



Universidade do Minho  
Escola de Arquitectura

Avaliação das potencialidades de utilização de membranas  
arquitetónicas como alternativa eficiente na reabilitação  
funcional de edifícios

Mónica Raquel Fernandes Macieira

UMinho | 2019

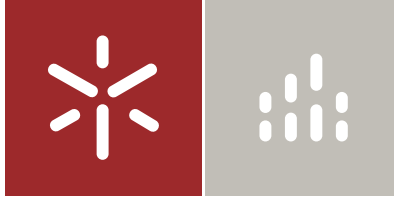
Mónica Raquel Fernandes Macieira

Avaliação das potencialidades de utilização  
de membranas arquitetónicas como  
alternativa eficiente na reabilitação funcional  
de edifícios

setembro de 2019







Universidade do Minho  
Escola de Arquitectura

Mónica Raquel Fernandes Macieira

Avaliação das potencialidades de utilização  
de membranas arquitetónicas como  
alternativa eficiente na reabilitação funcional  
de edifícios

Tese de Doutoramento  
Doutoramento em Arquitectura  
Área de especialização em Construção e Tecnologia

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor Paulo Jorge Figueira Almeida Urbano  
Mendonça  
Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda  
Guedes

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho:***



**Atribuição  
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer o rigor, a disponibilidade, o acompanhamento atento e o incentivo a fazer cada vez melhor, sempre demonstrados pelos meus orientadores científicos: Professor Doutor Paulo Jorge Figueira de Almeida Urbano de Mendonça e Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes. Graças à supervisão de ambos, com base no rigor e ao mesmo tempo na liberdade que me deram no processo de investigação, beneficei das suas experiências e sugestões.

Agradeço à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (**FCT**) e ao Fundo Social Europeu (**FSE**) pelo financiamento através da Bolsa de Doutoramento **SFRH/BD/104891/2014**, ao abrigo do Programa Operacional Potencial Humano (**POPH**) e do Ministério da Educação e Ciência (**MEC**). Também gostaria de agradecer às instituições de acolhimento: centro de investigação Lab2PT, Escola de Arquitetura da Universidade do Minho e ao centro de investigação Construct, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia civil da Universidade do Porto.



A realização da presente tese também foi possível graças à conjugação dos esforços de várias pessoas, às quais não posso deixar de expressar o meu sincero agradecimento:

- à Professora Doutora Anabela Tereso (Escola de Engenharia, Departamento de Produção e Sistemas da Universidade do Minho) pelo apoio, rigor, disponibilidade demonstrada em cada dúvida e oportunidade concedida de aprender com os seus conhecimentos sobre métodos e técnicas de apoio à tomada de decisão de tal modo que me tornou possível aplicá-los na criação do modelo de avaliação proposto nesta tese.
- Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, o meu agradecimento pela troca de ideias, apoio e experiência transmitida acerca da avaliação dos parâmetros acústicos.
- Ao Professor Doutor Nelson Martins pela troca de ideias e experiência transmitida acerca dos ensaios numéricos acerca do desempenho termo-energético; ao Arquiteto Marçal Tarrida Llopis pelo apoio com a utilização da ferramenta informática Design Builder e ao Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela disponibilização de dados climáticos exteriores medidos e registados nas suas estações meteorológicas.
- Ao Museu Arqueológico do Carmo (MAC), representado pelo Presidente José Morais Arnaud, à arqueóloga Cecília Nune e ao Professor Doutor Sande Lemos pela informação e colaboração prestadas sobre o MAC.
- Ao Gabinete de apoio à investigação da Escola de Economia e Gestão da Universidade do Minho, representado pelo Professor Doutor Luís Conraria e pela Doutora Susana Figueiredo, por fornecerem o acesso à plataforma de questionário online Qualtrics®.

- Aos proprietários do edifício tomado como caso de estudo no Capítulo 6, por gentilmente cederem o espaço para realizar ensaios e instalar o protótipo funcional executado no âmbito desta tese.
- Agradecer o apoio do serviço do Instituto Nacional de Estatística (INE) no fornecimento de informação relevante para caracterizar as intervenções de ampliação no parque edificado nacional.
- Às entidades proprietárias dos seguintes ferramentas informáticas, pela oportunidade de as utilizar nesta tese, através da cedência de utilização gratuita: Bionova - *One Click LCA, Versão 7.4 (14.04.2018)*; Professor Robert Roitmayer - *Formfinder professional*; PEMARD (Mediterranean acoustics research & Development) - *Olive Tree Lab Suite*, com especial agradecimento à equipa da PEMARD, nomeadamente Lina Economou e Costas Economou pelo apoio facultado na fase de modelação e análise dos resultados com a ferramenta *Olive Tree Lab*.
- Às empresas: (i) NCREP, representada pelo Eng.º Tiago Ilhargo; (ii) Floret, representada pela Arq. Adriana Floret, pela disponibilidade e por gentilmente cederem os desenhos técnicos do edifício tomado como caso de estudo no exercício 1; (iii) Anarchlab, representadas pelo Arq. Pedro Silva e Arq. Alice Silva, por gentilmente cederem informação técnica sobre o edifício tomado como caso de estudo no exercício 2; (iv) Futureng, representada pelo Eng.º João Santos, pela gentileza em fornecer o dimensionamento e estimativa de custos para executar a variante em estrutura ligeira em aço galvanizado (LSF), utilizada no exercício 2; (v) Climar, representada pelo Eng.º Eduardo Sucena, pelo apoio, troca de ideias e experiência transmitida sobre a instalação de tetos tensados em membrana; (vi) Tolniber, pelo apoio técnico e montagem do protótipo experimental; (vii) Architen Landrell, representada por Amy Wilson, pela informação transmitida sobre os projetos de reabilitação com membranas arquitetónicas realizados pela empresa; (viii) ECCON, representada pela Arqt.<sup>a</sup> Veronika Rothweiller, pela informação disponibilizada sobre a manutenção dos sistemas mecânicos e elétricos das soluções retráteis para estruturas em membrana; (ix) Sprung, representada por Paulo Nobriega, pela informação técnica facultada; (x) Holsoc, pela informação técnica disponibilizada sobre os painéis encapsulados em membrana de ETFE e (xi) Gherzi GmbH, representada por Carmen Trautmann e Hendrik Van Delden, pelo fornecimento de dados estatísticos sobre o mercado *Buildtech*.

E finalmente à minha família e amigos, por todo o apoio, o meu muito obrigada.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## RESUMO

### **Avaliação das potencialidades de utilização de membranas arquitetônicas como alternativa eficiente na reabilitação funcional de edifícios**

A atual e crescente importância atribuída ao impacto ambiental leva os projetistas a combinar o uso de materiais energeticamente eficientes com soluções técnicas que maximizem a poupança de recursos. Utilizadas essencialmente em estruturas exteriores de cobertura e proteções solares, as membranas arquitetônicas estão no entanto vocacionados para participar noutras aplicações construtivas. Neste sentido, o principal objetivo desta tese consistiu em avaliar a eficiência de tecnologias construtivas com membranas arquitetônicas, comparando-as relativamente às soluções convencionalmente utilizadas em intervenções de reabilitação funcional de edifícios. Para tal: (1) realizou-se uma análise do estado do conhecimento sobre reabilitação com membranas, com base num inventário de setenta projetos; (2) conceberam-se e avaliaram-se, através de ensaios numéricos e experimentais, soluções de reabilitação em membrana com potencial para melhorar o desempenho funcional de edifícios existentes e (3) aplicou-se um modelo multicritério que combina técnicas de apoio à tomada de decisão (AHP e SAW) e uma análise de sensibilidade, para determinar a eficiência relativa das soluções em membrana segundo critérios funcionais, técnico-construtivos, económicos, ambientais, de segurança, socioculturais e percetivos. A eficiência relativa das soluções em membrana foi avaliada através de três testes/casos de estudo em contextos de reabilitação específicos, numa relação de proximidade com a peculiaridade dos edifícios existentes, com o intuito de validar a utilização de soluções em membrana enquanto alternativas às convencionalmente utilizadas. Cada estudo representou uma abordagem arquitetónica comum em intervenções de reabilitação funcional - integração, sobreposição e reposição - preenchendo lacunas de investigação associadas ao uso de tecnologias de reabilitação com membranas arquitetónicas.

A avaliação da eficiência depende de muitos critérios com escalas e interpretações nem sempre convergentes. Deste modo, concebeu-se, testou-se e validou-se um modelo de avaliação multicritério, acompanhado de uma análise de sensibilidade para auxiliar o processo de tomada de decisão a vários níveis, de modo a promover uma visão holística e estruturada do problema que permitisse encontrar a solução de reabilitação mais eficiente para um conjunto de critérios distintos. A aplicação deste método a casos de estudos concretos salientou o interesse das soluções propostas e confirmou a hipótese de que as soluções de reabilitação em membrana constituem uma alternativa eficiente às soluções convencionais. Com os diferentes exercícios, mostrou-se que é possível, no âmbito de uma reabilitação funcional, melhorar diferentes aspetos do edifício em simultâneo. Em particular, não é contraditório visar, simultaneamente, uma abordagem estética coerente, com uma redução do consumo de energia e uma melhoria do conforto, com consequentes vantagens económicas e ambientais. Como resultado, obtiveram-se respostas às seguintes questões: (Q1) Qual a eficiência relativa das soluções de reabilitação com membranas? (Q2) Quais os aspetos avaliados que mais beneficiam/ penalizam a eficiência das soluções em membrana? Quando é que as soluções com membranas arquitetónicas constituem uma alternativa eficiente às convencionais para a reabilitação de edifícios?

Com esta tese demonstrou-se que as soluções de reabilitação com membranas arquitetónicas constituem alternativas eficientes às soluções convencionais de referência, em cenários de reabilitação funcional, sobretudo quando o peso e a reversibilidade/ repetibilidade constituem importantes fatores de decisão. Em suma, as soluções de reabilitação com membranas permitem que os edifícios se adaptem e atualizem segundo aspetos contemporâneos de sustentabilidade, apresentando-se como alternativas eficientes às soluções convencionais, com contributos para uma construção sustentável e inovadora. Contudo, apesar da crescente evolução dos materiais em membrana no passado recente, ainda existe um longo caminho a percorrer para que possam ser aceites e consideradas sustentáveis, também do ponto de vista social e cultural, sobretudo quando envolvem construções destinadas a uso residencial. Por fim, com base nas conclusões retiradas desta tese, sugerem-se algumas pistas para desenvolvimentos futuros.

**Palavras chave:** reabilitação funcional de edifícios; membranas arquitetónicas; integração; sobreposição; reposição; avaliação da eficiência relativa.

## ABSTRACT

### **Evaluating the potential of using architectural membranes as an efficient alternative in the functional refurbishment of buildings**

The current and growing importance attributed to environmental impact leads designers to combine the use of energy-efficient materials with technical solutions that maximize resources savings. Used mainly in roofing and exterior solar protection structures, the architectural membranes are however intended to participate in other constructive applications. In this sense, the main objective of this thesis is to evaluate the efficiency of constructive technologies with architectural membranes and comparing them to the conventional solutions, with focus on interventions for building's functional refurbishment. For this: (1) it was made the analysis of the state of knowledge about refurbishment with membranes based on a project's inventory of 70 cases; (2) it were designed and evaluated, through numerical and some experimental tests, membrane refurbishment solutions with potential to improve functional performance of existing buildings and (3) it was designed and applied a multi-criteria model, which combines decision support techniques (AHP and SAW) and a sensitivity analysis, to determine the relative efficiency of membrane solutions according to functional, technical-constructive, economic, environmental, safety, sociocultural and perceptual criteria. The relative efficiency of membrane solutions was evaluated through three tests/case studies in specific refurbishment contexts, in a close relationship to the peculiarity of existing buildings, in order to validate the use of membrane refurbishment solutions as alternatives to the conventional ones. Each study represented a common architectural approach to functional refurbishment interventions - integration, juxtaposition and replacement - filling research gaps associated with the use of refurbishment technologies with architectural membrane materials.

The efficiency evaluation depends on many criteria with scales and interpretations not always converging. Thus, a multicriteria evaluation model was conceived, tested and validated, to aid the multi-level decision-making process in order to promote a holistic and structured view of the problem, making it possible to find the most efficient refurbishment solution for a set of distinct criteria. The application of this method to real case studies underlined the interest of the proposed solutions and confirmed the hypothesis that membrane refurbishment solutions constitute an efficient alternative to conventional ones. Through the different exercises/ case studies it was shown that it is possible, within a functional refurbishment action, improving different building aspects at once. In particular, it is not contradictory to target both a consistent aesthetic approach with an energy-consumption reduction and comfort improvement, with consequent economic and environmental benefits. As result, it were answered the questions: (Q1) What is the relative efficiency of membrane refurbishment solutions? (Q2) Which evaluated aspects benefit/penalize most the efficiency of membrane refurbishment solutions? (Q3) When do architectural membrane solutions constitute an efficient alternative to conventional ones for buildings refurbishment?

With this thesis, it was demonstrated that architectural membrane refurbishment solutions are efficient alternatives to conventional reference ones in functional rehabilitation scenarios, especially when weight and reversibility/repeatability are important decision factors. In synthesis, refurbishment solutions with membranes allow buildings to adapt and update according to contemporary aspects of sustainability, being themselves efficient alternatives to conventional solutions, with contributions for a sustainable and innovative constructed environment. However, despite the increasing evolution of membrane materials in the recent past, there is still a long way to go so that they can be accepted and considered sustainable, also from the social and cultural point of view, especially in buildings for residential use. Finally, based on the conclusions drawn from this thesis, some clues are suggested for future developments.

**Keywords:** functional building's rehabilitation; architectural membranes; integration; juxtaposition; replacement; evaluation of relative efficiency.

## ÍNDICE

### CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Motivação .....	4
1.3. Problema de investigação/questões da tese .....	4
1.4. Destinatários da investigação .....	6
1.5. Objetivos .....	6
1.6. Metodologia de investigação .....	7
1.7. Organização da tese.....	9

### CAPÍTULO 2: REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS

2.1 Definição de reabilitação.....	12
2.2 Princípios/recomendações para intervenções de reabilitação.....	13
2.3 Panorama da reabilitação de edifícios na Europa e em Portugal.....	14
2.3.1 União Europeia.....	14
2.3.2 Portugal.....	16
2.3.3 Perspetivas de evolução .....	17
2.4 Eficiência na reabilitação funcional de edifícios.....	18
2.4.1 Reflexão 1: reabilitação funcional.....	19
2.4.2 Reflexão 2: reabilitação de edifícios enquanto veículo para a eficiência de recursos .....	20
2.4.3 Reflexão 3: atuais e futuros desafios da reabilitação funcional.....	22
2.5 Considerações finais.....	23

### CAPÍTULO 3: MEMBRANAS ARQUITETÓNICAS

3.1 Definição.....	25
3.2 Evolução das construções com membranas .....	26
3.3 Características das membranas .....	29
3.4 Visão geral do mercado das membranas arquitetónicas .....	33
3.5 Visão geral das construções com membranas arquitetónicas .....	38
3.6 Aspetos funcionais das construções com membranas .....	41
3.7 Considerações finais.....	43

### CAPÍTULO 4: REABILITAÇÃO FUNCIONAL COM MEMBRANAS

4.1. Introdução .....	46
4.1.1. Reflexão 1: património e desenvolvimento sustentável.....	47
4.1.2. Reflexão 2: preservação e reabilitação.....	47
4.2. Metodologia adotada para análise dos casos de estudo.....	48
4.2.1. Amostra .....	48
4.2.2. Casos de estudo selecionados.....	49
4.3. Análise geral dos casos de estudo.....	56
4.3.1. Mapeamento de aplicações .....	56
4.3.2. Parâmetros contextuais .....	58
4.3.3. Parâmetros climáticos .....	60
4.3.4. Parâmetros programáticos.....	61
4.3.5. Parâmetros funcionais: conforto e eficiência energética.....	65
4.3.6. Parâmetros construtivos .....	71
4.3.7. Parâmetros económicos .....	74
4.4. Princípios e abordagens de reabilitação com membranas arquitetónicas.....	75
4.4.1. Reposição .....	76
4.4.2. Integração.....	77
4.4.3. Sobreposição .....	78



<b>4.5. Motivações funcionais para utilizar membranas</b> .....	79
4.5.1. <i>Complementaridade: aspetos térmicos e acústicos</i> .....	80
4.5.2. <i>Aspetos lumínicos</i> .....	83
4.5.3. <i>Reabilitar com membranas através de estratégias de regulação funcional passiva</i> .....	84
4.5.4. <i>Segurança/proteção: contributos para mitigar o risco para os ocupantes</i> .....	86
4.5.5. <i>Mudança de paradigma na procura da flexibilização do espaço</i> .....	91
<b>4.6. Desafios atuais e futuros para a utilização de membranas</b> .....	92
4.6.1. <i>Reflexão 1: membranas e princípios para alcançar a eco-eficiência</i> .....	92
4.6.2. <i>Reflexão 2: o imperativo da adaptação às alterações climáticas e redução do consumo energético</i> .....	94
4.6.3. <i>Reflexão 3: membranas e desempenho estrutural</i> .....	95
4.6.4. <i>Reflexão 4: avaliação numérica do desempenho térmico das construções com membranas</i> .....	99
<b>4.7. Conclusões</b> .....	100
<b>CAPÍTULO 5: MODELO ADOTADO PARA AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DA EFICIÊNCIA RELATIVA</b>	
<b>5.1. Introdução</b> .....	101
<b>5.2. Modelo multicritério proposto para auxiliar a tomada de decisão/avaliar a eficiência das soluções de reabilitação em estudo</b> .....	103
<b>5.3. Etapa I: definição do problema</b> .....	104
<b>5.4. Etapa II: identificação dos decisores</b> .....	104
<b>5.5. Etapa III: definição dos critérios e estrutura hierárquica</b> .....	104
<b>5.6. Etapa IV: obtenção do vetor de prioridades – atribuição de pesos aos critérios/subcritérios</b> .....	105
<b>5.7. Etapa V: alternativas</b> .....	106
<b>5.8. Etapa VI: normalização dos critérios e avaliação multicritério</b> .....	106
<b>5.9. Etapa VII: análise de sensibilidade</b> .....	107
<b>5.10. Etapa VIII: discussão de resultados e recomendações</b> .....	108
<b>CAPÍTULO 6: TESTE 1 - ABORDAGEM DE INTERGRAÇÃO</b>	
<b>6.1. Introdução</b> .....	110
6.1.1. <i>Reflexão sobre a reabilitação térmica/energética em Portugal</i> .....	110
6.1.2. <i>Justificação do caso de estudo</i> .....	110
<b>6.2. Conceção de estufas</b> .....	112
6.2.1. <i>Arquitetura da transparência: as estufas ao longo dos séculos</i> .....	112
6.2.2. <i>Aspetos a considerar na ampliação do espaço habitável com uma envolvente transparente para aproveitamento dos ganhos solares</i> .....	113
6.2.3. <i>Materiais utilizados nas superfícies transparentes</i> .....	115
6.2.4. <i>Estrutura da estufa/encerramento de varanda</i> .....	117
<b>6.3. Caso de estudo: casa portuense do século XIX</b> .....	118
6.3.1. <i>Descrição do edifício caso de estudo - Caracterização geométrica e construtiva</i> .....	119
6.3.2. <i>Soluções de referência</i> .....	120
6.3.3. <i>Soluções alternativas em membrana</i> .....	121
<b>6.4. Soluções alternativas em membrana - propostas</b> .....	122
6.4.1. <i>Solução EM – Estufa com Membrana PVC cristal simples</i> .....	122
6.4.2. <i>Solução EP2M – Estufa com Pannel Encapsulado em dupla Membrana de ETFE</i> .....	125
6.4.3. <i>Protótipo funcional da solução EM: aspetos construtivos</i> .....	126
<b>6.5. Avaliação de critérios quantitativos</b> .....	128
6.5.1. <i>Método</i> .....	128
6.5.2. <i>Soluções construtivas em análise</i> .....	129
6.5.3. <i>Avaliação de aspetos térmicos e energéticos operacionais no ciclo de vida</i> .....	130
6.5.4. <i>Avaliação do impacto ambiental no ciclo de vida</i> .....	149
6.5.5. <i>Avaliação de aspetos económicos no ciclo de vida</i> .....	154

<b>6.6. Aplicação de modelo multicritério para avaliar a eficiência relativa das soluções construtivas de membrana</b> .....	156
6.6.1. <i>Etapa 1: definição do problema</i> .....	156
6.6.2. <i>Etapa 2: identificação dos decisores</i> .....	156
6.6.3. <i>Etapa 3: definição das alternativas</i> .....	156
6.6.4. <i>Etapa 4: definição dos critérios e estruturação hierárquica</i> .....	156
6.6.5. <i>Etapa 5: obtenção do vetor de prioridades (atribuição de pesos aos critérios e subcritérios)</i> ....	157
6.6.6. <i>Etapa 6: normalização dos valores e avaliação global de cada alternativa – cenário base</i> .....	159
6.6.7. <i>Etapa 7: análise de sensibilidade</i> .....	160
6.6.8. <i>Etapa 8: discussão dos resultados e recomendações</i> .....	162
<b>6.7. Dificuldades/limitações</b> .....	163
<b>6.8. Conclusões</b> .....	163

## **CAPÍTULO 7: TESTE 2 - ABORDAGEM DE SOBREPOSIÇÃO**

<b>7.1. Enquadramento geral</b> .....	168
7.1.1. <i>Operações de ampliação de edifícios na Europa</i> .....	168
7.1.2. <i>Operações de ampliação de edifícios em Portugal</i> .....	168
<b>7.2. Reflexões sobre ampliações verticais</b> .....	170
7.2.1. <i>Reflexão 1: motivação para ampliar um edifício</i> .....	170
7.2.2. <i>Reflexão 2: peso da estrutura a adicionar</i> .....	173
7.2.3. <i>Reflexão 3: benefícios de uma ampliação vertical para redução do impacto ambiental/consumo energético</i> .....	173
<b>7.3. Tipos de ampliação</b> .....	174
7.3.1. <i>Ampliação interna</i> .....	175
7.3.2. <i>Ampliação externa</i> .....	175
<b>7.4. Tipologias de ampliação vertical em casos nacionais: antecedentes</b> .....	177
7.4.1. <i>Trapeiras e mirantes</i> .....	178
7.4.2. <i>Andares recuados</i> .....	179
7.4.3. <i>Andares de ressalto</i> .....	179
<b>7.5. Caso de estudo: ampliação vertical sobre edifício antigo</b> .....	180
7.5.1. <i>Caracterização do edifício</i> .....	180
7.5.2. <i>Aspetos construtivos</i> .....	181
<b>7.6. Soluções leves convencionais para ampliações verticais</b> .....	183
7.6.1. <i>Conceção de ampliações verticais</i> .....	183
7.6.2. <i>Solução convencional leve em madeira (SCMad)</i> .....	184
7.6.3. <i>Solução convencional leve com estrutura metálica (SCMet)</i> .....	186
<b>7.7. Soluções alternativas em membrana para ampliações verticais</b> .....	186
7.7.1. <i>Enquadramento geral sobre aspetos estruturais e funcionais</i> .....	186
7.7.2. <i>Proposta – solução alternativa com membrana (SAM)</i> .....	188
7.7.3. <i>Aspetos estéticos da envolvente exterior</i> .....	197
7.7.4. <i>Aspetos funcionais da SAM</i> .....	198
<b>7.8. Avaliação dos critérios quantitativos</b> .....	205
7.8.1. <i>Objetivos e metodologia</i> .....	205
7.8.2. <i>Análise de aspetos construtivos</i> .....	206
7.8.3. <i>Avaliação do desempenho térmico e do consumo energético</i> .....	208
7.8.4. <i>Avaliação do impacto ambiental no ciclo de vida</i> .....	221
7.8.5. <i>Avaliação de aspetos económicos</i> .....	227
<b>7.9. Aplicação de modelo multicritério para avaliar a eficiência relativa das soluções de reabilitação com membranas – critérios quantitativos e qualitativos</b> .....	232
7.9.1. <i>Etapa 1: definição do problema</i> .....	232
7.9.2. <i>Etapa 2: identificação dos decisores</i> .....	232
7.9.3. <i>Etapa 3: definição das alternativas</i> .....	232

7.9.4. Etapa4: definição dos critérios e estruturação hierárquica .....	232
7.9.5. Etapa 5: obtenção do vetor de prioridades (atribuição de pesos aos critérios e subcritérios)....	233
7.9.6. Etapa 6: normalização dos valores e avaliação global de cada alternativa – cenário base.....	235
7.9.7. Etapa 7: análise de sensibilidade .....	236
7.9.8. Etapa 8: discussão dos resultados e recomendações .....	238
<b>7.10.Considerações finais</b> .....	239
<b>CAPÍTULO 8: TESTE 3 - ABORDAGEM DE REPOSIÇÃO</b>	
<b>8.1. Introdução</b> .....	243
8.1.1. Justificação do caso de estudo para realização do teste .....	243
8.1.2. Considerações iniciais .....	243
<b>8.2. Caso de estudo: ruínas de uma igreja do sec. XIV</b> .....	249
8.2.1. Nota historico-artística .....	249
<b>8.3. Reposição da cobertura e teto da nave da igreja do Carmo</b> .....	253
8.3.1. Aspetos a considerar na conceção da reposição da cobertura .....	253
8.3.2. Solução de referência convencional: cobertura em vidro.....	255
8.3.3. Solução alternativa proposta: cobertura fixa e teto abobadado retrátil em membrana.....	257
<b>8.4. Avaliação da eficiência da solução alternativa com membrana</b> .....	267
8.4.1. Método.....	267
8.4.2. Soluções de reabilitação em avaliação .....	267
8.4.3. Avaliação do desempenho acústico.....	268
8.4.4. Avaliação das condições de iluminação natural .....	279
8.4.5. Avaliação do impacto ambiental no ciclo de vida .....	284
8.4.6. Avaliação de aspetos económicos no ciclo de vida .....	287
<b>8.5. Aplicação de modelo multicritério para avaliar a eficiência relativa das soluções construtivas– critérios quantitativos e qualitativos</b> .....	289
8.5.1. Etapa 1: Definição do problema .....	289
8.5.2. Etapa 2: identificação dos decisores .....	289
8.5.3. Etapa 3: definição das alternativas.....	289
8.5.4. Etapa4: definição dos critérios e estruturação hierárquica .....	290
8.5.5. Etapa 5: obtenção do vetor de prioridades (atribuição de pesos aos critérios e subcritérios)....	290
8.5.6. Etapa 6: normalização dos valores e avaliação global de cada alternativa – cenário base.....	292
8.5.7. Etapa 7: análise de sensibilidade .....	294
8.5.8. Etapa 8: discussão dos resultados e recomendações .....	296
<b>8.6. Considerações finais</b> .....	296
<b>CAPÍTULO 9: CONCLUSÕES</b>	
<b>9.1. Resultados</b> .....	298
<b>9.2. Limitações</b> .....	304
<b>9.3. Objetivos futuros</b> .....	305
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	306
<b>ANEXO 1</b> .....	330
<b>ANEXO 2</b> .....	331
<b>ANEXO3</b> .....	332
<b>ANEXO 4</b> .....	341
<b>ANEXO 6</b> .....	401
<b>ANEXO 7</b> .....	402
<b>ANEXO 8</b> .....	403

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Data em que a pegada ecológica da humanidade esgotará os recursos do planeta Terra: (a) estimativa por país; (b) estimativa mundial entre 1969 a 2018. (Global Footprint Network, 2018). ...	2
Figura 1.2. Principais áreas de investigação da tese.....	4
Figura 1.3. Organigrama com os objetivos da tese.....	5
Figura 1.4. Fluxograma da metodologia adotada nesta tese. ....	8
Figura 1.5. Esquema de organização da tese.....	10

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Solução de cobertura em membrana ETFE para projeto de reabilitação da igreja de Corbera d'Ebre, projetada pelo arquiteto Ferran Vizoso (Designboom, 2015). ....	11
Figura 2.2. Variação anual e estimativa até 2020, em percentagem, da produção no setor da construção civil por tipo de trabalho - construção nova e reabilitação de edifícios (para a totalidade dos 19 países representados no Euroconstruct) (Euroconstruct, 2018a). ....	14
Figura 2.3. Mercado da construção por subsectores no ano de 2017 para a totalidade dos 19 países representados no Euroconstruct (2018a). ....	15
Figura 2.4. Acesso ao mercado global de materiais (Wuppertal Institut & Schmidt Bleek, 2007 apud Lemken, 2008). ....	21
Figura 2.5. Ilustração do consumo de energia operacional e incorporada no ciclo de vida de um edifício de escritórios reabilitado aos 25, 50 e 100 anos (adaptado de Yohanis & Norton, 2002 apud Dowson, 2012). ....	22
Figura 2.8. Diagrama comparativo do movimento da humidade (comportamento higrotérmico e energético) entre os edifícios contemporâneos (à esquerda) e os edifícios antigos (à direita) (English Heritage, 2004). ....	23
Figura 2.6. Média dos níveis de consumo energético para aquecimento (kwh/m2) de habitações unifamiliares por ano de construção em Portugal (BPIE, 2011). ....	23
Figura 2.7. Categorização da idade do parque habitacional na Europa (BPIE, 2011). ....	23

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Vista interior do projeto Eco Membrana - intervenção de reabilitação funcional no armazém da empresa Siemens (edifício original dos anos 30) para conversão em escritórios. ....	25
Figura 3.2. Exemplos de tipos de membranas arquitetónicas. ....	27
Figura 3.3. Exemplos de membranas arquitetónicas têxteis e não-têxteis.....	27
Figura 3.4. Exemplo de Ger e Pitching yurt, Dayan, Mongólia ocidental (Portisch, 2005). ....	27
Figura 3.5. a) Frei Otto (Bawa-Cavia, 2010), b) e c) Pavilhão da Alemanha na Expo 1967 em Monreal; (d) Estádio Olímpico de Munique, 1972 (Tensinet, 2015). ....	29
Figura 3.6. Formas típicas das estruturas tensadas. ....	29
Figura 3.7. Membranas com e sem revestimento.....	30
Figura 3.8. Configuração dos tecidos utilizados em arquitetura têxtil (adaptado de ELLF© apud Stranghöner et al., 2016). ....	31
Figura 3.9. Comparação entre sete tipos de membranas (o melhor material para cada caso assume o valor de 100%) (adaptado de Knippers et al (2011) e Heybroek (2014)). ....	32
Figura 3.10. Membranas na construção. ....	35
Figura 3.11. Distribuição temporal e ponderada das empresas produtoras de materiais em membrana destinadas ao setor da construção e respetivas matérias-primas.....	38
Figura 3.12. Distribuição da percentagem de construções em membrana identificadas na base de dados da Tensinet por diferentes períodos temporais. ....	39
Figura 3.13. Distribuição geográfica das construções em membrana com a respetiva percentagem (obtida através da análise da base de dados da Associação Tensinet). ....	39
Figura 3.14. Gráfico com os resultados da análise a casos de estudo segundo o tipo de uso/função. ....	40
Figura 3.15. Infográfico elaborado através do cruzamento entre mapa mundo de Haschen (2015) e a percentagem de construções em membrana (identificadas na base de dados da Associação Tensinet) por zona climática (segundo a classificação de Köppen, de 1901 a 2010). ....	41

Figura 3.16. Risco de exposição a desastres naturais: (a) mapa com distribuição mundial e classificação de acordo com o método quantil (UNU, 2015); (b) gráfico com percentagem de construções em membrana segundo localização em zonas de risco. ....	41
--	----

#### **CAPITULO 4**

Figura 4.1. Representação figurativa da relação entre o restauro e a arquitetura moderna – reflexão sobre as intervenções de reabilitação na atualidade (desenho vencedor de Drawing of the Year 2014, Transformation, © Olga Krukovskaya, (Aarhus, 2015)).....	46
Figura 4.2. Exemplo de ficha individual de cada projeto selecionado para análise. ....	50
Figura 4.3. Exemplos de aplicação de membranas em intervenções de reabilitação de edifícios. ....	58
Figura 4.4. Classificação dos tipos e variações de aplicações arquitetônicas de membranas na reabilitação de edifícios (parcialmente adaptado de Mollaert et al. (2003)).....	59
Figura 4.5. Classificação dos elementos construtivos em análise (intervenções com membrana arquitetônica) segundo o grau de proteção (parcialmente adaptado de Mollaert et al. (2003)). ....	59
Figura 4.6. Tabela com categorias de durabilidade para edifícios (BS 7543, 1992 apud Douglas, 2006). Gráfico com distribuição dos projetos de intervenção em análise segundo a idade do edifício intervençionado (à data da intervenção) e o elemento construtivo intervençionado com membrana.....	59
Figura 4.7. Distribuição dos projetos selecionados pelo ano de intervenção com membranas. ....	60
Figura 4.8. Localização (país e continente) dos projetos em análise. ....	61
Figura 4.9. Distribuição dos projetos em análise segundo a sua latitude.....	62
Figura 4.10. Distribuição dos projetos (por elementos primários e secundários) em análise segundo zonas climáticas.....	62
Figura 4.11. Relação entre uso inicial (círculo interior) e uso após intervenção com membranas (circunferência exterior).....	63
Figura 4.12. Relação entre o tipo de intervenção e o tipo de uso dos projetos em análise. ....	63
Figura 4.13. Graduação das intervenções de reabilitação dos projetos em análise.....	64
Figura 4.14. Exemplos de intervenções de reabilitação com membranas em edifícios industriais.....	66
Figura 4.15. Principais motivações identificadas nos projetos em análise para utilizar membranas em intervenções de reabilitação.....	66
Figura 4.16. Vista exterior e interior do protótipo de integração de células fotovoltaicas em membranas (Detail, 2016).....	66
Figura 4.17. Estratégia de sombreamento: (a) passivo - projeto ref <sup>a</sup> C.32. University of West London (imagens cedidas por Architen Landrell); (b) ativo (Gonzalez et al., 2011).....	67
Figura 4.18. Estratégias de regulação térmica passiva com membranas, de modo a evitar o sobreaquecimento do espaço interior do edifício intervençionado, bem como promover a melhoria de outros aspetos funcionais (acústicos, lumínicos, etc.).....	68
Figura 4.19. Estratégias passivas e ativas para o desenho de soluções com membranas na reabilitação/conversão de estação de comboios. ....	69
Figura 4.20. Estratégias passivas e ativas para o desenho de soluções com membranas na reabilitação/conversão de edifícios industriais.....	71
Figura 4.21. Estratégias passivas e ativas para o desenho de soluções com membranas na reabilitação/conversão de edifícios industriais.....	72
Figura 4.22. Intervenção com membrana. ....	72
Figura 4.23. Tipo de estrutura existente sobre a qual é feita a intervenção em membrana nos projetos em análise.....	72
Figura 4.24. (a) Intervenção com membranas – tipos de elementos através dos quais é feita a transmissão de cargas da membrana para a estrutura existente. (b) Sistema de membrana. ....	72
Figura 4.25. Exemplos de pormenores de ligações nos diferentes tipos de transmissão de carga em análise. ....	72
Figura 4.26. Intervenção com membrana – a) material da subestrutura; b) tipo de aplicação de membrana segundo o material da subestrutura.....	73
Figura 4.27. Análise do número de camadas em função do sistema adotado nas intervenções com membrana nos projetos em análise.....	73
Figura 4.28. Custo por metro quadrado (custo material + custo de instalação) da intervenção com membrana por elemento construtivo. ....	74

Figura 4.29. Relação entre o custo por metro quadrado e o sistema construtivo em membrana. ....	75
Figura 4.30. Relação entre o custo por metro quadrado e o tipo de intervenção de reabilitação com membranas arquitetônicas.....	75
Figura 4.31. Relação entre o custo por metro quadrado da intervenção com membrana e o ano de construção do edifício pré-existente. ....	75
Figura 4.32. Relação entre o custo por metro quadrado da intervenção com membrana e o grau de intervenção. ....	75
Figura 4.33. Relação entre o custo por metro quadrado da intervenção e a área superficial de membrana aplicada. ....	75
Figura 4.34. (a) Estação de comboios de Dresden (antes e depois da intervenção); (b) Camellia house (antes e depois da intervenção).....	77
Figura 4.35. (a) Igreja kostel Povýšení sv. Kříže – reconstituição de teto abobadado para melhoria do desempenho acústico; (b) Igreja de Corbera d’Ebre; (c) Clube de Ténis Bourg-la-Reine – substituição da cobertura com melhoria das condições lumínicas; (d) Museu de Bolonha (BarrisoL, 2016). ....	77
Figura 4.36. (a) Sede da empresa Imagination – vista exterior e interior (Architen, 2016); (b) Infantário de Wismar – antes e depois (ENOB, 2016); (c) Junta de Freguesia de Fukiya (Ishii, 1995); (d) Escritórios Logan – vista interior (Newmat, 2016). ....	78
Figura 4.37. (a) Hotel Evidencia light (Evidencia, 2016), (b) Palácio de Irgatza (Bat Spain, 2016); (c) Fuchun Kosa Zou Ma Lou (Archimixing, 2016); (d) Casa Shishiodoshi (Avignon Clouet, 2015). ....	79
Figura 4.38. Esquema conceitual da estratégia de mistura de pesos na reabilitação funcional de edifícios.....	80
Figura 4.39. Exemplos de reabilitação funcional de fachadas com membranas (antes e depois): (a) Casa em Munique (Kroersch, 2016); (b) Sede da empresa EDF (Ménard, 2013); (c) Westarven (Crone, 2008) e (d) KWO Grimselstrom (Texlon, 2016).....	81
Figura 4.40. (a) Museu Schlüterhof (antes e depois) (Nocke & Hilge, 2004); (b) escritórios do Ministério da Cultura Dinamarquês, projetado por Louise Campbell & Marianne Britt Jorgensen. (foto da autora); (c) fachada em membrana “capitonê” num edifício localizado em Basileia, Suíça; (d) vista transversal do ginásio reabilitado com teto em membrana - Benedictine Abbey, Pannonhalma, Hungria.....	83
Figura 4.41. Estratégias com membranas para evitar o sobreaquecimento do espaço interior intervencionado. ....	84
Figura 4.42. (a) Cobertura dos desvãos do edifício “Her Majesty’s Treasury”, Londres, 2002. (b) Kapuzinercarrée, Aachen,2002.....	86
Figura 4.43. (a) National Gallery, Londres, 2003. (b) Sede da empresa Jean-Paul Gaultier, Paris, 2004.....	86
Figura 4.44. Colapso de cobertura devido a queda de neve intensa em 2014 (Fujimi, Japão): (a) Cobertura leve convencional com revestimento metálico e (b) cobertura alternativa com membrana (Kumagaya Sports Park) (Kawaguchi, 2017). (c) Meios auxiliares de proteção. ....	87
Figura 4.45. Vistas interiores da Igreja de St.Ignatus-Loyola (ref <sup>a</sup> T.13, Anexo 4) antes e depois a intervenção (Barrisol, 2018).....	88
Figura 4.46. (a) Por serem leves e flexíveis, as aberturas de ventilação em membrana de ETFE podem ser muito maiores do que as aberturas convencionais; (b) ativação de sistema de corte da membrana de ETFE com um fio quente, em torno do perímetro da cobertura, para promover a ventilação do espaço subjacente (Lecuyer, 2008); (c) átrio do hotel DomAuarée (Voss, 2018). ....	89
Figura 4.47. Edifício da empresa têxtil Komatsu Seiren no Japão, envolvido por centenas de cabos de fibra de carbono – Cabkoma – que no conjunto funcionam como um tecido, uma membrana, atuando como elemento de reforço sísmico (conceção arq. de Kengo Kuma) (Komatsu Matere, 2018).....	90
Figura 4.48. (a) esquema de montagem de uma variante da solução ADjustMembrane (© Macieira, M. apud Mendonça, 2014). (b) Conceito de teto falso em membrana retrátil - para redução do volume útil para climatização/melhoria das condições acústicas de espaços com pé direito elevado. ....	91
Figura 4.49. Pormenores de ancoragem: (a) no “Hospital Feminino” (México); (b) de mastros e cabos da estrutura de membrana sobre a laje de betão armado do “Palácio de Mineria” (México).....	96
Figura 4.50. (a) Exemplo de estrutura híbrida – protótipo experimental (Lihenard & Knippers, 2015). (b) Instalação com as estruturas híbridas desenvolvidas no âmbito do projeto de investigação Isoropia para a 16 <sup>a</sup> Bienal de Arquitetura em Veneza (Inke, 2018). ....	98

## CAPITULO 5

- Figura 5.1. Fluxograma do processo adotado no modelo de avaliação proposto (adaptado de Clemen & Reilly (2001)). .....104
- Figura 5.2. Exemplo de estrutura hierárquica AHP para selecionar a melhor/mais eficiente solução de reabilitação funcional. ....105
- Figura 5.3. (a) Algoritmo para determinar o peso dos critérios através da comparação por pares (adaptado de Tupenaite et al. (2010)).(b) visualização parcial do questionário realizado com Transparent Choice AHP tool (2018). .....106
- Figura 5.4. Esquema síntese com as etapas do processo de verificação da taxa de consistência. ....107
- Figura 5.5. Exemplo de “árvore de decisão” utilizada para determinar qual a melhor alternativa (aparece destacada com cor diferente) para resolver um problema de decisão multicritério. Gráfico obtido através da aplicação informática Precision Tree da Palisade Decision Tools (2018). .....108

## CAPITULO 6

- Figura 6.1. Imagem síntese das soluções construtivas de referência para encerramento de varandas (à esquerda) e alternativa proposta em membrana (à direita). ..... 109
- Figura 6.2. Dados anuais de irradiação global na Europa; potencial de energia fotovoltaica (Enterra, 2018). ... 111
- Figura 6.3. (a) Percentagem de trabalhos de reabilitação por tipo de intervenção (adaptado de INE, 2017). (b) Tipos de intervenção de reabilitação com membranas..... 111
- Figura 6.4. (a) e (c) Estufa adossada durante o dia (adaptado de MENDONÇA, 2005); (b) e (d) Estufa adossada durante a noite com sistema termossifão de fluxo do ar. .... 114
- Figura 6.5. Sistema de fluxo de calor suportado por dispositivos mecânicos. .... 114
- Figura 6.6. Transmissão solar típica de vários polímeros e membranas, numa faixa de radiação solar UV, visível e próxima de IR (0.25 -2.5  $\mu\text{m}$  comprimento de onda (wavelength)), comparativamente ao vidro (Ming Wei Sun apud Knippers et al., 2011). ..... 115
- Figura 6.7. Esquemas em planta de estufas: (a) estufa integrada e (b) estufa adossada i (Mendonça, 2005). . 117
- Figura 6.8. Varandas envidraçadas (estufa integrada) tradicionais, localizadas em edifícios dos finais do século XIX no Porto. .... 117
- Figura 6.9. Estufas integradas num edifício contemporâneo – projeto de reabilitação do edifício de habitação coletiva, Bairro da Bouça (2004), Porto..... 117
- Figura 6.10. Exemplos de ampliações horizontais com criação de estufas adossadas: (a) “Grefe habitável” (enxerto habitável) (Moniteur, 2016); (b) Hi-pod (©BKK + Peter Elliott + Urban Design). ..... 118
- Figura 6.11. Vistas exteriores das fachadas e perspetiva de uma das varandas a intervir. .... 119
- Figura 6.12. Plantas do edifício tomado como caso de estudo (gentilmente cedidas pela Arquiteta Adriana Floret (Floret, 2017))..... 120
- Figura 6.13. Exemplos de soluções de estufas integradas em Portugal: (a) solução tradicional (Porto); (b) e (c) soluções tradicionais (Valença do Minho); (d) mistura de soluções tradicionais e convencionais (Porto); (e) e (f) soluções contemporâneas, (Porto)..... 121
- Figura 6.14. Exemplos de estufas correntemente utilizadas, exemplos recolhidos em edifícios localizados na cidade do Porto: (a) e (b) estufas tradicionais; (c), (d), (e) estufas convencionais. .... 121
- Figura 6.15. (a) Exemplo de membrana aplicada como elemento de proteção provisória durante intervenção de reabilitação. (b) Exemplos de cortina vertical e cobertura de alpendre em membrana impressa com imagem de ardósia (creditos autora) e (c) cortinas verticais com outras configurações (Total Cover, 2015). (d) Proposta de solução de encerramento de varanda com membrana pneumática (em almofadas modulares (créditos: autora). (e) Exemplos de estufas com membrana de PVC cristal (Graça & Mendes Lda., 2016)..... 122
- Figura 6.16. (a) Exemplo de padrão aplicado sobre a membrana para conferir privacidade. (b) Exemplo de aplicação de padrão alusivo aos sistemas de caixilharia tradicional para vidros sobre membrana transparente (créditos: autora)..... 122
- Figura 6.17. Esquematização dos princípios adotados na conceção da solução proposta. .... 123
- Figura 6.18. Ilustração da solução no período diurno na estação de (a) aquecimento e de (b) arrefecimento. . 123
- Figura 6.19. (a) As cortinas tradicionais podem resultar em significativas reduções de perdas de calor pelas janelas. (b) Imagem capturada com camara termográfica que mostra os benefícios das portadas de

madeira (à direita), comparativamente a não ter (à esquerda), ou ter apenas cortinas (ao centro) (Baker, 2008).....	124
Figura 6.20. (a) Tradicionais portadas de madeira e (b) portadas restauradas com membrana super isolante de aerogel, (c) fluxo dinâmico de temperatura de um compartimento com as portadas restauradas e testadas por Baker (2008).....	124
Figura 6.21. (a) Portadas de vidro que atuam como vidros duplos. (b) Membrana de ETFE tensada e com padrão refletor que pode ser utilizada para execução de portadas alternativas às de vidro. ....	124
Figura 6.22. (a) Membrana com material de mudança de fase, para retenção de calor pelo lado interior da membrana transparente que encerra a varanda. (b) Resultados experimentais da adoção de soluções em membrana para melhoria do isolamento térmico de superfícies envidraçadas, medidos e testados por Baker (2008). ....	125
Figura 6.23. (a) Variedade de dimensões dos painéis encapsulados em dupla membrana de ETFE (Holsoct, 2017). (b) Ilustração dos painéis encapsulados em membrana ETFE instalados na vertical para encerramento de uma varanda. ....	125
Figura 6.24. Pormenores construtivos. Secção transversal e longitudinal com indicação dos componentes que constituem a solução EM (em membrana de PVC cristal). ....	126
Figura 6.25. Detalhes do sistema de cortina vertical com tecnologia de calha zip (Oztech, 2019; Shy-Zip, 2019). ....	127
Figura 6.26. Cortina vertical em PVC cristal tensada para encerramento da varanda do edifício selecionado como caso de estudo. ....	127
Figura 6.27. Registo fotográfico da montagem do protótipo. ....	128
Figura 6.28. Esquema do método adotado para avaliação da eficiência das soluções alternativas com membranas arquitetónicas. ....	128
Figura 6.29. Fachada tardoz com as diferentes soluções de referência para estufa integrada numa intervenção de reabilitação funcional. ....	129
Figura 6.30. Fachada tardoz com e sem as diferentes soluções alternativas de estufa com membranas.....	129
Figura 6.31. Balanço térmico: (a) numa zona genérica (Gonçalves, 2010); (b) de varandas encerradas com elementos transparentes em diferentes estações do ano (Hilliaho, 2017). ....	132
Figura 6.32. Modelo desenhado em DesignBuilder. ....	132
Figura 6.33. Localização dos registadores com sensores de humidade e temperatura do ar. ....	134
Figura 6.34. Localização dos registadores com sensores de humidade e temperatura do ar na Estufa Tradicional (ET) existente (direita) e no compartimento adjacente (esquerda) na semana de verão. ....	135
Figura 6.35. Validação do modelo para a EM na semana de inverno. ....	137
Figura 6.36. Validação do modelo para a ET e EM para a semana de verão. ....	138
Figura 6.37. Validação do CAEM na semana de inverno. ....	138
Figura 6.38. Validação do CAEM e CAET na semana de verão. ....	138
Figura 6.39. Validação do CSE para a semana de inverno. ....	139
Figura 6.40. Validação do CSE para a semana de verão. ....	139
Figura 6.41. Análise comparativa entre os vários tipos de estufas e o compartimento habitável adjacente com e sem estufas – cenários 1 e 2 (de cima para baixo), um dia de uma semana típica de inverno. ....	141
Figura 6.42. Comparativo entre os vários tipos de estufas e o compartimento habitável adjacente com e sem estufas – cenários 1 e 2 (de cima para baixo), num dia de uma semana típica de verão. ....	142
Figura 6.43. Comparativo entre os cenários 1, 2 e 3 para o compartimento sem estufa – num dia de uma semana típica de inverno e de uma semana típica de verão (de cima para baixo). ....	143
Figura 6.44. Redução do consumo energético do edifício sem e com os vários tipos de estufa em análise (em cima) e para compartimento sem ou adjacente à estufa (em baixo) - Cenário 1 segundo a orientação solar. ....	146
Figura 6.45. Percentagem de redução/aumento do consumo energético do compartimento adjacente às estufas, relativamente ao compartimento sem estufa - para arrefecimento (acima) e aquecimento (abaixo) – no Cenário 1 e segundo orientação solar. ....	147
Figura 6.46. Comparação do consumo energético anual entre Cenário 1 e o Cenário 2 (com adoção de medidas passivas de arrefecimento e aquecimento) – p/o edifício sem e com estufas. ....	148



Figura 6.47. Comparação do consumo energético anual entre Cenário 1 e o Cenário 2 (com adoção de medidas passivas de arrefecimento e aquecimento) – p/o compartimento sem e adjacente às estufas.....	148
Figura 6.48. Consumo energético para arrefecimento do compartimento adjacente cenário 1 e 2. ....	149
Figura 6.49. Consumo energético com aquecimento do Compartimento adjacente nos cenários 1 e 2. ....	149
Figura 6.50. Comparação dos aspetos de termo energéticos (valores em percentagem) entre o edifício sem e com intervenção de reabilitação, através da integração de diferentes soluções de estufas: tradicionais, convencionais, contemporâneas e alternativas com membranas arquitetónicas. Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área. ....	150
Figura 6.51. Comparação entre as soluções de reabilitação segundo os resultados ACV (valores em percentagem). Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área. ...	154
Figura 6.52. Comparação do impacto ambiental entre todas as etapas da ACV segundo os indicadores com maior impacto (PAG e EI). ....	155
Figura 6.53. Comparativo do processo de instalação entre as soluções de membrana (a) e de vidro (b) para encerrar as varandas do edifício tomado como caso de estudo.....	156
Figura 6.54. Conceito de eficiência aplicado à avaliação multicritério. Estrutura hierárquica para a seleção da solução construtiva mais eficiente para a intervenção de reabilitação com abordagem de integração. ....	157
Figura 6.55. Comparação entre as diversas soluções de ampliação inseridas no edifício (edifício como um todo). ....	159
Figura 6.56. Árvore de decisão 'Melhor solução de integração'. Gráfico obtido com a utilização da aplicação "Precision Tree" da ferramenta informática Decision Tools Suite (DTS) Industrial student version 7.6 (2018). ....	161
Figura 6.57. Valores de eficiência esperados para cada alternativa em análise, de acordo com a variação individual de cada critério. Gráficos obtidos com a utilização da aplicação Precision Tree da ferramenta informática Decision Tools Suite v. 7.6 (2018) .....	163

## **CAPITULO 7**

Figura 7.1. Ilustração da intervenção de ampliação vertical com solução alternativa em membrana sobre edifício antigo.....	167
Figura 7.2. Proporção de edifícios concluídos por tipo de obra (2010 - 2015) (INE, 2016).....	168
Figura 7.3. Peso das obras de reabilitação no total de obras concluídas por NUTS II (2010 e 2015) (INE, 2016).....	168
Figura 7.4. Peso das obras de alteração, de ampliação e reconstrução relativamente ao total de obras de reabilitação concluídas por NUTS II (2015) (adaptado de INE, 2016). ....	169
Figura 7.5. Obras de ampliação na Região Autónoma da Madeira: (a) estimadas para 2013 e 2015 em função do tipo de uso; (b) número médio de pisos por edifício com obras de ampliação concluídas entre 2000 e 2012.....	170
Figura 7.6. Obras de ampliação na Região Autónoma dos Açores: (a) estimadas para 2013 e 2015 em função do tipo de uso; (b) número médio de pisos por edifício com obras de ampliação concluídas entre 2000 e 2012.....	170
Figura 7.7. Obras de ampliação na cidade do Porto: (a) estimadas para 2013 e 2015 em função do tipo de uso; (b) número médio de pisos por edifício com obras de ampliação concluídas entre 2000 e 2012..	170
Figura 7.8. Ampliações verticais: (a) edifícios com pisos recuados (Avenida Boavista, Porto); (b) ampliações verticais em edifícios na cidade do Porto – maqueta de uma casa antiga do Porto (Teixeira, 2013); (c) ampliações verticais na cidade de Guimarães (Casas de Ressalto na Praça Santiago e na Rua Gravador Molarinho).....	171
Figura 7.9. Imagens alusivas às iniciativas de reabilitação de edifícios a partir das suas coberturas: (a) Lisboa; (b) Barcelona.....	172
Figura 7.10. (a) Reabilitação com ampliação, Torre Pall Mall e Coliseum, construída em 1920 em Manchester (© <a href="http://manchesterhistory.net">http://manchesterhistory.net</a> ). (b) Uma construção pode ser extremamente ligeira, como esta caravana da Airstream, criada em 1936, que pode ser puxada por uma bicicleta (© <a href="http://www.fuelyourcreativity.com">www.fuelyourcreativity.com</a> apud LCT, 2013). (c) Ampliação vertical com sistema construtivo em madeira –cobertura com espaço de exposição da fábrica ARDENO (Tirana, Albânia); (d) Cobertura	

plana acessível, com camara de ar, cuja camada superior pode ser removida para aligeirar o edifício existente (LCT, 2016). .....	173
Figura 7.11. Casos avaliados em análise de ciclo de vida para as seguintes alternativas de reabilitação energética de um edifício (da esquerda para a direita): 1) manter o edifício existente; 2) reabilitação ligeira; 3) reabilitação profunda; 4) reabilitação ligeira + ampliação vertical com adição de energias renováveis e 5) demolição e reconstrução (WALD et al, 2015). .....	174
Figura 7.12. Resultados do estudo de Wald et al. (2015): (a) energia incorporada nas diferentes fases do ciclo de vida para todos os cenários analisados; (b) tempo de amortização (em anos) de energia primária incorporada (cor verde claro) e potencial de aquecimento global (cor verde escuro) com as respetivas emissões ao longo do ciclo de vida para as variantes analisadas. ....	174
Figura 7.13. Falkestrasse, Viena, 1988 (Coop Himmelblau, 2016). .....	176
Figura 7.14. (a) Secção transversal da ampliação dos escritórios Centrais do NNH & ING Bank em Budapeste, projetado por Erick van Egeraat associated architects (EEA) e (b) ampliação efetuada na Fábrica Fiat Lingotto, em Turim, projetada por Renzo Piano. ....	176
Figura 7.15. Exemplos contemporâneos de intervenções de reabilitação com ampliações verticais: (a) Neo leo vertical living, projetado por Luderwaldt Verhoff (2005, Alemanha); (b) Lister Mills Bradford, projetado por Urban Splash (2013, Reino Unido); (c) Didden village, projetado por MRDV (2006, Holanda). .....	177
Figura 7.16. (a) Exemplo nacional de intervenções de ampliação vertical, cidade do Porto. (b) Exemplo de trapeira e (c) de mirante. ....	178
Figura 7.17. Edifícios com trapeiras, Porto. Tipos de trapeiras e mirantes (adaptado de Clark, 1989 apud Douglas, 2006). ....	179
Figura 7.18. Modelo construtivo das casas burguesas do Porto – planta do piso recuado, corte longitudinal e alçados da rua e de tardoz (Teixeira & Povoas, 2009). ....	179
Figura 7.19. Exemplo de piso recuado em edifícios localizados na cidade do Porto. ....	179
Figura 7.20. Modelo construtivo das casas burguesas do Porto – Pormenores tipo (Teixeira & Povoas, 2009). 179	
Figura 7.21. Edifícios com andares de ressalto: (a) na Rua Gravador Molarinho, Guimarães; na região do Douro - (b) Santa Cruz, Armamar e (c) Granja do Tedo, Tabuaço; (d) exemplos de apoio do ressalto: (d1) cachorros (d2) Caibros de soalho (Martins, 2000). .....	180
Figura 7.22. Exemplos de ampliação vertical e horizontal (da esquerda para a direita) na ilha da Madeira. ....	180
Figura 7.23. Planta de implantação da autoria, e gentilmente cedida, pelo gabinete de arquitetura Anarchlab (2017); foto do edifício no cruzamento das duas ruas (antes e após a intervenção). ....	181
Figura 7.24. Foto do piso recuado, plantas e cortes do edifício em estudo no seu estado original, da autoria, e gentilmente cedidos, pelo gabinete de arquitetura Anarchlab (2017). ....	181
Figura 7.25. Maqueta de uma casa antiga do Porto. Pormenor dos lancis da parede da fachada, da estrutura das paredes de tabique do piso ampliado (integralmente em madeira) e da cobertura. (Teixeira, 2004). .....	182
Figura 7.26. Pormenor tipo da estrutura dos sobrados de uma casa com três frentes. Neste exemplo, o apoio das vigas principais do sobrado em frente a cada abertura é feito através de cadeias, assentes nas vigas, as quais se apoiam nos panos de parede sem aberturas (Teixeira, 2004). .....	182
Figura 7.27. Pormenor de uma parede exterior do piso recuado em tabique simples reforçado (adaptado de Teixeira (2004)) .....	183
Figura 7.28. Plantas e cortes do projeto de reabilitação, com ampliação vertical em madeira, da autoria de Anarchlab (2015) (desenhos gentilmente cedidos por Anarchlab). .....	184
Figura 7.29. Esquema estrutural do projeto de reabilitação do edifício com solução em madeira para a ampliação vertical, projetado pelo Engenheiro civil Jerónimo Botelho (fontes: foto da autora e desenhos gentilmente cedidos por Anarchlab (2017)). .....	185
Figura 7.30. Fotos dos elementos a manter, reforçar e construir (créditos: autora). .....	185
Figura 7.31. Exemplos de ampliação vertical envolvendo uma estrutura em LSF sobre edifício existente. ....	186
Figura 7.32. Tipos de intervenções nos projetos em análise, reabilitados com membranas. ....	186
Figura 7.33. Tipo de ampliação verificada nos projetos em análise, reabilitados com membranas. ....	186
Figura 7.34. Ampliações verticais com membranas: (a) piso recuado com cobertura em membrana (Portugal); (b) Shishiodoshi house - dois pisos sobrepostos ao edifício original com revestimento da envolvente	

exterior em membrana (França); (c) substituição total de uma claraboia sob a proteção de uma estrutura com membrana para assegurar a proteção do interior deste edifício histórico (Sprung, 2017); (d) escritório da empresa Airclad com módulo prefabricado e pneumático (Airclad, 2016); (e) mirante com estrutura metálica e revestimento em membrana (© arquitetoldos). ....	187
Figura 7.35. (a) Vista exterior e interior de ampliação vertical temporária em membrana, instalada na cobertura de um edifício antigo, Carnegie Hall, em Nova Iorque (Wright, 2017) e (b) abrigos militares com vigas pneumáticas em membrana (Federal Fabrics, 2017).....	188
Figura 7.36. Edifício experimental Mème House, concebido pelo arquiteto Kengo Kuma em 2013 (Archello, 2018). A superfície em membrana é produzida em estaleiro e instalada de forma rápida em obra, com recurso a meios de elevação mecânicos.....	188
Figura 7.37. Esquema conceitual da solução proposta - SAM.....	190
Figura 7.38. Pormenor da estrutura proposta – ligação ao existente.....	190
Figura 7.39. Esquema com sequência da intervenção de reabilitação: (a) edifício existente; (b) remoção da cobertura inclinada e das vigas de pavimento que estavam danificadas e execução de novas vigas em madeira lamelada; (c) sequência de montagem da ampliação vertical SAM. ....	192
Figura 7.40. Ilustração do processo de montagem de uma estrutura com membrana (adaptado de Sprung, 2017).....	192
Figura 7.41. Exemplos de intervenções de reabilitação em que foi necessário adotar soluções leves para viabilizar a execução de operações de manutenção e ampliação vertical.....	193
Figura 7.42. Geometria da membrana da solução em estudo, (tipo anticlastica) obtida através de ferramenta informática Formfinder (2016) que permite determinar a forma de equilíbrio da mesma – processo denominado de “form finding”.....	194
Figura 7.43. Placas de apoio em neopreno (Rothoblaas, 2018). Ideal para a realização de apoios estruturais e vínculos estáticos com dois graus de folga. ....	195
Figura 7.44. Porta-pilar (da esquerda para a direita): em “T” com lâmina interna (Rothoblaas, 2018) com ligação superior à viga; duplo – com ligação lateral a viga de madeira.....	195
Figura 7.45. Exemplos de ligações para forças de tração, da estrutura da SAM ao edifício existente: (a) cantoneira para forças de tração – chapa tridimensional em aço com zincagem galvânica; (b) chapa para forças de tração - chapa bidimensional furada de aço com zincagem galvânica (Rothoblaas, 2018).....	196
Figura 7.46. Exemplos de ligações da estrutura da SAM ao existente: (a) (b) laje ou vigas, (c) paredes. ....	196
Figura 7.47. Pormenor construtivos: (a) SAM recuada do alinhamento da fachada; (b) contraventamento dos pórticos.....	196
Figura 7.48. Pormenor construtivo da solução proposta no alinhamento da fachada. Sistemas de tensionamento de fachadas em membrana: 1. barra de tensionamento embolsada e 2. sistema tipo keder (IFAI, 2008).....	197
Figura 7.49. (a) Exemplo de impressão gráfica em membranas- membrana betuminosa com efeito 3D (4.2mm e), por impressão gráfica, que reproduz a imagem de telhas. (b)Tipos de janelas especificamente desenhadas para integrarem soluções de envolvente exterior com membrana (Sprung, 2016).....	197
Figura 7.50. Pormenor de integração de chaminé na casa experimental “Mème” revestida a membrana de poliéster com PVDF (arquiteto Kengo Kuma & Associates) (Archello, 2018). ....	198
Figura 7.51. Deve-se prever a colocação de linhas que afastem os pássaros das superfícies em membrana para evitar danos e manter as superfícies limpas durante mais tempo. ....	198
Figura 7.52. Constituição da cobertura e parede exterior da SAMb (desenho adaptado de Sprung, 2016).....	199
Figura 7.53. Resultados detalhados: condensação intersticial cumulativa mensal; quando os valores são negativos ocorre evaporação.....	200
Figura 7.54. Grelhas de ventilação: (a) autorregulável num caixilho (ARALCO FlatAir); (b) na cavidade de solução construtiva de claraboia composta com membrana dupla de ETFE tensionada e com caixa-de-ar entre si (foto da biblioteca da Escola Superior de Saúde da Universidade de Aveiro). (c) Pormenor de coletor de água de condensação na envolvente exterior da SAM. ....	201
Figura 7.55. (a) Comparação entre BioPCMTMQ24 (com as várias temperaturas de fusão (M – melting) e espessuras de paredes de alvenaria de tijolo; (b) Membrana com “bolsas” de PCM incorporado (PhaseChange, 2017).....	202

Figura 7.56. Cobertura em membrana vegetal - conceito de promoção da biodiversidade através de soluções leves para integrar em edifícios existentes: (a) membrana vegetal VGTEX (2017); (b) membrana vegetal com substrato orgânico de Heinzelmann et al, (2015); (c) aplicação da membrana vegetal ao caso de estudo. ....	202
Figura 7.57. Ilustração das soluções alternativas variantes. ....	203
Figura 7.58. Índice de redução sonora de acordo com a norma ISO 717-1 dos elementos construtivos da envolvente exterior das soluções em estudo. Resultados obtidos com a ferramenta informática Olive Tree Lab 4.0 (OTL) (Pemard, 2017). ....	204
Figura 7.59. Imagens do projeto Soft Cities (Kvarch, 2009) - conceito aplicado aos edifícios antigos da cidade do Porto. ....	205
Figura 7.60. Protótipo “Polar Bear Pavillion”, uma estrutura em membrana energeticamente suficiente. Fonte: ITV/TAO GmbH. ....	205
Figura 7.61. Esquema da metodologia geral adotada para avaliação da eficiência de cada solução em estudo. ....	206
Figura 7.62. Visão geral das soluções em estudo. ....	207
Figura 7.63. Peças desenhadas de arquitetura com identificação dos pisos do edifício em análise e dos espaços uteis e não uteis. ....	209
Figura 7.64. Modelo executado em Design Builder. ....	209
Figura 7.65. Variação da temperatura do ar interior na parte ampliada e no piso subjacente a esta numa semana típica de inverno. ....	211
Figura 7.66. Variação da temperatura do ar interior na parte ampliada e no piso subjacente a esta numa semana típica de verão. ....	212
Figura 7.67. Variação da sensação de conforto térmico segundo o índice de Fanger (Predicted Mean Vote – PMV) – semana de inverno. ....	212
Figura 7.68. Variação da sensação de conforto térmico segundo o índice de Fanger (Predicted Mean Vote – PMV) – semana de verão. ....	213
Figura 7.69. Variação da temperatura interior na parte ampliada e no piso subjacente numa semana típica de inverno. ....	213
Figura 7.70. Variação da temperatura interior na parte ampliada e no piso subjacente numa semana típica de verão. ....	214
Figura 7.71. Variação da sensação de conforto térmico segundo o índice de Fanger (Predicted Mean Vote – PMV) – semana de inverno. ....	214
Figura 7.72. Variação da sensação de conforto térmico segundo o índice de Fanger (Predicted Mean Vote – PMV) – semana de verão. ....	214
Figura 7.73. Balanço térmico anual das várias soluções de ampliação e do edifício no estado original através dos elementos construtivos e da infiltração de ar. ....	216
Figura 7.74. Consumo energético das soluções de ampliação vertical comparado entre si e com o consumo energético do edifício REFc/ST. ....	216
Figura 7.75. Comparação dos aspetos Termo energéticos entre as soluções convencionais e alternativas em análise para ampliação vertical (valores em percentagem). Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área. ....	217
Figura 7.76. Zonas climáticas de Portugal para a estação de inverno e de verão (Despacho n.º 15793-F/2013) com cidades em estudo assinaladas. ....	218
Figura 7.77. Consumo energético anual por área útil para o edifício com as diferentes soluções de ampliação vertical, localizado em diferentes zonas climáticas nacionais. ....	219
Figura 7.78. Necessidades de aquecimento e arrefecimento das soluções de ampliação vertical em diferentes zonas climáticas. ....	220
Figura 7.79. Percentagem de consumo energético para aquecimento e arrefecimento. ....	221
Figura 7.80. Consumo energético da parte ampliada e do piso subjacente com as várias soluções construtivas e em vários cenários climáticos. ....	221
Figura 7.81. Comparação dos impactos ambientais de todas as soluções de reabilitação com ampliação vertical, segundo os resultados ACV (da Tabela 7.28, convertidos em percentagem). ....	226

Figura 7.82. Comparação entre soluções segundo os indicadores PAG e EI e para todas as etapas ACV (valor em percentagem relativamente à solução com maior impacto).....	226
Figura 7.83. Análise económica do ciclo de vida das intervenções de ampliação em estudo. ....	228
Figura 7.84. Custo global do edifício, com e sem intervenção de reabilitação. Cálculo do período de retorno do cenário de reabilitação com ampliações convencionais e alternativas relativamente ao cenário inicial – edifício no estado original (c/ST existente). ....	230
Figura 7.85. Comparação dos aspetos económicos das soluções de ampliação vertical em análise (valores em percentagem, relativamente à melhor solução para cada critério). Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área. ....	232
Figura 7.86. Comparação entre as diversas soluções de ampliação inseridas no edifício – edifício como um todo. ....	234
Figura 7.87. Árvore de decisão 'Melhor solução de sobreposição'. Gráfico obtido com a utilização da aplicação “Precision Tree” da ferramenta informática Decision Tools Suite (DTS) Industrial student version 7.6 (2018). ....	236
Figura 7.88. Valores de eficiência esperados para cada alternativa em análise, de acordo com a variação individual de cada critério. Gráficos obtidos com a utilização da aplicação Precision Tree da ferramenta informática Decision Tools Suite v. 7.6 (2018). ....	237
<b>CAPITULO 8</b>	
Figura 8.1. Fotomontagem com a solução de reposição do teto abobadado da Igreja do Carmo - alternativa em membrana. ....	242
Figura 8.2. Bibracte, Mount Beuvray (França) concebido pelo arquiteto Paul Andreu: (a) arqueologistas em atividade sob a proteção da cobertura temporária em membrana; (b) vista da estrutura em membrana, com os balastos após queda de neve e maquete concetual da solução modular; (c) painéis verticais móveis para regular a ventilação interior (Archeologicalshelters, 2012).....	245
Figura 8.3.Castelo de Bellever (Maiorca, Espanha): (a) desenhos gerais da estrutura amovível (desenhos elaborados por Ramon Sastre); (b) etapas de instalação da cobertura insuflável (foto de Ramon Sastre apud Zanelli, 2015); (c) Pormenores de ligação da cobertura aos elementos resistentes existentes; (d) balastos de ancoragem da estrutura em membrana (totalmente reversíveis) (Tensinet, 2010).....	246
Figura 8.4. Ruínas do castelo de Thierstein (Suíça) - contraste entre a nova estrutura temporária entre as ruínas: (a) vista panorâmica da cobertura inserida na ruína; (b) vista interior do espaço coberto com estrutura em membrana; (c) vista axonométrica (Kugel, 2013).....	246
Figura 8.5. Exemplos de coberturas retrateis anteriores ao século XX: (a) velarium do coliseu de Roma; (b) teatros improvisados em edifícios existentes denominados de “Mansiones” com coberturas retráteis – imagem de Marco Marcola, a Commedia dell’arte na Arena de Verona, em 1772 (Kronenburg, 1995).....	246
Figura 8.6. Diagrama de movimentos possíveis para as construções leves (Otto, 1971 apud Zanelli, 2015a). .	247
Figura 8.7. Cobertura em membrana retrátil da Camara Municipal de Viena (Tilner & Willinger, 2018). ....	247
Figura 8.8. Palácio de Salzburgo, 2012: (a) as duas configurações principais do pátio e mecanismos de abertura e fecho da cobertura retrátil: ao ar livre (esquerda) ou coberto por uma membrana de PTFE (à direita); (b) a estrutura retráctil de proteção contra a chuva pode ser removida/recolhida na sua totalidade no final da temporada e, como se observa na seção transversal, o edifício existente não é afetado, sendo apenas são aplicadas pequenas forças horizontais nas fachadas; (c) e (d) viga reticular que suporta a cobertura de membrana (fixa) e calhas de deslize da membrana retrátil...	248
Figura 8.9. Castelo de Weitra, 2006 (fotos de Markisen): (a) quatro guarda-chuvas retangulares protegem 750 m2 de pátio da chuva; (a) vista de baixo, durante o fecho dos guarda-chuvas e vista de cima, configuração totalmente aberta. Pormenores construtivos: (b) e (c) cada braço principal é equipado com um perfil metálico que forma uma das seções do guarda-chuva na configuração fechada. ...	248
Figura 8.10. (a) Sequência de abertura (aprox. 530 m2) em 5 minutos (b) vista do arco formado na fachada norte (à esquerda), que abriga a totalidade da cobertura na posição de recolha, vista da fachada sul (à direita) (Gollnitz apud Zanelli (2015)); (c) modelo tridimensional da estrutura primária de suporte e do sistema de fixação aos edifícios existentes e adjacentes (Arch22 + Str.ucture); (d) vista de cima noturna e diurna; (e) pormenores dos elementos de deslize (Kugel, 2014). ....	249

Figura 8.11. Cobertura retrátil e pneumática: (a) Hangar portátil em membrana de poliéster revestida a PTFE (Tektoniks, 2018); (b) composta por Elementos rígidos insufláveis no edifício da Pacific Test Range, 2013 (Tektoniks, 2018); (c) membrana dupla de ETFE em Casting house - Landschaftspark Duisburg-Nord, Alemanha (2003). .....	249
Figura 8.12. Tipos de cobertura pneumática e retrátil em membrana (Kawaguchi, 2000). .....	250
Figura 8.13. Protótipo de um sistema de cobertura: (a) em membrana retrátil; (b) em membrana retrátil e pneumática; (c) em membrana suportado pelo ar (Kawaguchi, 2000). .....	250
Figura 8.14. (a) Ortofotomapa com localização do MAC (adaptado de VIEIRA (2013)); (b) vista aérea do MAC (© Landsat/ Copernicus); (c) vista da capela-mor desde o Elevador de Santa Justa; (d) vista interior da nave. ....	251
Figura 8.15. Enquadramento cronológico – visão geral da relação entre os abalos sísmicos e os pedidos de reposição da cobertura (elaborado com base na informação disponível em Monumentos, 2017). .....	251
Figura 8.16. Modelo tridimensional da Igreja do Carmo antes do terramoto de 1755 (Arnault & Fernandes, 2005). .....	251
Figura 8.17. Planta de cobertura e plantas esquemáticas com indicação do programa funcional da igreja gótica do Carmo: A. Nave principal; B. Nave lateral; C. Transepto; D. Altar principal; E. Capelas laterais; F. Sacristia. Planta com o programa funcional das ruínas da igreja convertida no MAC: 1.Coleções da Pré e Prohistória; 2.Escultura e Epigrafia (do Romano ao islâmico); 3.Escultura Medieval e Moderna, Heráldica; 4.Coleções exóticas e Biblioteca Histórica da AAP; 5.Escultura, Epigrafia e Azulejaria. ....	252
Figura 8.18. Desenhos dos alçados frontal, tardoz e lateral (executados pela autora com base no cruzamento entre dimensões obtidas num levantamento in situ e desenhos da autoria do arquiteto Carlos Castanheira publicados em Vieira (2013)). .....	253
Figura 8.19. Fotomontagem do alçado da nave lateral (à esquerda da entrada). .....	253
Figura 8. 20. Fotomontagem do alçado da nave lateral (à direita da entrada). Secção longitudinal (executada pela autora com base no cruzamento entre dimensões obtidas in situ e desenho da autoria do arquiteto Carlos Castanheira publicado em Vieira (2013)). .....	253
Figura 8.21. Fotomontagem do alçado transversal em direção à entrada principal. ....	253
Figura 8.22. Fotomontagem do alçado transversal oposto à entrada principal. ....	253
Figura 8.23. Exemplo de eventos públicos promovidos pela Associação de Arqueólogos Portugueses (AAP), no espaço do MAC, para sensibilizar a população da importância do património cultural. Vistas de eventos promovidos durante o dia e noite no verão. ....	253
Figura 8.24. Análise dos ventos com Formit 360 pro © (licença académica autodesk) para a localização do caso de estudo. ....	254
Figura 8.25. (a) Operação de consolidação/regularização do espaço entre arcos com o enchimento dos mesmos - vista do terraço da cabeceira, 1954.(b) Espaço entre arcos a regularizar (proposta). .....	256
Figura 8.26. Vista axonométrica explodida da estrutura das soluções de cobertura (a) e (b) propostas. (c) Pormenores de ligação da estrutura da cobertura aos elementos estruturais existentes, ao nível do coroamento. ....	256
Figura 8.27. (a) Projeto da cobertura das ruínas da Igreja do Carmo em ferro e vidro (IAN/TT, Arquivo Histórico do Ministério das Finanças-Ministério do Reino. Plantas Cx.5277, IV/C/121 (17) apud Arnault & Fernandes (2005). (b) Exemplo de cobertura vítrea contemporânea do projeto da cobertura da Igreja do Carmo: Estufas do Jardim Botânico de Lion (1857). .....	256
Figura 8.28. (a) Exemplo de cobertura em vidro executada para encerrar um edifício em ruína - Igreja de S. Petri Pauli (Alemanha). (b) Exemplo de estrutura primária e secundária metálica a adotar na conceção da solução convencional de cobertura em vidro: pormenor 3D e da secção transversal (RPTecnik, 2016). .....	257
Figura 8.29. Configuração da cobertura convencional em vidro simples e estrutura primária em aço e secundária em alumínio. ....	257
Figura 8.30. Configuração Exemplo de pormenor construtivo de cobertura com vidro simples. ....	258
Figura 8.31. Esquema de aplicação do conceito adotado: (a) operação do sistema retrátil; (b) e (c) cenários com a cobertura transparente permanente e teto abobadado translúcido e retrátil. ....	259
Figura 8.32. Exemplo de teto em membrana digitalmente impressa e com iluminação incorporada (Barrisol, 2018). .....	259

Figura 8.33. Exemplo de aplicação de membrana dupla de ETFE na em janelas: (a) solução pneumática – San Michele Arcangelo (Canobbio, 2018); (b) solução tensada através de encapsulamento de aro - KWO Grimselstrom (Texlon, 2018). .....	259
Figura 8.34. (a) Estado atual dos arcos existentes. (b) Proposta de conexão da estrutura da cobertura aos elementos resistentes existentes (fotomontagem) - cobertura autoportante (axonometria explodida); travamento horizontal assinalado a cor vermelha -Inclusão de elementos de contraventamento – cabos com esticadores – entre vigas de coroamento. ....	260
Figura 8.35. Ligação da cobertura à estrutura existente: 1) cota da cobertura; 2) elemento de distribuição de cargas/ coroamento; 3) ancoragens pontuais; (4) reposição do enchimento em falta entre os arcos existentes, com material adequado para o efeito. ....	260
Figura 8.36. Frossilo, Copenhaga, MVRDV (2005). A cobertura é autoportante, em membrana pneumática de ETFE, com treliças. ....	260
Figura 8.37. Etapas de montagem de uma cobertura em membrana, com formato em abobada de berço com secção ogival (Monita, 2015). ....	260
Figura 8.38. (a) Planta de cobertura do MAC, com a solução de cobertura em vidro (CV, à esquerda) e em membrana (CM, à direita). (b) Exemplo de aplicação de perfil de selagem, fixação perimetral e cabos de aço embebidos em bolsas de membrana ETFE, soldadas à membrana de revestimento exterior. ....	261
Figura 8.39. Corte transversal da nave com a cobertura e teto retrátil em membrana. ....	262
Figura 8.40. Pormenor da ligação da cobertura proposta aos elementos existentes. ....	262
Figura 8.41. (a) Pormenor de ligação da solução em membrana ao existente. Tipos de ligações/ modos de tensionamento/ reforço da membrana de ETFE: (b) reforço da membrana simples de ETFE com cabos embebidos em bolsas de ETFE (Birdair, 2018); (c) (d) com canal de drenagem. ....	263
Figura 8.42. Teto abobadado retrátil com nervuras pneumáticas: (a) posição retraída e estendido; (b) imagem da cobertura interior da capela lateral da Igreja do Carmo com nervuras em cantaria de pedra; (c) composição e esquema de funcionamento; (d) válvula de insuflação central - “chave” (Gybe, 2018). ....	264
Figura 8.43. Anatomia de uma nervura pneumática (adaptado de Cyclocamping (2018)). ....	265
Figura 8.44. Exemplos de aplicação de vigas pneumáticas: a) cobertura insuflável para a central de autocarros do aeroporto de Heathrow (Lindstrand, 2006); (b) hangar “Transportable Maintenance Enclosure (TME)” (concebido por FTL Happold) (Bell, 2018). ....	265
Figura 8.45. Pormenores das ligações superiores (S) e inferiores (I e I') do teto abobadado com nervuras pneumáticas ao existente. ....	266
Figura 8.46. Desenhos do alçado frontal, alçado tardez, alçado lateral e secção longitudinal do MAC com a cobertura alternativa proposta. ....	267
Figura 8.47. Ilustração do antes e após implementação da solução alternativa com membrana: (a) vista do transepto (b) vista da nave. ....	267
Figura 8.48. Esquema do método adotado para avaliação da eficiência. ....	268
Figura 8.49. Vista geral das ruínas da Igreja do Carmo/MAC com todas as soluções/configurações em avaliação. ....	268
Figura 8.50. Distribuição (percentagem) da localização e tipo de eventos realizados na Igreja do Carmo/MAC de 2015 a 2018 (informação gentilmente cedida pelo MAC): (a) tipo de eventos acústicos realizados na nave em ruína; (b) tipo de eventos acústicos realizados no auditório interior e (c) localização dos eventos. ....	270
Figura 8.51. Modelos virtuais do edifício com as configurações/soluções de reabilitação em avaliação. ....	271
Figura 8.52. Características dimensionais do espaço em análise e localização dos pontos de medição (fontes e recetores), considerados nos ensaios numéricos. ....	272
Figura 8.53. Pormenor construtivo de cobertura em membrana ETFE com membrana de supressão de ruído adicional: 1. manilha; 2. membrana de supressão de ruído; 3. anilha de suporte; 4. cordão de fibra de vidro; 5. cordão de nylon com Ø 3mm; 6. keder prefixado em polietileno; 7. suporte (adaptado de LeCuyer, 2008). ....	273

Figura 8.54. Níveis de ruído de impacto provocado pela queda de chuva em vários materiais leves aplicados em coberturas; teste conduzido por British Research Establishment, BRE Report Number 220312 BRE: Rain noise from roof glazing, polycarbonate roofing and ETFE roofing (Chiu, 2015).....	273
Figura 8.55. Gráfico com o Tempo de Reverberação (TR) para cada banda de oitava e mapas de distribuição dos valores de TR, obtidos através de ensaio numérico com a ferramenta OTL suite. ....	274
Figura 8.56. Resultados do parâmetro Claridade (C80): média para cada combinação fonte/recetor e respetivo desvio padrão para cada banda de oitava (valores obtidos por ensaio numérico com OTL suite room).....	275
Figura 8.57. Resultado para o parâmetro de Tempo de Decaimento Inicial (EDT): valor médio para cada combinação fonte/recetor e respetivo desvio padrão para cada banda de oitava (valores obtidos por ensaio numérico com OTL suite room).....	276
Figura 8.58. Comparação entre os valores calculados para o Tempo de Reverberação (RT) e Tempo de Decaimento Inicial (EDT). ....	276
Figura 8.59. Resultado para o parâmetro Definição (D50): valor médio calculado para cada combinação fonte/recetor e respetivo desvio padrão, para cada banda de oitava (valores obtidos por ensaio numérico com OTL suite room).....	276
Figura 8.60. Resultados da análise comparativa entre a Igreja do Carmo/MAC e outras igrejas com volume similar para os seguintes parâmetros: (a) TR; (b) EDT; (c) C80 e (d) D50. ....	278
Figura 8.61. Transmissão de luz da membrana ETFE e de outros materiais transparentes (Lecuyer, 2008). ...	281
Figura 8.62. Membrana de ETFE transparente (à esquerda) e membrana de ETFE com padrão refletor impresso (à direita) (Koch, 2004). ....	281
Figura 8.63. Análise da penetração de luz solar no interior da nave no estado atual – modelo virtual 3D realizado com DesignBuilder). ....	282
Figura 8.64. Fatores Luz Dia (FLD) e valores de iluminância obtidos por simulação numérica, através da ferramenta informática DesignBuilder com céu nublado. ....	283
Figura 8.65. Percentual da média de horas superiores a 300 lux - mapas resultantes da simulação numérica do indicador AELD (obtidos através da ferramenta informática DesignBuilder). ....	284
Figura 8.66. Percentual da média de horas superiores a 1000 lux - mapas resultantes da simulação numérica do indicador ESA (obtidos através da ferramenta informática DesignBuilder). ....	284
Figura 8.67. Percentual da média de horas simuladas, distribuídas nos intervalos de iluminância útil de todos os modelos em estudo. Mapas obtidos através da ferramenta informática DesignBuilder. Nota: V - verifica; N.V. - Não verifica. ....	285
Figura 8.68. Comparação entre as soluções de reabilitação segundo os resultados para o impacto ambiental total da ACV (valores em percentagem). Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área. ....	287
Figura 8.69. Ilustração dos resultados globais acerca do indicador PAG (Potencial de Aquecimento Global) de cada solução em análise. ....	288
Figura 8.70. Comparação do impacto ambiental entre todas as etapas da ACV segundo os indicadores com maior impacto (PAG e EI). ....	288
Figura 8.71. (a) Exemplo de processo de instalação de membrana ETFE numa cobertura através de sistema de clipagem composto por perfis de alumínio extrudido - Estação de transportes de Montpellier, Saint-Roch, França, 2013 (MAP3, 2017). (b) Plataforma elevatória utilizada para instalação de membrana numa igreja em Moçambique em 2015 (Monita, 2017). ....	290
Figura 8.72. Exemplo de processo de instalação de cobertura de vidro: elevação de pano de vidro pesado através de guindaste/grua (GGroup, 2017) (VEonglass, 2017); Gare de Lion, França, 2012 (MAP3, 2017).....	290
Figura 8.73. Comparação entre as soluções de reposição da cobertura. Avaliação da eficiência em que todos os indicadores têm peso igual no resultado final. Melhor =0%; Pior =100%. ....	292
Figura 8.74. Árvore de decisão 'Melhor solução de reposição'. Gráfico obtido com a utilização da aplicação Precision Tree da ferramenta informática Decision Tools Suite (DTS) Industrial student version 7.6 (2018). ....	294



## INDICE DE TABELAS

### CAPITULO 1

Tabela 1.1. Visão global dos casos de estudo selecionados para avaliar a eficiência das soluções com membranas propostas.....	9
---	---

### CAPITULO 2

Tabela 2.1. Conceitos associados à reabilitação.....	13
Tabela 2.2. Variação percentual em termos reais (volume) e por tipo de construção para o conjunto de 19 países abrangidos pelo Euroconstruct (2018a). ....	15
Tabela 2.3. Variação percentual em termos reais (volume) e por tipo de construção para Portugal (Euroconstruct, 2018b).....	17
Tabela 2.4. Indicadores para Reabilitar em 2025, adaptado de AEICOPS (2011).....	18
Tabela 2.5. Síntese dos aspetos relativos à definição do modelo/metodologia de avaliação da eficiência (assente na adoção de métodos de avaliação multicritério de apoio à tomada de decisão) de intervenções de reabilitação funcional de edifícios.....	19

### CAPITULO 3

Tabela 3.1. Visão geral das propriedades dos materiais em membrana utilizados nos edifícios (Pohl, 2010; Knippers et al, 2011).....	32
Tabela 3.2. Áreas de aplicação dos têxteis técnicos. Percentagem da proporção de vendas a nível Gobar (Gerbe, 2015).....	34
Tabela 3.3. Dimensão do mercado têxteis técnicos na Europa, por aplicação, 2013-2020 (Million Metric Tons) (Markets & Markets, 2016).....	36
Tabela 3.4. Ranking, por ordem crescente, da percentagem de construções com membranas (CM) de 30 dos 54 país analisados neste estudo e respetivo índice de risco a desastre natural. ....	40
Tabela 3.5. Exemplos de aplicações de materiais em membrana na arquitetura (Ollenhauer, 2011).....	42
Tabela 3.6. Medidas para aumentar a eficiência da envolvente de um edifício com materiais em membrana (Cremers, 2011). ....	42

### CAPITULO 4

Tabela 4.1. Principais parâmetros em estudo (adaptado de Gonzales et al. (2012)). ....	47
Tabela 4.2. Casos de estudo de reabilitação funcional com membranas em que a cobertura foi o elemento intervencionado. ....	48
Tabela 4.3. Casos de estudo de reabilitação funcional com membranas em que a fachada foi o elemento intervencionado. ....	52
Tabela 4.4. Casos de estudo de reabilitação funcional com membranas em que o teto foi o elemento intervencionado. ....	53
Tabela 4.5. Casos de estudo de reabilitação funcional com membranas em que a paredes divisórias foi o elemento intervencionado. ....	55
Tabela 4.6. Síntese das principais aplicações de Têxteis técnicos, em especial membranas arquitetónicas, na reabilitação de edifícios. ....	56
Tabela 4.7. Relação entre o ano de intervenção e a localização dos projetos em análise.....	59
Tabela 4.8. Distribuição dos projetos em análise segundo o ano de construção, o tipo de intervenção e de utilização.....	62
Tabela 4.9. Materiais em membrana utilizados nos projetos em análise.....	72
Tabela 4.10. Principais características dos materiais em membrana com maior aplicação na reabilitação de edifícios.....	72
Tabela 4.11. Decomposição do custo de uma intervenção com membranas (Armijos, 2008) (Fabric Architect, 2018).....	73
Tabela 4.12. Síntese das motivações para a intervenção com membranas, por elemento construtivo. ....	79
Tabela 4.13. Síntese e justificação dos casos de estudo selecionados para avaliar a eficiência das soluções com membranas propostas.....	100

### CAPITULO 5

Tabela 5.1. Escala numérica de Saaty (1980).....	105
--	-----

Tabela 5.2. Exemplo de cenário de decisão (base) – resultados da atribuição de pesos para cada critério e subcritério. ....	106
---	-----

## **CAPITULO 6**

Tabela 6.1. Propriedades relevantes de alguns materiais translúcidos e transparentes (adaptado de Knippers et al., 2011). ....	115
Tabela 6.2. Características técnicas da envolvente do edifício selecionado (para calcular as necessidades energéticas). ....	119
Tabela 6.3. Informação geral sobre o edifício tomado como caso de estudo. ....	119
Tabela 6.4. Principais características climáticas da cidade do Porto (REH, 2013). ....	120
Tabela 6.5. Caracterização das soluções de estufa em avaliação. ....	129
Tabela 6.6. Configuração e operação da envolvente transparente; peso e localização de cada solução em análise. ....	130
Tabela 6.7. Propriedades termofísicas dos elementos construtivos. ....	133
Tabela 6.8. Propriedades das superfícies transparentes existentes e da membrana empregue na construção do protótipo utilizado no ensaio experimental. ....	133
Tabela 6.9. Condições em que decorreu o ensaio experimental do edifício. ....	134
Tabela 6.10. Valores de n. ....	136
Tabela 6.11. Parâmetros considerados para a calibração do modelo. ....	136
Tabela 6.12. Cenários para averiguar o comportamento térmico das estufas e dos compartimentos habitáveis com e sem estufas. ....	140
Tabela 6.13. Horas de conforto na varanda encerrada com os vários tipos de estufas e no compartimento habitável adjacente com e sem estufas – semana típica de inverno – para o cenário 1 e 2. ....	141
Tabela 6.14. Horas de conforto na varanda encerrada com os vários tipos de estufas e no compartimento habitável adjacente com e sem estufas – semana típica de verão – para o cenário 1 e 2. ....	142
Tabela 6.15. Horas de conforto no compartimento sem estufa para o cenário 1, 2 e 3. ....	143
Tabela 6.16. Condições de simulação. ....	144
Tabela 6.17. Consumo energético para o edifício sem e com as diferentes soluções de estufa - cenário 1 segundo orientação solar. ....	145
Tabela 6.18. Consumo energético anual para um compartimento sem e adjacente às diferentes soluções de estufa – para o cenário 1 segundo diferentes orientações solares. ....	147
Tabela 6.19. Consumo energético anual, para o edifício existente sem e com as diferentes soluções de estufa – para o cenário 2 segundo a orientação solar menos (Oeste) e mais (Sul) favorável (segundo os resultados do cenário 1). ....	148
Tabela 6.20. Necessidades energéticas anuais, para um compartimento útil sem estufa e adjacente às diferentes soluções de estufa – para o cenário 2, segundo a orientação solar mais e menos favorável (segundo os resultados do cenário 1). ....	149
Tabela 6.21. Síntese dos resultados da simulação do consumo energético operacional do edifício sem e com integração das várias soluções de estufa em análise, segundo o cenário 2 e para a orientação solar mais favorável (Sul) da fachada com varanda- Oeste. ....	150
Tabela 6.22. Módulos considerados no sistema de avaliação do ciclo de vida - fronteira do sistema de avaliação (EN 15804). ....	151
Tabela 6.23. Síntese da definição do enquadramento da análise ACV em estudo. ....	151
Tabela 6.24. Inventário ACV. Para todos os componentes, a massa inicial baseia-se na quantidade de material usada para construir uma estufa com superfície de fachada de 100m <sup>2</sup> . ....	151
Tabela 6.25. Resultados da avaliação ACV, considerando uma vida útil de 60 anos, para cada solução de estufa. ....	152
Tabela 6.26. Comparação dos resultados ACV de cada solução de reabilitação segundo os indicadores de impacto. ....	154
Tabela 6.27. Custos económicos durante 60 anos de vida útil para o edifício com as diferentes soluções de estufas. ....	156
Tabela 6.28. Aspectos construtivos para a instalação de 100m <sup>2</sup> de área de fachada com as soluções de encerramento das varandas (com base nos resultados da montagem do modelo experimental executado e na informação disponível em Cype (2016)). ....	156
Tabela 6.29. Estruturação hierárquica a adotar no método AHP. ....	157

Tabela 6.30. Resultados dos indicadores selecionados para avaliar a eficiência das soluções de reabilitação com abordagem integrada. Percentagem de melhoria da solução EM relativamente às restantes soluções em análise. ....	158
Tabela 6.31. Resultados da atribuição de pesos a cada critério e subcritério – cenário base.....	160
Tabela 6.32. Resultados da avaliação global de cada alternativa para o cenário base. ....	160
Tabela 6.33. Resultados da análise de sensibilidade. ....	161

## **CAPITULO 7**

Tabela 7.1. Estimativa da percentagem de ocorrência dos diferentes tipos de operações e motivações para a reabilitação de edifícios no ano de 2010 na Europa . ....	168
Tabela 7.2. Obras de reabilitação segundo tipo de obra e distribuição geográfica (NUTS II) (INE, 2015).....	169
Tabela 7.3. Tipo de coberturas dos edifícios em Portugal (INE, 2012). ....	171
Tabela 7.4. Comparação entre os problemas comuns às construções em geral e específicos das ampliações verticais. ....	172
Tabela 7.5. Tipos de ampliações sobre edifícios existentes.....	175
Tabela 7.6. Aspetos arquitetónicos associados ao edifício existente.....	181
Tabela 7.7. Representação gráfica das condensações intersticiais previstas para o mês mais crítico e resultados dos cálculos de verificação de condensações superficiais. ....	199
Tabela 7.8. Resultados da avaliação do desempenho acústico dos elementos construtivos que constituem as soluções de ampliação vertical em estudo. Simulação numérica realizada com a ferramenta informática Olive Tree Lab 4.0 (OTL) (Pemard, 2017). ....	203
Tabela 7.9. Quadro geral comparativo das soluções construtivas em estudo segundo aspetos construtivos.....	208
Tabela 7.10. Informação geral sobre o edifício em estudo. Principais características climáticas da cidade do Porto (REH, 2013).....	209
Tabela 7.11. Características técnicas dos elementos construtivos do edifício existente (sem parte ampliada) e do sistema de climatização considerado tanto para o edifício com e sem parte ampliada. ....	209
Tabela 7.12. Constituição e propriedades térmico-físicas dos elementos construtivos da envolvente exterior da parte ampliada. ....	209
Tabela 7.13. Constituição e propriedades termofísicas e óticas dos elementos envidraçados (DesignBuilder,2016). ....	211
Tabela 7.14. Análise estatística da variação da temperatura durante uma semana típica de inverno e de verão. ....	215
Tabela 7.15. Análise estatística da variação da sensação de conforto segundo Fanger (PMV) numa semana típica de inverno e de verão. ....	215
Tabela 7.16. Síntese dos resultados da simulação do consumo energético operacional do edifício com as soluções em estudo.....	217
Tabela 7.17. Definição da zona climática de inverno. ....	218
Tabela 7.18. Definição da zona climática de verão.....	218
Tabela 7.19. Parâmetros climáticos de referência para simulação dinâmica das cidades em estudo; informação disponível através de aplicação informática do LNEG (2017) de acordo com o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios (DI 118/2013 de 20 agosto). ....	218
Tabela 7.20. Necessidades energéticas anuais do edifício REF c/diferentes soluções de ampliação e em cenários climáticos distintos. ....	219
Tabela 7.21. Síntese da definição do enquadramento da análise ACV em estudo. ....	222
Tabela 7.22. Inventário de materiais para ACV do piso recuado com solução construtiva tradicional (ST) - etapa de produção (A1 -A3) e etapa de utilização (B2, B4 e B6) (vida útil de 60 anos). ....	222
Tabela 7.23. Inventário de materiais para ACV da ampliação vertical SCMad - etapa de produção (A1 -A3) e etapa de utilização (B2, B4 e B6) (tempo de vida útil de 60 anos). ....	222
Tabela 7.24. Inventário de materiais para ACV da ampliação vertical com solução construtiva convencional com estrutura metálica (SCMet) - etapa de produção (A1 -A3) e etapa de utilização (B2, B4 e B6). ....	223
Tabela 7.25. Inventário de matérias para ACV da ampliação vertical com SAMb, SAMv1, SAMv2 e SAMv3 todas com estrutura em madeira - etapa de produção (A1 -A3) e etapa de utilização (B2, B4 e B6) (vida útil de 60 anos). ....	223
Tabela 7.26. Resultados ACV, considerando uma vida útil de 60 anos, para cada solução de ampliação vertical. ....	224

Tabela 7.27. Comparação dos resultados totais ACV para cada solução de ampliação vertical, segundo os indicadores de impacto.....	226
Tabela 7.28. Inventário dos custos associados ao ciclo de vida da ampliação vertical convencional com estrutura de madeira.....	227
Tabela 7.29. Inventário dos custos associados ao ciclo de vida da ampliação vertical convencional com estrutura metálica.....	227
Tabela 7.30. Inventário dos custos associados ao ciclo de vida da ampliação vertical alternativa proposta em membrana com estrutura em madeira e respetivas variantes.....	228
Tabela 7.31. Preço da eletricidade em Portugal de 2006 a 2016 para o setor doméstico (PORDATA, 2017)...	229
Tabela 7.32. Considerações tomadas para realizar a análise comparativa do período de retorno.....	230
Tabela 7.33. Período de retorno das intervenções de reabilitação, relativamente ao edifício REFc/ST, utilizando energia elétrica.....	231
Tabela 7.34. Síntese dos custos associados ao ciclo de vida.....	231
Tabela 7.35. Quadro de avaliação multicritério para apoio à tomada de decisão da melhor solução para a abordagem de sobreposição – estruturação hierárquica a adotar no método AHP.....	232
Tabela 7.36. Resultados dos indicadores selecionados para avaliar a eficiência das soluções de reabilitação com abordagem de sobreposição e percentagem de melhoria da SAMv1 relativamente às restantes soluções em análise.....	233
Tabela 7.37. Resultados da atribuição de pesos a cada critério e subcritério – cenário base.....	235
Tabela 7.38. Resultados da avaliação global de cada alternativa para o cenário base.....	235
Tabela 7.39. Resultados da análise de sensibilidade.....	237

## **CAPÍTULO 8**

Tabela 8.1. Síntese das características de uma estrutura gótica (adaptado de Chicó, 1968).....	254
Tabela 8.2. Propriedades mecânicas das membranas ETFE (Bessey, 2012).....	261
Tabela 8.3. Características da membrana selecionada para o teto retrátil.....	263
Tabela 8.4. Propriedades físicas e coeficientes de absorção Sonora dos materiais considerados nos ensaios numéricos (calculados e retirados da base de dados OTL Suite Room).....	271
Tabela 8.5. Comparação entre os valores ótimos/ideais de TR (para 500 -1000 Hz), segundo o tipo de uso (Carvalho, 2018), e os valores estimados de TR para cada configuração do espaço da nave (obtidos através de ensaios numéricos com OTL suite).....	274
Tabela 8.6. Comparação entre os valores ideais de RT e C80 (500-1000 Hz), de acordo com o tipo de uso (Carvalho, 2018), e os valores calculados para cada configuração do espaço da nave (valores obtidos por ensaio numérico com OTL suite).....	275
Tabela 8.7. STI para as combinações F01/recetor (resultados obtidos através de ensaio numérico com OTL Suite).....	277
Tabela 8.8. Comparação entre as opções de reabilitação funcional da igreja do Carmo/MAC com outros edifícios/igrejas, desocupados e com volume semelhante, através de vários parâmetros acústicos.....	278
Tabela 8.9. Síntese de valores ótimos para vários parâmetros acústicos e diferentes usos; valores calculados/resultados obtidos para o espaço da nave da igreja do Carmo/MAC - com e sem soluções de reabilitação (através de ensaio numérico com OTL Suite).....	280
Tabela 8.10. Resumo das propriedades óticas dos materiais analisados.....	281
Tabela 8.11. Síntese dos dados introduzidos no DesignBuilder/Daysim para a previsão do comportamento lumínico com base nos dados climáticos locais.....	284
Tabela 8.12. Módulos considerados no sistema de avaliação do ciclo de vida - fronteira do sistema de avaliação (EN 15804).....	285
Tabela 8.13. Síntese da definição do enquadramento da análise ACV em estudo.....	285
Tabela 8.14. Inventário para ACV. Para todos os componentes a massa inicial baseia-se na quantidade de material usada para construir uma cobertura com superfície de 3000m <sup>2</sup> e um teto retrátil com superfície de 2000m <sup>2</sup> .....	286
Tabela 8.15. Resultados da avaliação ACV, considerando uma vida útil de 80 anos, para cada solução de cobertura. Resultados gerados com a ferramenta informática One Click LCA © (2015) copyright Bionova Ltd   Versão: 14.04.2018, Versão da base de dados: 7.4.....	286

Tabela 8.16. Comparação dos resultados ACV de cada solução de reabilitação segundo todos os indicadores de impacto.....	287
Tabela 8.17. Custos económicos estimados durante 80 anos de vida útil para o edifício com as diferentes soluções de cobertura. ....	289
Tabela 8.18. Tempo estimado e equipamentos necessários para a instalação das soluções de cobertura em análise. ....	289
Tabela 8.19. Quadro de avaliação multicritério para apoio à tomada de decisão da melhor solução para a abordagem de reposição – estruturação hierárquica a adotar no método AHP.....	291
Tabela 8.20. Resultados dos indicadores selecionados para avaliar a eficiência das soluções de reabilitação em estudo, numa abordagem de reposição, para um ciclo de vida de 80 anos.....	292
Tabela 8.21. Resultados da atribuição de pesos a cada critério e subcritério – cenário base.....	293
Tabela 8.22. Resultados da avaliação global de cada alternativa para o cenário base. ....	293
Tabela 8.23. Comparativa entre a solução de cobertura CV e CM (síntese) (adaptado de Vector Foiltec, 2012).294	
Tabela 8.24. Resultados da análise de sensibilidade. ....	295

## **CAPITULO 9**

Tabela 9.1. Análise dos pontos fracos e fortes, das oportunidades e ameaças às soluções de reabilitação em membrana. ....	298
---	-----

# Capítulo

# 01

## *Introdução*

O presente capítulo encontra-se dividido em oito secções, nas quais, e após o devido enquadramento (secções 1.1 e 1.2), é apresentado o problema de investigação, destinatários e objetivos (secções 1.3, 1.4 e 1.5). A metodologia de investigação adotada é explicada na secção 1.6 e conclui-se este capítulo descrevendo a estrutura desta tese (secção 1.7).

### **1.1. Enquadramento do tema**

Em menos de um século, a população mundial septuplicou (US Census Bureau, 2004) e o parque edificado aumentou para acompanhar esse crescimento. No entanto, essa expansão nem sempre foi ambientalmente eficiente (Juan *et al.*, 2009) e, por isso, a reabilitação de edifícios tem assumido um importante papel no panorama da atividade de construção. De acordo com estimativas publicadas, esta atividade tem crescido e em 2017 representou na Europa cerca de 51% do volume total de investimento (Euroconstruct, 2018). Na União Europeia (EU) a percentagem de edifícios construídos antes dos anos 90 é geralmente superior a 80%, o que enfatiza a importância deste setor (Itard *et al.*, 2008). Em Portugal existem 1.44 unidades habitacionais por agregado familiar e 38.1% dos edifícios necessitam de obras de reabilitação urgentes, sobretudo para melhorar o comportamento sísmico e o conforto higrotérmico (INE, 2011). Além disso, estamos a utilizar o nosso planeta para além da sua capacidade: segundo Ewing *et al.* (2018) estima-se que seriam necessários 1,7 planetas (Figura 1.1) para repor todos os recursos naturais esgotados<sup>1</sup>. A indústria da construção é uma atividade responsável por uma parcela significativa dos impactos ambientais negativos em termos de consumo final de energia (40% na UE), emissão de gases com efeito de estufa (50% na UE) e produção de resíduos (22% - 859.49 x 10<sup>6</sup> toneladas por ano na UE e 8.08 x 10<sup>6</sup> toneladas por ano em Portugal) e um elevado consumo anual de água (588 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> em Portugal) (OMHM, 2010; BPIE, 2011; Ferreira, Pinheiro & Brito, 2013).

Neste quadro, a UE tem vindo a estabelecer metas e a definir políticas com vista à preservação ambiental e racionalização dos recursos (CE, 2003; Diretiva 2010/31/EU, 2010). A procura de soluções para atingir estas metas no setor da construção passa por combinar a reabilitação do parque edificado existente com os princípios de construção sustentável, definidos por Kibert (2008) como “*a criação e gestão responsável de um ambiente construído saudável baseado na utilização eficiente de recursos e em princípios ecológicos*”. Contudo, os projetos de reabilitação são normalmente caracterizados por elevados níveis de incerteza e risco, devido à falta de informação e à complexidade das tarefas associadas (Lee & Gilleard, 2002). Por isso, são necessárias ferramentas adequadas para apoiar a tomada de decisão. Isso tem estimulado o surgimento de métodos concebidos para fornecer as melhores medidas de reabilitação e que integrem abordagens ambientais, económicas e funcionais, como é o caso do exemplo da abordagem adotada na presente tese.

Define-se reabilitação como o conjunto de ações que visam a melhoria das condições dos edifícios existentes do ponto de vista físico, funcional e ambiental (Genre, Flourentzos & Stockli, 2000), garantindo a preservação da identidade e valores culturais intrínsecos relevantes. A reabilitação de edifícios é em si um veículo para a sustentabilidade do ambiente natural, construído e socio-humano, na medida em que se enquadra, à escala do património edificado, na lógica de ciclo fechado – reutilizando o existente e transformando-o, sempre que necessário, por forma a dar continuidade à sua utilização e à eficaz correspondência às exigências renovadas.

---

<sup>1</sup> A data do de superação do planeta Terra é calculada comparando o consumo anual total da humanidade (Pegada Ecológica) com a capacidade da Terra de regenerar recursos naturais renováveis no anos em análise (bio capacidade). Um país só terá um dia de superação se a sua Pegada Ecológica por pessoa for maior que a bio capacidade global (1,68 gha). Os países cuja *Pegada Ecológica* por pessoa é inferior à bio capacidade global não têm um dia de superação e, portanto, não estão incluídos na Figura 1.1(a).

Para que tal seja possível, deve haver, à priori, quer em nova construção, quer na própria reabilitação, a preocupação de dotar as construções dessa capacidade de persistir e evoluir continuamente, optando por materiais e sistemas construtivos duráveis, reversíveis, reparáveis e polivalentes, para maximizar a compatibilização com futuras intervenções.

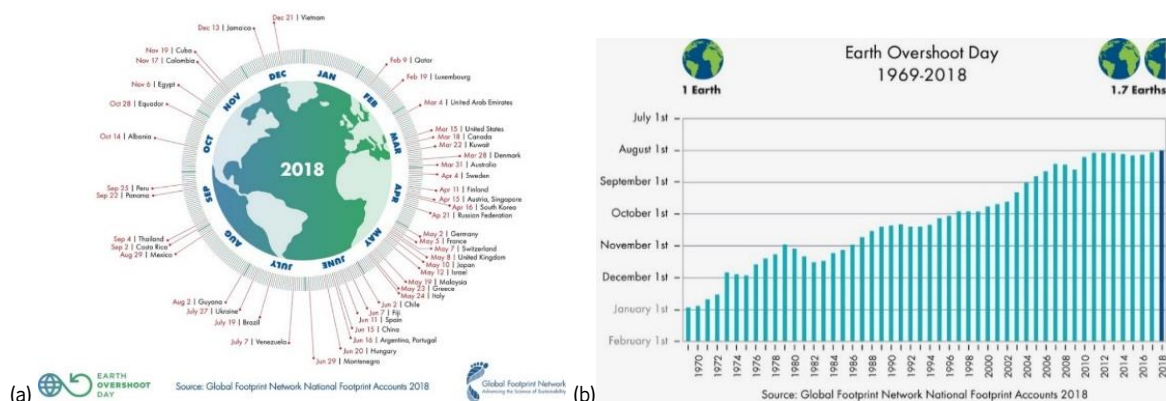


Figura 1.1. Data em que a pegada ecológica da humanidade esgotará os recursos do planeta Terra: (a) estimativa por país; (b) estimativa mundial entre 1969 a 2018. Fonte: Global Footprint Network (2018).

O parque edificado europeu caracteriza-se pela utilização de tecnologias construtivas com recurso a materiais maciços, pesados, caracterizados por elevadas espessuras, tanto em construções novas como na reabilitação de edifícios existentes. Mas as tendências atuais mostram que os estilos de vida estão a mudar e que os novos materiais estão a tornar-se cada vez mais importantes no sector conservador da construção. Entre estes materiais, as membranas arquitetónicas (têxteis, poliméricas e compósitas) assumem cada vez mais quotas de mercado (Ollenhauer, 2011). Durante muitos anos, estas têm sido utilizadas, principalmente, como membranas impermeáveis e revestimentos de paredes interiores. Contudo, recentemente estão a tornar-se o componente chave de fachadas inovadoras, sistemas de sombreamento e até elementos para a renovação estética, térmica e acústica, graças à flexibilidade, leveza e reduzida espessura destes materiais. Globalmente, a sua caracterização está a melhorar e o seu desempenho tem transformado a sua utilização, passando de uma simples camada de acabamento para um elemento integrador de múltiplas funções. Por exemplo, os novos materiais têxteis, denominados de “têxteis inteligentes”, podem ser funcionalizados, integrando na própria membrana conteúdos de alta tecnologia invisíveis a olho nu. Assim, as membranas tornam-se sensíveis, quase obtêm qualidades sensoriais, tornando-se recetivas à pressão, ao calor, aos sons, etc.

A necessidade de economizar recursos materiais e energéticos, aliada às preocupações ambientais e à incerteza na evolução da economia, induz a abordagens minimalistas na arquitetura e engenharia. Estas abordagens, denominadas por alguns autores de “Light-tech” (Horden, 1995) e “Eco-tech” (Slessor, 1997), apostam em soluções mais eficientes do ponto de vista mecânico e funcional. Mas nem sempre uma otimização mecânica corresponde a uma otimização funcional; por exemplo, a redução do peso traduz-se geralmente em problemas funcionais. Um edifício com soluções leves, devido à reduzida massa térmica e insuficiente isolamento acústico, pode ser problemático do ponto de vista do conforto. Mas se estes problemas forem solucionados, podem ser soluções interessantes do ponto de vista da sustentabilidade (Almeida *et al.*, 2005; Mendonça, 2005). Segundo Mendonça (2005) a estratégia de integrar elementos com massa térmica não convencional, ou combinar elementos pesados e leves pode obviar este problema. O contributo destas estratégias neste contexto será alvo de avaliação, pois o desempenho dos edifícios existentes a reabilitar (com soluções construtivas geralmente pesadas) pode ser complementado com membranas arquitetónicas (leves).

Aumentar a eficiência energética na fase de utilização dos edifícios é o maior desafio da atualidade, normalmente referida ao consumo de energia (não renovável) para utilizar o edifício. Mas também temos de nos focar no consumo de energia e impacto ambiental dos materiais e processos tecnológicos utilizados nos edifícios, desde a sua produção à reciclagem ou aterro. Isto significa adicionar o tema da escassez de recursos e desperdícios.

Comparado com outros ramos da indústria, o setor de construção ainda carece de eficiência e racionalização no uso de materiais. Segundo Cremers (2013), a taxa de reciclagem total neste setor é muito baixa. Por isso, é necessário estudar alternativas aos materiais e processos construtivos convencionais. Deste modo, na presente tese propõe-se avaliar a eficiência de soluções alternativas com membranas - comparativamente a soluções convencionais – considerando, para além dos aspetos funcionais, vários outros aspetos, como os de impacto ambiental.

Relativamente à indústria da construção com membranas arquitetônicas, assiste-se a uma ambivalência crítica. Por um lado, utilizam-se polímeros que consomem grandes quantidades de energia na sua produção, associada a elevadas emissões poluentes de alguns materiais que compõem as membranas e que podem apresentar perigo para o ambiente e para os utilizadores. Por outro, as membranas possuem potencial para integrar sistemas construtivos e torná-los mais eficientes, com maiores poupanças energéticas, uma vez que utilizam materiais em reduzida quantidade, o que permite minorar o impacto ambiental associado à fase de construção e até obter ganhos energéticos na fase de utilização.

Na última década, as indústrias têxtil e de polímeros têm investido no desenvolvimento de materiais têxteis técnicos e avançados (onde se incluem as membranas arquitetônicas) que ainda não foram significativamente implementados na construção civil com o aproveitamento de todas as suas potencialidades. Exemplos destes desenvolvimentos são: as membranas têxteis utilizadas na reabilitação de edifícios (proporcionando funções de reforço e monitorização) e as membranas compósitas de elevado desempenho à tração utilizados em sistemas avançados de cobertura para grandes áreas. No entanto, apesar dos benefícios mencionados, muitos profissionais do setor da construção não estão familiarizados com o comportamento e as características desses materiais. A falta de informação sobre o uso e as propriedades destes materiais, tanto para os profissionais projetistas como instaladores, limita a sua capacidade para alcançar elevados padrões na garantia da qualidade e gestão da construção. Além disso, para estes materiais de elevado desempenho, os atuais códigos ou regulamentos de construção podem não aplicar-se; aliás, novos códigos/especificações/diretrizes para a conceção, dimensionamento, construção e teste encontram-se em desenvolvimento.

Em estudos anteriores (Macieira, 2012; Llorens & Zanelli, 2016; Macieira, Mendonça & Guedes, 2017) verificou-se que existem soluções construtivas com materiais em membranas com potencial para a reabilitação funcional de edifícios. No entanto, existe a necessidade de avaliar e promover essas potencialidades junto de todos os intervenientes no processo de reabilitação, através da descrição do processo construtivo e da respetiva avaliação funcional, ambiental e económica e de avaliações multicritério da eficiência relativa das soluções de reabilitação com membranas, comparativamente às soluções convencionais de referência.

Pela leveza, reversibilidade e neutralidade formal de tecnologias construtivas com membranas arquitetônicas, estas podem ser úteis em intervenções sobre edifícios existentes, nomeadamente em ampliações, renovações ou alterações. Enquanto paredes divisórias, tetos falsos, ou revestimentos, as membranas apresentam espessuras reduzidas (menos de 1 mm) permitindo grandes ganhos de área/volume útil, uma vantagem a considerar em espaços residenciais a reabilitar que, por inerência, estão condicionados às condições existentes. A solução Adjustmembrane (Mendonça & Macieira, 2013) e a solução “Aerogel-based textile wallpaper” (Masera *et al.*, 2017) resultantes de projetos de investigação, entre outras, constituem exemplos deste tipo de aplicações.

Existem soluções que permitem tensionar membranas sobre superfícies existentes adicionando apenas um centímetro de espessura (permitindo ocultar imperfeições presentes nas superfícies existentes causadas pela retração das argamassas, presença de humidade, etc.) (Macieira, 2012). Segundo Mollaert *et al.* (2003), adicionando uma membrana no interior de um espaço existente, é possível ter uma solução de reabilitação térmica e acústica. Este foi o caso da reconversão de um edifício industrial num bloco de escritórios (arquitetos Thomas Herzog e José Moro, 1997); o revestimento interior, com duas camadas de membrana PTFE transparente, melhorou o conforto interior sem reduzir a iluminação natural.

Kawaguchi (2015) realizou investigação sobre a segurança dos ocupantes, um outro aspeto funcional importante, em edifícios de grandes vãos. Apontando os riscos associados aos tetos falsos em eventos sísmicos, propôs a utilização de tetos em membrana em vez de placas de gesso cartonado. Este dado é revelador da



importância destas soluções em cenários de reabilitação, bem como de construção nova. Pressupõe-se que as soluções não estruturais em membrana, como os tetos falsos (Kawaguchi, 2015; Ogi *et al.*, 2012) e as divisórias em membrana (Macieira, 2012; Mendonça *et al.*, 2014), tensadas entre as lajes de teto e pavimentos rígidos, podem garantir maior proteção/redução dos riscos para os ocupantes de um espaço interior em caso de sismo, pois as soluções mais rígidas, em caso de rotura, podem projetar material pesado para fora do seu plano.

Além dos exemplos referidos, a inovadora aplicação de membranas em soluções de reabilitação térmica de fachadas, como se apresenta, por exemplo, nos projetos de reabilitação do edifício da EDF (concebido por Jean-Paul Viguier & associados, 2008) e de uma casa em Munique (concebido pelo arquiteto Stefan Krötsch, 2012) constituem exemplos de alternativas às soluções convencionais de reabilitação energética de fachadas. Além disso, o estudo de Monticelli, Zanelli & Campioli (2013) também evidencia uma redução do impacto ambiental associado a este tipo de soluções.

Na presente tese, apresenta-se a avaliação da eficiência de soluções de reabilitação funcional com membranas em três abordagens arquitetónicas: de integração (encerramento de varandas existentes/ampliação horizontal/integração de espaços solares); de sobreposição (ampliação vertical) e de reposição (de um teto e cobertura).

## 1.2. Motivação

A atual e crescente importância atribuída ao impacto ambiental leva os projetistas a combinar o uso de materiais energeticamente eficientes com soluções técnicas que maximizem a poupança de recursos. Com a necessidade de uma gestão cada vez mais prudente e eficiente, torna-se fundamental determinar quais as alternativas disponíveis. Perante este cenário, o presente estudo debruça-se sobre a avaliação da eficiência do emprego de materiais em membrana em soluções de reabilitação funcional de edifícios (Figura 1.2), de modo a determinar se as soluções com estes materiais constituem uma alternativa ambiental, económica e funcional às soluções convencionalmente utilizadas. Esta investigação é particularmente premente, dado que a promoção de soluções com membranas, para a melhoria do desempenho funcional de edifícios existentes, encontra-se em desenvolvimento e requer discussão e validação enquanto alternativa às soluções convencionais.

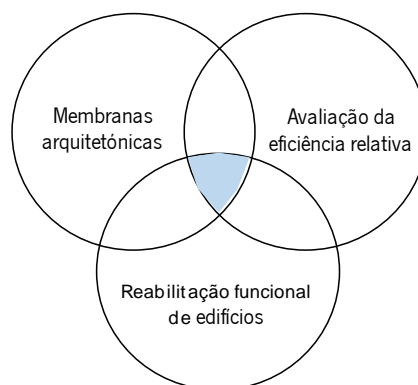


Figura 1.2. Principais áreas de investigação da tese.

## 1.3. Problema de investigação/questões da tese

Quando existem, limitações económicas, estruturais, funcionais e/ou ambientais ao uso de materiais convencionais, é necessário encontrar alternativas. Com este estudo pretende-se analisar as tendências atuais e apontar desenvolvimentos futuros para soluções eficientes, sobretudo ao nível funcional, mas também ambiental, económico, construtivo e de proteção/mitigação de risco, com vista a uma maior sustentabilidade das ações de reabilitação.

Esta tese centra-se na avaliação da eficiência de soluções construtivas com membranas arquitetónicas adequadas à reabilitação funcional de edifícios. Sumariamente, entende-se por: (i) reabilitação funcional – intervenção num edifício de modo a melhorar ou repor o seu desempenho funcional (associado a aspetos de utilização, espaciais, de conforto e energéticos); (ii) membranas arquitetónicas - material fibroso ou em película, flexível, com reduzida espessura em relação à sua área superficial e que apenas apresenta estabilidade através

de forças de tensão; (iii) eficiência<sup>2</sup> - relação entre a quantidade de recursos empregues (mínima) e as melhorias obtidas tendo em conta um objectivo desejável (máximo).

A arquitetura têxtil tem uma longa tradição para diferentes aplicações em várias condições ambientais. As suas vantagens, tais como permitirem construções leves e de rápida execução, adequam-na a aplicações complexas, como coberturas com grandes vãos, nomeadamente sobre estruturas de edifícios existentes (com requisitos e constrangimentos especiais), até simples abrigos de emergência. O facto de ser, em geral, uma construção de camada única resulta em fracas qualidades físicas, nomeadamente em défices de isolamento térmico ou acústico.

Considerando o desafio de ter propriedades físicas (higrotérmicas e acústicas) semelhantes às das construções convencionais, nesta tese avaliam-se algumas possibilidades de soluções não convencionais para melhorar o desempenho das soluções de reabilitação com membranas. Através de três cenários/casos de estudo, serão exploradas essas alternativas nas seguintes abordagens (Figura 1.3): 1) integração; 2) sobreposição e 3) reposição. A sequência de apresentação dos casos de estudo reflete uma progressão na complexidade e escala de intervenção. A introdução gradual de aspetos mais complexos é feita do capítulo 6 ao capítulo 8. Por exemplo, no capítulo 6 introduz-se os aspetos de complementaridade das soluções em membrana com as construções existentes (explorando o desempenho solar passivo); no capítulo 7 abordam-se os aspetos construtivos e tecnológicos (de reversibilidade) e de desempenho termo energético em intervenções de ampliação vertical; e no capítulo 8 introduzem-se aspetos formais, estruturais, acústicos e lumínicos em intervenções de reposição de cobertura sem adição significativa de massa. Em todos os casos de estudo, a investigação será conduzida analisando aspetos ligados a: economia; desempenho funcional; tecnologia e processo construtivo; e impacto ambiental.

O objetivo é estabelecer uma abordagem e análise orientada para demonstrar o potencial das intervenções de reabilitação que empregam materiais de membrana, como soluções eco-eficientes. A redução de peso através do uso da quantidade mínima necessária de material é uma forma de alcançar a ecoeficiência, facilitar a reciclagem, a reutilização e a flexibilidade (Brand 1994) (Berger 1996). Atualmente, os materiais de membrana podem satisfazer requisitos de durabilidade, resistência mecânica, propriedades lumínicas e outros aspetos que podem ser explorados em intervenções de reabilitação, dos quais, arquitetos e engenheiros podem tirar partido numa abordagem sustentável.

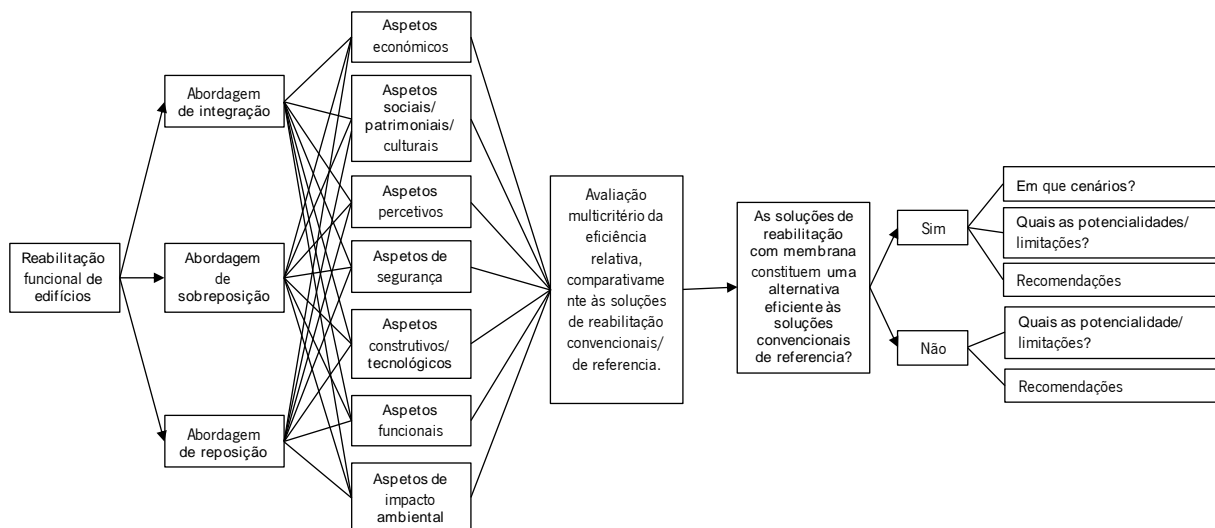


Figura 1.3. Organograma com os objetivos da tese.

<sup>2</sup> Segundo OECD (2002) define-se como a relação entre os resultados desejáveis - qualitativos e quantitativos - e os dados de entrada; utilização da menor quantidade de recursos para alcançar os resultados desejados; alcançar os melhores resultados com emprego mínimo de recursos. Geralmente, para determinar a eficiência é necessário comparar abordagens alternativas para alcançar os mesmos resultados, de modo a garantir que o processo mais eficiente foi adotado.

Consideram-se como questões fundamentais desta tese as seguintes:

**Q1:** *Quais os aspetos avaliados que mais beneficiam/penalizam a eficiência das soluções em membrana? Quando é que as soluções com membranas arquitetónicas constituem uma alternativa eficiente para a reabilitação de edifícios, relativamente às soluções convencionais?*

**Q2:** *Qual a eficiência relativa das soluções de reabilitação com membranas?*

As questões suplementares, para as quais se vai obtendo resposta ao longo da tese, as quais orientaram a revisão de literatura e o processo de seleção dos casos de estudo das soluções construtivas a avaliar foram as seguintes:

- Q ii O que é reabilitação funcional no âmbito deste estudo?
- Q iii Qual o retrato do mercado da reabilitação em Portugal e na União Europeia?
- Q iiiii Quais os atuais e futuros desafios para a reabilitação funcional de edifícios?
- Q ivi O que são membranas arquitetónicas?
- Q vi Qual o retrato do mercado dos têxteis técnicos (onde se inserem as membranas arquitetónicas)?
- Q vii Qual o retrato geral das construções com membranas?
- Q viii Qual é a perceção geral dos instaladores de soluções construtivas com membranas?
- Q viiii Quais as suas potencialidades e limitações?
- Q xix Qual o retrato do estado do conhecimento e das aplicações de membranas em soluções de reabilitação funcional de edifícios? Quais as lacunas existentes e que investigações existem em curso?
- Q xi Como pode ser estimulado o uso de membranas arquitetónicas em intervenções de reabilitação funcional? Que as abordagens/cenários devem ser avaliadas?
- Q xii Como avaliar a eficiência em contexto de reabilitação funcional?
- Q xiii Que soluções alternativas propor para os casos de estudo selecionados? Quais as recomendações para o desenho destas soluções?
- Q xiiii Que tecnologias de reabilitação com membranas têm potencial para alcançar uma redução significativa no consumo de energia na fase de utilização dos edifícios existentes, para climatização e/ou iluminação artificial? E para melhorar o desempenho acústico?
- Q xivi Em que medida a utilização destas soluções de reabilitação beneficiam o edifício existente?

#### **1.4. Destinatários da investigação**

Existem algumas vantagens diretas na utilização de soluções de reabilitação com membranas arquitetónicas. Permitem: reduzir a energia incorporada, pela utilização de material em menor quantidade; reduzir os custos de transporte para o local de intervenção; reduzir os resíduos resultantes das atividades de reabilitação; aumentar a produtividade em obra; e facilitar a gestão do estaleiro em espaços normalmente exíguos e complexos. Tendencialmente, os custos são reduzidos, devido ao menor tempo de construção dispensado, à simplificação dos processos e à menor necessidade de utilização de equipamentos auxiliares e andaimes.

Para a indústria, o conhecimento das potencialidades em estudo e o acesso aos resultados da análise funcional, económica e de impacto ambiental das soluções de reabilitação com membranas arquitetónicas, comparativamente às soluções convencionais, pode motivar o desenvolvimento, produção e implementação de muitos dos materiais e componentes destas soluções no mercado nacional, diminuindo o recurso à importação, já que o transporte tem peso importante no custo final. Também o público em geral e os profissionais relacionados com o setor da reabilitação de edifícios podem beneficiar positivamente dos resultados desta tese.

#### **1.5. Objetivos**

O objetivo geral desta tese é o de avaliar teórica e experimentalmente, através de casos de estudo, a eficiência relativa do emprego de soluções de reabilitação com membranas. Para tal, pretende-se conceber um modelo multicritério de apoio à tomada de decisão no desenho de soluções de reabilitação, que permita determinar e comparar a eficiência de soluções de reabilitação com membranas com soluções convencionalmente utilizadas em intervenções de reabilitação.

Os objetivos específicos desta tese são: (1) retratar o estado do conhecimento acerca da reabilitação com membranas, com o inventário de soluções de reabilitação existentes; (2) categorizar os tipos de abordagens arquitetónicas para a reabilitação funcional de edifícios e propor as soluções mais adequadas com membranas arquitetónicas; (3) mapear pormenores construtivos; (4) encontrar os critérios importantes para focar a avaliação da eficiência neste tipo de intervenções; (5) avaliar individualmente os critérios quantitativos (económicos, funcionais, construtivos e ambientais), através de ensaios experimentais e/ou numéricos, e qualitativos (perceptivos, de segurança, sociais/patrimoniais) através de inquérito ao grupo de decisão; (6) analisar abordagens arquitetónicas de reabilitação funcional com membranas; (7) propor soluções alternativas com membranas; (8) desenvolver um modelo de avaliação da eficiência relativa dessas alternativas; (9) selecionar casos de estudo nacionais - cenários de reabilitação funcional de edifícios; (10) implementar o modelo de avaliação da eficiência através de exercícios com casos de estudo para as abordagens arquitetónicas identificadas no estado da arte (integração, sobreposição e reposição); (11) validar as escolhas, nomeadamente verificar se as soluções em membrana constituem alternativas eficientes às soluções de reabilitação convencionais e, formular recomendações para trabalhos futuros e para os agentes do setor da reabilitação de edifícios.

### **1.6. Metodologia de investigação**

A hipótese desta tese é que a implementação de soluções com membranas em intervenções de reabilitação funcional é ainda reduzida, não devido à sua falta de eficiência, mas à falta de conhecimento sobre a sua real eficiência neste contexto.

O diagrama apresentado na Figura 1.5 apresenta uma visão global da metodologia adotada nesta tese. O primeiro passo consistiu em definir as questões de investigação (ver secção 1.3) para orientar a revisão de literatura e o processo de seleção dos casos de estudo das soluções construtivas a avaliar.

Considerando o problema e os objetivos enunciados, a metodologia adotada nesta tese compreende as seguintes ações:

1. Retratar o estado do conhecimento sobre o setor da reabilitação e das membranas arquitetónicas - através de revisão da literatura, consulta de bases de dados estatísticos e inquéritos sobre a perceção geral das empresas nacionais e internacionais que executam soluções construtivas com membranas;
2. Retratar a reabilitação funcional com membranas e classificar abordagens arquitetónicas dominantes por elemento construtivo - através de revisão da literatura, consulta de bases de dados, recolha, inventário e análise de projetos, de modo a constituir um retrato sobre reabilitar com membranas;
3. Investigar como se processa a conceção e execução de soluções de reabilitação, em geral, e com membranas em particular; aferir potencialidades e limitações;
4. Construir um modelo multicritério de apoio à tomada de decisão, para avaliar a eficiência relativa das soluções de reabilitação com membranas - através de revisão da literatura sobre os métodos de avaliação multicritério no apoio à tomada de decisão em cenários de reabilitação e de análise de sensibilidade;
5. Identificar que critérios são relevantes para a avaliação - através de revisão da literatura e de inquérito (pelo processo de análise hierárquico - (AHP)) ao grupo de decisores estabelecido para cada caso de estudo;
6. Selecionar e caracterizar os casos de estudo (em Portugal) para implementar o modelo de avaliação referido - através de revisão da literatura, registo fotográfico e levantamento arquitetónico;
7. Propor soluções de reabilitação com membranas, alternativas às convencionais - através de revisão de tecnologias emergentes e correntes, com uma abordagem concetual e algum detalhe construtivo;
8. Avaliação individual de critérios quantitativos (relativo a aspetos económicos, funcionais, construtivos e de impacto ambiental) para cada solução em estudo - através de ferramentas para ensaios numéricos e/ou experimentais, consulta de publicações científicas e de bases de dados;
9. Avaliação individual de critérios qualitativos - através de inquérito AHP ao grupo de decisores;
10. Avaliação da eficiência relativa de cada solução de reabilitação para um cenário base - através do modelo multicritério proposto no ponto 3 e 4 e de ferramentas informáticas de apoio à decisão;

11. Avaliação da eficiência relativa de cada solução de reabilitação para variantes do cenário base, considerando a atribuição de outras ponderações para a importância de cada critério definido – através de análise de sensibilidade;
12. Discussão dos resultados – através de análise comparativa.

O trabalho de investigação que deu origem a esta tese compreendeu as seguintes etapas fundamentais: análise do estado do conhecimento (Etapa 1); avaliação e estudo comparativo da eficiência relativa das soluções de reabilitação com membranas (Etapa 2) e disseminação (Etapa 3). A Etapa 1 compreendeu a análise do estado do conhecimento sobre o setor da reabilitação de edifícios, identificando necessidades e tendências, e sobre os materiais em membrana e as suas aplicações em intervenções de reabilitação de edifícios, através do inventário de tecnologias e projetos existentes e em desenvolvimento - identificando potencialidades e limitações/tendências. A Etapa 2 propôs abordagens/soluções arquitectónicas distintas (pela escala e complexidade, identificadas no estado da arte -Tabela 1.1) de reabilitação funcional, aplicadas em três casos de estudo<sup>3</sup>/testes para avaliação da sua eficiência relativa<sup>4</sup> através de ensaios numéricos e experimentais e de um modelo multicritério. Por fim, a Etapa 3 compreendeu a disseminação de resultados, através da produção desta tese e de artigos científicos revistos por pares da comunidade científica e de recomendações/propostas para desenvolvimentos futuros.

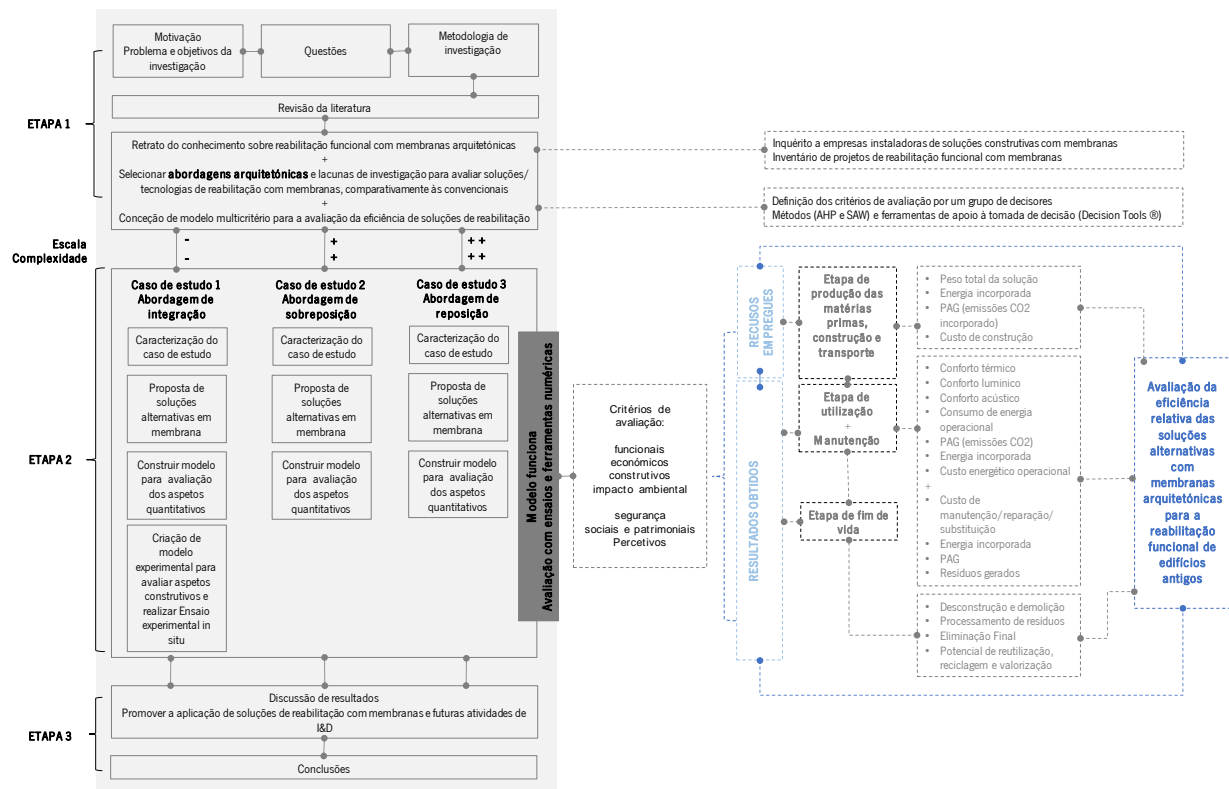


Figura 1.4. Fluxograma da metodologia adotada nesta tese.

<sup>3</sup> Como premissa da presente tese, os casos de estudo selecionados encontram-se em território nacional (Portugal). Pois, o facto de se encontrarem em território nacional facilitou a recolha de informação sobre os mesmos e, em alguns casos, permitiu a realização de ensaios experimentais *in situ*, de modo a aumentar a confiança nos resultados de ensaios numéricos. Os edifícios tomados como casos de estudo foram selecionados por apresentarem diferentes escalas e induzirem diferentes níveis de complexidade de intervenção.

<sup>4</sup> Ou seja, comparativamente às soluções identificadas como convencionais (ou de referência, por serem correntemente utilizadas).

Tabela 1.1. Visão global dos casos de estudo selecionados para avaliar a eficiência das soluções com membranas propostas.

	Abordagem arquitetónica da intervenção		
	Teste 1 - Integração	Teste 2 - Sobreposição	Teste 3 - Reposição
<b>Objetivo:</b>	Integração de elemento não estrutural transparente para encerrar varandas em edifícios antigos.	Ampliação vertical sobre edifício com limitações estruturais.	Reposição de cobertura e teto abobadado sem adição significativa de massa num edifício classificado como património.
<b>Escala da intervenção</b>	<b>Pequena</b>	<b>Média</b>	<b>Grande</b>
<b>Gradação da intervenção:</b> <b>Aspetos para avaliar a eficiência da solução proposta:</b>	Ligeira	Média/profunda	Excepcional
	Económicos; patrimoniais e culturais; sociais; segurança (mitigação de riscos para os ocupantes); construtivos; funcionais e impacto ambiental (ACV e potencial de adaptação às alterações climáticas).		

### 1.6.1. Resultados expectáveis

Em síntese, espera-se obter: (1) um inventário com um conjunto de projetos de reabilitação realizados com membranas e a respetiva análise deste conjunto e (2) a avaliação da eficiência relativa de soluções de reabilitação com membranas através de uma abordagem multicritério. A abordagem multicritério adotada deve ajudar a manter uma visão global de cada solução, por parte dos agentes de tomada de decisão, evitando que uma solução seja eliminada apenas com base num único critério de desempenho.

Existem poucos estudos sobre o tema da avaliação da eficiência de soluções com membranas; a maioria incide sobre construções novas. Esses estudos apontam as potencialidades das soluções construtivas com membranas, que são avaliadas na presente tese em contextos de reabilitação funcional de edifícios.

### 1.6.2. Limitações

A avaliação é feita para cenários de reabilitação de edifícios localizados apenas em território nacional (Portugal) e para um número finito de alternativas. Contudo, os princípios fundamentais, provavelmente, também serão válidos noutros países e a expectativa é que mais alternativas possam ser adicionadas ao modelo de avaliação proposto.

## 1.7. Organização da tese

A presente tese encontra-se organizada em nove capítulos (Figura 1.5) que integram as três etapas metodológicas fundamentais referidas anteriormente (Figura 1.4): análise do estado do conhecimento (Etapa 1), avaliação da eficiência (Etapa 2) e disseminação dos resultados (Etapa 3).

O presente capítulo faz uma breve abordagem ao tema desta tese e ao seu enquadramento, indicando o problema de investigação, os objetivos; a metodologia de investigação, a estrutura da tese, os destinatários da investigação.

O segundo e terceiro capítulos apresentam uma revisão do conhecimento. Abordam conceitos teóricos considerados fundamentais para a compreensão do trabalho que se segue, quer sobre o panorama da reabilitação de edifícios, em especial a reabilitação funcional, em Portugal e na Europa, quer sobre membranas arquitetónicas.

O quarto capítulo debruça-se sobre a reabilitação funcional com membranas, através da análise de um inventário de projetos realizados e do retrato das tendências mais relevantes de aplicação de soluções de reabilitação com membranas. Identificam-se as abordagens arquitetónicas relevantes no âmbito da reabilitação com membranas e definem-se os casos de estudo sobre os quais se implementará o modelo de avaliação proposto no capítulo seguinte.

O quinto capítulo apresenta o modelo multicritério proposto para a avaliação da eficiência relativa das soluções de reabilitação em estudo e os respetivos critérios. Inclui ainda uma revisão sobre os modelos de auxílio à tomada de decisão multicritério em cenários de reabilitação, bem como os pressupostos assumidos para a implementação do modelo adotado nos capítulos seguintes.

Os sexto, sétimo e oitavo capítulos aplicam o modelo proposto no capítulo cinco. Apresentam os casos de estudo e as soluções de reabilitação alternativas (com membranas) e as convencionais. Caracterizam e descrevem, em

detalhe, todos os ensaios experimentais e/ou numéricos efetuados e os resultados obtidos para os parâmetros medidos e que se relacionam com: aspetos funcionais, de impacto ambiental, económicos e tecnológicos/construtivos. Finalmente, efetuam uma análise comparativa entre as várias soluções estudadas, apresentam os resultados da avaliação da eficiência e propõem melhorias nas soluções.

O nono capítulo expõe as principais conclusões da tese. Responde às questões apresentadas no primeiro capítulo e apresenta perspetivas de trabalhos futuros.

Por último são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

Os anexos são dedicados sobretudo à apresentação dos cerca de 70 projetos de reabilitação com membranas analisados no Capítulo 4, bem como à análise detalhada dos aspetos tecnológicos/construtivos das soluções de reabilitação implementadas nos projetos analisados nesse capítulo.

**01** INTRODUÇÃO



Figura 1.5. Esquema de organização da tese.

## Capítulo

# 02

### *Reabilitação de edifícios*



*Figura 2.1. Solução de cobertura em membrana ETFE para projeto de reabilitação da igreja de Corbera d'Ebre, projetada pelo arquiteto Ferran Vizoso (Designboom, 2015).*

*Reabilitação define-se como uma intervenção, neste caso, sobre uma construção com o objetivo de dotá-la de níveis de desempenho que permitam o seu uso em condições de conforto e segurança (pré) estabelecidas e, simultaneamente, preservem os seus valores materiais e imateriais (construtivos, arquitetónicos, históricos, culturais, etc.) significativos/identitários.*

*O presente capítulo faz um enquadramento do panorama da reabilitação de edifícios. Apresenta uma visão global sobre: princípios e recomendações para a reabilitação; o estado de conservação do parque habitacional e a evolução do setor da reabilitação em Portugal e na Europa; perspetivas e desafios do segmento da reabilitação. Explora sobretudo a visão da reabilitação enquanto veículo para a sustentabilidade, incidindo na procura de soluções eficientes enquadradas em ações de reabilitação funcional. Para além disso introduz alguns dos conceitos relativos aos processos de reabilitação de edifícios com pertinência para este estudo, sobretudo no que concerne à reabilitação funcional de edifícios.*



## 2.1 Definição de reabilitação

Da etimologia da palavra, entende-se que reabilitar consiste em devolver a *habilidade de*, ou seja, restituir ao edifício existente a sua aptidão e capacidade de corresponder às necessidades e expectativas que a sua utilização e respetivos utilizadores lhe impõem.

Entre os termos *recuperação, renovação, revitalização, restauro, requalificação, reparação, reforço, reestruturação e reabilitação*, o conceito chave é o de reabilitação, que tem por base as noções de utilidade ou função. Neste sentido, uma intervenção de reabilitação num edifício existente pode ir da *resolução das anomalias construtivas* à atualização do desempenho técnico-funcional, energético-ambiental e às alterações espaço-funcionais que permitam a reutilização do edifício para o mesmo uso (mas cujas necessidades se alteraram) ou para uma nova função. Entende-se, assim, que uma operação de reabilitação pode englobar intervenções de demolição ou ampliação, além das já referidas (restauro, reforço, reconstrução, reconversão, *etc.*) consideradas necessárias à referida habilitação do edifício para acolher uma qualquer atividade.

Reabilitar é também, segundo as *Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitetónico*, o “*processo para adaptar uma construção a um novo uso ou função, sem alterar as partes da construção que são significativas para o seu valor histórico*” (ICOMOS, 2003). O termo reabilitação surge, no âmbito da “*conservação integrada*”, na Carta Europeia do Património Arquitetónico (Conselho da Europa, 1975) e na Resolução 76(28) como a ação que permite resolver o problema da intervenção sobre edifícios correntes que, do ponto de vista da conservação, não podiam ser encarados como monumentos. Este conceito implicava “*reabilitar edifícios, particularmente os destinados a habitação, renovando as suas estruturas internas, adaptando-a às necessidades da vida moderna, mas preservando cuidadosamente os seus valores com significado cultural*”, ou seja, atualizar o desempenho através da adaptação dos edifícios e integrando os valores existentes. As questões do valor e do significado cultural estão também ligadas aos conceitos de identidade e autenticidade, tal como expressos no *Documento de Nara* (ICOMOS, 1994) e são indissociáveis do próprio conceito de reabilitação.

A intervenção em edifícios antigos é uma operação altamente complexa, desde logo porque os materiais e sistemas construtivos tradicionais (o seu comportamento e a vasta fenomenologia que está na origem das anomalias) não são de fácil domínio em formações mais generalistas, implicando a intervenção de vários especialistas (Teixeira, 2013). Trata-se pois de uma atividade pluridisciplinar por excelência.

A ideia de um conceito de reabilitação amplo é perceptível na definição do termo *renovação* de Thomsen & Filer (2008) enquanto processo de transformação das características físicas, funcionais, económicas, arquitetónicas e ecológicas de um produto da construção, ou do projeto para realizar uma extensão abrangente e útil do ciclo de vida. Aumentar o ciclo de vida do edifício e, simultaneamente, adaptá-lo às funções a que está destinado são os objetivos principais da reabilitação. A reabilitação não só requalifica e reutiliza um espaço, como também possibilita um menor consumo de materiais e energia, quando comparada com a fase de construção de uma construção nova de raiz (Wald *et al.*, 2015).

Ao nível internacional, a *renovação*<sup>1</sup> do edificado é um dos fatores-chave da eficiência energética e tem ganho cada vez mais importância na UE, existindo uma vasta bibliografia recente neste âmbito, onde o termo *renovação* é muitas vezes adotado como termo genérico para referir a intervenção no edificado (segundo requisitos energéticos, entre outros), com vista a uma eficaz e sustentável extensão do ciclo de vida das construções.

A Tabela 2.1 procura sistematizar as possibilidades de intervenção no edificado existente, segundo níveis de intervenção e respetivos níveis de transformação, dispondo os termos tal como são entendidos neste trabalho, em função da revisão da literatura realizada e da informação que se julgou ser mais relevante na construção dos conceitos.

<sup>1</sup> Não obstante, é também frequente o emprego dos termos *reabilitação* e *requalificação* entre outros.

Tabela 2.1. Conceitos associados à reabilitação.

<p><b>REABILITAÇÃO</b></p> <p>Conceito restrito: trabalhos de reparação de anomalias (patologias construtivas); trabalhos de simples beneficiação; pequenos trabalhos de manutenção periódica de conservação pelo menos uma vez em cada período de oito anos.</p> <p>Conceito amplo: melhoria das características de desempenho funcional, estrutural e construtivo das estruturas e edifícios intervenionados; novas aptidões funcionais; novos usos; padrões mais elevados de desempenho.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ampliação:</b> entende-se como uma operação de aumento da área/volume útil inicial do edifício. Segundo o Instituto Nacional de Estatísticas (INE) (ECH, 2015) constitui uma ampliação a obra da qual resulte o aumento da área de pavimento ou de implantação, da cêrcea ou do volume de uma edificação existente.</li> <li>• <b>Alteração:</b> refere-se ao trabalho produzido na construção que não se enquadra na manutenção ou na reparação e cujo objetivo é modificar o existente, podendo afetar a estrutura resistente do edifício e/ou o layout interior e a sua aparência. Segundo o INE (ECH, 2015) constitui uma alteração a obra de que resulte a modificação das características físicas de uma edificação existente ou sua fração, designadamente a respetiva estrutura resistente, o número de fogos ou divisões interiores, assim como a natureza e a cor dos materiais de revestimento exterior, sem aumento da área de pavimento, implantação ou cêrcea.</li> <li>• <b>Renovação:</b> segundo Douglas (2006), consiste no redesenho e reconstrução de um componente existente de modo a incorporar novas tecnologias, para dar resposta a novos requisitos ou para adicionar funções que não estavam contempladas no projeto original (Iselin et al., 1993). Em alguns casos corresponde à reposição de componentes do edifício com novos componentes que não existiam na data de construção existente (Ashworth, 1997 apud Douglas, 2006).</li> <li>• <b>Reconstrução:</b> entende-se mais como uma operação associada ao desenho/conceção, do que ao objeto construído. Neste sentido, pode-se entender que o desenho pode ser reconstruído baseado em evidências, ou em documentos, ou em ambos, fazendo-se a reposição parcial ou total dos elementos, seguindo o desenho original. É utilizado normalmente para colmatar o desaparecimento de partes significativas da construção original, quando se torna importante a sua reposição.</li> <li>• <b>Reforço:</b> é uma intervenção a realizar para aumentar a capacidade estrutural ou de desempenho funcional (acústico, higratérmico, etc.) de uma construção.</li> </ul>
--

## 2.2 Princípios/recomendações para intervenções de reabilitação

Qualquer intervenção em património edificado, sobretudo quando dotado de valores particulares que interessa preservar, deve apoiar-se num conjunto de princípios que estão expressos em cartas e convenções doutrinárias. Os pontos seguintes elencam recomendações/princípios retiradas das *Cartas Doutrinárias* para a análise, conservação e reabilitação do património arquitetónico, que são transversais a qualquer intervenção, independentemente de esta incidir sobre um edifício em que o valor patrimonial tenha ou não sido consagrado pela legislação:

- deve respeitar-se a autenticidade das construções;
- deve ser possível identificar os novos elementos de forma clara e imediata;
- deve fazer-se uma aferição prévia do valor histórico, cultural e tecnológico do edifício;
- evidências de caráter histórico detetadas no decorrer da intervenção não devem ser removidas ou alteradas, devendo garantir-se o respeito pelo seu valor cultural, assim como defender a sua integridade física e a possibilidade de acesso futuro (quando não estão visíveis);
- devem adotar-se de soluções com o mínimo de intrusão;
- deve promover-se a adaptação da função às características do espaço e do edifício (qualquer intervenção deve respeitar as características tipológicas e morfológicas que marcam a arquitetura do lugar onde incide e integrar-se de forma harmoniosa no mesmo);
- todas as operações de reabilitação devem assegurar condições básicas de higiene, saúde e conforto, proporcionando a adequada qualidade ambiental imprescindível para o uso atual dos diferentes tipos de edifícios como habitação, assim como garantir as imprescindíveis condições de segurança: estrutural, de segurança ao incêndio, contra intrusões, etc. e no uso normal;
- quanto maior for o grau de profundidade de uma intervenção de reabilitação, maior deve ser o grau de conformidade com as exigências impostas nos atuais regulamentos da construção, assim como o grau de satisfação dos padrões qualitativos exigíveis para uma edificação;
- deve atribuir-se ao edifício um destino funcional socialmente útil;
- deve privilegiar-se a recuperação de processos/técnicas antigas (a utilização de técnicas tradicionais ou modernas deve ser decidida caso a caso, com preferência para as primeiras, exceto nos casos em que estas não garantam as exigências de segurança e durabilidade);
- as soluções técnicas de reparação e de beneficiação devem ser adequadas às características da construção e dos materiais preexistentes (sobretudo quanto às suas características físicas, químicas e mecânicas), procurando assegurar a sua inteira compatibilidade do ponto de vista tecnológico/construtivo e formal,

garantindo a identificação do que é novo e do que é antigo e evitando o mimetismo e o pastiche (Carta de Veneza sobre a Conservação e Restauro dos Monumentos e Sítios, 1964);

- deve recorrer-se a todas as ciências relevantes nas ações de conservação;
- deve privilegiar-se soluções de intervenção faseadas no tempo, como meio de diminuição de soluções de grande envergadura e diminuindo custos financeiros e sociais;
- deve privilegiar-se a manutenção periódica;
- deve garantir-se a reversibilidade das soluções preconizadas (deixando o mínimo de marcas ou danos no património). Devem ser evitadas soluções que resultem em transformações irreversíveis, ou seja, modificações de tal modo profundas, pesadas e rígidas, nas estruturas e nos restantes elementos primários das construções, que impossibilitem ou tornem muito difícil futuras operações de beneficiação e/ou adaptação para objetivos diferentes dos agora estabelecidos.

Na Tabela 2.1 do Anexo 2 apresenta-se uma síntese das vantagens e desvantagens de reabilitar. Segundo Douglas (2006), entre as várias motivações para reabilitar um edifício enunciam-se as seguintes: (1) apoios financeiros disponíveis; (2) questões associadas ao tempo de execução; (3) estado de conservação; (4) funcionais (desempenho e uso); (5) questões legais e de (6) sustentabilidade.

## 2.3 Panorama da reabilitação de edifícios na Europa e em Portugal

### 2.3.1 União Europeia

Em 2017, o setor da construção civil, na totalidade dos 19 países<sup>2</sup> representados no Euroconstruct (Europa), totalizou cerca de 1521 mil milhões de euros, dos quais 49% resultaram de construção nova e 51% de intervenções de reabilitação do edificado (Euroconstruct, 2018a). Até à crise financeira, a participação das novas construções era de quase 60% (Euroconstruct, 2018a). Desde então, a reabilitação de edifícios existentes ganhou mais importância. Isto deve-se em parte ao facto de o mercado da construção nova ter experimentado uma enorme mudança. Pois, a necessidade de novas construções caiu claramente nos últimos anos (Figura 2.2). A longo prazo, a manutenção e a modernização de edifícios antigos ganharão importância (Figura 2.2), mas a construção de novos edifícios será menos necessária. No entanto, isso não significa que deixará de existir procura de novas construções em algum momento no futuro. Pois a imigração e migração interna, o progresso tecnológico, as mudanças nas necessidades dos utilizadores e as demolições continuarão a gerar uma significativa procura por construções novas no futuro.

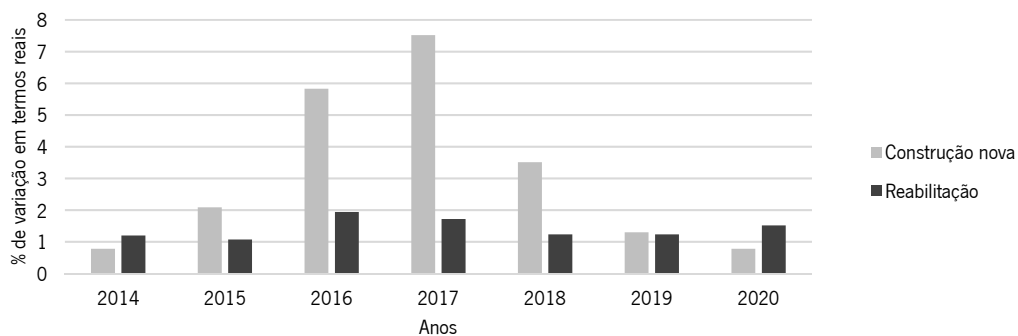


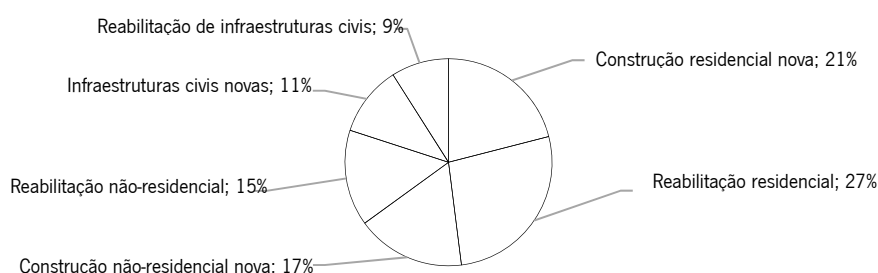
Figura 2.2. Variação anual e estimativa até 2020, em percentagem, da produção no setor da construção civil por tipo de trabalho - construção nova e reabilitação de edifícios (para a totalidade dos 19 países representados no Euroconstruct) (Euroconstruct, 2018a).

É irrealista esperar que as construções novas alcancem o nível de produção anterior à crise financeira. Pois como se refere no relatório do Euroconstruct (2018a), o volume de construção era insustentavelmente alto, especialmente na Irlanda, Espanha e Portugal. Existem, no entanto, vários países/regiões (como a Europa Oriental), onde as condições específicas sugerem que a procura por novas construções permanecerá elevada no futuro (Euroconstruct, 2018a).

<sup>2</sup> Áustria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Hungria, Irlanda, Itália, Holanda, Noruega, Polónia, Portugal, Eslováquia, Espanha, Suíça, Suécia e Reino Unido

Segundo o Euroconstruct (2018a), na Europa, a construção residencial é responsável por quase metade do mercado de construção europeu: a construção residencial nova representou 21%, em 2017, com um valor de 320 bilhões de euros; a reabilitação representou 27% do mercado, em 2017, com um valor de 404 mil milhões de euros (Tabela 2.2), sendo o maior subsetor do mercado de construção na Europa (Figura 2.3). A reabilitação de edifícios (residenciais e não residenciais) representa pouco mais de metade do mercado de construção europeu sendo maior em Itália, com 75% (para o ano de 2017), mas também na Alemanha, Dinamarca e Holanda (Euroconstruc, 2018a). Em 2017, a manutenção e a modernização do parque habitacional representaram mais de 50% da construção residencial total em 13 países do Euroconstruct, dos quais se registaram mais de 70% na Dinamarca (85%), Itália (76%), Irlanda (73%) e Alemanha (72%) (Euroconstruct, 2018a).

As construções não-residenciais representaram, em 2017, cerca de um terço da construção total, sendo o volume de construções novas não-residenciais (17% do mercado total, com um valor aprox. de 258 mil milhões (Tabela 2.2)) ligeiramente superior ao da reabilitação não-residencial (15% do mercado total, com um valor aprox. de 231 mil milhões de euros (Tabela 2.2)) (Euroconstruct, 2018a).



Produção total do setor da construção em 2017 foi de 1521 bilhões de euros

Figura 2.3. Mercado da construção por subsectores no ano de 2017 para a totalidade dos 19 países representados no Euroconstruct (2018a).

Tabela 2.2. Variação percentual em termos reais (volume) e por tipo de construção para o conjunto de 19 países abrangidos pelo Euroconstruct (2018a).

	Volume em milhões de euros <sup>(1)</sup> 2017	Variação percentual em termos reais (volume)							
						Estimativa		Previsão	
		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
<b>Construção residencial</b>	Nova	320 160	1.8	4.1	9.0	10.3	5.1	1.4	0.6
	Reabilitação*	403 560	0.9	1.0	2.6	1.7	1.0	1.1	1.6
	<b>Total</b>	<b>723 719</b>	<b>1.3</b>	<b>2.3</b>	<b>5.2</b>	<b>5.3</b>	<b>2.8</b>	<b>1.2</b>	<b>1.1</b>
<b>Construção não-residencial</b>	Nova	258 324	-0.3	0.0	2.3	4.3	1.5	1.2	1.0
	Reabilitação*	231 122	1.7	1.1	0.9	1.8	1.7	1.5	1.4
	<b>Total</b>	<b>489 446</b>	<b>0.6</b>	<b>0.5</b>	<b>1.6</b>	<b>3.1</b>	<b>1.6</b>	<b>1.3</b>	<b>1.2</b>
<b>Edifícios**</b>	Nova	578 483	0.8	2.1	5.8	7.5	3.5	1.3	0.8
	Reabilitação*	634 682	1.2	1.1	1.9	1.7	1.2	1.2	1.5
	<b>Total</b>	<b>1213 165</b>	<b>1.0</b>	<b>1.5</b>	<b>3.7</b>	<b>4.4</b>	<b>2.3</b>	<b>1.3</b>	<b>1.2</b>
<b>Infraestruturas civis</b>	Nova	173 073	-0.5	3.9	-2.8	1.5	5.3	5.9	3.4
	Reabilitação*	135 135	2.7	0.2	-1.1	2.9	3.3	2.5	1.2
	<b>Total</b>	<b>308 208</b>	<b>0.9</b>	<b>2.3</b>	<b>-2.1</b>	<b>2.1</b>	<b>4.4</b>	<b>4.5</b>	<b>2.5</b>
<b>Construção total</b>	<b>1 521 373</b>	<b>1.0</b>	<b>1.7</b>	<b>2.5</b>	<b>3.9</b>	<b>2.7</b>	<b>1.9</b>	<b>1.4</b>	

Notas: \*A reabilitação abrange reparação, manutenção, renovação e reconstrução; (1) em 2017, excluindo taxas; \*\* inclui os residenciais e os não residenciais.

Segundo as previsões do Euroconstruct (2018a), em 2018-2020, a taxa de crescimento acumulado da reabilitação residencial será de 4% e em 2020 a reabilitação residencial superará a nova construção. A maior taxa de crescimento acumulado de reabilitação residencial em 2018-2020 ocorrerá em Portugal com 47%, na Hungria com 27%, na Polónia com 14%, na República Checa com 13% e na Irlanda com 11%; nos restantes oito países do Euroconstruct, a taxa de crescimento acumulado da reabilitação residencial excederá 5%; uma taxa de crescimento acumulado negativa de reabilitação residencial em 2018-2020 ocorrerá em dois países: na Alemanha com -1% e na Suíça com -2% (Euroconstruct, 2018a).

Nos últimos anos, os fatores que contribuíram para o bom desempenho das novas construções residenciais também foram benéficos para a reabilitação residencial. As reduzidas taxas de juros não contribuíram apenas para reduzir os custos de financiamento das operações de reabilitação. Estas também motivaram um novo interesse em comprar ativos imobiliários como uma alternativa de investimento, aumentando também a procura pela reabilitação residencial. Em alguns casos, as taxas anormalmente baixas interferiram nos programas públicos que apoiam o financiamento da reabilitação. Os potenciais beneficiários de empréstimos subsidiados poderiam considerar o que era mais conveniente: a) solicitar o empréstimo junto das autoridades públicas que frequentemente impõem condições adicionais (p.e. exigentes normas ambientais) que aumentam os custos; ou b) solicitar o empréstimo ao mercado privado, onde as taxas de juros são quase tão reduzidas como as primeiras, mas não há necessidade de dispensar recursos adicionais para atender às exigências mais recentes.

Relativamente ao nível de construção não-residencial, este manteve-se melhor do que o residencial após a crise financeira; a reabilitação não-residencial voltou a aumentar em 2014 e o crescimento tem sido forte desde então (Euroconstruct, 2018a). O Fundo Europeu para Investimentos Estratégicos<sup>3</sup> acelera investimentos na Europa.

### 2.3.2 Portugal

Ao nível da União Europeia, o parque habitacional português é um dos mais novos, senão o mais recente. De facto, Portugal tem menos de metade dos alojamentos em edifícios anteriores a 1919 que a média europeia (INE, 2013). Quanto à época de construção, apesar dos edifícios construídos até 1945 representarem 14% do parque habitacional, foi nestas épocas de construção que se concentrou 58% dos edifícios com necessidade de grandes reparações, ou muito degradados. O número de edifícios com necessidade de grandes reparações, ou muito degradados, diminuiu acentuadamente nos edifícios construídos entre 1946 e 1990, tornando-se quase residual nos edifícios posteriores a 1990 (INE, 2013).

A quase totalidade (95%) dos edifícios com necessidade de grandes reparações, ou que estavam muito degradados tinha um ou dois pisos. Apesar dos edifícios com estrutura em paredes de alvenaria sem placa, alvenaria de pedra solta, taipa ou adobe representarem apenas 19% do total do conjunto de edifícios clássicos, foi nestas categorias de estrutura que se concentraram 68% dos edifícios muito degradados ou com necessidade de grandes reparações (INE, 2013). Nos edifícios em pior estado de conservação, existe uma predominância de edifícios com 1 ou 2 pisos e sem estrutura de betão armado, construídos até 1945 (INE, 2013).

Segundo o INE (2013), em 2011 cerca de 1/3 dos edifícios com necessidade de grandes reparações, ou muito degradados estavam concentrados em cinco regiões: Grande Porto, Tâmega, Grande Lisboa, Douro e Algarve. Os edifícios com necessidade de grandes reparações, ou muito degradados correspondiam a 4% do total de edifícios clássicos em 2011.

Durante os últimos 5 anos o mercado da reabilitação tem crescido e atualmente está a passar por um crescimento mais rápido, impulsionado pelas pressões da procura pela oferta insuficiente de imóveis recém-reabilitados. Acredita-se que este mercado vale mais do que 10 mil milhões de euros (Tabela 2.3), mas é provável que as estimativas sejam muito cautelosas devido à dificuldade em avaliar a enorme quantidade de pequenos trabalhos de reabilitação que não são comunicados aos municípios; alguns especialistas do setor estimam que o valor dessa não-inclusão corresponda a 5% do valor reportado (Euroconstruct, 2018b). Segundo o Euroconstruct (2018b) o mercado da reabilitação residencial experienciou um forte crescimento no início de 2018 e os trabalhos em curso correspondem a 71.7% ano após ano.

Os principais fatores que explicam o crescimento do mercado da reabilitação de edifícios em Portugal foram discutidos no ponto 2.2.2; além disso, este segmento também beneficia de outros fatores, positivamente associados aos impostos<sup>4</sup> e ao financiamento<sup>5</sup>.

<sup>3</sup> O programa de investimentos lançado pela Comissão Europeia (ESIR) visa aumentar o investimento privado, acelerar o crescimento económico e melhorar o emprego. Espera-se que o ESIR mobilize cerca de 500 mil milhões de euros para novos investimentos na Europa até 2020. A maior parte do financiamento deverá ser direcionada para infraestruturas e investimentos de reabilitação industrial, e cerca de ¼ para Pequenas e Médias Empresas.

<sup>4</sup> Por exemplo, particulares ou empresas que adquiram um imóvel com necessidades de reabilitação, e iniciem os trabalhos de reabilitação em 3 anos, estão isentos de Imposto Municipal sobre Transmissões onerosas de imóveis (IMT) dependendo do valor da propriedade e do uso para o qual é adquirido, atualmente este imposto varia entre 0 e 6% do valor de venda (Portugal Global, 2019). Os proprietários também estão isentos do Imposto Municipal sobre Imóveis (IMI) (que varia entre 0.3 e 0.5%), durante um período de 3 anos após conclusão dos trabalhos; esta isenção pode ser estendida para 5 anos mais

Em 2017 o número de habitações reabilitadas (concluídas) cresceu até 21.1%, enquanto a conclusão de novas habitações aumentou apenas 4.6% (Euroconstruct, 2018b). A perspetiva do mercado residencial para os próximos anos é bastante otimista (Tabela 2.3).

Tabela 2.3. *Varição percentual em termos reais (volume) e por tipo de construção para Portugal (Euroconstruct, 2018b).*

	Volume em milhões de euros <sup>(1)</sup> 2017	Varição percentual em termos reais (volume)							
						Estimativa		Previsão	
		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
<b>Construção residencial</b>	Nova	2626	-8.0	4.0	4.0	4.6	5.0	4.5	4.0
	Reabilitação	5489	0.0	10.0	6.0	21.1	15.0	14.0	12.0
	<b>Total</b>	<b>8115</b>	<b>-3.1</b>	<b>7.8</b>	<b>5.3</b>	<b>15.2</b>	<b>11.8</b>	<b>11.1</b>	<b>9.7</b>
<b>Construção não-residencial</b>	Nova	2775	-2.0	0.0	2.5	3.5	5.4	4.0	2.7
	Reabilitação	1176	3.0	4.0	2.0	6.0	6.0	5.0	4.0
	<b>Total</b>	<b>3951</b>	<b>-0.6</b>	<b>1.1</b>	<b>2.4</b>	<b>4.3</b>	<b>5.6</b>	<b>4.3</b>	<b>3.1</b>
<b>Edifícios</b>	Nova	5401	-4.9	1.9	3.2	4.1	5.2	4.3	3.3
	Reabilitação	6665	0.6	8.7	5.2	18.1	13.4	12.5	10.8
	<b>Total</b>	<b>12066</b>	<b>-2.2</b>	<b>5.3</b>	<b>4.2</b>	<b>11.4</b>	<b>9.7</b>	<b>9.0</b>	<b>7.7</b>
<b>Infraestruturas civis</b>	Nova	3904	0.9	0.0	-11.0	4.9	3.0	3.1	2.0
	Reabilitação	1049	1.0	1.0	-5.0	4.2	2.2	2.5	1.6
	<b>Total</b>	<b>4953</b>	<b>0.9</b>	<b>0.2</b>	<b>-9.8</b>	<b>4.8</b>	<b>2.8</b>	<b>3.0</b>	<b>1.9</b>
<b>Construção total</b>	<b>17019</b>	<b>-1.2</b>	<b>3.5</b>	<b>-0.5</b>	<b>9.4</b>	<b>7.7</b>	<b>7.3</b>	<b>6.2</b>	

Nota: a reabilitação abrange reparação, manutenção, renovação e reconstrução; (1) em 2017, excluindo taxas.

### 2.3.3 Perspetivas de evolução

As perspetivas para o mercado da reabilitação são boas dado que a atividade de reabilitação crescerá por um longo período de tempo, e o crescimento excederá em média o de novas construções (Tabela 2.3). Isto resulta de um comportamento de contraciclo, característico do mercado da reabilitação, ou seja, por não apresentar flutuações cíclicas semelhantes às das novas construções. Segundo o Euroconstruct (2018a) existem diferentes formas de explicar este comportamento:

- A correlação entre a situação económica e a reabilitação residencial não é tão direta como no caso da economia associada à construção de novas habitações. A economia influencia o tipo de reforma decorrente de um mercado imobiliário ativo (quando novos proprietários ou inquilinos se mudam para uma habitação existente e decidem fazer alterações e melhorias). No entanto, uma quantidade substancial da reabilitação residencial diz respeito a edifícios existentes que necessitam de reforço e manutenção, e isso é muito menos influenciado pelo ciclo económico.
- Uma economia familiar saudável é um pré-requisito para um mercado de reabilitação saudável. A melhoria do rendimento familiar, à medida que a economia europeia se estabiliza, é um dos fatores de influência. Mas existe uma incerteza relativamente ao tipo de prioridades que as famílias europeias têm na hora de aplicar as suas poupanças. Não é claro se as novas gerações colocam a melhoria da casa antes de outras ofertas mais atrativas, como o lazer ou entretenimento.
- Um mercado imobiliário saudável pode não ser um pré-requisito determinante para um mercado de reabilitação saudável, mas certamente ajuda. A situação geral na Europa, de aumento dos preços da habitação não está a prejudicar o mercado da reabilitação; de fato, vários países relatam que potenciais investidores agem com mais confiança quando percebem que estão a investir num imóvel que manterá o seu valor. E se o mercado imobiliário estiver ativo o suficiente, ao ponto de provocar a falta de imóveis em determinados locais, este cria mais oportunidades de reabilitação.
- Existe um grande potencial no nicho de reabilitação relacionado com a eficiência energética, mas nos últimos tempos foi desacelerado pelo longo período com reduzidos preços de energia. Um mercado-chave como a

se a propriedade for utilizada como residência principal do proprietário. Os proprietários que arrendam os seus edifícios ou frações no mercado da habitação também são elegíveis para beneficiarem de um tratamento mais favorável relativamente ao pagamento de impostos. Outras taxas de incentivo, como as taxas de crédito, isenções ou redução de IVA, bem como estímulos específicos oferecidos pelos municípios estão disponíveis em algumas circunstâncias específicas.

<sup>5</sup> Por exemplo, o IFRRU, um mecanismo financeiro que reúne fundos de várias fontes multinacionais (ESIF, EIB, CEB), em conjunto com fundos de bancos comerciais fornecem melhores condições de financiamento para investidores em projetos de reabilitação urbana e de melhoria da eficiência energética. Existe um orçamento disponível de 1.4 mil milhões de euros para cofinanciar projetos em Portugal até 2020. Um programa voltado para estimular a melhoria da eficiência energética de edifícios (como o "Programa Casa Eficiente 2020") fornece empréstimos concessionados a proprietários que realizem investimentos para aumentar a eficiência na utilização de energia nos seus edifícios. Este programa tem um financiamento de 200 milhões até 2020 e é co-financiado pelo Banco Europeu de Investimento (European Investment Bank) e os bancos comerciais Portugueses.

Alemanha parece ter sido afetado por esse fenómeno, mas a impressão geral é que isso não deve tornar-se necessariamente um problema de longo prazo. Por um lado, não há garantia de que os preços da energia permaneçam baixos indefinidamente. Por outro lado, as tecnologias e equipamentos envolvidos na economia de energia doméstica também estão a tornar-se mais económicos, ampliando as margens de rentabilidade da reabilitação energética de edifícios.

A reabilitação de edifícios também tem aumentado através de intervenções de reconstrução/reconversão – onde as áreas residenciais são densificadas através da conversão de antigos prédios industriais e de escritórios em unidades habitacionais. Isto sucede-se em muitas cidades, onde um dos objetivos de planeamento consiste em ter mais habitações localizadas num meio urbano consolidado, associadas a boas ligações de transportes.

Como se verificou anteriormente, a reabilitação de edifícios não-residenciais não é tão significativa como a dos residenciais. Isto sucede-se porque os impactos associados à idade da estrutura são menos significativos do que no segmento residencial; o ciclo de vida dos edifícios não-residenciais é mais curto, alguns nunca passam por reabilitações estruturais, mas são demolidos. A principal motivação para a reabilitação de edifícios comerciais é a modificação dos espaços interiores. A condição técnica dos espaços não-residenciais, de serviço e industriais não é necessariamente má, mas a sua funcionalidade pode deteriorar-se à medida que a muda a procura.

A melhoria dos edifícios existentes também requer atenção para muitos aspetos relacionados com o desenvolvimento sustentável e redução de emissões poluentes. A transição para fontes de energia renováveis e com baixa emissão de poluentes requer mudanças. Possivelmente, serão introduzidos novos requisitos para a reciclagem e reutilização dos componentes de construção, bem como para a gestão de resíduos. O desenvolvimento das cidades à luz dos fatores acima mencionados acrescentará certamente novas facetas ao conceito de reabilitação do ambiente construído: (1) numa tentativa de densificar as comunidades e aumentar a participação do transporte público e do tráfego de bicicletas e pedestres como modos de transporte; (2) com o objetivo de melhorar a qualidade das instalações habitacionais e de trabalho, através de novas tecnologias e economias assentes em plataformas de partilha. O aumento da inteligência, de acordo com o conceito de *cidade inteligente*, também poderá ter um grande impacto na reabilitação Euroconstruct (2018a). Num estudo da AEICOPS (2011) foi traçado o retrato do estado do mercado da reabilitação onde se apontam tendências: para quem? E o quê? A Tabela 2.4 apresenta o perfil dos utilizadores dos edifícios a reabilitar e aponta o que se espera atingir com a reabilitação de edifícios, em termos qualitativos, até 2025.

Tabela 2.4. Indicadores para Reabilitar em 2025, adaptado de AEICOPS (2011).

Reabilitação de edifícios residenciais para quem?	Reabilitar para atingir o quê?
Famílias pequenas.	<b>Residências:</b> incorporação de flexibilidade que permita adaptações de acordo com mudanças no agregado familiar e/ou estilos de vida. Casas inteligentes, energeticamente eficientes, que promovam a reciclagem de materiais e a redução de poluentes.
Famílias financeiramente menos prósperas.	<b>Escolas:</b> melhor apetrechamento técnico e adaptada para diferentes usos de ensino.
Famílias mais exigentes no que respeita à qualidade e ao conforto.	<b>Indústria, comércio e serviços:</b> edifícios inteligentes, energeticamente eficientes que promovam a redução dos custos energéticos, otimizem processos produtivos e incorporem novas tecnologias.
Famílias com maiores preocupações de caráter ambiental.	<b>Turismo:</b> aposta na qualidade, design e valor arquitetónico.
Famílias com maiores exigências ao nível da arquitetura e do design.	<b>Cultura:</b> reabilitação de património histórico e requalificação de edificações diversas (museus, espaços dedicados a eventos culturais, etc.)
Famílias mais dependentes do uso da tecnologia.	

## 2.4 Eficiência na reabilitação funcional de edifícios

Considera-se que a eficiência resulta da relação ótima entre os recursos empregues (materiais, económicos, energéticos, etc.) e os resultados obtidos (melhorias funcionais, estruturais, estéticas, etc.). Deste, modo, transportando o conceito de eficiência para a um edifício considera-se que este apresenta uma relação ente os seguintes níveis: (1) nível da “estrutura física” – o edifício é apenas “a soma de todas as suas partes” e inerentes impactos individuais resultantes de extração, produção, transporte, aplicação, demolição e reciclagem ou depósito; (2) nível da “máquina viva” – o edifício é todo um sistema ativo, consumidor de recursos e gerador de desperdícios que permitem o seu funcionamento e traduzem o seu impacto ambiental ao longo de toda a sua fase de utilização, mas também um impacto social, cultural, estético, etc.

### 2.4.1 Reflexão 1: reabilitação funcional

Considera-se como reabilitação funcional de um edifício o conjunto de intervenções que visam garantir a melhoria das suas condições de habitabilidade e durabilidade (que influenciam a percepção de conforto por parte dos utilizadores). A Tabela 2.5 apresenta os aspetos que serão avaliados nos exercícios de reabilitação que serão tratados no âmbito desta tese (nos capítulos 5, 6 e 7, segundo as abordagens arquitetônicas definidas no capítulo 4) de modo a definir os limites deste estudo. Considera-se que a reabilitação funcional é constituída por subdomínios e que cada subdomínio apresenta vários aspetos. Todos os aspetos têm de ser coordenados entre si para alcançar conforto interior, poupar energia e prevenir danos no edifício. Só assim é que os trabalhos de reabilitação podem ter sucesso a longo prazo. Após uma intervenção de reabilitação, o edifício deve dar resposta aos vários requisitos funcionais durante os 30 anos seguintes, pois intervalos de tempo mais reduzidos não são economicamente viáveis (Giebler *et al.* 2009).

Tabela 2.5. Síntese dos aspetos relativos à definição do modelo/metodologia de avaliação da eficiência (assente na adoção de métodos de avaliação multicritério de apoio à tomada de decisão) de intervenções de reabilitação funcional de edifícios.

Domínio	Subdomínio	Aspetos
<b>Reabilitação funcional</b> (reposição das condições de habitabilidade e durabilidade)	<b>Higrotérmico e energético</b>	Capacidade de isolamento térmico e transferência de calor; Comportamento higrotérmico da solução construtiva (estanquidade à água, permeabilidade ao vapor de água, etc.); Consumo energético operacional total (para aquecimento e arrefecimento) do edifício intervençionado; Grau de controlo dos sistemas de regulação pelos ocupantes.
	<b>Visual/Luminico</b>	Comunicação/estética. Ganhos de luz natural; Transmissão de luz visível; Absorção de luz visível/ Reflexão de luz visível; Comportamento de refração; Difusão de luz e grau de controlo dos sistemas de regulação pelos ocupantes.
	<b>Acústica</b>	Capacidade de absorção do som; Capacidade de reflexão do som; Capacidade de transmissão do som; Capacidade de atenuação do som; Grau de controlo dos sistemas de regulação pelos ocupantes.
	<b>Ambiente</b>	Toxicidade (produção, utilização e reciclagem); Potencial de aquecimento Global total (PAG) em todo o ciclo de vida; Energia incorporada total (EE) em todo o ciclo de vida.
	<b>Construtivo, estabilidade e durabilidade</b>	Peso total; Facilidade de montagem; Tempo de execução estimado; Durabilidade dos materiais de revestimento; Grau de adaptabilidade para futuras alterações; Grau de repetibilidade; Grau de reversibilidade; Condições de serviço; Resistência ao impacto; Resistência a ações de utilização; Proteção contra os efeitos decorrentes de ações de sobrecarga provocadas por fenómenos naturais; Adequação a circunstâncias locais; Resistência à radiação UV; Resistência à ação de agentes químicos; Relativamente a substancia dissolvidas numa precipitação; Relativamente ao cloreto de sódio (em zonas costeiras).
	<b>Segurança/mitigação do risco</b>	Risco para os ocupantes perante incêndio (classe de resistência ao fogo: reação ao fogo; gotejamento; formação de aberturas que permitam a evacuação do calor e fumos; toxicidade dos gases libertados durante um incêndio); Risco para os ocupantes perante furacões/ tempestades; Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos; Risco para os ocupantes em caso no caso da ativação de engenhos explosivos.
	<b>Social, cultural e patrimonial</b>	Uso de técnicas e materiais de construção tradicionais; Capacidade de instalação em sítios ocupados; Grau de intrusividade; Impacto do processo construtivo para os ocupantes (no caso de edifícios ocupados) e para a vizinhança.
	<b>Económico</b>	Custo energético operacional para aquecimento e arrefecimento; Custo de manutenção; Período de retorno do investimento na intervenção de reabilitação.
	<b>Social,</b>	Capacidade de instalação em sítios ocupados;



	<b>cultural e patrimonial</b>	Grau de intrusividade; Impacto do processo construtivo para os ocupantes (no caso de edifícios ocupados) e para a vizinhança; Identificação de novos elementos; Respeito pelas intervenções anteriores/ Preservação do existente.
--	-------------------------------	--

Apesar de algumas medidas de apoio a intervenções de reabilitação, o parque edificado nacional (em particular o parque habitacional), para além de sinais evidentes de envelhecimento, revela um desajustamento funcional acentuado, face às exigências de conforto associadas à melhoria gradual das condições económicas e sociais registadas nos últimos trinta anos. Todavia, as desejadas condições de conforto não podem ser obtidas descurando os consumos energéticos associados. Este aspeto, se por vezes não constitui a preocupação imediata do consumidor final, constitui um objetivo estratégico comunitário e nacional da maior relevância na atualidade. Nesse sentido, inserida no domínio da reabilitação funcional, a reabilitação térmica e energética dos edifícios tem como objetivo principal promover a obtenção de condições de conforto do ambiente interior, minimizando os consumos de energia de aquecimento e/ou arrefecimento, existentes ou necessários.

Do ponto de vista de eficiência energética, existe um grande percurso a realizar pois, em Portugal, a maioria dos edifícios foram construídos antes de 1990, não tendo por isso sido concebidos com este tipo de preocupações. Foi a partir do início de 1990, com a publicação do Decreto-lei 40/90 que se assistiu à primeira evolução na aplicação de requisitos térmicos aos edifícios, a qual conduziu, entre outras medidas, ao aumento da incorporação de isolamento térmico na construção, e à aplicação de vidro duplo em janelas. Posteriormente, foram revistos os requisitos térmicos e energéticos (em 2006 e 2013), bem como, a partir de 2006, foi implementado o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE). Mais recentemente, em 2013, a designação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE) e Regulamento do Comportamento de Edifícios de Comércio e Serviços (RCECS), foi alterada para Regulamento dos Edifícios de Habitação (REH) e Regulamento de Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

Com base nos dados disponíveis através do SCE foi possível mapear a eficiência energética de uma forma mais eficaz, e perceber que apenas a partir de 2006 (com especial enfoque após 2013), se começaram a aplicar requisitos próximos do *custo-ótimo* num horizonte de 30 anos (Fragoso, 2015). Ainda de acordo com o SCE, e tendo por base as medidas de melhoria identificadas pelos especialistas, é possível constatar que as componentes passivas dos edifícios, nomeadamente as respeitantes a paredes, coberturas e janelas, são as mais visadas (em cerca de 70% das recomendações para o setor residencial).

#### 2.4.2 Reflexão 2: reabilitação de edifícios enquanto veículo para a eficiência de recursos

Além da crise económica, o mundo também experimenta uma crise ambiental, cujas consequências são difíceis de prever. De fato, estudos relatam que a Terra está sendo empurrada para além dos seus limites dado que a pegada ecológica mundial já equivale a 1,5 planetas (Wackernagel & Rees, 1996; Ewing *et al*, 2010). Assim, o maior desafio atual e futuro será promover a reabilitação sustentável do parque edificado consolidado, ou seja, a criação e a gestão responsável de um ambiente construído saudável e renovado, baseado na eficiência de recursos e em princípios ecológicos (Kibert, 2008). Operar sobre edifícios existentes deixou de ser apenas uma questão de preservar a imagem da cidade e dos monumentos históricos; tornou-se um imperativo económico e ecológico (Schittich, 2003).

De todos os setores económicos, o da construção é o que gera maiores fluxos de materiais e volume de negócios; isto acontece tanto para construção nova como para a reabilitação de edifícios. Por exemplo, segundo Lemken (2008), a forma como construíamos e vivíamos em 2008 requeria cerca de 30% do consumo de recursos naturais (kg de material extraído) per capita e por ano. Com uma taxa global de consumo de materiais de aprox. 52 toneladas por pessoa por ano, são utilizadas anualmente 17 toneladas de materiais para a construção de infraestruturas e habitação, e uma quantidade equivalente em energia para produzir, transportar e processar estes materiais (Lemken, 2008). A reabilitação de um edifício antigo consome um terço do material necessário para construir um edifício novo Lemken (2008). Atendendo ao peso das soluções construtivas utilizadas, no caso de edifícios construídos com soluções construtivas “pesadas”, existe uma adição equivalente de material em 50% (aprox.) dos recursos empregues na envolvente exterior do edifício. Isto resulta do consumo gerado numa fase de utilização (sobretudo devido a necessidades de aquecimento e de manutenção periódica)

de aprox. 80–100 anos (Wallbaum & Herzog, 2001). Comparativamente a um novo edifício, aprox. 2/3 do material empregue durante as fases de construção e de utilização podem ser salvos através da reabilitação de um edifício existente<sup>6</sup> (Wallbaum & Herzog, 2001).

Atualmente, o parque de edifícios antigos enfrenta práticas regulamentares que exigem a redução do consumo de energia e, na maioria das vezes, solicitam a melhoria do desempenho económico. Esses edifícios raramente são substituídos por edifícios novos e mais eficientes; na verdade, a taxa de substituição de edifícios antigos por novos é apenas cerca de 1,0 –3,0% por ano (Ma *et al.*, 2012). Assim, a reabilitação energética é o caminho privilegiado para aumentar a eficiência energética perante elevados padrões de consumo.

As nações em desenvolvimento e recentemente industrializadas aspiram ao consumo intensivo de recursos das nações industrializadas, copiando-as. O nível de consumo global é estabelecido, principalmente, pelos principais países industrializados que, em relação à sua população, apresentam uma contribuição muito desproporcional no desempenho económico global. Neste sentido, atualmente o acesso per capita ao mercado global de materiais - uma base para a prosperidade material - é estimado como sendo inequitativamente distribuído. Se a população dos países em desenvolvimento duplicasse e o seu consumo se aproximasse do consumo dos países industrializados, com base na intensidade material estimada das economias ocidentais, então em 2050 serão necessárias sete vezes mais a quantidade de recursos materiais do que no presente (Figura 2.4). De modo a contribuir para a estabilidade da ecoesfera, por outro lado, requiere que o consumo global atual seja reduzido para metade. Isto pode requerer desmaterializar as economias industrializadas de um fator de 16 (Figura 2.4). (Bringezu *et al.*, 1998 *apud* Lemken 2008).

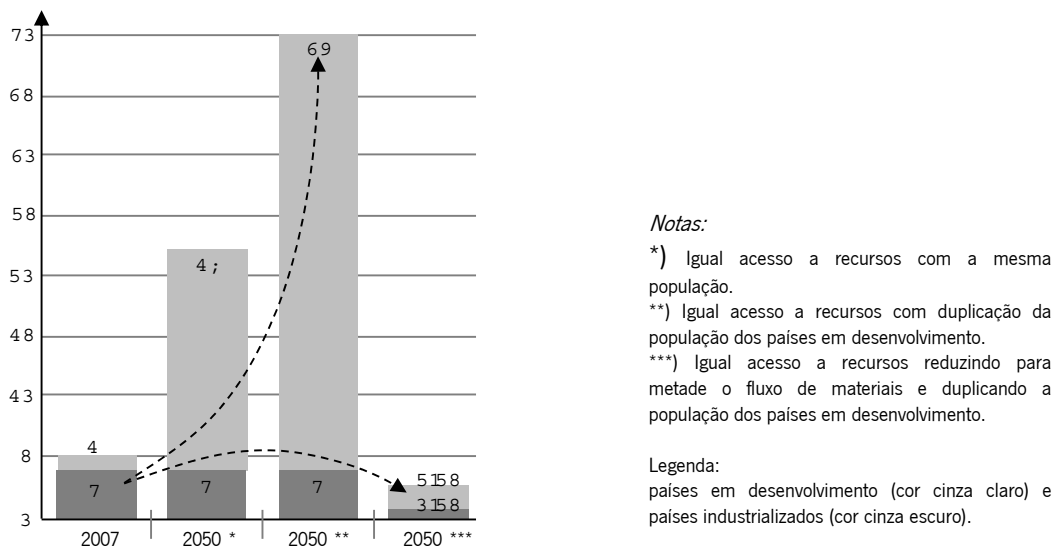


Figura 2.4. Acesso ao mercado global de materiais (Wuppertal Institut & Schmidt Bleek, 2007 *apud* Lemken, 2008).

O impacto ambiental da reabilitação de edifícios, em particular da energia incorporada e do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) produzido na aquisição de matéria-prima, transformação em componentes, transporte para o local e construção/processo de reabilitação *in situ*, é uma área de investigação frequentemente esquecida. Durante o ciclo de vida de um edifício, estima-se que estes impactos incorporados “*do berço ao local*” representam cerca de 10-20% do consumo total de energia de um edifício (Setac, 2003). Por outro lado, para edifícios com baixo consumo de energia e elevada eficiência, esta fase do ciclo de vida pode ter uma importância muito maior, representando cerca de 40-75% do consumo total de energia ao longo da vida (Setac, 2003; Smil, 2008).

De acordo com Ravetz (2008), a energia incorporada necessária para construir um novo edifício pode ser até 10 vezes maior do que para a reabilitação, devido aos impactos fora do local da construção; e Power (2008) defende que a energia incorporada necessária para construir um novo edifício habitacional é 4 a 8 vezes maior do que reabilitá-lo para alcançar as exigências atuais. Estes aspetos também foram estudados pela Empty Homes Agency (EHA), que demonstrou como uma intervenção de reabilitação profunda gera cerca de 15

<sup>6</sup> Esta estimativa não inclui outros potenciais métodos de poupança de recursos, envolvendo materiais e métodos de construção adequados.

toneladas de CO<sub>2</sub>, comparativamente à intervenção de demolição e reconstrução que gerou cerca de 50 toneladas de CO<sub>2</sub> incorporado; o consumo energético médio de uma habitação, no Reino Unido, é responsável por 5-6 toneladas anuais de CO<sub>2</sub>, dos quais, dois terços podem ser reduzidos através da adoção de medidas simples de eficiência energética (EHA, 2008).

A Figura 2.5 ilustra os típicos consumos operacionais e energéticos incorporados para um edifício de escritórios que foi alvo de três intervenções de reabilitação profundas aos 25, 50 e 100 anos do seu ciclo de vida. Segundo Yohanis & Norton (2002) verifica-se que a energia operacional acumula-se constantemente ao longo do ciclo de vida do edifício, enquanto a energia incorporada acumula-se em fases de aumento de energia. Embora um edifício tenha uma vida útil longa comparativamente à dos materiais por si só, sem o aumento significativo da eficiência dos recursos materiais será difícil implementar uma construção sustentável. Neste sentido, a construção otimizada com o uso mínimo de recursos (materiais, energia, espaço) ao longo de todo o ciclo de vida de um edifício, também significa atender a requisitos funcionais (Berge, 1999; Dowson, 2012).

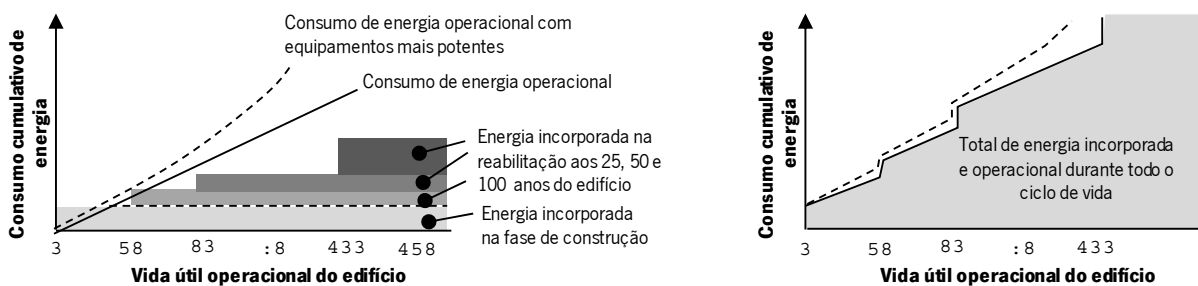


Figura 2.5. Ilustração do consumo de energia operacional e incorporada no ciclo de vida de um edifício de escritórios reabilitado aos 25, 50 e 100 anos (adaptado de Yohanis & Norton, 2002 apud Dowson, 2012).

#### 2.4.3 Reflexão 3: atuais e futuros desafios da reabilitação funcional

Para edifícios a reabilitar no futuro, os custos continuarão a desempenhar um papel central que se prolonga para além da fase de construção. Segundo Lemken (2008), pode considerar-se que, no futuro, as tecnologias que levem a reduções significativas de custos durante a construção, utilização, manutenção e também na disposição final de um edifício serão implementadas mais rapidamente do que na atualidade. Neste sentido, já está ocorrendo uma mudança de perspetiva: de uma visão puramente orientada para os custos de investimento (construção), para uma visão que englobe o cálculo do custo total (incluindo o de construção, operação e manutenção e eliminação de resíduos).

A segurança energética e as alterações climáticas estão a estimular um futuro que deve mostrar uma melhoria drástica no desempenho energético dos edifícios. Na Europa, os 27 estados membros definiram uma meta de poupança de energia de 20% até 2020, principalmente através de medidas de eficiência energética. A União Europeia também se comprometeu com a redução de 80-95% de GEE (Gases Efeito Estufa) até 2050 como parte do seu roteiro (Energy Roadmap EU 2050) de mudança para uma economia competitiva em baixo carbono<sup>7</sup>. Atualmente, os edifícios são responsáveis por 36% do consumo energético da UE e 40% destas emissões são GEE (BPIE, 2011) em que 63% estão relacionadas com o setor residencial (OECD, 2015).

Apesar das ambiciosas metas definidas para novos edifícios, que têm de cumprir com o padrão de *energia (quase) nula* (NZEB) até o final de 2020 (Diretiva 2010/31/EU), é possível subestimar que a taxa de substituição de edifícios existentes por novos seja muito baixa, de tal modo que 50% do atual parque edificado continuará a ser utilizado em 2050 (Zimmermann, 2012). Os edifícios que datam de 1945 a 1970, com baixa eficiência energética (como se verifica em Portugal, Figura 2.6, pouco isolados e muitas vezes com sistemas de aquecimento obsoletos (Figura 2.8), representam cerca de 70% do total, enquanto os construídos após 1990, com melhores padrões energéticos, representam apenas 1% (Norris & Shiels, 2014).

<sup>7</sup> Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia (2010, Maio 19). Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho sobre o desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial da União Europeia.

De facto, uma parte substancial do parque edificado na Europa tem mais de 50 anos de idade e muitos dos edifícios que são utilizados atualmente têm centenas de anos. Mais de 40% dos edifícios residenciais europeus foram construídos antes de 1960, quando os regulamentos energéticos para a construção eram muito limitados. Um grande aumento na construção em 1961-1990 também é evidente através da análise do BPIE (2011), onde o parque habitacional, com algumas exceções, mais do que duplica neste período (Figura 2.7).

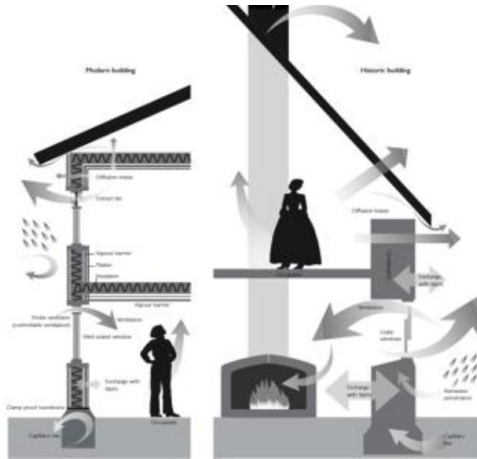


Figura 2.6. Diagrama comparativo do movimento da humidade (comportamento higrotérmico e energético) entre os edifícios contemporâneos (à esquerda) e os edifícios antigos (à direita) (English Heritage, 2004).

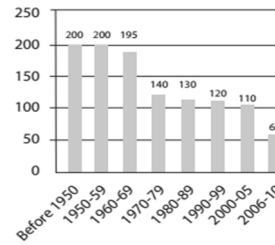


Figura 2.7. Média dos níveis de consumo energético para aquecimento (kWh/m<sup>2</sup>) de habitações unifamiliares por ano de construção em Portugal (BPIE, 2011).

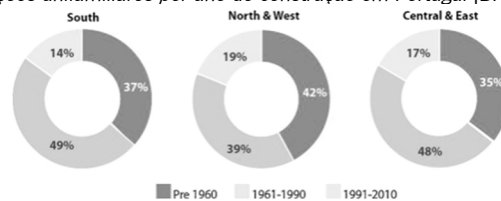


Figura 2.8. Categorização da idade do parque habitacional na Europa (BPIE, 2011).

Posto isto, a reabilitação funcional do parque habitacional existente representa um grande desafio para o setor de construção europeu nos próximos anos; constitui uma estratégia crucial que deve ser implementada à grande escala para se alcançarem as ambiciosas metas de descarbonização estabelecidos pela UE para 2050 (UE, 2011). A importância da reabilitação funcional, com enfoque particular no desempenho energético da envolvente exterior dos edifícios, tem sido amplamente reconhecida (Asadi *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2012) e as atividades de reabilitação já constituem cerca de 50% do volume de negócios da indústria da construção na Europa (Juan *et al.*, 2009).

Para além dos aspetos ambientais e económicos, também existem aspetos sociais que devem ser considerados na conceção de intervenções de reabilitação. A constante evolução e mutação dos estilos de vida e dos agregados familiares têm levado a um reequacionar dos modos de habitar e à crescente necessidade de propor habitações mais evolutivas e adaptáveis (Roos, 2011; Coelho *et al.*, 2003). Verifica-se no entanto que, em Portugal, a maior parte dos alojamentos existentes não cumpre satisfatoriamente esse desígnio, apresentando, por exemplo, soluções de divisórias interiores pesadas e estáticas (Mendonça *et al.*, 2014). Revela-se assim importante introduzir soluções construtivas e espaciais mais flexíveis e eficientes, sabendo que no futuro a necessidade de reorganizar o espaço interior se colocará com a mesma dificuldade que atualmente.

## 2.5 Considerações finais

No presente capítulo foi feito um enquadramento do estado do setor da reabilitação ao nível europeu e nacional. Também se expôs o entendimento sobre eficiência e reabilitação funcional, e identificaram os atuais e futuros desafios da reabilitação.

Considerando tudo o que foi exposto, torna-se evidente que devem ser tomadas medidas para promover o aumento do desempenho funcional – associado ao conforto na utilização dos espaços dos edifícios e à redução do impacto ambiental. Deste modo, as soluções de reabilitação funcional que integram membranas arquitetónicas podem dar um contributo para o alcance das metas referidas. Esses contributos serão discutidas nos capítulos posteriores. Contudo, é questionável se as soluções de reabilitação com membranas cumprem a visão holística da eficiência/sustentabilidade – segundo aspetos ambientais, económicos, construtivos, sociais, funcionais e de segurança – razão pela qual se realiza o presente trabalho.

O capítulo que se segue faz um enquadramento aos materiais em membrana.

## Capítulo

# 03

### *Membranas arquitetônicas*



*Figura 3.1. Vista interior do projeto Eco Membrane<sup>1</sup> - intervenção de reabilitação funcional no armazém da empresa Siemens (edifício original dos anos 30) para conversão em escritórios.*

*O progresso da construção envolve, não apenas melhorias nos métodos e tecnologias, mas igualmente nos materiais que temos à escolha (Sauer, 2010). Neste estudo são avaliadas as potencialidades da utilização de membranas arquitetônicas em soluções construtivas para a reabilitação funcional de edifícios, enquanto alternativa às soluções convencionais. Destacam-se como virtudes das soluções com membranas: a flexibilidade e a facilidade de adaptação às novas tecnologias e requisitos. No entanto, como em qualquer outra solução, também é necessário ter conhecimento das suas limitações.*

*Este capítulo serve de introdução e discussão sobre os diferentes materiais em membrana: definições, visão global do mercado, propriedades, potencialidades, limitações, tendências e desafios relevantes para o setor da construção de edifícios. A principal tarefa das membranas é “reguladora em relação às condições da envolvente” (Mollaert et al, 2003) de modo a fornecer: proteção contra a água e a radiação UV, estabilidade mecânica, transmissão de luz, etc. Por exemplo, em alguns casos, a membrana poderá ser: permeável ao vapor de água, mas ser termicamente isolante para que se alcance o conforto higrotérmico no interior do edifício; mais ou menos translúcida para permitir iluminação natural, atenuar a transmissão de ruído e possuir uma superfície exterior auto lavável.*

---

<sup>1</sup> Foi aplicada uma membrana de PVC transparente para melhoria das condições térmicas, acústicas e lumínicas do espaço para o adequar à nova função. Com esta solução, para além dos critérios de projeto para poupança de energia e redução do impacto ambiental apresentados, Herzog também fez uma reinterpretação dos princípios históricos de transparência. Os designers da Siemens, enquanto trabalham, têm uma constante recordação visual das técnicas de construção passadas e futuras. Projeto concebido pelos arquitetos Thomas Herzog e construído pela empresa Koch Hightex em 1997. Fontes: Tensinet 3 (2015) e Eco membrane (2015).

### 3.1 Definição

O termo membrana deriva da palavra latina *membrana* que significa pele (Faegre, 1979). Este termo descreve um material flexível, com reduzida espessura relativamente à sua área superficial, que apenas apresenta estabilidade através de forças de tração. As membranas designam-se como arquitetônicas (termo utilizado por Frei Otto) quando têm aplicação no campo da arquitetura<sup>2</sup> (Glaeser, 1978). Segundo Milwich (2010), as membranas utilizadas em edifícios podem ser simples ou compostas, com reduzida espessura. As membranas simples mais comuns são redes, películas poliméricas ou tecidos não revestidos (Figura 3.2). Convencionalmente, as membranas compostas consistem num substrato de tecido (com função estrutural) e um revestimento polimérico (com função de proteção). Estas camadas são feitas de diferentes materiais e ambos são utilizados para denominar o material de membrana. Segundo Knippers et al (2011), no setor da construção de edifícios os materiais têxteis (revestidos ou não), as películas poliméricas ou as finas folhas metálicas também podem ser classificadas como membranas arquitetônicas. A divisão entre os materiais têxteis<sup>3</sup> tradicionais (tecidos e malhas) e outros materiais flexíveis, tais como: películas ou compósitos, é cada vez mais ambígua. Segundo Munter (2012), uma propriedade comum a todos os materiais mencionados é o reduzido peso próprio: variável entre 0,2 e 1,5 kg/m<sup>2</sup>.

Segundo Chris Byrne (2000), as membranas pertencem a um grupo de materiais denominados *têxteis técnicos*, por se encontrarem no âmbito da engenharia dos materiais flexíveis. *De acordo com a EURATEX (2006)*, os têxteis técnicos são definidos como materiais e produtos têxteis utilizados principalmente pelo seu desempenho técnico e propriedades funcionais. O Instituto Têxtil localizado no Reino Unido define *têxteis técnicos* da seguinte forma: *“textile materials and products manufactured primarily for the technical and performance properties rather than their aesthetic or decorative characteristics”* (Textile Institute, 1995). Esta breve definição deixa uma grande margem para interpretações, especialmente quando um crescente número de produtos têxteis combina desempenho funcional e propriedades decorativas de igual modo. É exemplo disso a aplicação de retardadores de chama em dispositivos interiores de proteção solar, ou repelentes de água nos dispositivos exteriores.

Depois da Segunda Guerra Mundial verificou-se uma explosão no desenvolvimento dos semissintéticos, como: a viscosa e raion; o acrílico (polimetacrilato de metilo) e o lurex (fibra de poliéster metalizado); a licra; a poliamida de nylon; as fibras de poliéster; o polietileno (*Dyneema*) e as aramidadas (*Nomex*<sup>®</sup>, *Twaron*<sup>®</sup>, *Kevlar*<sup>®</sup>). Além disso, várias fibras não-orgânicas, tais como fibras de carbono, fibras de vidro e fios de metal também podem ser tecidas com processos têxteis e várias matérias-primas podem ser transformadas em tecido sem serem tecidas – denominadas de não-tecidos<sup>4</sup>.

A diversidade têxtil contemporânea é enorme (quer seja pelas matérias-primas como pelos processos técnicos) (Figura 3.3). Já é possível produzir têxteis com novas propriedades, ou atuadores funcionais através da adição de componentes eletrônicos, fibras óticas, sensores ou nano partículas integradas, iluminação LED em película, tecidos com ligas metálicas, *etc.* Os têxteis técnicos são produzidos em países industrializados e envolvem diversos setores da indústria e segmentos de mercado. A feira *Tech-textil* em Frankfurt é líder internacional na divulgação de têxteis técnicos, cobrindo diversas áreas de aplicação destes materiais; a principal categoria de aplicação dos têxteis técnicos em arquitetura é a *Buildtech*. As características dos têxteis são múltiplas, bem como as potenciais aplicações em arquitetura. Segundo Adanur (2001), os têxteis técnicos, onde se inserem as membranas, estão a substituir os materiais têxteis tradicionais, bem como metais, vidro e outros materiais de construção.

<sup>2</sup> Também existem construções com membrana tipo casca, em inglês *thin shell membrane*, p.e. a pala do Pavilhão de Portugal da Expo98 (Portugal, projetado por Álvaro Siza) e a cobertura do aeroporto TWA *Flight Center* (Nova Iorque, projetado por Eero Saarinen em 1962), que não serão alvo de análise desta tese. Estas possuem uma espessura reduzida quando comparada com as outras dimensões. As ações exercidas sobre este tipo de membrana são forças no plano, embora possam existir forças secundárias decorrentes de deformações de flexão. Segundo Chen (1997), a membrana tipo casca deve ser capaz de resistir a forças de tração e compressão.

<sup>3</sup> A palavra *Têxtil* é originária do termo latino *textilis* e *texere*. No sentido literal, têxtil significa tecer e refere-se a tudo o que é tecido. Na realidade, o termo têxtil também engloba materiais não tecidos, mantas, malhas agulhadas, *etc.* Alguns autores, como Byrne (2000) e Krüger (2009), consideram que até mesmo o papel ou as películas poliméricas podem ser classificados como têxteis por possuírem muitas propriedades e capacidades de manipulação semelhantes, tais como manipulação de fibras, tecidos e técnicas de combinação e acabamento.

<sup>4</sup> Estes são produzidos com métodos referidos como de termofixação ou fundição; exemplo disso é o feltro e o papel. Alguns dos métodos modernos utilizados para produzir não-tecidos são: a agulhagem; o jato de água e a ligação adesiva através de um material polimérico.

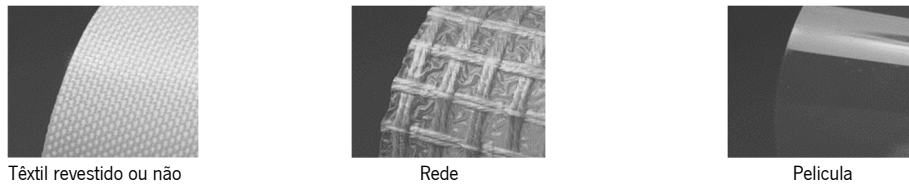


Figura 3.2. Exemplos de tipos de membranas arquitetônicas.

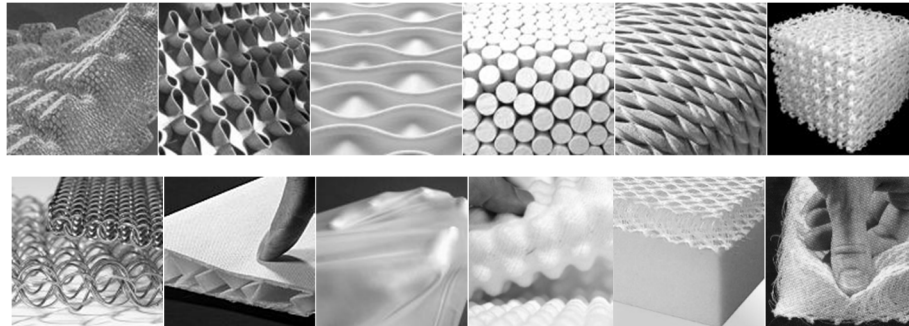


Figura 3.3. Exemplos de membranas arquitetônicas têxteis e não-têxteis (da esquerda para a direita): 3D Text Mayer®; Anne Kyro Quinn®; Hire felt®; Helen Amy Murray®; 3D textile®; Perforated metal®; Luminex®; Studio Muurbloem®; Techstyle®; Thermoplastic film®; Cullus®; 3D spacer fabrics + espuma de viscose Beyzan™; malha tridimensional de poliéster (Zijlstra, 2009).

### 3.2 Evolução das construções com membranas

Desde as eras mais remotas da pré-história que o Homem procurou refúgios para se proteger. Os primeiros abrigos que o Homem utilizou eram grutas naturais que posteriormente foram sendo *ampliadas* e adaptadas artificialmente no sentido de aumentar o seu espaço útil, ou limitar o acesso, tornando-as habitáveis. As primeiras construções leves surgiram precisamente no interior dessas grutas, no sentido de incrementar as suas condições de habitabilidade. De acordo com Faegre (1979 *apud* Lang *et al*, 2013), “*a tenda é o abrigo mais antigo, com exceção da caverna*” e, é provável que constituísse o primeiro tipo de habitação construída por seres humanos. Apresentava estrutura simples constituída por peles de animais distendidas entre varas (Stone Age Habitat, 2002 *apud* Mendonça, 2005). Os poucos vestígios que estas construções ligeiras deixaram, devido ao carácter efêmero dos materiais com que foram realizadas e à sua reduzida dimensão, tem sido razão para serem ignoradas pelos historiadores da arquitetura (Kronenburg, 1995); a maioria dos estudos incide sobre as construções de carácter mais monumental, realizadas em materiais duráveis como a pedra, o tijolo ou a terra compactada. Só recentemente, os arqueólogos, equipados com técnicas mais evoluídas de pesquisa e recolha de dados, conseguiram descobrir e identificar vestígios das primeiras habitações, realizadas com materiais efêmeros.

Um exemplo de desenvolvimentos posteriores deste tipo de construções são as tendas simples, como as “*tendas negras*” e as “*tendas tibetanas*”, adequadas a um estilo de vida nómada por serem leves e fáceis de transportar. Estas estruturas permitiam aos seres humanos mover-se de um lugar para outro, mesmo em ambientes agressivos, com as condições mínimas para se manterem confortáveis. Posteriormente, em locais onde os recursos naturais eram mais abundantes, tornou-se possível construir abrigos permanentes na forma de tendas. O exemplo mais notável é o *Yurt* (Figura 3.4). As tendas *yurt* - estruturas portáteis, constituídas por uma treliça de madeira revestida com membranas – são utilizadas atualmente nas estepes e em países da Ásia Central, como a Mongólia. A origem da palavra *yurt* é turca e significa *espaço de habitar*.



Figura 3.4. Exemplo de Ger e Pitching yurt, Dayan, Mongólia ocidental (Portisch, 2005).

A combinação de um requisito fundamental, como o de abrigo, moderado pela funcionalidade e disponibilidade de recursos ainda está presente no projeto de edifícios atuais. Tal como as primeiras tendas, as modernas estruturas em membrana tendem a ser utilizadas em situações onde o abrigo básico deve ser fornecido com a quantidade mínima de material. Os materiais têxteis, dos quais derivam as membranas, foram sempre utilizados para proteção visual e das condições climáticas. No entanto, começaram a perder essa função à medida que o Homem se tornou cada vez mais sedentário. Múltiplas aplicações no passado servem de inspiração às aplicações contemporâneas; por exemplo, as modernas coberturas retráteis que cobrem os estádios desportivos foram precedidas pelas estruturas que protegem os espectadores do sol nos anfiteatros e arenas romanos.

Enquanto as construções têxteis têm uma tradição de milhares de anos, os polímeros representam uma nova classe de materiais. Por isso, a utilização das membranas na arquitetura não surgiu apenas em meados do século XX; o que aconteceu foi que as fibras sintéticas e os revestimentos poliméricos proporcionaram a produção de têxteis mais duráveis e resistentes, substituindo os tecidos de algodão aplicados na construção de tendas até à altura. Foi o desenvolvimento dos materiais sintéticos que ajudaram Frei Otto, Walter Bird e outros arquitetos e engenheiros a construir estruturas tensionadas pioneiras<sup>5</sup>, que rapidamente se difundiram nas décadas seguintes.

O desenvolvimento dos materiais poliméricos, em especial sob a forma de materiais compósitos, levou ao aumento de projetos com membranas inovadoras. Estes materiais permitem hoje em dia vencer grandes vãos e criar coberturas translúcidas com dimensões esbeltas. Uma característica especial dos polímeros é o bom desempenho mecânico. Contudo, outras propriedades destes materiais, como a permeabilidade à luz e ao calor podem ser especificamente ajustadas para o fim pretendido. No entanto, a opinião pública sobre os polímeros começou a mudar drasticamente no final do século XX. As razões para que isto acontecesse prenderam-se com os defeitos frequentemente encontrados nos materiais poliméricos usados na construção e, particularmente, com a crescente preocupação ambiental na qual os materiais sintéticos interferiam negativamente.

Na atualidade, os materiais em membrana são cada vez mais utilizados na indústria da construção como um substituto dos materiais convencionais como a madeira, o betão, o tijolo e o aço (Ollenhauer, 2011). As propriedades mecânicas das membranas com fibras de aramida, de carbono e de vidro, combinadas com resina para formar materiais compósitos, oferecem uma gama de novos materiais com elevada resistência, rigidez e flexibilidade. Segundo Ollenhauer (2011) as coberturas e fachadas em membrana fazem parte da arquitetura contemporânea, com uma expressiva aplicação em edifícios de grande escala. No entanto, a transferência da tecnologia desenvolvida ao longo das últimas quatro décadas tem sido feita para edifícios de menor escala – tanto comerciais como residenciais. Os aspetos construtivos e formais são fatores importantes, mas os aspetos funcionais, de ciclo de vida, custo e impacto ambiental, têm adquirido um papel fundamental na escolha de soluções com membrana.

Em muitos casos, os polímeros, na forma de materiais de isolamento e impermeabilização, constituem-se como indispensáveis para a conceção de edifícios energeticamente eficientes. O seu peso reduzido potencia a criação de estruturas leves e ao mesmo tempo eficientes, com conseqüente redução do impacto ambiental. Contudo, as desvantagens dos materiais poliméricos são: o elevado consumo de energia no processo de produção, a utilização de materiais fósseis e a sua insatisfatória reciclagem. Neste momento, os investigadores procuram intensivamente um material que substitua a utilização do petróleo na produção de polímeros, com o objetivo de reduzir o consumo de matérias-primas finitas e promover a reciclagem e o fim de vida destes materiais.

Nos últimos anos observa-se um retorno às aplicações arquitetônicas com membranas, o espectro vai desde aplicações de alta a baixa tecnologia (Knippers *et al*, 2011). No futuro, pode-se esperar um uso cada vez maior de sistemas construtivos com membranas em edifícios sob a forma de estruturas permanentes, mesmo sob as condições climáticas predominantes da Europa central e do norte (Moritz, 2000).

---

<sup>5</sup> Em 1948, Walter Bird construiu a primeira estrutura pneumática, e em 1957 Frei Otto fundou o *Centro de desenvolvimento de construções leves* em Berlim e construiu *Dancing Fountain* em Colónia.



### 3.2.1. O contributo de Frei Otto

Em meados do século XX, a aplicação de membranas na área de estruturas autoportantes foi fundamentalmente influenciada pela obra de Frei Otto (Figura 3.5(a)). Em 1967, o primeiro protótipo foi mostrado ao público com a inauguração do Pavilhão Alemão na Expo '67, em Monreal (Figura 3.5(b) e (c)). As membranas têm desempenhado um papel importante na arquitetura desde a sua primeira aplicação, em larga escala, no Estádio Olímpico de Munique<sup>6</sup> (Figura 3.5(d)) em 1972, concebido pelos arquitetos alemães Frei Otto e Gunter Behnisch (Glaeser, 1978). Este projeto lançou uma nova tendência arquitetónica. A investigação de Frei Otto aprofundou métodos de construção que poderiam ser altamente eficazes, com muito pouco material empregue para cumprir objetivos e requisitos comuns, melhorando o ambiente construído, evitando conflitos com a natureza e garantindo a sobrevivência do Homem através da sustentabilidade - um quarto princípio a ser adicionado à filosofia de Marcus Vitruvius (80/70 AC a 13 AC): *firmitas, utilitas, venustas* - isto é, sólida, útil e bela.

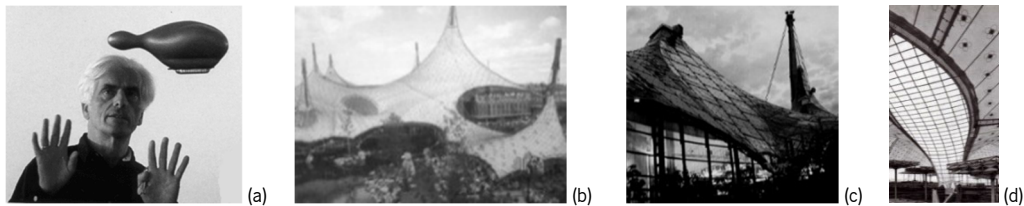


Figura 3.5. a) Frei Otto (Bawa-Cavia, 2010), b) e c) Pavilhão da Alemanha na Expo 1967 em Monreal; (d) Estádio Olímpico de Munique, 1972 (Tensinet, 2015).

Com a fundação do Instituto de Estruturas Leves (ILEK) na Universidade Técnica de Stuttgart, em 1964, Frei Otto recorre ao uso intensivo de membranas para coberturas e para a envolvente vertical. No seu trabalho de investigação, lidou com exigências térmicas e acústicas em edifícios com maiores requisitos de conforto. Desde então, foram criadas muitas estruturas de membranas inovadoras em todo o mundo que usaram tecnologias de desenho e produção e permanecem na atualidade, com constantes aperfeiçoamentos e inovações, através das quais se desenvolveram ainda mais as tecnologias de construção com membranas.

Desde então, o progresso nos materiais, do ponto de vista da engenharia e do uso de tecnologia informática para lidar com condições geométricas complexas de fluxo de forças e comportamento estrutural, alargaram consideravelmente o campo de aplicação de membranas na construção. Novas ferramentas de desenho, que conseguem representar e calcular tridimensionalmente superfícies sinclásticas (curvadas na mesma direção) ou anticlásticas (curvadas em direções opostas) (Figura 3.6), têm permitido o desenho e execução de tais estruturas de uma forma economicamente viável e eficiente.

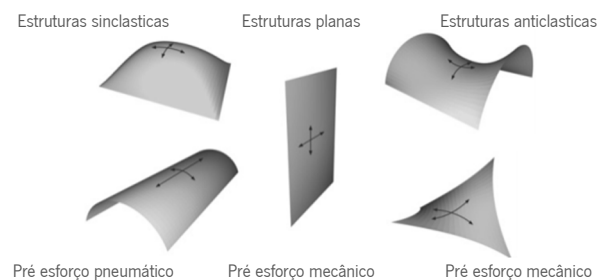


Figura 3.6. Formas típicas das estruturas tensadas.

Um importante desenvolvimento na construção com membranas é representado pelo uso de almofadas pneumáticas e herméticas, feitas de películas ou membranas revestidas, que trouxeram novas oportunidades de desenho. Assim, emergiram mais edifícios emblemáticos, tal como o estádio *Allianz Arena* em Munich ou o *Eder Project* em Cornwall. As vantagens das construções pneumáticas são óbvias. O espaço cheio de ar, com uma pressão positiva de 0,2 bar, é capaz de fornecer um certo grau de isolamento térmico; as almofadas pneumáticas são – comparativamente ao vidro - muito leves e permitem regular a transmissão de luz através de impressão serigráfica.

<sup>6</sup> Classificado como monumento histórico.

### 3.3 Características das membranas

*“A madeira apodrece, os metais são caros, o couro e o marfim tornam-se frágeis teias! Durante muito tempo a humanidade foi sonhando com a substituição de materiais naturais por sintéticos - que fossem fáceis de produzir, de longa duração e prontamente disponíveis para todos.”* (Knippers et al, 2010)

Foi este sonho que desde o século XVI os alquimistas tentaram alcançar através das mais estranhas experiências. Por exemplo, na sequência dos danos provocados pela segunda Guerra Mundial, surgiu uma procura por uma solução expedita que as pessoas pudessem utilizar para substituir os vidros partidos nos edifícios e terem conforto. Na procura de uma resposta eficaz, desenvolveu-se uma tela em polímero translúcido e muito resistente, impermeável e que permitia dar proteção solar – *Barrer le soleil* (barrar o sol - tradução para português) - e que esteve na origem da atual empresa *Barrisol*, mundialmente conhecida pela aplicação de membranas tensadas no interior de edifícios. Esta empresa está localizada em território francês e próximo da fronteira com a Alemanha e a Suíça, onde existiam e ainda existem muitos laboratórios e indústrias químicas, essenciais para o desenvolvimento deste tipo de membranas.

Esta membrana foi desenvolvida para dar uma resposta rápida a uma necessidade de reabilitação funcional dos edifícios danificados. Contudo, apesar de ter sido utilizada temporariamente, a sua aplicação foi eficiente e daí surgiram novas soluções com base nas suas potencialidades. Este fato constituiu um dos primeiros exemplos de como as membranas podem ser utilizadas na reabilitação de edifícios. Na Tabela A3.1 do Anexo 3 apresentam-se, ordenados cronologicamente, os desenvolvimentos associados às membranas arquitetônicas.

#### 3.3.1. Tipos

Como já foi referido, a definição de membrana compreende membranas simples e compostas: tipicamente, as simples constituem-se por um só material (uma película ou um tecido não revestido); as compostas constituem-se por um substrato têxtil e um revestimento polimérico. Estas “camadas” são normalmente feitas de materiais diferentes e ambas são mencionadas ao designar o material da membrana. Tecidos com inserções de trama, tecidos laminados e películas finas são variantes do conceito geral de membrana. As combinações mais comuns de tecido e revestimento são (Figura 3.7): membrana de poliéster revestida a PVC ou THV; membrana de fibra de vidro revestida a PTFE, silicone ou laminado com película de PTFE; e membrana de PTFE revestida com PTFE ou outro fluoropolímero.

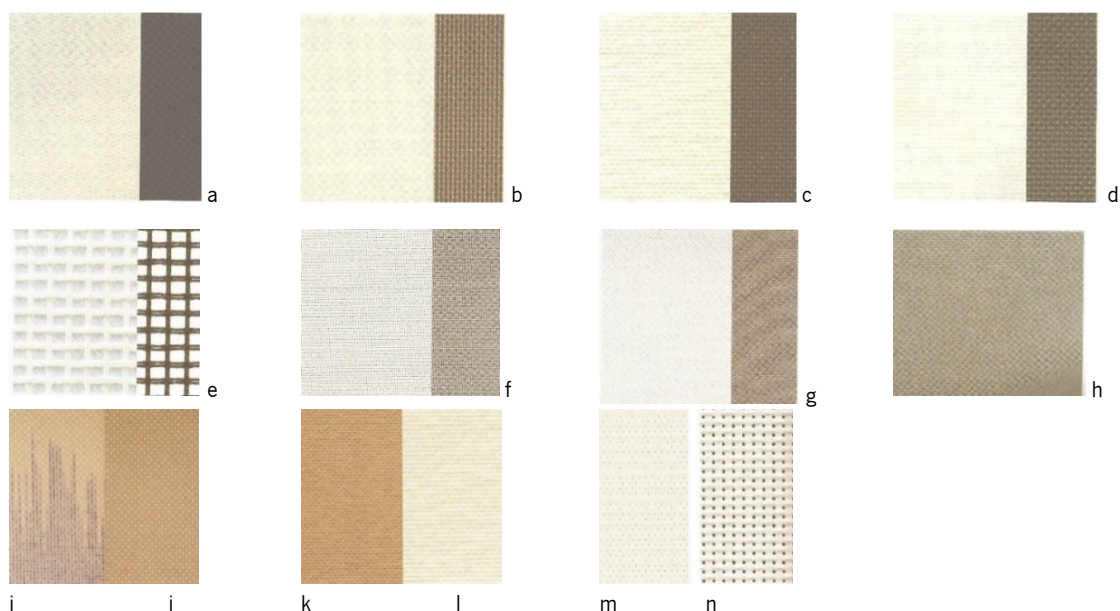


Figura 3.7. Membranas com e sem revestimento: (a) membrana de poliéster revestida a PVC; (b) membrana de poliéster revestida a THV; (c) membrana em fibra de vidro revestida a PTFE; (d) Membrana fibra de vidro revestida a silicone; (e) membrana de fibra de vidro laminada com membrana PTFE; (f) membrana PTFE revestida; (g) membrana PTFE não revestida; (h) revestimento para redução da emissividade (low E) aplicado em membrana de fibra de vidro revestida a PTFE. Tiras de membrana de poliéster revestida a PVC embebida em tinta: (i) sem revestimento; (j) com fibras revestidas para minimizar o efeito higroscópico (low wick coating). Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE: (k) depois de produzida; (l) após exposição a raios UV; (m) Membrana acústica com micro perfurações; (n) Rede de poliéster revestida a PVC utilizada como membrana de proteção solar (Knippers et al., 2011).

Os substratos têxteis mais comuns que podem ser feitos de fibras orgânicas ou inorgânicas (Figura A3.1 do Anexo 3), apresentam-se, geralmente, em rolos de 5 metros de largura. Os fios na direção longitudinal do rolo são designados por fio de teia (Figura 3.8), na direção perpendicular designam-se por fio de trama (Figura 3.8). Os procedimentos de tecelagem mais utilizados para os tecidos usados na arquitetura têxtil são o tecido liso e o panamá (2:2), como se exemplifica na Figura 3.8. Devido ao procedimento de tecelagem, os tecidos apresentam uma relação tensão-deformação altamente não linear e diferentes propriedades na direção da teia e da trama. A maioria dos tecidos é caracterizada por maior rigidez na direção da teia do que da trama.

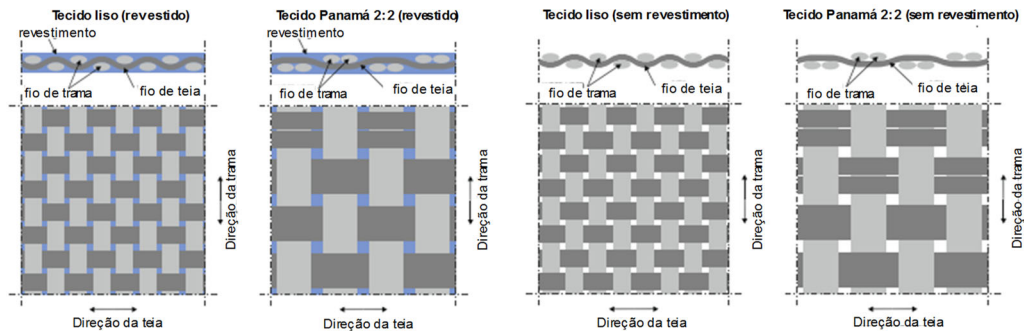


Figura 3.8. Configuração dos tecidos utilizados em arquitetura têxtil (adaptado de ELLF© apud Stranghøner et al., 2016).

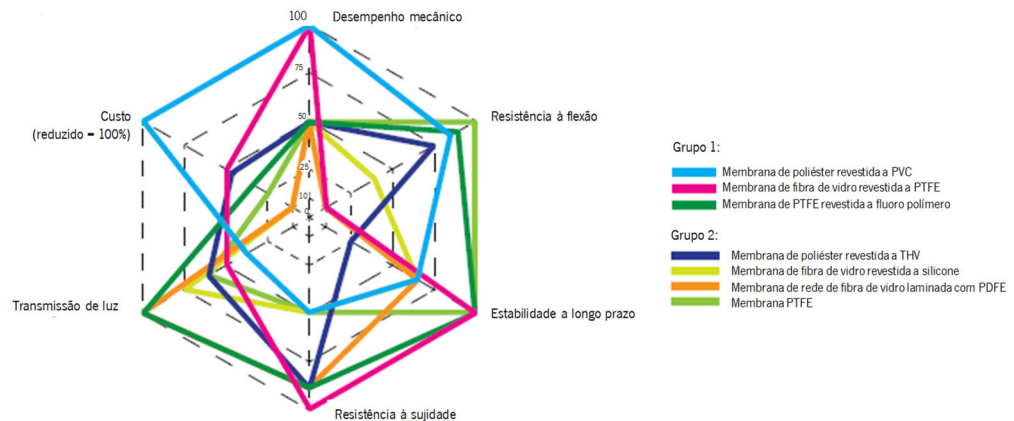
Os tecidos são revestidos apenas quando utilizados no exterior, sobretudo para proteção do tecido e para obter propriedades físicas desejáveis. Embora o revestimento também seja utilizado para transmitir forças de corte (especialmente nas juntas soldadas), este aspeto não tem influência no comportamento estrutural da membrana em si (Stranghøner *et al.*, 2016). A teia e a trama são os elementos estruturais da membrana. A função do revestimento da membrana é proteger o tecido contra a humidade, radiação UV, fogo e ataque de agentes bacterianos; a sua qualidade é, portanto, crucial para aumentar a vida útil do material. O revestimento, não só melhora a durabilidade da membrana, como também influencia as suas propriedades mecânicas - ajuda a fixar a geometria do substrato de tecido e, conseqüentemente, influencia (aumenta) a rigidez ao corte e a resistência à propagação de rasgo da membrana. Os revestimentos termoplásticos permitem que partes individuais de material de membrana sejam soldadas entre si e através da adição de pigmentos ao revestimento ou impressão é possível atribuir cor às membranas. Os revestimentos de todos os tecidos feitos de fibras sintéticas orgânicas e inorgânicas são feitos de polímeros termoplásticos (PVC, PTFE e outros fluoropolímeros). São exceções: a borracha de silicone que pertence ao grupo dos elastômeros e a resina de silicone que é um polímero termoestável. Na generalidade, os revestimentos têm influência nas seguintes propriedades: resistência à tração, ao corte; soldabilidade; proteção UV; impermeabilidade à água; reação ao fogo; transmissão e reflexão de luz; emissividade; difusão de luz incidente; repelência à sujidade; coloração e radiação de calor (Knippers *et al.*, 2011). Devido à crescente procura de tecidos revestidos, com melhor desempenho térmico, têm surgido cada vez mais membranas com revestimentos Low E (Low Emissivity, baixa emissividade). Estes baseiam-se na mesma tecnologia utilizada para o vidro isolante; consistem num revestimento metálico ultrafino à base de óxido de estanho fluorado, ou uma fina camada de prata. O resultado é uma redução considerável das perdas de calor do interior do edifício (Beccarelli, 2015).

No Anexo 3 (ponto 3.1) apresenta-se uma breve descrição dos tipos de membrana mais comuns e de última geração que podem ser usados em edifícios: membrana de poliéster (PES) revestida a policloreto de vinil (PVC); membrana de poliéster revestida a THV; membrana de fibra de vidro revestida a PTFE; membrana de fibra de vidro revestida a silicone; membrana de rede de fibra de vidro laminada com película de PTFE; membrana em tecido PTFE, com ou sem revestimento; membrana em aramida revestida a PVC ou PTFE; membranas em rede (malha aberta), com ou sem revestimento; membranas de Etileno-TetraFluoroEtileno (ETFE); membrana de *nylon* revestida a PU; membrana de PVC.

### 3.3.2. Requisitos gerais das construções com membranas

Existem muitos requisitos associados às estruturas realizadas com materiais em membrana (Figura 3.9). No entanto, atualmente não existem no mercado materiais que satisfaçam completamente todas as exigências. Os

critérios devem ser ponderados de acordo com a aplicação pretendida e a sua localização. Por exemplo, se por um lado a elevada resistência à tração e o bom comportamento a cargas permanentes são fatores cruciais para uma cobertura permanente de grande dimensão, por outro, a leveza, a resistência à dobra, à flexão e à fendilhação são fatores decisivos para o desenho de soluções com membrana conversíveis. Através do diagrama da Figura 3.9 é possível comparar as mesmas qualidades para diferentes materiais de membrana. É claro que nenhum dos materiais em membrana cobre todas as exigências de forma igual. Salienta-se que critérios como a resistência à flexão e a transmissão de luz devem ser avaliados separadamente para cada projeto. Segundo Knippers *et al.* (2011), o custo de um material em membrana não deve ser considerado isoladamente, porque a escolha de cada material tem efeito sobre o custo de produção e os custos de construção específicos para cada projeto e, ao mesmo tempo, tem de ser coordenada com as expectativas em relação à durabilidade do material.



Propriedades/tipos de membrana:	Grupo 1	Grupo 2
<b>Desempenho mecânico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevada força de tensão</li> <li>Elevada resistência à propagação do rasgo</li> <li>Resistências semelhantes nas direções da teja e da trama</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevada rutura de alongamento</li> <li>Baixa deformação sob carregamentos permanentes;</li> <li>Boa maleabilidade</li> </ul>
<b>Resistência à fendilhação e flexão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capacidade de dobragem (soluções moveis ou conversíveis)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem rutura de fibras sob tensões de compressão</li> </ul>
<b>Proteção contra os efeitos das condições climáticas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistência a ataques químicos e biológicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estabilidade sobre ação de raios UV</li> </ul>
<b>Características da superfície</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soldável</li> <li>Autolimpeza e anti adesiva</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Indicada para aplicar revestimentos</li> <li>Aparência estética</li> </ul>
<b>Resistência ao fogo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não ser facilmente inflamável;</li> <li>Não produz gotejamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produção mínima de fumo (toxicidade)</li> </ul>
<b>Transmissão de luz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transmissão pretendida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reflexão pretendida</li> </ul>
<b>Economia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Custos reduzidos de matéria-prima</li> <li>Custos reduzidos de produção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Custos reduzidos de montagem</li> <li>Longo tempo de vida expectável</li> </ul>

Figura 3.9. Comparação entre sete tipos de membranas (o melhor material para cada caso assume o valor de 100%) (adaptado de Knippers *et al* (2011) e Heybroek (2014)).

### 3.3.3. Propriedades

As características únicas das estruturas tensionadas<sup>7</sup>, comparativamente aos componentes de elementos construtivos mais convencionais, atribuem-se sobretudo ao comportamento estrutural dos elementos como cabos e membranas (Chilton, 2010 *apud* Stranghøner *et al.*, 2016). Elementos em tração pura constituem a forma mais eficiente de resistir a cargas externas. Comparativamente às vigas e colunas, onde parte do material é subutilizada ou a instabilidade por torção compromete a resistência final dos componentes, os cabos e membranas podem ser submetidos à resistência máxima. No entanto, devido às semelhanças com uma catenária, a deflexão (grande) da estrutura está diretamente relacionada com a magnitude e a distribuição das cargas aplicadas (Stranghøner *et al*, 2016). Apenas uma geometria adequada, projetada com um nível correto de dupla curvatura (anticlástico para superfícies pré-esforçadas, sinclástico para componentes pneumáticos) pode suportar as cargas de vento e neve, sem problemas de pressão/sucção/elevação ou acumulação, de modo a transmitir estes esforços com segurança para a estrutura primária e às fundações de forma otimizada (Moritz, 2000).

<sup>7</sup> Este termo descreve a categoria de edifícios em que a capacidade de carga é obtida através da tensão de tração da maioria dos seus componentes, tais como cabos, membranas, *etc.* A única exceção corresponde aos elementos rígidos posicionados na fronteira das membranas e aos elementos estruturais de suporte que geralmente são submetidos à compressão e flexão. As estruturas tensionadas são comumente subdivididas em: membranas tensionadas, estruturas pneumáticas e redes de cabos ou vigas pré-tensionadas (Lewis, 2003 *apud* Stranghøner *et al*, 2016).

A Tabela 3.1 apresenta uma síntese/visão global das propriedades que apresentam maior relevo para selecionar a membrana mais adequada para cada tipo de utilização. No Anexo 3 (ponto 3.2) são descritas as propriedades elementares dos materiais de membrana mais comuns, tais como: resistência à tração; resistência à propagação de rasgo; alongamento à ruptura e tensão de rigidez. Para obter mais informação detalhada sobre as características das membranas mais comuns pode tomar-se como referência o relatório da Comissão Europeia, da autoria de Stranghøner et al (2016) - “*Propect for European Guidance for the structural Design of Tensile Membrane Structures: support to the implementation, harmonization and further development of Eurocodes*”.

Tabela 3.1. Visão geral das propriedades dos materiais em membrana utilizados nos edifícios (Pohl, 2010; Knippers et al, 2011).

Material de substrato	Revestimento	Repelência à sujidade	Durabilidade (anos)	Durabilidade à flexão	Aplicações/ observações
Poliéster tipo 1 - 5	PVC	Suficiente	15 - 20	Boa	Material corrente.
Poliéster	PVC + acrilatero	Boa	≤ 20	Boa	Boa resistência à sujidade.
	PVC + PVF	Muito boa	–	–	–
	PVC + PVDF	Muito boa	–	–	–
Poliéster elevada resistência	–	Muito boa	10- 20	Boa	Membrana p/ condicionamento acústico translúcida.
Fibra de vidro	Silicone	Boa	25 - 30	Fraca	Reduzida auto-limpeza.
Fibra de vidro	Fluoro polímero	Boa	15- 20	Fraca	Membrana p/condicionamento acústico com reduzida emissividade.
Malha aberta de fibra de vidro	PTFE	Muito boa	≤ 25	Fraca	Aberturas de malha distintas.
Malha aberta de fibra de vidro	PVC	Boa	10- 15	Fraca	Boa relação entre resistência e translucidez.
PTFE	–	Muito boa	≤ 25	Muito boa	Indicada para soluções conversíveis.
Malha de aço	–	Boa	≤ 50	Fraca	Solução adequada para ventilação.
Aramida	PVC	Fraca	≤ 20	Boa	Difícil maleabilidade. Translucidez e elasticidade reduzidas.
Poliéster	–	Fraca	≤ 5	Muito boa	Aplicação interior, uso temporário.
Película PVC flexível	–	–	15- 20	Fraca	Só permite aplicação interior.
ETFE 50 – 250 µm	–	Muito Boa	≤ 25	Fraca	Estruturas pneumáticas.

	Membrana poliéster PVC	Membrana poliéster THV	Membrana fibra vidro PTFE	Membrana fibra vidro silicone	Malha fibra vidro laminada PTFE	Membrana PTFE revestida	Membrana PTFE
<b>Aplicações</b>	Diversas aplicações. Material com custo reduzido.	Elevada transmissão de luz.	P/estruturas permanentes	Estruturas permanente. Elevada transmissão de luz.	Estruturas permanente Elevada transmissão de luz.	Estruturas permanentes e móveis. Elevada transmissão de luz.	Estruturas permanentes e móveis. Fraca estanquidade.
<b>Métodos de união entre juntas</b>	Soldagem por alta frequência e impulso.	Soldagem por alta frequência e impulso.	Soldagem por impulso c/película intermédia.	Vulcanização, colagem ou costura (ou ambos).	Soldagem por impulso com película intermedia.	Soldagem por alta frequência.	Costura.
<b>Estabilidade</b>	Boa estabilidade UV e resistência química.	Sem informação disponível.	Muito boa estabilidade UV e resistência química.	Boa estabilidade UV e resistência química.	Boa estabilidade UV e resistência química.	Muito boa estabilidade aos raios UV e resistência química.	Muito boa estabilidade aos raios UV e resistência química.
<b>Sensibilidade à fissuração</b>	Muito resistente	Resistente.	Muito sensível	Pouco sensível.	Muito sensível	Muito resistente.	Muito resistente.
<b>Sensibilidade à sujidade</b>	Vulnerável à sujidade. Melhora c/aplicação sobre revestimento	Bom comportamento o à repelência de sujidade.	Autolimpeza.	Vulnerável à sujidade.	Autolimpeza.	Bom comportamento à repelência de sujidade.	Bom comportamento o à repelência de sujidade.
<b>Transmissão de luz</b>	5- 15%	15- 23%	8- 20%	25- 30%	43- 46%	20- 40%	35%
<b>Impacto ambiental (substrato e revestimento considerados separadamente. Sistemas de reciclagem existentes p/o conjunto ainda são complexos)</b>	PV degrada-se e forma cloro. O poliéster pode ser derretido ou reutilizado como fibras de menor dimensão.	THV decompõem-se com elevadas temperaturas	Eliminação da fibra de vidro de forma positiva a nível ambiental. PTFE decompõe-se com elevadas temperaturas e produz fluor.	Eliminação da fibra de vidro de forma positiva a nível ambiental. O silicone pode ser reciclado.	Eliminação da fibra de vidro de forma positiva. PTFE decompõe-se com elevadas temperaturas e produz fluor.	PTFE decompõem-se com elevadas temperaturas e produz fluor.	PTFE decompõem-se com elevadas temperaturas e produz fluor.
<b>Reação ao fogo (DIN 4102)</b>	B1	B1	A2 (tipo I e II) B1 (tipo III e IV)	B1	B1	B1 S1- d0 (EN13501)	B1 S1-d0 (EN13501)
<b>Peso próprio (g/m²)</b>	Tipo I: 750 Tipo II: 900 Tipo III: 1100 Tipo IV: 1300 Tipo V: 1450	Tipo I: 1150 Tipo II: 1200	Tipo I: 800 Tipo II: 900 Tipo III: 1200 Tipo IV: 1500	Tipo 0: 200 Tipo I: 340 Tipo III: 685 Tipo IV: 1100	1050	1080	320 530
<b>Resistencia à tração (teia/ trama) (N/50mm)</b>	Tipo I: 3000/3000 Tipo II: 4200/4000 Tipo III: 5800/5400 Tipo IV: 7500/6500 Tipo V: 10000/9000	Tipo I:3500/3000 Tipo II: 5000/4500	Tipo I: 500/3500 Tipo II: 5000/4500 Tipo III: 7000/7000 Tipo IV: 8000/7000	Tipo 0: 2500/1750 Tipo I: 3000/3000 Tipo III: 5000/5000 Tipo IV: 8000/8000	4500/4000	4000/4000	2000/2050 4000/3700
<b>Resistência a propagação do rasgo (N) (teia/trama)</b>	Tipo I: 300/300 Tipo II: 500/500 Tipo III: 850/800 Tipo IV:1200/1200	Tipo I:700/700 Tipo II: 600/600	Tipo I: 300/300 Tipo II: 350/350 Tipo III: 500/500 Tipo IV: 500/500	Tipo 0: 350/400 Tipo I: 300/300 Tipo III: 400/400 Tipo IV: 500/500	250/250	798/752	365/330 669/550

	Tipo V: 1800/1800						
<b>Vida útil</b>	15- 20	S/ informação	≥ 25	≥ 20	≥ 25	≥ 25	≥ 30
<b>Custo matérias-primas</b>	15- 45%	60- 140%	50- 150%	110- 180%	100- 180%	100- 140%	120- 170%

<sup>1</sup> Valores médios; <sup>2</sup> Comparados com o preço médio da membrana de fibra de vidro revestida a PTFE (100%); Melhor solução para cada indicador.

### 3.3.4. Processo de concepção e de preparação para obra

A concepção de estruturas tradicionais (com funcionalmente à compressão) segue uma sequência linear, na qual a forma arquitetônica inicial passa para a etapa de dimensionamento estrutural e, subsequentemente, o projeto definitivo é transmitido ao construtor para a realização da obra. Contudo, a concepção de um projeto de arquitetura têxtil requer uma colaboração conjunta entre o arquiteto e o engenheiro estrutural na fase inicial de concepção. A forma inicial da estrutura de membrana resulta de estudos preliminares de análise estrutural, denominada de procura da forma (*form-finding*), que assegura que cada ponto da superfície está em equilíbrio e se definem as condições limite/perimetrais da forma. A ideia arquitetônica e estrutural deve convergir para uma solução que seja esteticamente e estruturalmente eficiente e viável. O processo de concepção também tem de considerar questões relacionadas com o material escolhido, a sua produção e montagem. É, portanto, desejável que os instaladores e produtores de materiais estejam envolvidos no desenvolvimento do projeto nesta fase de concepção, quando o tipo de material de membrana é selecionado, com conseqüente repercussão no processo de realização e montagem. O processo de concepção de estruturas com membranas tensionadas pode ser resumido em três etapas principais: (1) procura da forma; (2) análise estática e (3) padronização do corte, com a possível adição de análise dinâmica, se necessário (Beccarelli, 2015). Atualmente existem várias ferramentas informáticas disponíveis para executar cada uma dessas etapas<sup>8</sup>.

O dimensionamento estrutural da membrana é determinado de acordo com os regulamentos vigentes. Uma etapa muito importante deste dimensionamento designa-se por "*padronização do corte*", na qual, o engenheiro de estruturas e o arquiteto definem geometricamente as faixas planas que, uma vez unidas, constituirão a superfície curva. Para tal, consideram-se vários critérios: estética, durabilidade, e relacionados com o caráter ortotrópico da membrana têxtil. Sem esquecer a importância de reduzir o tamanho das faixas, que permitirá a realização de um pré-esforço durante a montagem, utilizam-se vários métodos para se obter a forma. Após estas etapas, a membrana pode então ser transportada para o local, posicionada, fixada aos pontos de ancoragem e é-lhe aplicada o pré-esforço calculado. De um modo geral, a produção de membranas a aplicar num grande vão inclui várias etapas: (1) preparação do padrão de corte (geralmente com uma impressora de corte); (2) união das peças individuais de membrana através de soldagem; (3) soldadura ou dobra do perímetro da membrana, incorporando cordões ou cintas para costura; (4) integração de componentes de montagem quando aplicável e (5) dobragem ou enrolamento da membrana para embalagem e transporte. No ponto 3.3 do Anexo 3 apresenta-se uma breve explicação sobre o processo de corte e de soldadura de membranas.

## 3.4 Visão geral do mercado das membranas arquitetônicas

### 3.4.1. Área Buildtech

A área Buildtech é definida como um subsetor dos têxteis técnicos do qual fazem parte as membranas arquitetônicas, derivadas dos materiais e processos tecnológicos têxteis. Esta área reúne todos os desenvolvimentos e aplicações dos materiais em membrana na construção civil. A título de exemplo, encontram-se as seguintes membranas/têxteis técnicos: (1) em não-tecido, de fibra de vidro ou poliéster, aplicadas na execução de coberturas convencionais, para permitir a permeabilidade ao vapor de água e prevenir danos causados pela humidade (Figura 3.10(a)); (2) as membranas duplas, *designadas por drop stitch fabric*, com espaçamento entre si, que podem ser preenchidas com materiais adequados para fornecer isolamento térmico e acústico (Figura 3.10(b)) e (3) as redes de fibra de vidro ou propileno utilizadas na prevenção e reparação de fissuras em elementos de betão e rebocos. No Japão, a fibra de carbono é vista com enorme interesse como possível material para reforço contra ações sísmicas em edifícios, embora o seu custo ainda seja um fator limitativo da difusão da sua aplicação. As membranas também são aplicadas de outras formas no decurso de

<sup>8</sup> Contudo, antes de existirem métodos de desenho computadorizado, essas etapas realizavam-se através de modelos físicos, com precisão e escalas de representação (em função dos aspetos em estudo).



operações construtivas, como por exemplo em redes de segurança, cofragem flexível para a cura de betão (Figura 3.10(c)), proteções temporárias do local de obra, barreiras acústicas/poeiras, etc.

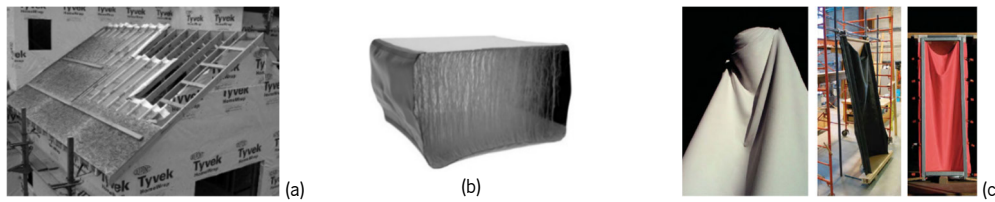


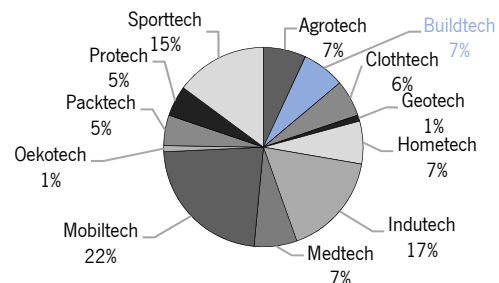
Figura 3.10. Membranas na construção: a) membranas para o vapor em revestimento de cobertura para prevenir humidades de condensação (Dupont, 2015); b) Membrana dupla com espaçamento entre si; c) Cofragem de membrana para betão (Cast, 2009).

Cada vez mais os têxteis técnicos estão a demarcar aplicações que anteriormente eram primordialmente reservadas aos sectores da siderurgia ou dos plásticos, como é o caso das aplicações no sector da construção civil (Euratex, 2006). Devido ao crescimento populacional mundial, e ao aumento de necessidades de proteção ambiental e da saúde, têm-se criado novos mercados para a indústria têxtil devido à maior sustentabilidade ambiental e económica das matérias-primas utilizadas face a outras. Por isso, e cada vez mais, o têxtil não se dedica só às áreas de vestuário e têxteis-lar, mas abrange uma infinidade de aplicações, em especial na área técnica e funcional (Tabela 3.2). Os têxteis técnicos continuam a estimular a Europa no setor da construção civil. Em 2005, Rigby (2005) estimou que a produção de têxteis técnicos na Europa Ocidental crescesse 15% no período de 2005 e 2010. Segundo Markets & Markets (2016), este crescimento confirmou-se e foi explicado pela substituição de outros materiais por têxteis técnicos.

O centro tecnológico “Belgian Textile Research Center” (Centexbel, fundado em 1950) - uma organização sem fins lucrativos, com sede na Bélgica – foca-se na área Buildtech apoiando os fabricantes de têxteis no desenvolvimento de novos materiais e na introdução de novos processos tecnológicos. É o organismo notificado para a certificação de produtos da construção civil pela União Europeia, no âmbito do “Regulamento de Produtos de Construção”. No norte de Portugal, o Centro Tecnológico das Indústrias Têxteis e do Vestuário (Citeve, fundado em 1989), que conta com a participação de 630 empresas do Sector Têxtil e do Vestuário, também se dedica à área do Buildtech.

Segundo a Centexbel (2015), os têxteis, enquanto membranas, na construção civil encontram-se presentes nas seguintes formas: (1) reforço de sistemas construtivos em betão; (2) reforço de fachadas e fundações com redes; (3) revestimentos interiores; (4) mantas de isolamento e proteção; (5) redução de ruído nos sistemas de ar condicionado; (6) proteção visual contra os efeitos da luz solar direta; (7) impermeabilização de coberturas; (8) controlo de permeabilidade em cofragens para betão; (9) membranas reflexivas e permeáveis ao vapor para aplicação na envolvente do edifício; (10) estabilização de solos com malhas em formato de favo e não tecidos como os geotêxteis; (11) estruturas tensionadas (temporárias ou permanentes); (12) painéis de fachada.

Tabela 3.2. Áreas de aplicação dos têxteis técnicos. Percentagem da proporção de vendas a nível Gobar (Gerbe, 2015).



Fonte e direitos de autor: Techtexsil, Messe Frankfurt Exhibitions.

Subsetor	Área de aplicação dos têxteis técnicos	Exemplos de produtos:
Agrotech	Agricultura e florestação, horticultura e pescas.	Para proteção das culturas e controlo de plantas daninhas; membranas biogás; redes de segurança e cordas.
Buildtech	Construção de edifícios, engenharia civil e reabilitação/renovação.	Coberturas; subtelhas; membranas hidrófugas permeáveis ao vapor; isolamento térmico e acústico; revestimento de paramentos, tubagens, cofragens, drenagem de águas para fundações e estabilização de solos e elementos verticais; proteção a diferentes condições climáticas, estruturas em membrana; materiais de reforço; papéis de parede, cabos e cordas, etc.
Clotech	Indústria do calçado e vestuário.	Materiais de enchimento/forro; palmilhas e membranas impermeáveis.

Geotech	Geotêxteis, horticultura, agricultura, vias, armazenamento, construção de diques.	Drenagem; separadores; filtros; materiais de proteção contra a erosão e reforço.
Hometech	Indústria do mobiliário e interiores.	Materiais de enchimento, revestimentos de tetos, paredes, pavimentos e mobiliário
Indutech	Filtragem e outros produtos.	Correias; separadores/filtros; cordas e fitas.
Medtech	Produtos de higiene e outros produtos médicos.	Vestuário; membros artificiais; ortoses; aplicações para feridas e implantes (vasos artificiais, fitas, malhas para hérnias).
Mobiltech	Construção de veículos.	Pneus e revestimento de assentos; <i>airbags</i> , cintos de segurança e revestimentos interiores.
Oekotech	Proteção ambiental.	Filtros de retenção.
Packtech	Materiais para embalagem.	
Protech	Proteção pessoal e de equipamentos (edifícios e veículos).	Vestuário de proteção/segurança; materiais de proteção climática/ fogo e proteção balística.
Sporttech	Componentes para produtos de desporto e lazer	Lonas; mochilas; sacos de cama, etc.

Atualmente, encontram-se a decorrer projetos de investigação e de desenvolvimento de materiais têxteis com aplicações no setor da construção que, segundo a Centexbel (2015), cobrem os seguintes aspetos: (a) qualidade do ar interior; (b) degradação catalítica dos poluentes do ar; (c) compósitos reforçados com fibras; (d) melhorias na qualidade do isolamento (ao ruído, ao calor e ao frio); (e) tratamento de superfície e funcionalização de materiais flexíveis para melhoria do comportamento ao fogo e da repelência à água e à sujidade; (f) integração de sensores em têxteis para monitorizar a integridade estrutural dos edifícios e infraestruturas (Multitexco, 2015); (g) otimização das propriedades acústicas; (h) regulação da transparência das membranas para diferentes tipos de radiação; (i) melhoria das propriedades de armazenamento de energia através da integração de células fotovoltaicas; (j) membranas como materiais de cofragem flexíveis, ou forros de cofragem funcionais para criar formas com elevada complexidade geométrica (Cast, 2009).

#### 3.4.2. Importância da indústria dos têxteis técnicos em Portugal e na Europa

A Indústria Têxtil e do Vestuário (ITV) Portuguesa é uma das atividades com maior tradição na estrutura industrial nacional. Tendo-se estabelecido as primeiras fábricas em Portugal no século XVIII, este setor assumiu, desde cedo, o papel da maior indústria em termos de emprego e internacionalização. Mediante o estudo apresentado no início de 2008 pela Associação Têxtil e do Vestuário Portuguesa (ATP, 2007), a economia nacional revela uma grande dependência relativamente ao sector da ITV. De facto, em 2005 a ITV representava 2,0% do PIB, 25,5% do emprego da Indústria Transformadora e 13,4% das exportações. Em termos relativos, verifica-se que a exportação de têxteis técnicos representa cerca de 2,9% do PIB (ATP, 2007).

A região Norte representa, aproximadamente 80% da atividade económica da ITV nacional, qualquer que seja o indicador escolhido com destaque para o volume de negócios e para o emprego. Em 2003, 79,0% do pessoal ao serviço do têxtil nacional e 79,9% dos efetivos afetos à confeção reportavam ao Norte de Portugal (ATP, 2007). Esta concentração é fundamental para facilitar processos de circulação de bens, informação e conhecimento, predominantemente de natureza informal, permitindo que este tecido empresarial (constituído por empresas de pequena dimensão) consiga manter uma forte orientação exportadora e uma posição significativa nos mercados internacionais.

Na Europa, a indústria têxtil tem uma longa tradição de liderança em termos de inovação e criatividade. Apesar da concorrência global cada vez mais forte e da deslocalização maciça da produção para países com oferta de mão-de-obra mais barata, a indústria têxtil continua a representar um dos principais setores industriais da Europa, já que mais de 2.3 milhões de empregos, € 61 mil milhões (em valor económico) e € 42 biliões em exportações estão diretamente ligados a esta indústria (Grebe, 2015) – sem contar com centenas de milhares de empregos e biliões de euros em criação de valor económico em fornecedores, clientes e serviços relacionados. A União Europeia alargada possui um total de mais de 170000 empresas, das quais cerca de 96% são PME, que produzem um vasto leque de produtos de consumo e industriais através de conhecimento, processos de produção e tecnologias altamente especializados. Isoladamente, estes números mostram a importância de garantir que esta indústria encontre as melhores condições possíveis para ser inovadora na Europa (Euratex, 2006).

A Europa é um dos maiores fabricantes de têxteis técnicos do mundo, representando, em 2014, uma quota de 24% do valor do mercado global (Markets & Markets, 2016). Estima-se que a Alemanha seja o maior mercado de



têxteis técnicos na Europa, devido aos seus avanços tecnológicos, no que diz respeito a equipamentos, maquinarias e matérias-primas. A investigação e a inovação têm sido ferramentas importantes para a indústria têxtil europeia. Ao contrário de algumas indústrias na Europa, a indústria têxtil é líder mundial e pioneira recorrente em inovações tecnológicas e de produto. Por exemplo, a liderança mundial no fabrico de máquinas para o setor têxtil pertence à Europa. Este setor apresenta excedentes de exportação em relação ao resto do mundo. A rapidez de produção, reforçada por produtos e processos inovadores em particular no campo dos têxteis técnicos, permite manter uma elevada competitividade.

Os têxteis técnicos estão a receber um apoio significativo de vários governos, devido à crescente consciencialização sobre os benefícios associados aos seus produtos, tendo o mercado mundial de têxteis técnicos crescido significativamente nos últimos anos. Em 2015, a China (31% e a Índia (18%) representaram quase metade da produção mundial de têxteis técnicos, a América 17%, a União europeia 16% e o resto do mundo 17% (CIRFS, Edana *apud* Grebe, 2015). O mercado Europeu dos têxteis técnicos, em termos de volume, perspetiva-se que alcance 9.95 milhões de toneladas em 2020, supondo uma taxa composta de crescimento anual de 4.33% (CAGR<sup>3</sup>) entre 2015 e 2020 (Tabela 3.3).

O setor de aplicação Buildtech estima-se que alcance um crescimento de 4.43% (CAGR) entre 2015 e 2020 (Tabela 3.3), sendo o 3º maior setor em crescimento. As rigorosas normas de segurança e proteção no setor da construção europeu têm contribuído para o crescimento da procura de têxteis técnicos. Verifica-se que os avanços tecnológicos em curso na indústria têxtil estão criando várias oportunidades a nível global; a concorrência está crescendo consideravelmente, devido ao aumento de aplicações de uso final e inovações de produtos, com uso de têxteis inteligentes (smart textiles), por exemplo.

Tabela 3.3. Dimensão do mercado têxteis técnicos na Europa, por aplicação, 2013-2020 (Million Metric Tons) (Markets & Markets, 2016).

Subsetor	2013	2014	2015	2020p	CAGR (2015-2020)	Indicadores de crescimento
Indutech	1.25%	1.30%	1.35%	1.69%	<b>4.55%</b>	Crescimento mundial, crescente complexidade da produção industrial.
Sportech	1.11%	1.15%	1.19%	1.49%	<b>4.47%</b>	Aumento do consumo produtos de desporto e lazer, particularmente em países emergentes.
Buildtech	0.54%	0.56%	0.58%	0.73%	<b>4.43%</b>	Renovação de edifícios existentes, crescimento urbano, substituição de materiais de construção convencionais, isolamento térmico.
Homotech	0.51%	0.53%	0.55%	0.68%	<b>4.44%</b>	Aumento das despesas com a habitação nos países emergentes.
Clothtech	0.48%	0.50%	0.52%	0.65%	<b>4.40%</b>	Crescimento global, produção de vestuário e aumento proporcional de vestuário funcional.
Meditech	0.48%	0.50%	0.52%	0.64%	<b>4.40%</b>	Aumento da oferta de cuidados de saúde países emergentes, crescimento demográfico, etc.
Protech	0.40%	0.41%	0.43%	0.53%	<b>4.39%</b>	Padrões e requisitos de segurança cada vez mais rigorosos.
Packtech	0.39%	0.40%	0.42%	0.51%	<b>4.38%</b>	Crescimento estável do comércio mundial.
Agrotech	0.47%	0.49%	0.51%	0.63%	<b>4.35%</b>	Crescimento da população, aumento procura de alimentos, acesso a novas áreas de cultivo, etc.
Mobiltech	1.71%	1.76%	1.82%	2.22%	<b>3.99%</b>	Redução de peso, crescimento da produção de veículos.
Oekotech	0.08%	0.08%	0.09%	0.10%	<b>3.88%</b>	Aumento dos encargos, normas ambientais e procura de maior sustentabilidade.
Geotech	0.07%	0.07%	0.07%	0.09%	<b>3.88%</b>	Forte crescimento urbano, construção de infraestruturas em países emergentes.
<b>Total</b>	<b>4.48%</b>	<b>7.76%</b>	<b>8.05%</b>	<b>9.95%</b>	<b>4.33%</b>	Permanente abertura de novas áreas de aplicação.

Legenda: p – projeção

O setor da construção com membranas é altamente especializado e envolve: arquitetos, engenheiros civis, produtores de fibras, tecidos, polímeros, empresas de revestimentos e indústrias de confeção, que têm construído uma densa rede de trabalhos com especialistas de construção metálica e em madeira. A maior parte das empresas envolvidas são pequenas ou médias empresas, com a exceção das empresas fornecedoras de matérias-primas para os tecidos (fibra de vidro, poliéster) bem como as que produzem resinas e revestimentos e materiais químicos para acabamentos. A vasta experiência de todas as pessoas envolvidas e a reputação alcançada pelas obras realizadas tornam este setor altamente especializado (Ollenhauer, 2011).

A Tabela A3.2, localizada no Anexo 3 desta tese, apresenta uma seleção, baseada no relatório de Ollenhauer (2011), de empresas altamente inovadoras na tecelagem, soldadura, costura ou acabamentos de membranas

<sup>3</sup> CAGR (Compound Annual Growth Rate) tradução para português: Taxa composta de crescimento anual - representa o ganho anual uniformizado obtido com um investimento durante um determinado horizonte temporal.

utilizadas em arquitetura, principalmente como estruturas tensionadas, mas também noutras aplicações. Nesta seleção encontram-se empresas líderes na produção de fibras, incluindo fibra de vidro, e químicos, como o PTFE, bem como fornecedores de acabamentos e revestimentos. Alguns destes materiais são visíveis pelo exterior ou interior; outros estão integrados em paredes, tetos ou pavimentos. Com base no levantamento de Ollenhauer (2011) apresentado na Tabela A3.2 do Anexo 3 desta tese, elaborou-se o gráfico da Figura 3.11. Verifica-se que a maior parte das empresas atualmente líderes na produção de membranas iniciaram a sua atividade no período de 1951 a 2000; 63% dessas empresas localizam-se na Europa, em especial na Alemanha e em média têm 64 anos de existência. As empresas existentes com mais de um século de existência na produção de membranas, ou de matérias-primas necessárias para a sua produção localizam-se integralmente na Europa e representam 18% das empresas totais existentes nos dias de hoje. Todas as empresas criadas desde 2001 até aos dias de hoje localizam-se na Ásia.

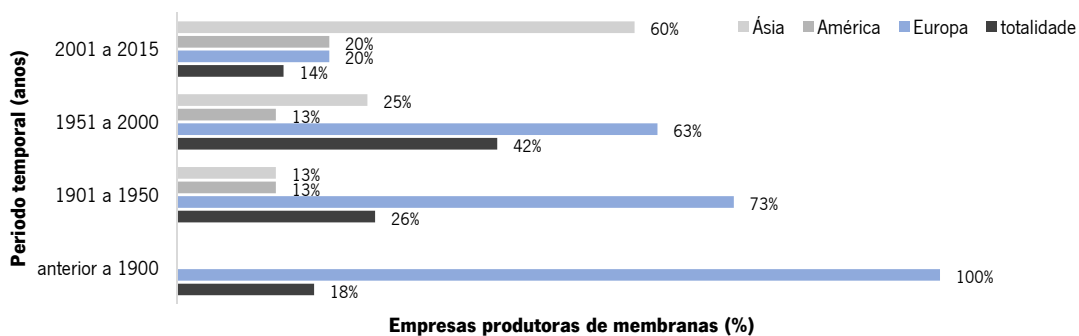


Figura 3.11. Distribuição temporal e ponderada das empresas produtoras de materiais em membrana destinadas ao setor da construção e respetivas matérias-primas.

### 3.4.3. Inquérito à percepção geral das empresas de instalação de soluções construtivas com membranas

Num inquérito anónimo, realizado através de formulário online (entre janeiro e junho de 2019) a um universo de 60 empresas instaladoras de Soluções Construtivas com Membranas (SCM), 30 nacionais + 30 internacionais, apenas 6 empresas nacionais e 3 empresas internacionais deram resposta, ou seja, constituem uma amostra de 20% do universo de empresas nacionais e 10% de empresas internacionais. Apesar desta amostra não ser significativa, considerou-se importante, registar os seus resultados nesta tese, de modo a que, no futuro, este inquérito possa servir de base a outras ações de investigação, utilizando outros métodos de inquérito, tipo presencial e a um número mais alargado de empresas/gabinetes projetistas.

Os resultados desse inquérito encontram-se no ponto 3.5 do Anexo 3. Ao nível nacional, os resultados do inquérito revelam que a maioria das empresas manifesta o seguinte: (1) faz sentido promover a aplicação de SCM para a reabilitação de edifícios; (2) acham que é necessário mais ações de formação, investigação e desenvolvimento para promover essas aplicações; (3) entendem que as SCM têm de ser melhoradas nos aspetos acústicos, ambientais/reciclagem, durabilidade, higrótérmicos (1), resistência ao fogo (1), resistência aos raios UV e tecnológicos (construção); (4) entendem que tendências/novidades como a integração de elementos geradores de energia, a interatividade (membranas inteligentes) e utilização de matérias-primas biodegradáveis podem ser aproveitar para aumentar a utilização das SCM; (5) investiriam sobretudo em meios humanos, meios mecânicos e formação; (6) sentem que os principais fatores que limitam o desenvolvimento desta atividade em Portugal são a formação, meios mecânicos e a reduzida produção nacional de membranas.

Ao nível internacional, os resultados do inquérito revelam que a maioria das empresas tem a seguinte percepção: (1) os aspetos culturais/sociais são, entre outros, os que mais limitam o desenvolvimento e aplicação de SCM; (2) se tivessem acesso a financiamento para investir na empresa também investiriam em meios humanos e mecânicos, como as empresas nacionais; (3) consideram que a eficiência energética é a tendência que se pode aproveitar para aumentar a utilização das SCM; (4) a par das empresas nacionais, também adotam práticas de reciclagem das membranas, mas o destino final maioritário é o aterro; (5) entendem que é necessário investir mais na investigação e desenvolvimento para promover a aplicação de SCM na reabilitação de edifícios; (6) a

maioria das aplicações de SCM são em coberturas e fachadas, e em edifícios de comércio/serviços, culturais/recreativos e desportivos.

### 3.5 Visão geral das construções com membranas arquitetônicas

*“Membrane structures in architecture have come a long way from prehistoric to the present. Nevertheless, Western histories of architecture and treatises on building construction have often ignored them due to their intemporality, circumstantial use, or alleged lack of representation, even though they have been present through history in all climates and regions around the world. However, in recent decades, circumstances have changed and have catapulted the use of structural membranes as structural elements or even building systems for many applications. Technical advances in materials, products, elements, systems, design methods, and comfort, together with growing environmental concerns have increasingly placed structural membranes as a favorable alternative to conventional construction methods.” (Llorens, 2015)*

Atendendo à visão de Llorens (2015), nas subsecções seguintes analisa-se uma amostra de 592 casos de estudo (construídos entre 1960 e 2010) e que correspondem à totalidade dos projetos que se encontram registados na base de dados da Associação Tensinet (Tensinet, 2015), com o intuito de obter uma visão geral das construções em membrana relativamente a vários aspetos.

#### 3.5.1. Período de construção, localização geográfica e tipo de uso

O gráfico da Figura 3.12 mostra que a maioria das construções em membrana identificadas na base de dados da Tensinet realizou-se entre o ano de 1991 e 2000. Entre os finais de 1980 e 1990 verificou-se um aumento exponencial na realização deste tipo de construções. Este aumento surge na mesma altura em que se desenvolvem fibras com elevado desempenho. Contudo, verifica-se que na passagem para o período entre 2001 e 2010 existe um decréscimo de construções em membrana. Considerando a distribuição geográfica da amostra da Tensinet em análise, verifica-se que a Europa apresenta mais de metade do número de construções com membrana a nível mundial (Figura 3.13)

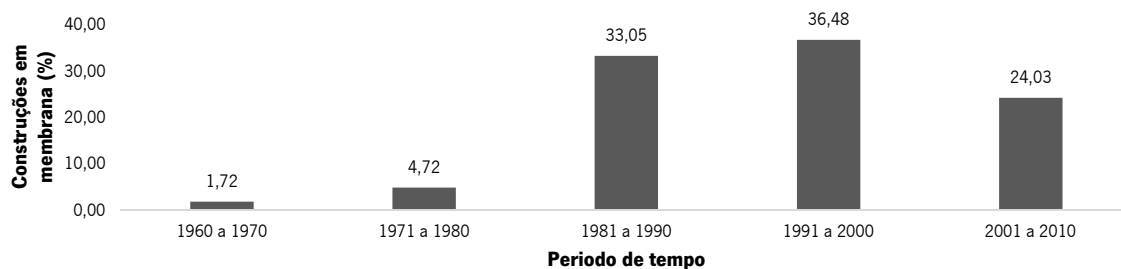


Figura 3.12. Distribuição da percentagem de construções em membrana identificadas na base de dados da Tensinet por diferentes períodos temporais.



Figura 3.13. Distribuição geográfica das construções em membrana com a respetiva percentagem (obtida através da análise da base de dados da Associação Tensinet).

As membranas arquitetônicas são utilizadas de vários modos na construção dos edifícios - permanente ou temporário; num universo de 562 projetos registrados no banco de dados Tensinet (em 2015), 290 projetos são permanentes e 272 são temporários. Estruturas temporárias, como tendas e toldos, são algumas das aplicações com maior visibilidade da aplicação de membranas. No entanto, as membranas arquitetônicas ganharam mais importância quando passaram a participar na construção de estruturas semi-permanentes, como estádios desportivos, centros de exposições e outros edifícios de grandes dimensões. Pela análise da Figura 3.14 verifica-se que o tipo de uso mais significativo nas construções com membrana é o desportivo, seguido das funções de entretenimento/lazer e exposição. Um dos denominadores comuns a este tipo de edifícios é possuírem grandes vãos livres.

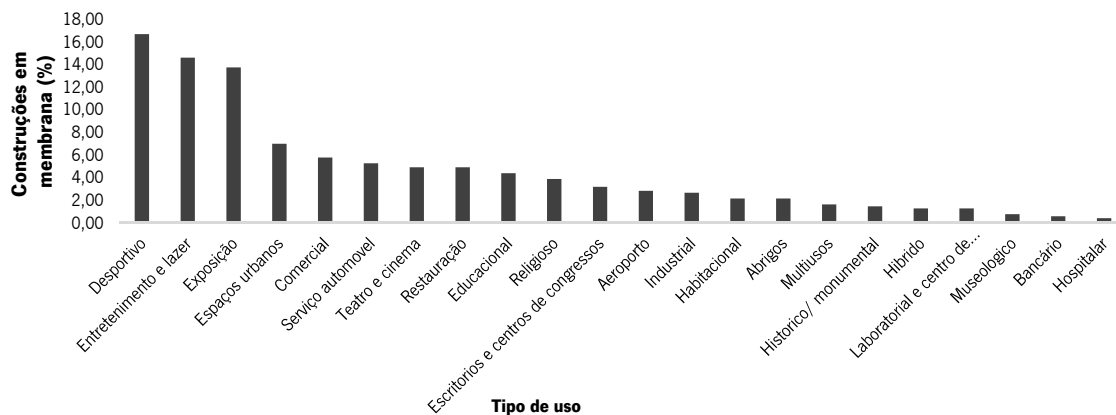


Figura 3.14. Gráfico com os resultados da análise a casos de estudo segundo o tipo de uso/função.

### 3.5.2. Zona Climática e zonas de vulnerabilidade a desastres naturais

Pela análise da Figura 3.15 verifica-se que mais de metade das construções com membrana se situa em clima temperado. Neste esquema considera-se a seguinte classificação: clima tropical - quente e seco todo o ano; clima árido - seco e quente todo o ano; clima mediterrânico - inverno ameno e verão quente e seco; clima temperado - inverno frio e verão ameno; clima frio - frio todo o ano e clima polar - muito frio e seco todo o ano. O clima árido é o que possui menor percentagem de construções em membrana e os registos de construções em clima frio e polar são pouco expressivos, de tal modo que não aparecem representados na Figura 3.15.

A Figura 3.16 mostra que a maioria das construções em membrana se encontra geograficamente localizada em zonas de risco reduzido, ou muito reduzido a desastres naturais. Contudo, observando a Tabela 3.4, verifica-se que o segundo país com maior percentagem de construções com membranas arquitetônicas – o Japão – possui um nível muito elevado de risco a desastres naturais. As ilhas japonesas encontram-se geograficamente localizadas em áreas com vários e severos distúrbios naturais. Não só terremotos, mas também nevões e tufões fortes afetam pontualmente os edifícios no Japão. Muitas construções em membrana já experienciaram estes desastres. Kawaguchi (2015) aponta que, devido à extrema leveza das construções em membrana, dificilmente são afetadas por cargas resultantes de eventos sísmicos. Por outro lado, das observações e registos feitos por Kawaguchi, conclui-se que o vento, ou neve forte atingem diretamente os grandes vãos das construções em membrana, pois algumas construções em membrana ficaram danificadas devido a fortes tufões e sobrecarga de neve. Contudo, as observações de Kawaguchi (2015) também indicam que, comparativamente aos materiais convencionais, a falha antecipada da membrana pode ter contribuído para a proteção da estrutura de suporte a danos mais graves. O papel da membrana enquanto "limitador de força" deve ser reconhecido e pode ser considerado como um elemento positivo na fase de projeto (Kawaguchi, 2015). Este constitui uma das potencialidades das membranas para reabilitação funcional de coberturas, na medida em que contribui para a durabilidade das construções.

Através do confronto entre a localização geográfica dos casos de estudo analisados e o índice de risco ao desastre natural, foi possível determinar qual o predomínio de construções com membrana em locais com diferentes índices de risco de desastre natural. Na Tabela 3.4 encontram-se destacados os 10 países com mais construções com membranas e o respetivo índice de risco de exposição a desastre natural.

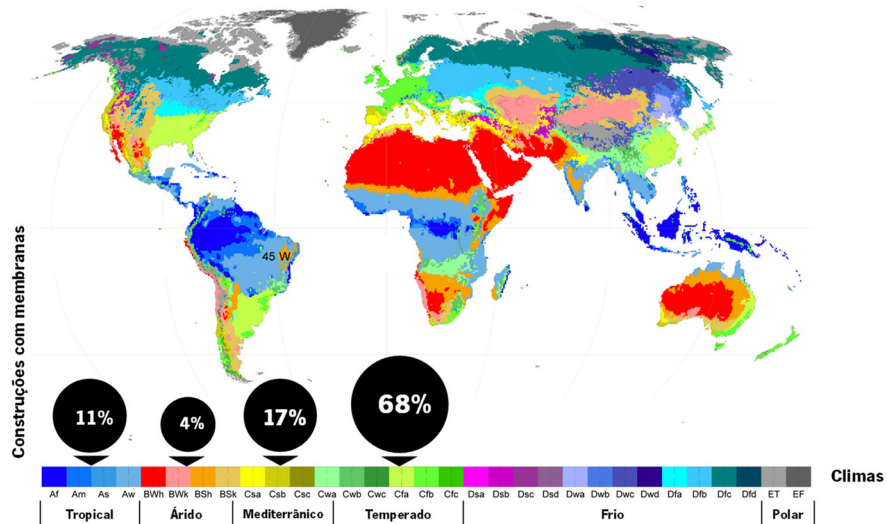


Figura 3.15. Infográfico elaborado através do cruzamento entre mapa mundo de Haschen (2015) e a percentagem de construções em membrana (identificadas na base de dados da Associação Tensinet) por zona climática (segundo a classificação de Köppen, para o período de 1901 a 2010).

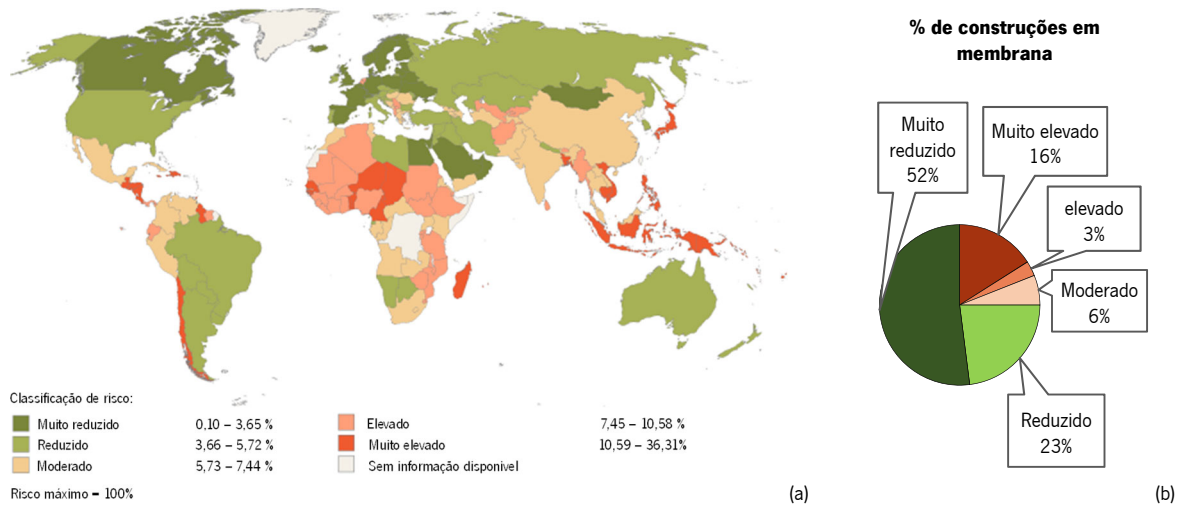


Figura 3.16. Risco de exposição a desastres naturais: (a) mapa com distribuição mundial e classificação de acordo com o método quantil (UNU, 2015); (b) gráfico com percentagem de construções em membrana segundo localização em zonas de risco.

Tabela 3.4. Ranking, por ordem crescente, da percentagem de construções com membranas (CM) de 30 dos 54 países analisados neste estudo e respetivo índice de risco a desastre natural.

Posição	Localização	CM a nível mundial	Índice de risco de desastre natural (UNU, 2013)	Posição de risco
1	Alemanha	20,37 %	3,24 %	39ª
2	Japão	8,01 %	14,10 %	5ª
3	França	7,68 %	2,79 %	43ª
4	EUA	7,51 %	3,99 %	30ª
5	Reino Unido	7,18 %	3,71 %	34ª
6	Espanha	7,01 %	3,38 %	38ª
7	Guatemala	5,51 %	20,88 %	1ª
8	Bélgica	4,67 %	3,42 %	37ª
9	Itália	4,34 %	4,88 %	26ª
10	Turquia	3,34 %	5,52 %	22ª
11	Arabia Saudita	3,17 %	1,32 %	
12	Holanda	2,67 %	8,76 %	10ª
13	Austrália	1,67 %	4,51 %	
14	Suíça	1,50 %	2,61 %	
15	Áustria	1,34 %	3,80 %	
16	Grécia	1,34 %	7,60 %	
17	Uruguai	1,34 %	4,09 %	
18	China	1,17 %	6,91 %	
19	Canadá	0,83 %	3,18 %	
20	Luxemburgo	0,83 %	2,68 %	
21	Turquemenistão	0,67 %	6,57 %	

Posição	Localização	CM a nível mundial	Índice de risco de desastre natural (UNU, 2013)	Posição de risco
22	Chile	0,50 %	12,28 %	6 <sup>a</sup>
23	México	0,50 %	6,39 %	
24	Polónia	0,50 %	3,46 %	
25	África do Sul	0,50 %	5,80 %	
26	Brasil	0,33 %	4,26 %	
27	Portugal	0,33 %	3,80 %	32 <sup>a</sup>
28	Índia	0,33 %	7,17 %	
29	Israel	0,33 %	2,49 %	
30	Coreia Sul	0,33 %	4,94 %	
<b>31 a 54</b>		<b>Ver tabela A3.3 do Anexo 3</b>		

### 3.6 Aspetos funcionais das construções com membranas

A introdução dos aspetos funcionais das construções com membranas, indicados neste item servirá de suporte para as análises apresentadas nos capítulos 6, 7 e 8, onde alguns destes aspetos serão explorados em detalhe.

As possibilidades de utilização dos materiais em membrana na construção são quase ilimitadas. No entanto, segundo Ollenhauer (2011), os produtores de membranas encontram dificuldades para implementar estas soluções. Esta situação está relacionada com a forte natureza cíclica da indústria da construção, os longos procedimentos de certificação e, acima de tudo, com a tarefa de comunicar os desenvolvimentos deste setor a um grupo diversificado e altamente fragmentado de profissionais, incluindo arquitetos, engenheiros civis e outros agentes ligados ao setor da construção. Para além do que foi referido, a diferença de requisitos, práticas e normas construtivas de cada país torna mais difícil entrar neste mercado.

As membranas apresentam potencialidades, mas também limites de aplicação na construção. Nalguns casos, a pouca durabilidade (por exemplo, as membranas têxteis sem revestimento) e o facto de ser impossível erguer uma construção em membrana sem o suporte de uma estrutura rígida, constituem algumas das limitações na sua aplicação. No entanto, uma membrana pode resultar da combinação de diferentes materiais e atingir uma duração "ilimitada" (Kruger, 2009). Por exemplo, existem materiais têxteis feitos com materiais inertes, como a fibra de vidro, que podem ser revestidos com repelentes de sujidade, absorvedores de poluição e raios ultravioleta (UV), acabamentos refletantes, oferecendo uma vida útil de 20-30 anos.

Graças à melhoria das características dos materiais em membrana - em termos da relação resistência-peso, durabilidade, flexibilidade, isolamento, propriedades de absorção, resistência ao fogo - estes podem substituir materiais de construção convencionais, como o aço e outros metais, madeira e plásticos. Exemplos de tais utilizações inovadoras com membranas - enquanto materiais estruturais, na atualidade e potencialmente no futuro - incluem (Grabe, 2010): (1) coberturas em membrana; (2) betão reforçado com fibras e cofragem com membranas para execução de formas livres; (3) sistemas de proteção contra a erosão e deslizamento de terras; (4) reforço de diques e outros sistemas de gestão de água; (5) emissão de luz através de fibra ótica; (6) tubagens flexíveis e duráveis; (7) ilhas artificiais e plataformas flutuantes.

Os materiais sintéticos em membrana têm-se tornado altamente desenvolvidos, eficientes e oferecem as seguintes vantagens sobre os materiais convencionais: enorme potencial estrutural; resistência a climas severos; baixa condutividade térmica; versatilidade em termos de forma e translucidez; propriedades ajustáveis através de aditivos; integração de componentes funcionais e construtivos; leveza, resistência à tração, absorção de sons aéreos, flexibilidade, controlo lumínico, regulação térmica, reduzido impacto ambiental, elasticidade, cor, resistência a químicos e fungos, fácil montagem e manutenção, etc. Por outro lado, os materiais em membrana, quando combinados ou ligados aos materiais convencionais, como por exemplo o vidro, amadeira ou os metais, resultam em soluções construtivas interessantes que serão apresentadas nos capítulos seguintes deste estudo. A Tabela 3.5 apresenta uma síntese relativa à aplicação dos materiais em membrana em arquitetura, no exterior e no interior, com aplicação visível ou oculta.

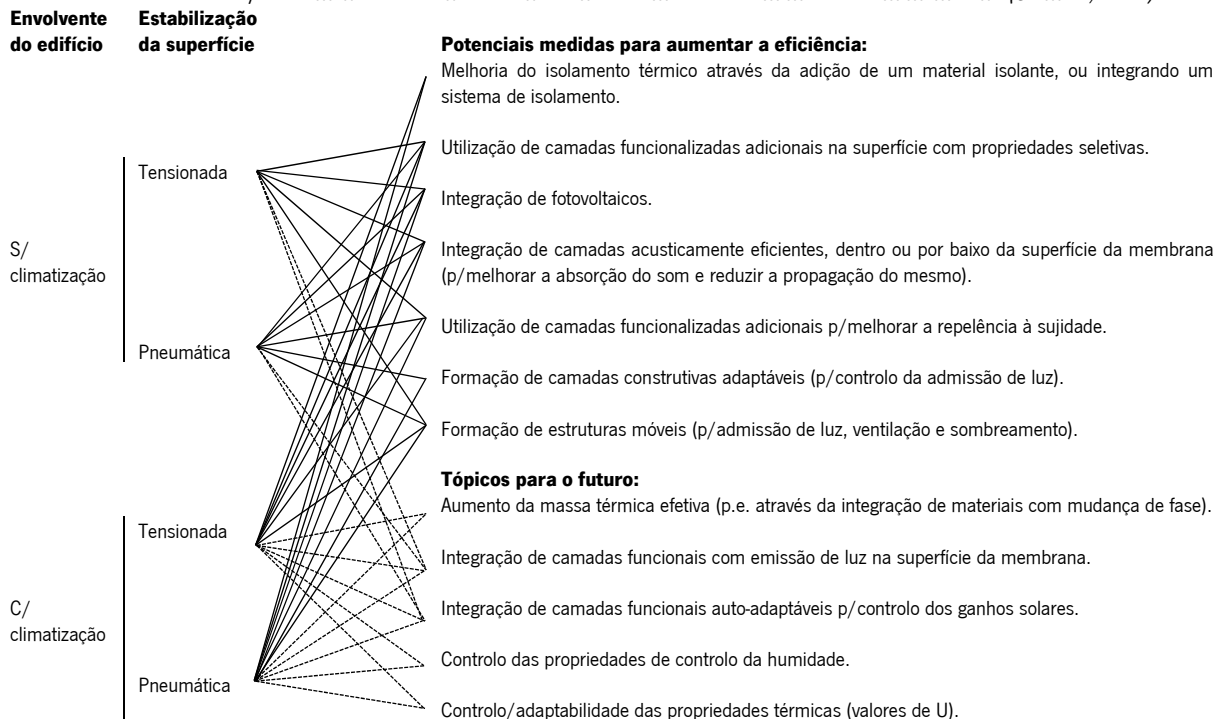
Tabela 3.5. Exemplos de aplicações de materiais em membrana na arquitetura (Ollenhauer, 2011).

Aplicação	Exterior	Interior	Visível	Oculto
Cobertura	•		•	
Isolamento				•
Revestimentos	•		•	
Reforço de revestimentos de paredes, coberturas ou pavimentos	•	•		•
Proteção solar	•	•	•	
Proteção ao vento, chuva e neve	•		•	
Proteção acústica de paredes e tetos		•	•	•
Difusão de luz		•	•	
Reforço de soluções com betão e construções em terra	•	•		•
Proteção contra raios UV	•	•	•	
Proteção com compatibilidade eletromagnética (EMC)	•	•	•	•
Emissão de luz com diodo emissor de luz integrada (LED) ou outros materiais eletroluminescentes	•	•	•	
Regulação térmica	•	•	•	•
Revestimento de tubagens		•		•
Proteção adicional contra o fogo para papéis de parede, revestimentos de pavimentos e outros.		•	•	

As membranas arquitetônicas oferecem soluções eficientes e estéticas, não só devido à sua leveza, propriedades mecânicas e químicas, mas também quando funcionalizadas para aplicações no setor da construção. Um exemplo de aplicação onde as membranas devem ser aplicadas com maior frequência, é o de estruturas multicamada. Nestes casos, é possível otimizar cada camada relativamente às suas propriedades funcionais materiais. Assim, podem explorar-se as vantagens da membrana em termos de resistência à chuva e ao vento, combinadas com o reduzido peso e vários níveis de translucidez. Aplicações mais amplas, como armazenamento/isolamento térmico e/ou isolamento acústico, podem ser obtidas pela integração de outros materiais apropriados no interior da estrutura multicamada.

Para promover o aumento da eficiência dos materiais em membrana na arquitetura, Knipers *et al.* (2011) definiram algumas medidas que devem ser tomadas (Tabela 3.6). Para além destas medidas há necessidade de novos desenvolvimentos para melhorar a reação ao fogo e aspetos ecológicos das construções com membrana.

Tabela 3.6. Medidas para aumentar a eficiência da envolvente de um edifício com materiais em membrana (Cremers, 2011).



De modo a ultrapassar as limitações de desempenho térmico das membranas, novos desenvolvimentos, tais como revestimentos de baixa emissividade para membranas, permitem que as soluções construtivas com membranas assumam mais funções na envolvente exterior dos edifícios, por exemplo, para beneficiar as propriedades de transmissão térmica das superfícies translúcidas. Os aerogéis e, possivelmente, os materiais

com mudança de fase, em princípio, são adequados para melhorar estruturas multicamada em membrana, tornando-as componentes polivalentes, assumindo funções avançadas relativamente ao isolamento térmico. Além disso, segundo Cremers & Laush (2008), num futuro próximo será possível a integração de camadas de água e ar nas estruturas multicamada.

Outras funções, como a condutividade elétrica, a eletroluminescência ou nanoestruturas integradas, também serão relevantes, alterando positivamente as propriedades funcionais da membrana. Aqui, as propriedades da envolvente do edifício podem ser especificamente adaptadas para alterar os parâmetros ambientais. Em termos ecológicos, fatores como a redução de energia e recursos necessários para a produção, bem como a capacidade de reutilização e reciclagem dos componentes são de grande importância.

### **3.7 Considerações finais**

Do confronto entre as empresas produtoras de membranas e a visão geral da construção com estes materiais, verifica-se que a maioria das construções com membranas se realizou no período em que houve a criação de um maior número de empresas produtoras de membranas. Ou seja, o mercado da construção tem acompanhado o mercado da produção destes materiais, com pouco desfasamento temporal entre a produção e a aplicação destes produtos. Isso significa que as inovações destes materiais chegam rapidamente ao mercado da construção. O que demonstra uma facilidade de adaptação a desafios e tendências atuais e futuras.

Verifica-se, que as soluções com membranas podem oferecer uma significativa redução de peso, tornando-se atraentes para designers em diversas áreas tecnológicas. O seu grande potencial reside na sua elevada resistência à tração, flexibilidade (p.e. para criar formas orgânicas), durabilidade, translucidez, peso mínimo e baixo custo do material e da sua manutenção. Embora as estruturas com membranas sejam capazes de cobrir grandes espaços, com vãos livres, e economizar eletricidade para iluminação devido às suas propriedades de transmissão de luz, estas também apresentam algumas limitações. Os espaços configurados por estas estruturas, geralmente, apresentam vários problemas como: reduzido isolamento térmico e acústico, reverberação, absorção, ruído provocado pelo impacto da queda de chuva, *etc.* Atualmente, as grandes empresas, em conjunto com centros de investigação, estudam novas aplicações com membranas arquitetónicas de modo a ultrapassar as limitações que lhes são reconhecidas. As tendências atuais incluem: membranas híbridas e com revestimentos resultantes de soluções nanotecnológicas; membranas com tecnologias inteligentes incorporadas (baterias, LEDs, sensores) e membranas para a purificação e regulação da qualidade do ar interior. A inovação tecnológica, neste campo, tem avançado a um ritmo extraordinário nas últimas décadas e tem gerado excelentes resultados que, em alguns casos, são iguais ao desempenho dos materiais convencionais.

Considerando o que foi exposto neste capítulo e no anterior, no capítulo seguinte, Capítulo 4, são recolhidos e analisados casos de estudo (ao nível internacional, sobretudo) de reabilitações funcionais com membranas arquitetónicas como forma de retirar lições/linhas de recomendação para futuros desenvolvimentos. Esta informação apoia-se no vasto corpo de conhecimento acumulado por diversos agentes relevantes no sector, de várias épocas e das mais diversas regiões no mundo: técnicos e teóricos, instituições e universidades, privados e públicos.



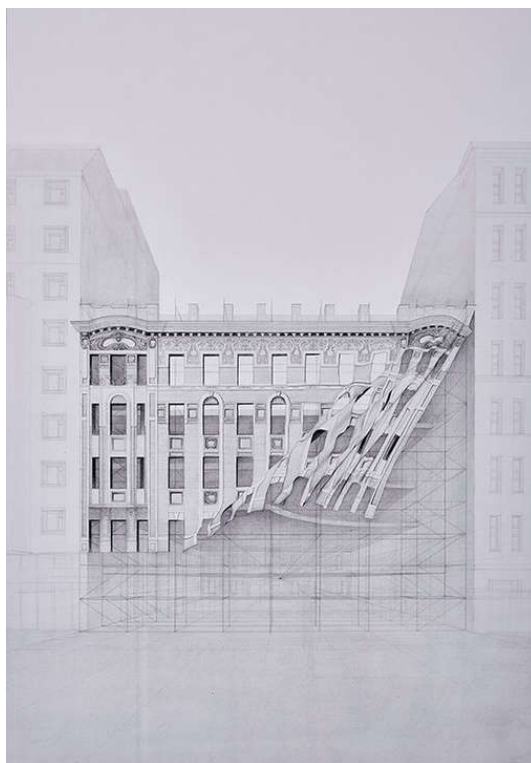
## Capítulo

# 04

### *Reabilitação funcional com membranas*

*“Le durable, c’est le transformable, le reversible.”*

(Portzamparc, 2012)



*Figura 4.1. Representação figurativa da relação entre o restauro e a arquitetura moderna – reflexão sobre as intervenções de reabilitação na atualidade (desenho vencedor de Drawing of the Year 2014, Transformation, © Olga Krukovskaya, (Aarhus, 2015)).*

*Este capítulo apresenta uma visão sobre a utilização de membranas arquitetônicas para a reabilitação funcional de edifícios, analisando as características que as tornam adequadas para este fim. Para determinar como as características das membranas arquitetônicas se adaptam (ou falham) aos exigentes requisitos para reabilitar o património edificado, realizou-se uma análise detalhada de uma amostra com 70 projetos de intervenção. Para facilitar a leitura, foram elaboradas fichas individuais com a descrição de cada projeto segundo parâmetros selecionados: contextuais, climáticos, programáticos, construtivos, funcionais e económicos.*

*Com base nesta amostra é possível identificar as motivações/abordagens de conceção em confronto com os princípios estabelecidos na intervenção em edifícios, bem como estabelecer critérios/recomendações de intervenção para uma aplicação mais ampla das membranas arquitetônicas, auxiliando nas tomadas de decisão em futuras intervenções de reabilitação, onde a utilização de soluções com membranas arquitetônicas possa constituir uma alternativa eficiente às convencionais.*

*Os resultados são ilustrados com projetos selecionados, realçando como as tecnologias construtivas com membranas podem cumprir os princípios de reabilitação mais importantes. Alguns desses exemplos são particularmente significativos e merecem ser detalhados, para mostrar a forma como alcançam a integração, ou o diálogo com o edifício existente e os diversos sistemas construtivos. A pormenorização construtiva das soluções com membranas é apresentada no Anexo 4 e ao longo dos Capítulos 6, 7 e 8.*

*No final, identificam-se os desafios e as tendências futuras (áreas de investigação) para o desenvolvimento de soluções eficientes, sobretudo ao nível funcional, mas também ambiental, económico, construtivo e de proteção/mitigação de risco, com vista a uma maior sustentabilidade das futuras ações de reabilitação.*

#### 4.1. Introdução

Conforme mencionado no capítulo 2, nas últimas décadas a Comunidade Europeia desenvolveu uma estratégia energética que considera cada vez mais o elo indissolúvel entre: políticas energéticas, mudanças climáticas e proteção do meio ambiente. Neste contexto considera-se que o setor de construção é um dos principais consumidores de energia na Europa, onde, nos últimos 20 anos, se verifica uma tendência de crescimento do uso de energia em edifícios<sup>1</sup>. A tecnologia de construção da maioria do parque edificado europeu caracteriza-se pelo uso de materiais pesados, com elevadas espessuras, tanto nas construções novas quanto nas intervenções de reabilitação (BPIE,2011). Mas as tendências atuais mostram que os estilos de vida estão a mudar, e existem novos materiais que estão a tornar-se cada vez mais importantes no mundo conservador das construções. Entre esses materiais, as membranas estão a assumir cada vez mais cotas de mercado (Markets & Markets, 2016). Durante muitos anos, estes materiais foram usados, sobretudo, como membranas impermeáveis e papéis de parede tradicionais. No entanto, recentemente, estão a tornar-se o componente chave da inovação de fachadas têxteis, sistemas de sombreamento e até componentes para a renovação estética e térmica - graças à sua flexibilidade, leveza, reduzida espessura e qualidades estéticas. Globalmente, as suas propriedades melhoraram e sua função transformou-se, passando da ideia de uma simples camada revestimento para o conceito de um dispositivo com múltiplas funções.

Em estudos anteriores, Gonzales *et al.* (2012) analisaram 644 projetos onde foram utilizadas tecnologias construtivas com membranas arquitetónicas e concluíram que, embora estas tecnologias tenham sido desenvolvidas no início do século XX, a maior parte das aplicações são executadas na construção de novos edifícios (90%, sendo 80% em edifícios e 10% em aplicações urbanas, p.e. sombreadores) e apenas 10% em intervenções de reabilitação de edifícios (ampliação, alteração e reconstrução). Estes números, a par dos resultados do inquérito realizado aos instaladores destas tecnologias (apresentados no capítulo anterior), mostram que as potencialidades destas tecnologias não estão a ser suficientemente exploradas na reabilitação de edifícios e que é necessário apostar na promoção e na avaliação comparativa com outras soluções convencionais. Por esse motivo, a presente tese foca-se na avaliação da eficiência destas tecnologias para a otimizar o desempenho funcional de edifícios existentes, enquanto alternativas eficientes às soluções construtivas convencionais.

Proteger e manter/gerir a nossa herança cultural bem como assegurar a sustentabilidade ambiental são os principais desafios que enfrentamos, pois necessitamos de conciliar o impulso (cada vez mais premente) em direção à inovação tecnológica com a preservação de nossa identidade e valores culturais.

A Convenção sobre a Proteção do Património Mundial Cultural e Natural em 1972 (UNESCO, 1972) da Organização Educacional, Científica e Cultural das Nações (UNESCO) identificou três grandes grupos que definem património cultural: monumentos, locais e conjuntos edificados. Por outro lado, as Diretrizes Operacionais para a Implementação da Convenção do Património Mundial em 2013 (UNESCO, 2013) recomendam a revisão dos métodos existentes de gestão do património, à luz das exigências que o sistema do Património Mundial e as necessidades atuais lhes impõem, sublinhando a necessidade de abordagens participativas que envolvam especialistas em património e outras partes interessadas.

Nos últimos anos, os especialistas em património começaram a promover uma abordagem holística e integrada para a conservação e gestão do património cultural mundial, acreditando que é apenas através da utilização simbiótica da memória e inovação, tanto individual como coletiva, que tais sociedades podem garantir um futuro sustentável para as gerações futuras. Zanelli (2015) acredita que o património cultural constitui um exemplo simbólico de como os princípios teóricos e as recomendações operacionais se encontram bem desenvolvidos, embora o trabalho no terreno permaneça fragmentado e sem uma visão clara e delineada. De acordo com Zanelli (2015), o uso de materiais leves, como as membranas arquitetónicas, pode constituir uma forma estratégica de superar esse problema, pelos seguintes dois motivos: rapidez de produção e instalação bem como facilidade de remoção. As estruturas de membrana podem constituir formas excepcionalmente grandes e muito permeáveis à luz natural. Constituem uma ferramenta interessante para intervenções onde se procura conservar uma área, ou uma série de edifícios, embora seja necessária mais investigação tecnológica e

<sup>1</sup> Em 2009, o consumo doméstico Europeu foi responsável por 68% do uso total final de energia em edifícios (BPIE, 2011).

arquitetônica para torná-las mais discretas e menos invasivas, especialmente na ancoragem ao solo, ou a outros elementos pré-existentes. As diretrizes mais recentes para a preservação de bens culturais deram o passo inovador de delinear a necessidade de uma abordagem baseada no valor, que mantenha a proteção e a gestão em conjunto, com base em planos estratégicos de longo prazo. Neste sentido, as abordagens inovadoras em proteção, conservação e reabilitação, como as que utilizam membranas inovadoras/estruturas leves são úteis quando o princípio precaucionário (Latour, 2000) se assume como prioritário.

#### 4.1.1. Reflexão 1: património e desenvolvimento sustentável

Desde a Cimeira Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável de 2002, em Joanesburgo, tem sido amplamente aceite que a cultura é o quarto pilar do desenvolvimento sustentável (Throsby, 2002), e em 2011 a Assembleia Geral do ICOMOS, realizada em Paris, adotou a seguinte declaração significativa: "*o património como motor do desenvolvimento*" (ICOMOS, 2011). Esta Declaração de Princípios e Recomendações realça que a relação entre património e desenvolvimento tem de ser vista como um avanço para a conservação do património, para a disseminação dos seus valores inerentes e para o desenvolvimento cultural, social e económico das comunidades.

Património cultural é uma área específica dentro da Plataforma Europeia de Tecnologia da Construção (ECTP – European Construction Technological Platform), com ênfase na proteção e reabilitação de edifícios e monumentos antigos, enquanto a iniciativa ERA-NET promove a comunicação e coordenação de projetos de investigação no sentido de melhorar a eficiência das soluções de reabilitação (com o objetivo de melhorar o desempenho e reduzir custos). Para além desta fragmentação de entidades, também se verifica uma fragmentação significativa no domínio da investigação para a preservação do património cultural tangível. Com o objetivo de manter a liderança mundial Europeia na preservação do património cultural, muitos projetos de investigação sobre o património cultural apoiados pela UE tratam do tema "Ambiente" e do sub-tema "Tecnologias do ambiente", realçando que os danos causados pela poluição, alterações climáticas e o turismo em massa não tem implicações apenas nas fachadas exteriores - o interior de edifícios, monumentos e outras estruturas também está em risco (Zanelli, 2015).

#### 4.1.2. Reflexão 2: preservação e reabilitação

Em linha com a premissa de preservação, a exigência de otimizar o património existente (tanto o que foi construído na antiguidade quanto o mais recente) está a crescer constantemente. As membranas arquitetônicas, podem oferecer uma série de respostas nesta frente, desde as que atendem aos típicos objetivos de conservação e proteção do património cultural (p.e. arqueológico), até às que se consideram para "reabilitação de ativos" (edifícios).

Neste sentido, é importante que, para a preservação, os projetistas adiram ao princípio precaucionário (Latour, 2000) que consiste em favorecer soluções que empreguem técnicas de construção leve e opções reversíveis, para que, caso não exista um plano a longo prazo (cientificamente fundamentado e amplamente aceite por todos os órgãos responsáveis pela conservação do património) seja possível agir rapidamente, de modo a fornecer pelo menos uma solução de preservação temporária e com impacto mínimo sobre o ativo a proteger. Tal abordagem deixa a porta aberta para as futuras gerações reverem o ativo conservado.

De uma forma geral, a abordagem para a reabilitação é menos problemática do que para a preservação, pois dá mais liberdade para o projetista apresentar soluções inovadoras que possam ter algum impacto visual. As construções com membrana estão a provar ser de crescente interesse nesta frente, dado que a sua leveza requer esforços extra reduzidos para a estrutura de suporte do ativo intervencionado. As soluções construtivas com membranas arquitetônicas também podem ajudar a incrementar a eficiência energética de edifícios antigos, pelo que se torna necessário avaliar e explorar as suas potencialidades quando integradas em intervenções de reabilitação (questão abordada com os exercícios dos capítulos 6 e 7). Por exemplo, alguns materiais em membrana apresentam excelentes propriedades mecânicas que podem torná-las o suporte ideal para integrar materiais de isolamento inovadores, ou dispositivos/instalações técnicas. Alguns exemplos, entre vários outros apresentados no Anexo 4, podem ser encontrados em: Mendonça *et al.* (2013) com o projeto ADjustMembrane e Maserà *et al.* (2017) com o projeto EASEE (2013) (ver item 4.6.5).

## 4.2. Metodologia adotada para análise dos casos de estudo

Para determinar como as membranas arquitetônicas se adaptam, ou não aos requisitos para a reabilitação de edifícios, apresenta-se uma análise detalhada de setenta exemplos de projetos de intervenções de reabilitação. Alguns desses exemplos são particularmente significativos para mostrar a forma como se consegue alcançar a integração, ou o diálogo com o edifício existente, neste tipo de intervenções.

### 4.2.1. Amostra

Foram estudados 70 projetos de reabilitação funcional com membranas arquitetônicas. Estes projetos de reabilitação foram selecionados de acordo com os seguintes critérios: encontrarem-se executados com soluções construtivas com membranas arquitetônicas (tensadas e pneumáticas); resultarem de uma reabilitação funcional; e os elementos construtivos intervencionados possuírem carácter arquitetónico (com influência na definição espacial do edifício). A identificação dos casos de estudo resultou de uma pesquisa efetuada em: publicações, base de dados da Tensinet, consulta a gabinetes de arquitetura e empresas instaladoras de membranas arquitetônicas. Salva-se que, para obter uma amostra completa, neste estudo apenas foram considerados os projetos com divulgação pública e com acesso a todos os parâmetros em análise, explícitos na ficha de identificação de cada projeto (apresentada no anexo 4). Optou-se por distribuir os projetos selecionados segundo o elemento construtivo alvo de intervenção. Segundo os critérios enunciados anteriormente, o elemento construtivo cobertura é o mais intervencionado com membranas arquitetônicas (61%), seguido do elemento construtivo teto (21%), ambos elementos construtivos horizontais. Os elementos verticais, como as fachadas e paredes divisórias representam 13% e 5% das intervenções, respetivamente.

Os projetos apresentados com intervenção em tetos e paredes divisórias correspondem a amostras do universo de aplicação de membranas em intervenções de reabilitação. Estima-se que a quantidade de projetos executados no âmbito de reabilitações funcionais dos elementos referidos seja muito superior. Estima-se ainda que existe um maior número de aplicações de membranas nestes elementos em projetos residenciais e comerciais; contudo, por serem projetos destinados a uso privado, o acesso a informação torna-se mais limitado.

Os projetos selecionados foram catalogados e comparados de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 4.1, facilitando o cruzamento de dados em função do tipo de análise a realizar. Assim, foram agrupados e comparados em relação a: área de aplicação da membrana, ano de construção original e ano de intervenção com membranas, tipo de reabilitação, função do edifício, etc. (ver Tabela 4.1). Para facilitar a compreensão e leitura de cada projeto foram desenvolvidas fichas com detalhes de cada projeto (Figura 4.2) – ver Anexo 4.

Tabela 4.1. Principais parâmetros em estudo (adaptado de Gonzales et al. (2012)).

Contextuais	Climáticos	Programáticos/uso	Construtivos	Funcionais	Económicos
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ano da construção original;</li> <li>Ano da intervenção de reabilitação;</li> <li>Idade do edifício;</li> <li>Localização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Latitude/longitude;</li> <li>Altitude;</li> <li>Zona climática;</li> <li>Temperatura, precipitação, vento e radiação solar médias anuais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uso/programa/ função;</li> <li>Tipo de reabilitação/intervenção (ampliação, alteração/conversão, reconstrução, reforço, renovação);</li> <li>Tipo de utilização (permanente/temporária/sazonal).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tipo de estrutura em membrana;</li> <li>Tipo de subestrutura;</li> <li>Tipo de ancoragem;</li> <li>Reforços auxiliares;</li> <li>Tipo de membrana (material, nº de camadas, estrutura);</li> <li>Peso próprio;</li> <li>Resistência ao fogo.</li> <li>Tipo de estrutura do edifício existente;</li> <li>Tipo de transmissão de cargas entre a membrana e o edifício existente;</li> <li>Vão livre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regulação térmica;</li> <li>Ventilação natural;</li> <li>Iluminação natural;</li> <li>Proteção solar;</li> <li>Condicionamento acústico;</li> <li>Adaptabilidade/reversibilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Custo global (material+ instalação).</li> </ul>

Ao longo da elaboração das fichas individuais de cada projeto registaram-se os seguintes critérios de projeto para intervir com membranas arquitetônicas:



<sup>2</sup> Para a análise não se considerou o revestimento como um elemento individual, mas sim integrado na tecnologia construtiva de cada elemento construtivo. Por exemplo, o revestimento de uma fachada aparece no elemento fachada.

**ELEMENTO CONSTRUTIVO**  
**COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.03**  
Solução de baixa intrusividade

Título: **Palácio de Igartza**  
Ano de construção existente: 1800 (cerca de)  
Ano de intervenção: 2009  
Tipo/ função do edifício: cultural  
Especialidade: Arquitetura/ Instalador: DAT Spain

Localização: Basen, Guipúzcoa, Espanha; Euros  
Latitude/ longitude: 43° 2' 50" N / 0° 12' 17" O  
Altitude: 160 m  
Temperatura média anual: 14°C  
Precipitação média anual: 1400 mm  
Condição climática: Temperado marítimo, Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Alteração, Aterro de uso com cobertura de pólo  
Requisitos funcionais: Insul/mezclabilizació, Iluminación natural, regulación térmica e acústica

Membrana (tipo): Pneuamática,  
Dupla membrana de ETFE, espessura 250 µ  
Área: 40 m²  
Custo global (Instalação + instalação): 450 €/m²

Descrição:  
O edifício existente é uma pequena fortaleza construída no século XIII que se encontra num clima com precipitação abundante (50% do ano). Devido ao elevado nível de proteção deste património cultural, foi necessário criar o pólo central com uma solução de baixa intrusividade. O projeto de reabilitação existente contempla uma solução pesada - com estrutura metálica de suporte para uma claraboia de vidro - que visa sobrecarregar a estrutura de madeira existente, provocar danos e reduzir as condições luminosas originais.

Solução:  
Como alternativa à proposta inicial, propõe-se uma solução de cobertura leve em membrana ETFE pneuamática. Esta solução não afeta as condições luminosas originais nem a estrutura de madeira existente (só as cargas permanentes são mínimas).  
A cobertura de membrana foi desenhada com uma almejada pneuamática, suportada apenas por uma nova estrutura coincidente com os limites perimetrais da abertura do pólo. De acordo com o regulamento local, foi considerada uma sobrecarga de neve de 0,3 kN/m². As sobrecargas ao vento foram difíceis de estimar devido à forma da cobertura (diferente das coberturas normalizadas nos regulamentos) e à posição da cobertura em membrana, protegida pela cobertura existente. Realizou-se uma análise de dinâmica dos fluidos para obter com mais precisão as cargas provenientes dos ventos, determinando para um período retornado de 300 / 500 Pa sem/sem cargas externas. Foi anexado à estrutura de madeira um encaixe de tubos de aço com seção quadrangular através de uma estrutura secundária de separadores de aço e um complexo sistema de perfis de alumínio estudado e de EPDM para assegurar a correta instalação e estanqueidade da cobertura em membrana.  
Este projeto constitui um exemplo de como a incorporação de novas funções, mesmo as de proteção cultural, nos edifícios antigos, podem ser conseguidas com membranas arquitetónicas, pelo permitir a sua reabilitação (convidada) sem causar distúrbios visuais.

Fonte:  
DAT SPAIN (2016). "Palacio Igartza". Disponível em: <http://www.basena.com/efe.html> [Acedido a 08 de Fevereiro de 2016].  
TEJERA, J. MONJÚ, J. & LA TORRE, J. (2010). "Heritage preservation strategies through textiles". Tensile Symposium 2010 Tensile Architecture. Sofia: Tensinet.

Figura 4.2. Exemplo de ficha individual de cada projeto selecionado para análise.

#### 4.2.2. Casos de estudo selecionados

Os projetos que constituem os casos de estudo encontram-se listados nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. No Anexo 4, nos itens 4.4. e 4.5., encontram-se as fichas individuais de cada projeto, com informação detalhada. Os projetos selecionados encontram-se ordenados cronologicamente, segundo o ano de construção original do edifício existente. Deste modo é possível ter uma leitura da adequação das tecnologias construtivas com membranas, desde as edificações mais antigas, até às mais recentes.

Tabela 4.2. Casos de estudo de reabilitação funcional com membranas em que a cobertura foi o elemento intervencionado.

##### C.01. ARENA DE NIMES

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

**27 a.C. / 1988**

Pais/ Continente/ Clima:

França/ Europa/ Mediterrâneo

Programa/ tipo de intervenção:

Ampliação

Critério funcional p/ a intervenção:

Adaptabilidade/ reversibilidade

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Pneuamático/ Fibra de vidro revestida PTFE e simples

Área/ Custo global estimado:

5000 m² e 1068 €/m²



##### C.02. FUCHUN KOSA ZOU MA LOU

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

**1300/ 2014**

Pais/ Continente/ Clima:

China/ Ásia/ Temperado marítimo

Programa/ tipo de intervenção:

Hotel/ alteração

Critério funcional p/ a intervenção:

Proteção climática

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Tensada/ membrana PVC transparente e simples

Área/ Custo global estimado:

50 m² e 50 €/m²



##### C.03. PALÁCIO DE IGARTZA

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

**1800/ 2009**

Pais/ Continente/ Clima:

Espanha/ Europa/ Temperado marítimo

Programa/ tipo de intervenção:

Cultural/ Alteração

Critério funcional p/ a intervenção:

Térmico e luminoso

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Pneuamático/ membrana ETFE dupla

Área/ Custo global estimado:

40 m² e 450 €/m²



##### C.04. MUSEU CHILENO DE ARTE PRECOLOMBINA

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

**1807/ 2013**

Pais/ Continente/ Clima:

Chile/ América/ Mediterrâneo

Programa/ tipo de intervenção:

Cultural/ Alteração

Critério funcional p/ a intervenção:

Acústico, térmico e luminoso

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Pneuamático/ membrana ETFE dupla

Área/ Custo global estimado:

211 m² e 450€/m²





**C.05. PALÁCIO DAS ARTES DE MONS**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1824/ 2014**  
 Bélgica/ Europa/ Temperado marítimo  
 Cultural/ alteração  
 Acústico, reversibilidade, controlo luminico, peso  
 Tensado/ membrana de poliéster revestida a PVC simples  
 1750 m<sup>2</sup> e 86 €/m<sup>2</sup>



**C.06. CAMELLIA HOUSE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1827/ 2006**  
 Inglaterra/ Europa/  
 Jardim de inverno/ Alteração  
 Proteção climatérica e luminosidade e peso  
 Tensada/ membrana ETFE simples  
 220 m<sup>2</sup> e 900 €/m<sup>2</sup>



**C.07. ESTAÇÃO DE COMBOIOS DE SALZBURGO**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1860/ 2012**  
 Áustria/ Europa/ Continental húmido  
 Transportes/ Renovação  
 Acústico, luminico e peso  
 Tensado/ membrana PTFE simples  
 1700m<sup>2</sup> e 220€/m<sup>2</sup>



**C.08. ESTAÇÃO DE COMBOIOS SAKURAGICHO**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:

**1872/ 1990**  
 Japão/ Ásia/ Temperado marítimo  
 Transportes/ renovação  
 Acústico, luminico e peso  
 Tensado/ membrana de fibra de vidro revestida a PTFE



**C.09. CÂMARA MUNICIPAL DE VIENA**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1884/ 2000**  
 Áustria/ Europa/ Continental húmido  
 Cultural/ Alteração  
 Acústico, reversibilidade, controlo luminico e peso  
 Tensado/ membrana de poliéster revestida a PVC simples  
 1000 m<sup>2</sup> e 220€/m<sup>2</sup>



**C.10. KAPUZINERCARRÉE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1889/ 2003**  
 Alemanha/ Europa/ Temperado marítimo  
 Serviços/ Ampliação  
 Tensado/ membrana ETFE simples  
 500 m<sup>2</sup> e 450 €/m<sup>2</sup>



**C.11. ESTAÇÃO DE COMBOIOS DE DRESDEN**

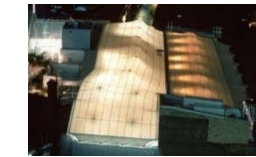
Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1898/ 2006**  
 Alemanha/ Europa/ Continental húmido  
 Transportes/ reconstrução  
 Acústico, controlo luminico e peso  
 Tensado/ membrana de fibra de vidro revestida a PTFE simples  
 32 000 m<sup>2</sup> e 265 €/m<sup>2</sup>

**C.12. ESTAÇÃO DE COMBOIOS DE DRESDEN**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1900/ 2006**  
 Inglaterra/ Europa/ Temperado marítimo  
 Escritórios/ alteração  
 Reversibilidade/ controlo luminico e peso  
 Tensado/ membrana de fibra de vidro revestida a PTFE  
 100 m<sup>2</sup> e 220€/m<sup>2</sup>



**C.13. MASÍA VILLA CELIANA**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global:

**1920/ 2010**  
 Espanha/ Europa/ Mediterrânico  
 Hotelaria/ alteração  
 Regulação térmica  
 Tensado/ membrana de poliéster revestida a PVC simples  
 650 m<sup>2</sup> e 220€/m<sup>2</sup>



**C.14. CASA DO PINTOR LEE JUNG SEOB**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1920/ 1997**  
 Coreia do Sul/ Ásia/ Temperado marítimo  
 Residencial/ alteração  
 Reversibilidade e peso  
 Tensado/ rede de sisal e de polietileno  
 50 m<sup>2</sup> e 50 €/m<sup>2</sup>



**C.15. CENTRO WILLIAM RAPPARD, EDIFÍCIO DA ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DO COMÉRCIO**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

Pais/ Continente/ Clima:

Programa/ tipo de intervenção:

Critério funcional p/ a intervenção:

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Área/ Custo global estimado:

**1926/ 2012**

Suíça/ Europa/ Temperado marítimo

Serviços/ ampliação

Regulação térmica e controlo luminico

Pneumático/ membrana ETFE tripla

525m<sup>2</sup> e 450 €/m<sup>2</sup>



**C.16. ATRIO DO SALÃO DE EXPOSIÇÕES DO RENO**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

Pais/ Continente/ Clima:

Programa/ tipo de intervenção:

Critério funcional p/ a intervenção:

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Área/ Custo global estimado:

**1928/ 2008**

Alemanha/ Europa/ Temperado marítimo

Escritórios/ ampliação

Regulação térmica e controlo luminico

Pneumático/ membrana ETFE quintupla

4000m<sup>2</sup> e 450 €/m<sup>2</sup>



**C.17. CÂMARA MUNICIPAL DE SAXONY-ANHALT**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

Pais/ Continente/ Clima:

Programa/ tipo de intervenção:

Critério funcional p/ a intervenção:

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Área/ Custo global estimado:

**1929/ 2012**

Alemanha/ Europa/ continental húmido

Serviços/ alteração

Acústico, térmico e luminico

Pneumático/ membrana ETFE dupla

375m<sup>2</sup> e 450 €/m<sup>2</sup>



**C.18. EDIFÍCIO JOHNSON**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

Pais/ Continente/ Clima:

Programa/ tipo de intervenção:

Critério funcional p/ a intervenção:

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Área/ Custo global estimado:

**1930/ 2005**

Inglaterra/ Europa/ Temperado marítimo

Escritórios/ alteração

Regulação térmica e controlo luminico

Pneumático/ membrana ETFE dupla

300m<sup>2</sup> e 450 €/m<sup>2</sup>



**C.19. BURBERRY HEADQUARTERS, HORSEFERRY HOUSE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

Pais/ Continente/ Clima:

Programa/ tipo de intervenção:

Critério funcional p/ a intervenção:

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Área/ Custo global estimado:

**1930/ 2008**

Inglaterra/ Europa/ Temperado marítimo

Escritórios/ alteração

Regulação térmica e controlo luminico

Pneumático/ membrana ETFE tripla

410m<sup>2</sup> e 450 €/m<sup>2</sup>



**C.20. FUKIYA INTERNATIONAL VILLA HALL**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

Pais/ Continente/ Clima:

Programa/ tipo de intervenção:

Critério funcional p/ a intervenção:

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Área/ Custo global estimado:

**1930/ 1988**

Japão/ Ásia/ Temperado marítimo

Cultural/ ampliação

Estética (integração na envolvente), regulação térmica e luminica

Tensado/ membrana de fibra de vidro revestida a PTFE

180m<sup>2</sup> e 110 €/m<sup>2</sup>



**C.21. ESTÁDIO OLÍMPICO DE BERLIM**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

Pais/ Continente/ Clima:

Programa/ tipo de intervenção:

Critério funcional p/ a intervenção:

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Área/ Custo global estimado:

**1936/ 2004**

Alemanha/ Europa/ continental húmido

Desporto/ alteração

Proteção climática, acústica e peso

Tensado/ membrana de fibra de vidro revestida a PTFE

27000m<sup>2</sup> e 220 €/m<sup>2</sup>



**C.22. DRESDEN CASTLE KLEINER SCHLOSSHOF**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

Pais/ Continente/ Clima:

Programa/ tipo de intervenção:

Critério funcional p/ a intervenção:

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Área/ Custo global estimado:

**1945/ 2009**

Alemanha/ Europa/ continental húmido

Cultural/ renovação

Acústico, térmico e luminico

Pneumático/ membrana ETFE dupla

1400m<sup>2</sup> e 600 €/m<sup>2</sup>



**C.23 IGREJA DE CORBERA D'EBRE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

Pais/ Continente/ Clima:

Programa/ tipo de intervenção:

Critério funcional p/ a intervenção:

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Área/ Custo global estimado:

**Séc. XVII/2013**

Espanha/ Europa/ mediterrânico

Cultural/ alteração

Luminico e peso

Tensado/ membrana ETFE simples

700m<sup>2</sup> e 220 €/m<sup>2</sup>



**C.24. FRAC ART CENTRE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:

Pais/ Continente/ Clima:

Programa/ tipo de intervenção:

Critério funcional p/ a intervenção:

Sistema construtivo/ tipo de membrana:

Área/ Custo global estimado:

**1949/ 2013**

França/ Europa/ temperado marítimo

Cultural/ ampliação

Acústico, térmico, luminico e proteção climática

Pneumático/ membrana ETFE dupla

3362m<sup>2</sup> e 450 €/m<sup>2</sup>



**C.25. FRØSILO**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1963/ 2005**  
 Dinamarca/ Europa/ temperado marítimo  
 Habitacional/ alteração  
 Leveza e translucidez  
 Pneumático/ membrana ETFE dupla  
 Sem informação



**C.26. EDIFÍCIO DE HABITAÇÃO COLETIVA EM ZAMORA**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1970/ 2014**  
 Espanha/ Europa/ Semi árido  
 Habitacional/ renovação  
 Estético - redução do impacto visual  
 Colada/ membrana betuminosa com impressão  
 Sem informação



**C.27. HARTLEY LIBRARY LEARNING CENTRE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1970/ 2004**  
 Inglaterra/ Europa/ temperado marítimo  
 Biblioteca/ renovação  
 Regulação térmica, iluminação natural e acústica  
 Pneumático/ membrana ETFE tripla  
 96 m² e 600€/m²



**C.28. PRAÇA DEVONSHIRE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1970/ 2008**  
 Inglaterra/ Europa/ temperado marítimo  
 Escritórios/ alteração  
 Isolamento térmico e iluminação natural  
 Tensado/ membrana ETFE simples  
 1452 m² e 400€/m²



**C.29. INFANTÁRIO DE WISMAR**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global:

**1972/ 2005**  
 Alemanha/ Europa/ continental húmido  
 Educacional/ renovação  
 Isolamento térmico, acústico e iluminação natural  
 Pneumático/ membrana ETFE tripla  
 976 m² e 120 €/m²



**C.30. TALISMAN CENTRE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1983/ 2010**  
 Canadá/ América/ continental húmido  
 Desportivo/ renovação  
 Isolamento térmico e iluminação natural  
 Tensado/ membrana fibra de vidro revestida a PTFE c/aerogel  
 15000 m² e 2600 €/m²



**C.31. CLUBE DE TÊNIS BOURG-LA-REINE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1992/ 2013**  
 França/ Europa/ Temperado marítimo  
 Desportivo/ renovação  
 Iluminação natural e leveza  
 Tensado/ membrana de poliéster revestida a PVC  
 3600 m² e 258€/m²



**C.32. UNIVERSITY OF WEST LONDON**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**2006/ 2014**  
 Inglaterra/ Europa/ temperado marítimo  
 Educacional/ renovação  
 Isolamento térmico e controlo luminico  
 Pneumático/ membrana ETFE tripla  
 155 m² e 380€/m²



**C.33. PALACIO DE MINERÍA**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1813/ 2002/2011**  
 México/ América/ clima sub-tropical  
 Cultural/ renovação  
 Reversibilidade, controlo luminico e peso  
 Tensado/ membrana de poliéster revestida a PVC simples  
 1225m²/ -



**C.34. BIBLIOTECA NACIONAL BEYAZIT**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1506/2015**  
 Turquia/ Europa-Ásia/ Continental semi-árido  
 Cultural/ ampliação  
 Proteção/ ampliação  
 Pneumático/ membrana dupla de ETFE  
 260 m²/ 600 €/m²





### C.35. ESTAÇÃO CARLISLE

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1847/ 2017**  
 Reino Unido/ Europa/ temperado marítimo  
 Transportes/ renovação  
 Proteção/ Visual  
 Membrana simples de ETFE  
 10500 m<sup>2</sup>/ 250 €/m<sup>2</sup>



### C.36. HER MAJESTY'S TREASURY

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1917/ 2002**  
 Reino Unido/ Europa/ Temperado marítimo  
 Serviços/ ampliação  
 Proteção/ regulação térmica/ visual/ luminica  
 Pneumático/ Membrana dupla de ETFE  
 -



### C.37. COLÉGIO KETTELER

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1960/ 2009**  
 Alemanha/ Europa/ Continental húmido  
 Educacional/ ampliação  
 Proteção/ visual  
 Pneumático/ membrana de ETFE dupla  
 620 m<sup>2</sup>/ 600 €/m<sup>2</sup>



### C.38. GALERIA NACIONAL DE LONDRES

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1838/ 2003**  
 Reino Unido/ Europa/ Temperado marítimo  
 Museu/ renovação  
 Proteção  
 Pneumático/ membrana de ETFE dupla  
 450 €/m<sup>2</sup>



### C.39. SEDE JEAN-PAUL GAULTIER

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**Séc. XIX/ 2004**  
 França/ Europa/ Temperado marítimo  
 Serviços/ renovação  
 Visual/ iluminação natural  
 Pneumático/ membrana de ETFE dupla  
 450 €/m<sup>2</sup>



### C.40. ESTAÇÃO DE COMBOIOS DE WROCLAW

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1904/ 2013**  
 Polónia/ Europa/ Temperado marítimo  
 Transportes/ renovação  
 Proteção  
 Tensionado/ membrana de fibra de vidro revestida a PTFE  
 2856 m<sup>2</sup>/ -



### C.41. CLAUSTRO DA ABADIA DE SABLES D'OLONNE

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1800/ 2013**  
 França/ Europa/ Temperado marítimo  
 Cultura/ ampliação  
 Proteção/ visual  
 Pneumático/ membrana tripla de ETFE  
 550m<sup>2</sup>/ 160 €/m<sup>2</sup>



### C.42. JULIANUS SHOPPING

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1800/ 2008**  
 Bélgica/ Europa/ Temperado marítimo  
 Cultura/ ampliação  
 Proteção  
 Pneumático/ membrana de PTFE  
 1369 m<sup>2</sup>/ 260 €/m<sup>2</sup>



### C.43. MUSEU RAFAEL CORONEL

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1600/ 2019**  
 México/ América/ clima sub-tropical  
 Cultural/ renovação  
 Reversibilidade, controlo luminico e peso  
 Tensado/ membrana ETFE simples  
 320m<sup>2</sup>/ 220 €/m<sup>2</sup>

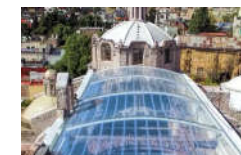


Tabela 4.3. Casos de estudo de reabilitação funcional com membranas em que a fachada foi o elemento intervencionado.

### F.01. CENTRO DE GERONTOLOGIA

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1940/ 2003**  
 Alemanha/ Europa/ continental húmido  
 Saúde/ alteração  
 Isolamento térmico e iluminação natural  
 Tensado/ membrana ETFE simples  
 1550 m<sup>2</sup> e 225€/m<sup>2</sup>



**F.02. CASA EM MUNIQUE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1956/ 2012**  
 Alemanha/ Europa/continental húmido  
 Habitacional/ renovação  
 Isolamento térmico  
 Tensado sobre estrutura madeira/ membrana de polietileno  
 240 m<sup>2</sup> e 30€/m<sup>2</sup>



**F.03. EDIFÍCIO EDF**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1958/ 2011**  
 França/ Europa/ temperado marítimo  
 Serviços/ renovação  
 Isolamento térmico  
 Tensada sobre perfis metálicos/ membrana de TPO  
 3400 m<sup>2</sup> e 140€/m<sup>2</sup>



**F.04. BIBLIOTECA NACIONAL KING FAHAD**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1970/ 2013**  
 Arabia Saudita/ Asia/ desértico  
 Biblioteca/ ampliação  
 Isolamento térmico e iluminação natural  
 Tensada/ membrana fibra de vidro revestida a PTFE  
 12000 m<sup>2</sup> e 930 €/m<sup>2</sup>



**F.05. WESTRAVEN**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1975/ 2007**  
 Holanda/ Europa/ temperado marítimo  
 Escritórios/ renovação  
 Proteção contra o vento, isolamento térmico e iluminação natural  
 Tensada/ membrana fibra de vidro revestida a PTFE  
 3500 m<sup>2</sup> e 60 €/m<sup>2</sup>



**F.06. SHISHIODOSHI HOUSE**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1980/ 2013**  
 França/ Europa/ Temperado marítimo  
 Habitacional/ ampliação  
 Reversibilidade, leveza e proteção climatérica  
 Tensado/ membrana de poliéster revestida a PVC  
 250 m<sup>2</sup> e 60 €/m<sup>2</sup>



**F.07. EDIFÍCIO EM BASILEIA**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**Sem informação**  
 Suíça/ Europa/ Temperado continental  
 Residencial  
 Isolamento térmico e acústico  
 Sistema multicamada com membrana de poliolefina  
 Sem informação



**F.08. SAN MICHELE ARCANGELO**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1580/ 2016**  
 Itália/ Europa/ Mediterrânico e continental  
 Cultural/ alteração  
 Proteção/ luminica  
 Pneumático/ Membrana dupla de ETFE  
 120 m<sup>2</sup>/ 450€/m<sup>2</sup>



**F.09. KWO GRIMSELSTROM**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente/ Clima:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1925/ 2013**  
 Suíça/ Europa/ Temperado continental  
 Indústria, central elétrica/ renovação/ reforço  
 Reforço/ regulação térmica/ visual  
 Tensionado/ membrana dupla de ETFE  
 145 m<sup>2</sup>/ 200 €/m<sup>2</sup>

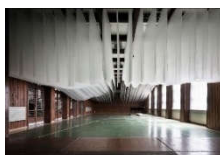


Tabela 4.4. Casos de estudo de reabilitação funcional com membranas em que o teto foi o elemento intervencionado.

**T.01. ABADIA BENEDITINA DE PANNONHALMA**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global:

**996/ 2012**  
 Hungria/ Europa  
 Educacional/ renovação  
 Acústico e reversibilidade  
 Suspenso/ Membrana poliéster  
 200 m<sup>2</sup> e 6 €/m<sup>2</sup>



**T.02. IGREJA DE ST. PETRI-PAULI**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1483/ 2012**  
 Alemanha/ Europa  
 Religioso/ renovação  
 Acústico  
 Tensado/ Membrana PVC microperfurado  
 36 m<sup>2</sup> e 200 €/m<sup>2</sup>



### T.03. IGREJA EM VERSALHES

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1706/ 2003**  
 França/ Europa  
 Religioso/ Renovação  
 Acústico  
 Tensado/ Membrana PVC microperfurado  
 400 m<sup>2</sup> e 200 €/m<sup>2</sup>



### T.04. MUSEU DA HISTÓRIA ALEMÃ

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

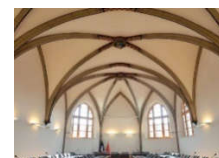
**1800/ 2010**  
 Alemanha/ Europa  
 Museu/ Renovação  
 Acústico  
 Tensado/ Membrana PVC microperfurado transparente  
 1800 m<sup>2</sup> e 60€/m<sup>2</sup>



### T.05. SALA DE REUNIÕES DA COMUNIDADE DE VALLÉE DOLLER E SOULTZBACH

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**? / 2010**  
 França./Europa  
 Serviços/ Renovação  
 Regulação térmica e isolamento acústico, reversibilidade  
 Tensado/ Membrana PVC microperfurado com sistema radiante  
 500 m<sup>2</sup> e 250 €/m<sup>2</sup>



### T.06. CANTINA DE CONVENTO FRANCISCANO

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1908/ 2014**  
 Itália, Europa  
 Religioso/ renovação  
 Acústico e térmico  
 Tensado/ Membrana PVC microperfurado com sistema radiante  
 350 m<sup>2</sup> e 100 €/m<sup>2</sup>



### T.07. MUSEU EM BOLONHA

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

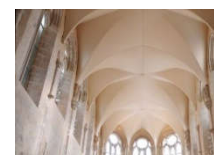
**? / 2010**  
 Itália, Europa  
 Cultural/ renovação  
 Estético, acústico e reversibilidade  
 Tensado/ Membrana PVC microperfurado  
 120 €/m<sup>2</sup>



### T.08. IGREJA DA ELEVAÇÃO DE SANTA CRUZ

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1871/ 2011**  
 República Checa, Europa  
 Religioso/ Renovação  
 Estético, acústico e reversibilidade  
 Tensado/ Membrana PVC microperfurado  
 250 m<sup>2</sup> e 100 €/m<sup>2</sup>



### T.09. ST. EDWARDS UNIVERSITY

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1878/ 2014**  
 Texas, América  
 Educacional/ Renovação  
 Controlo luminico e acústico  
 Tensado/ membrana ETFE branco  
 43 m<sup>2</sup> e 120 €/m<sup>2</sup>



### T.10. ESCRITÓRIOS LOGAN

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1900/ 2012**  
 Logan, América  
 Escritórios/ Renovação  
 Acústico, iluminação natural e reversibilidade  
 Tensado/ Membrana dupla de PVC translúcida e microperfurada  
 1200 m<sup>2</sup> e 30€/m<sup>2</sup>



### T.11. ECOMEMBRANE

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1936/ 1997**  
 Alemanha, Europa  
 Escritórios/ alteração  
 Regulação térmica, acústica, iluminação natural e reversibilidade  
 Tensada/ membrana PVC transparente simples  
 1400 m<sup>2</sup> e 30€/m<sup>2</sup>



### T.12. IGREJA DE AGNESE DE MODENA

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1970/ 2003**  
 Itália/ Europa  
 Religioso/ renovação  
 Acústico  
 Tensado/ Membrana PVC microperfurado  
 90 m<sup>2</sup> e 100€/m<sup>2</sup>





**T.13. IGREJA DE ST-IGNATUS-DE-LOYOLA**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1982/ 2011**  
 Canadá/ América  
 Religioso/ Renovação  
 Tensado/ Membrana PVC microperfurado  
 Membrana tensionada  
 ? e 100€/m²



**T.14. BIBLIOTECA NACIONAL KING FAHAD**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1970/ 2013**  
 Arabia Saudita/ Ásia  
 Biblioteca/ ampliação  
 Acústico, iluminação natural  
 Tensado/ membrana PVDF simples  
 15000 m² e 220 €/m²



**T.15. ABADIA DE DRAGUN**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**Séc. XIII/ 1940/ 2014**  
 Alemanha/ Europa  
 Cultural/ renovação  
 Acústico  
 Tensionado/ membrana de poliéster  
 300 m²



Tabela 4.5. Casos de estudo de reabilitação funcional com membranas em que a paredes divisórias foi o elemento intervencionado.

**PI.01. DANISH CULTURAL MINISTRY**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1978/ 2005**  
 Dinamarca/ Europa  
 Escritórios/ renovação  
 Acústica, flexibilidade e reversibilidade  
 Suspensão/ membrana de veludo  
 180m² e 80€/m²



**PI.02. HOTEL EVIDENCIA LIGHT**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1900/ 2012**  
 Portugal/ Europa  
 Hotel/ renovação  
 Estética (definição espacial), acústica e reversibilidade  
 Tensado/ Membrana poliéster revestida a PU  
 30 €/m²



**PI.03. MINO**

Ano de construção pré-existente/ intervenção:  
 País/ Continente:  
 Programa/ tipo de intervenção:  
 Critério funcional p/ a intervenção:  
 Sistema construtivo/ tipo de membrana:  
 Área/ Custo global estimado:

**1970/ 2010**  
 Itália/ Europa  
 Alojamento/ alteração  
 Acústico, térmico e luminoso  
 Tensado/ Membrana poliéster de malha aberta  
 30 €/m²



**4.3. Análise geral dos casos de estudo**

Embora no passado as membranas arquitetônicas tenham sido usadas principalmente em sistemas de cobertura, atualmente, devido aos vários requisitos existentes estão a surgir múltiplas soluções de arquitetura têxtil que respondem positivamente a muitos requisitos funcionais: reabilitar, proteger e valorizar edifícios existentes. No entanto, apesar do conhecimento desses benefícios, muitos profissionais do setor da construção não estão familiarizados com o comportamento e as características das membranas. A falta de informação sobre o seu uso e propriedades, pela comunidade de projetistas e construtores, limita a capacidade de alcançarem os mais elevados padrões regulamentares de qualidade. Setenta projetos de reabilitação com membranas foram classificados cronologicamente, distinguindo-os por países e tipo de aplicação/elementos construtivos. É evidente que existe um claro aumento no uso de membranas nos últimos 30 anos, liderado por aplicações em coberturas (de pátios) e tetos. A lista completa dos projetos e a sua análise detalhada, segundo o tipo de aplicação, encontra-se disponível no Anexo 4.

**4.3.1. Mapeamento de aplicações**

A fim de assegurar uma boa representatividade da amostra selecionada dos projetos de intervenção foi necessário definir um mapa de aplicações das membranas na reabilitação de edifícios. Com base no estudo de Browaeys (2011) (que estabelece um mapa de aplicação de têxteis técnicos) apresenta-se na Tabela 4.6 e Figura 4.3, uma síntese e exemplos das aplicações das membranas arquitetônicas para a reabilitação de edifícios. A Tabela 4.6 e a Figura 4.4 classificam-nas em várias famílias (esta lista não é exaustiva).

Tabela 4.6. Síntese das principais aplicações de Têxteis técnicos, em especial membranas arquitetônicas, na reabilitação de edifícios.

<b>Estruturas e elementos arquitetônicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estruturas tensadas/ pneumáticas;</li> <li>• fachada dupla;</li> <li>• cobertura de pátios existentes;</li> <li>• estruturas de ampliação horizontal e vertical;</li> <li>• tetos tensados e divisórias interiores (impressos, retro iluminados, perfurados).</li> </ul>
<b>Revestimento de pavimentos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Camada acústica;</li> <li>• camada impermeável;</li> <li>• segurança em caso de queda (no caso dos têxteis tufados).</li> </ul>
<b>Estruturas temporárias/ auxiliares</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fachadas ou coberturas provisórias;</li> <li>• cofragem perdida ou provisória em membrana;</li> <li>• plataformas de trabalho para espaços abertos;</li> <li>• barreiras acústicas ou de sujidade.</li> </ul>
<b>Reforço estrutural e monitorização</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vigas pneumáticas;</li> <li>• dispositivo em membrana para monitorização do desempenho estrutural de edifícios afetados por uma catástrofe;</li> <li>• ligas de reforço estrutura (em poliéster, fibra de vidro ou malha de fibra de carbono).</li> </ul>
<b>Elementos de proteção</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivos de sombreamento e proteção solar;</li> <li>• redes de segurança;</li> <li>• isolamentos térmicos leves compostos;</li> <li>• barreiras de vapor para estruturas de madeira.</li> </ul>
<b>Instalações e equipamentos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conduitas de ar;</li> <li>• extensões elétricas (em faixas de membrana com ligas condutoras integradas);</li> <li>• integração de células fotovoltaicas flexíveis, bem como sensores e dispositivos de recolha de informação.</li> </ul>

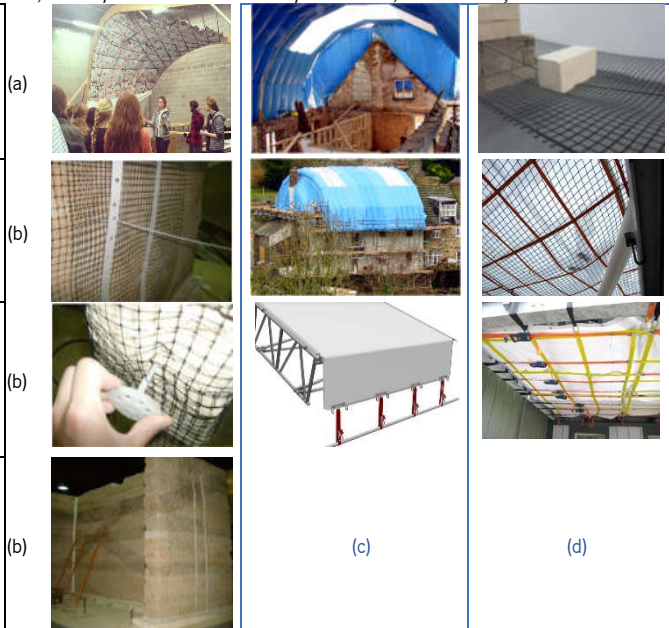
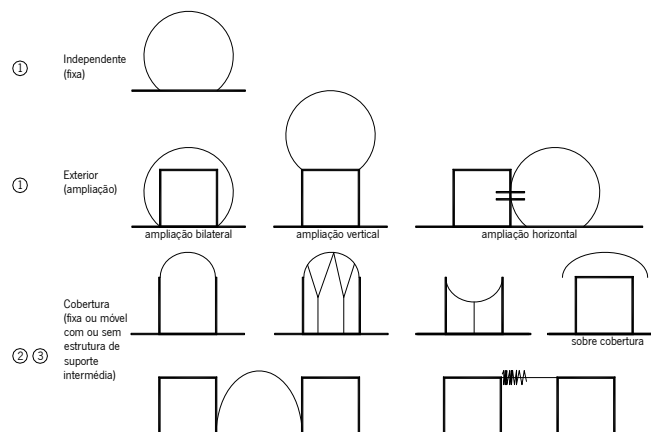


Figura 4.3. Exemplos de aplicação de membranas em intervenções de reabilitação de edifícios (de cima para baixo): (a) rede de cintas para reforço da segurança em coberturas degradadas/ em perigo e suporte de materiais de isolamento térmico pelo interior da cobertura (Techstyle Haus, 2015); (b) aplicação de rede sintética para o reforço de parede de adobe (Figueiredo et al., 2012); (c) sistema de cobertura provisória pneumática (Southerninflatables, 2013) e tensionada Combisafe Ubix®; (d) rede de sensores de tração incorporados em geotêxtil, para monitorizar o deslocamento do solo, passível de ser aplicado no revestimento de paredes de edifícios que sofreram danos sísmicos (Heyse et al., 2015) e sistema de rede de segurança SpanSet Walkabout (Spanset, 2015).

O ponto de partida para a análise dos casos de estudo consistiu na definição dos conceitos de aplicação arquitetónica de membranas para intervenções de reabilitação. Esta definição resultou da adaptação/ reformulação dos conceitos definidos por Mollaert *et al.* (2003) (originalmente orientada para aplicações em edifícios construídos de raiz).

Da análise da amostra identificaram-se cinco opções recorrentes nos projetos de intervenção (Figura 4.5): (1) fachada e cobertura independentes, compostas por uma membrana; (2) adição de segundas fachadas, claraboias e coberturas, fixas ou móveis; (3) cobertura de pátios/ justaposição - construir sobre o construído; (4) integração - construir dentro do construído; (5) introdução de elementos de definição espacial interiores (tetos falsos e divisórias tensionados). A Figura 4.5 apresenta a classificação dos elementos construtivos em análise segundo o grau de proteção.



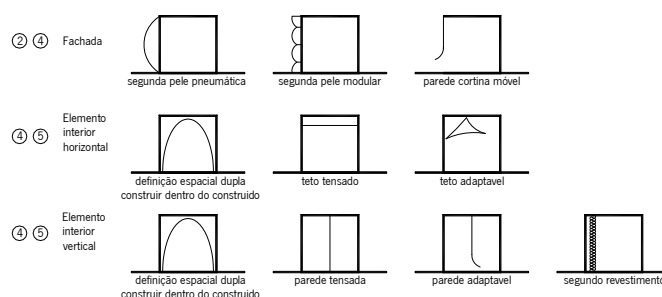


Figura 4.4. Classificação dos tipos e variações de aplicações arquitetônicas de membranas na reabilitação de edifícios (parcialmente adaptado de Mollaert et al. (2003)).

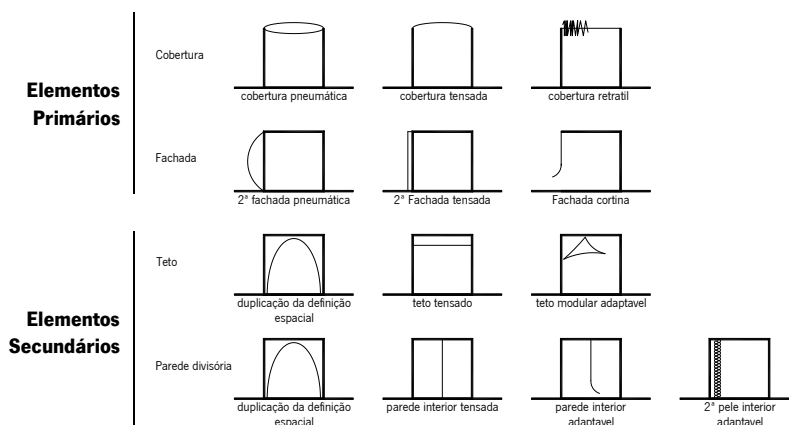


Figura 4.5. Classificação dos elementos construtivos em análise (intervencionados com membrana arquitetônica) segundo o grau de proteção (parcialmente adaptado de Mollaert et al. (2003)).

#### 4.3.2. Parâmetros contextuais

##### • Ano de construção do pré-existente e ano de intervenção

Os setenta projetos selecionados foram distinguidos pela intervenção nos seus elementos de definição espacial: coberturas (60%), tetos (21%), fachadas (13%) e paredes divisórias (6%). Todos os projetos de intervenção foram classificados cronologicamente. De acordo com as categorias de durabilidade definidas por Douglas (2006), verifica-se que a maioria das intervenções de reabilitação com membranas (45%) ocorre em edifícios antigos, com mais de 120 anos à data da intervenção com membranas, e que apresentam vida longa (Figura 4.6); relativamente aos restantes projetos, 30% dos edifícios intervencionados têm uma vida normal (60-119 anos), 20% têm uma vida mediana (30-59 anos) e 5% têm uma vida curta (abaixo de 30 anos) (Figura 4.6). Pela análise cronológica dos projetos em estudo, verifica-se que a idade média dos edifícios pré-existent é de 171 anos (máximo superior a 2000 anos e mínimo de 23 anos).

Categoria	Descrição	Categoria de durabilidade
1	Temporária	Período mínimo: Até 10 anos
2	Vida curta	Período mínimo: 10 anos
3	Vida média	Período mínimo: 30 anos
4	Vida normal	Período mínimo: 60 anos
5	Vida longa	Período mínimo: 120 anos

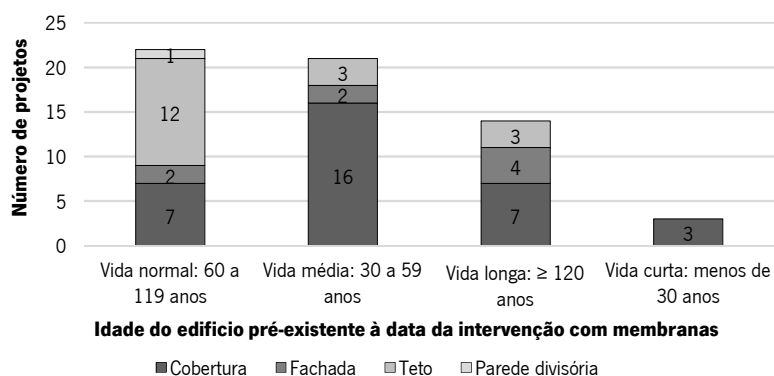


Figura 4.6. Tabela com categorias de durabilidade para edifícios (BS 7543, 1992 apud Douglas, 2006). Gráfico com distribuição dos projetos de intervenção em análise segundo a idade do edifício intervencionado (à data da intervenção) e o elemento construtivo intervencionado com membrana.

Em meados do século XX, a aplicação de membranas na área de estruturas autoportantes foi fundamentalmente influenciada pela obra de Frei Otto. Foram criadas aplicações com têxteis para coberturas em feiras mundiais, teatros ao ar livre e complexos desportivos. Assim, a construção em membrana conquistou novos campos de aplicação, sedentária, como alternativa à arquitetura clássica. Isto deveu-se ao desenvolvimento de fibras sintéticas, bem como tecnologias modernas de acabamento têxtil pós-1945 (Knippers *et al.* 2010).

Entre os anos 50 a 70, experienciaram-se muitas intervenções com membranas em áreas diversas. No entanto, as deficiências técnicas levaram à diminuição do uso destas tecnologias. Contudo, observa-se um retorno às aplicações arquitetónicas com membranas nos últimos anos. Pelo estudo cronológico dos projetos em análise, verifica-se que a aplicação de membranas arquitetónicas é relativamente recente, dado que estas intervenções se realizaram, em média, há 10 anos (máximo 30 anos e mínimo 4 anos) (Figura 4.7), idade que corresponde à durabilidade média (de 10 a +/- 5 anos) dos materiais em membrana aplicados em intervenções de reabilitação até ao ano de 2018. Os sistemas construtivos em membrana experienciaram um importante desenvolvimento nos últimos 30 anos e verifica-se que existiu um aumento no uso de membranas em intervenções de reabilitação na última década, liderado por aplicações em coberturas de pátios/claraboias (Figura 8). As intervenções mais antigas com membrana são em coberturas de edifícios e datam de 1988 – projeto *Arena de Nimes* (ref<sup>a</sup> C.01) e o projeto *Fukiya International Villa Hall* (ref<sup>a</sup> C.20).

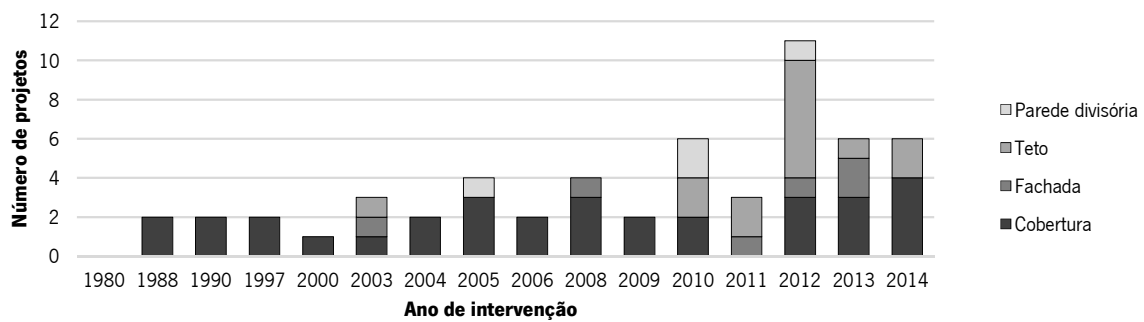


Figura 4.7. Distribuição dos projetos selecionados pelo ano de intervenção com membranas.

Cada vez são criadas mais soluções inovadoras e utilizações experimentais com membranas. O espectro vai desde aplicações de alta tecnologia a baixa tecnologia que exploram cada vez mais as potencialidades da arquitetura com membranas. Em particular, o projeto *University of West London* (ref<sup>a</sup> C.32) mostra a rapidez com que evoluem os materiais em membrana, pois após 8 anos, foi substituída a membrana ETFE de uma cobertura pré-existente por uma outra membrana ETFE com maior transmissão lumínica. Outro exemplo é o projeto de reabilitação *Talisman Centre* (ref<sup>a</sup> C.30, detalhes no Anexo 4) em que uma nova membrana dupla de fibra de vidro revestida a PTFE com manta de aerogel intermédia foi a opção selecionada para substituir a membrana simples de fibra de vidro revestida a PTFE instalada em 1983. Esteticamente, a nova membrana possui a mesma aparência da membrana existente, enquanto funcionalmente fornece cinco vezes mais isolamento do que a membrana existente, promove a passagem de luz natural, reduz o risco de condensações e evita perdas de calor decorrentes do aquecimento da água das piscinas.

No ano de 1997 foi executada uma intervenção inovadora - projeto *Eco Membrane* (ref<sup>a</sup> T.11 (detalhes no Anexo 4)) - com a duplicação de um espaço interior através da aplicação de um membrana de PVC para otimizar o desempenho térmico no interior do edifício. Esta otimização foi conseguida através da inserção de duas membranas com ar entre si. Dos constrangimentos inerentes a esta intervenção resultou uma solução arquitetónica inovadora, em que a reutilização de edifícios industriais se tornou um ato de sustentabilidade, na medida em que se evitaram resíduos de demolição e se reduziu o consumo de novos materiais de construção e de energia.

No ano de 2007 assistiu-se à primeira aplicação de membranas numa reabilitação de fachadas – projeto *Westraven* (ref<sup>a</sup> F.05 (detalhes no Anexo 4)). A membrana foi tensionada entre balaustres metálicos através de tubos de alumínio, fazendo uso das instalações existentes para ancoragem dos equipamentos de limpeza de vidros. Uma vez que esta solução foi aplicada pela 1<sup>a</sup> vez no âmbito de uma intervenção de reabilitação de um

edifício, foram realizados testes para todos os requisitos técnicos e funcionais. Os testes demonstraram que esta 2ª pele em membrana reduz suficientemente as forças do vento e a ação dos raios UV (Cepezed, 2016).

O ano de 2012 regista o maior número de intervenções com membranas em edifícios. Neste ano realizou-se a primeira aplicação de uma estrutura pneumática contínua – intervenção de reabilitação na cobertura do edifício da Câmara Municipal de Saxony-Anhalt (refª C.17 (Anexo 4)). A ideia de uma estrutura pneumática contínua tem mais de 10 anos. O *Institute of Membrane Structures (IMS)* desenvolveu e patenteou o sistema *Bekaert-Belt* que usa cintas/ correias de aço embebidas em poliuretano, resistentes a raios UV, para permitir a execução de grandes vãos com estruturas em membranas de ETFE. Depois da primeira cobertura experimental em Bobingen, os investigadores do IMS aplicaram pela primeira vez o sistema *Bekaert-Belt* a um edifício de grande escala (Tensinet, 2016).

• **Localização**

Relativamente à localização geográfica dos projetos de reabilitação em análise, verifica-se que 81% foram feitos na Europa, 10% na Ásia e 9% na América. Além disso, entre os 19 países representados na amostra, dois deles (Alemanha e Reino Unido) lideram a lista com mais de 10 intervenções (17% a 22% do total) (Figura 4.8). Dos que foram realizados na Europa, cerca de 40% localizam-se na Alemanha ou Inglaterra (Figura 4.8), países onde os sistemas/tecnologias que integram membranas têm sido investigados e fabricados com maior profusão. Além disso, as condições climáticas destes países, com reduzidos ganhos solares no inverno e temperaturas amenas no verão, beneficiam da aplicação destas tecnologias de construção. Contudo, na última década, a utilização destas tecnologias tem sido desenvolvida noutras zonas com temperaturas máximas elevadas, como no sul da Europa ou em algumas regiões da Ásia (Tabela 4.7).

Tabela 4.7. Relação entre o ano de intervenção e a localização dos projetos em análise.

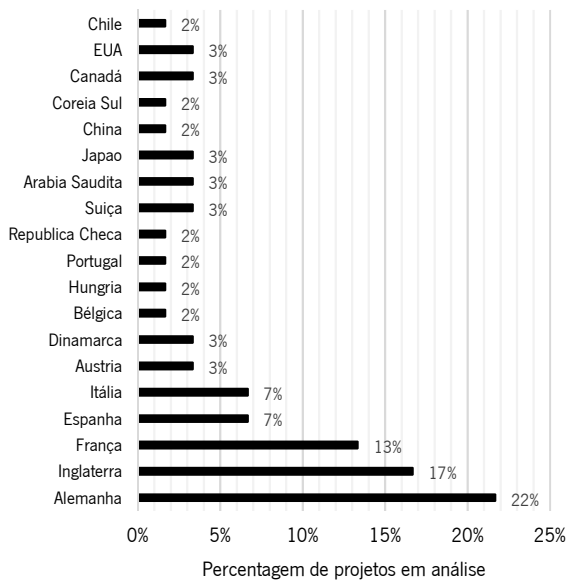


Figura 4.8. Localização (país e continente) dos projetos em análise.

Ano de intervenção de reabilitação com membrana	Países																			
	Alemanha	Inglaterra	França	Espanha	Itália	Áustria	Dinamarca	Bélgica	Hungria	Portugal	República Checa	Suíça	Arábia Saudita	Japão	China	Coreia do Sul	Canadá	EUA	Chile	
1988																				
1990																				
1997																				
2000																				
2003																				
2004																				
2005																				
2006																				
2008																				
2009																				
2010																				
2011																				
2012																				
2013																				
2014																				

4.3.3. Parâmetros climáticos

Um outro critério de análise dos projetos diz respeito à zona climática em que se localiza o edifício intervencionado. Os fatores ambientais são fundamentais para a escolha dos materiais e tecnologias de construção com características específicas, adequadas para dar resposta aos requisitos ambientais e garantir um bom desempenho funcional (térmico, lumínico, acústico, etc.) do edifício.

Os projetos em análise localizam-se entre 24° - 55° de latitude Norte (Figura 4.9) e em média nos 45°. A maioria localiza-se entre 47° - 51° de latitude Norte (66%). Numa análise mais detalhada (Figura 4.10), observa-



se que a maioria dos projetos se encontra construído na zona Cfa/Cfb (57%) – clima temperado marítimo<sup>3</sup> - de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (Kottek, 2006); seguindo-se a zona Dfb (25%) – clima continental húmido<sup>4</sup>.

O clima com temperaturas amenas e elevados níveis de humidade favorecem o uso de soluções exteriores com membranas transparentes e pneumáticas, beneficiando dos ganhos de radiação solar no inverno. Para além disso, permite que, através de sistemas de ventilação passivos ou ativos (com reduzido consumo energético), seja possível atingir bons desempenhos em parâmetros de conforto térmico interior. No entanto, a utilização de tecnologias com membranas pneumáticas tem aumentado noutros climas, como o Mediterrâneo, com temperaturas mais elevadas no verão.

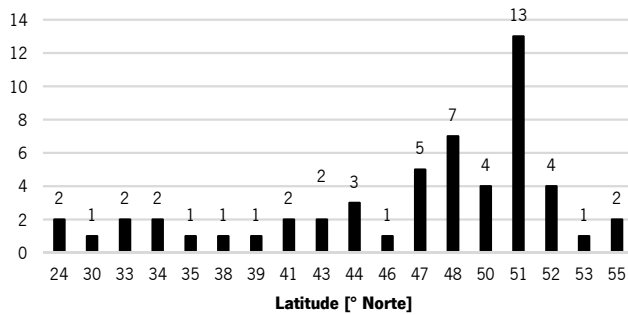


Figura 4.9. Distribuição dos projetos em análise segundo a sua latitude.

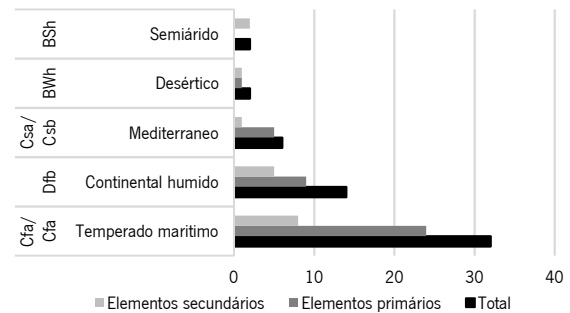


Figura 4.10. Distribuição dos projetos (por elementos primários e secundários) em análise segundo zonas climáticas.<sup>5</sup>

#### 4.3.4. Parâmetros programáticos

Um terceiro critério de análise diz respeito ao programa do edifício: à utilização e uso para o qual foi projetado; ao tipo de utilização (permanente, temporária ou sazonal) e ao tipo de intervenção de reabilitação (Ampliação, Alteração (conversão) e Renovação (reconstrução ou reforço) – dados importantes para avaliar a tendência de utilização destas soluções. A reabilitação de edifícios não residenciais corresponde a 91% da amostra de projetos selecionados. Destes, 20% apresentam uso cultural, 17% escritórios, 17% desportivos/lazer, 18% transportes e 11% religiosos. Edifícios com este tipo de usos necessitam de renovar a sua imagem com frequência, ou ampliar a sua capacidade e os materiais de membrana facilmente integram soluções para dar resposta a este tipo de necessidades.

#### • Tipo de uso

Os materiais em membrana têm tido uma expressiva aplicação em edifícios com categoria de uso não residencial, como se pode observar na Figura 4.11. Os projetos de intervenção em análise realizam-se maioritariamente sobre edifícios com usos (inicial) residencial (21%), religioso (19%) e escritórios (10%). No uso final, após intervenção com membranas, os edifícios passam a ter uso maioritariamente cultural (26%), de escritórios (24%) e religiosos (13%) (Figura 4.11). Com esta análise conclui-se que a maioria dos edifícios intervencionados, inicialmente e após intervenção, possuem um uso não residencial. Contudo, verifica-se que a transferência de tecnologia com membranas arquitetônicas (desenvolvida ao longo das últimas quatro décadas) tem sido feita para edifícios de menor escala, tanto comerciais como residenciais.

<sup>3</sup> Clima temperado marítimo – Cfa, Cfb: nas regiões com clima temperado marítimo as chuvas são abundantes e bem distribuídas ao longo do ano, sendo o verão bastante fresco e húmido.

<sup>4</sup> Clima continental húmido – Dfb: caracteriza-se pela ocorrência de chuvas no verão ou ao longo de todo o ano e temperatura média do ar no mês mais frio inferior a -3°C e no mês mais quente superior a 10°C.

<sup>5</sup> Clima mediterrâneo – Csa, Csb: caracteriza-se por ter um verão quente e seco, e inverno instável e húmido. Clima desértico – BWh: caracteriza-se por ter reduzida quantidade de chuvas e grande amplitude térmica. Devido à aridez, de dia a temperatura chega a 45 °C e a noite -5 °C. O clima desértico geralmente ocorre em latitudes entre 15° e 30°. Clima semiárido – BSh: tipo de clima caracterizado pela baixa humidade e pouco volume pluviométrico.

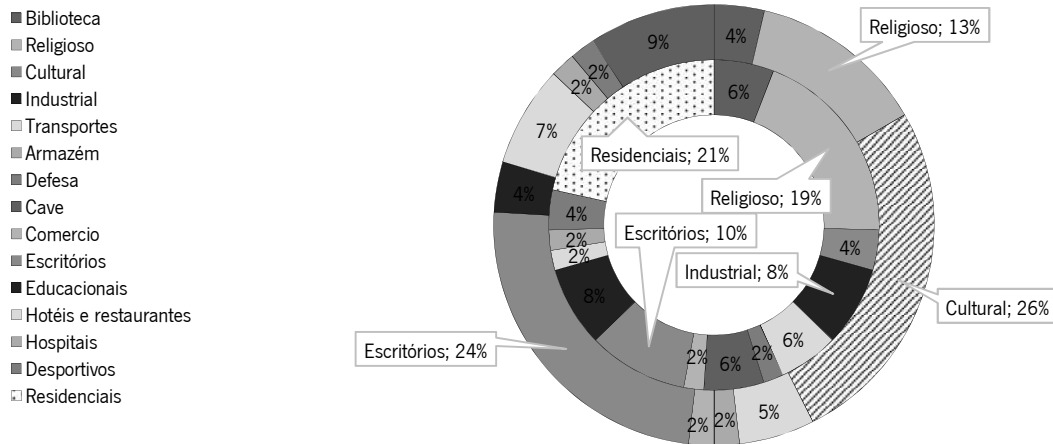


Figura 4.11. Relação entre uso inicial (círculo interior) e uso após intervenção com membranas (circunferência exterior).

### • Tipo de intervenção

Relativamente ao tipo de intervenção<sup>6</sup> verifica-se que a maioria são ampliações (39%) e renovações (32%). A maioria das ampliações são internas, ou seja, correspondem ao aumento da área útil, mas pelo encerramento de pátios existentes. As ampliações ocorrem, sobretudo, sobre edifícios não-residenciais que se convertem em usos culturais e as renovações em edifícios com programas religiosos (Figura 4.12). Na maioria das intervenções de ampliação ocorre conversão de uso (64%) (Tabela 4.8). Mas na maioria das intervenções para alteração ou renovação dos edifícios existentes não existe conversão de uso (Tabela 4.8). Em síntese, na Tabela 4.8 apresenta-se a distribuição de cada projeto em análise, segundo o ano de construção, o tipo de intervenção e de utilização.

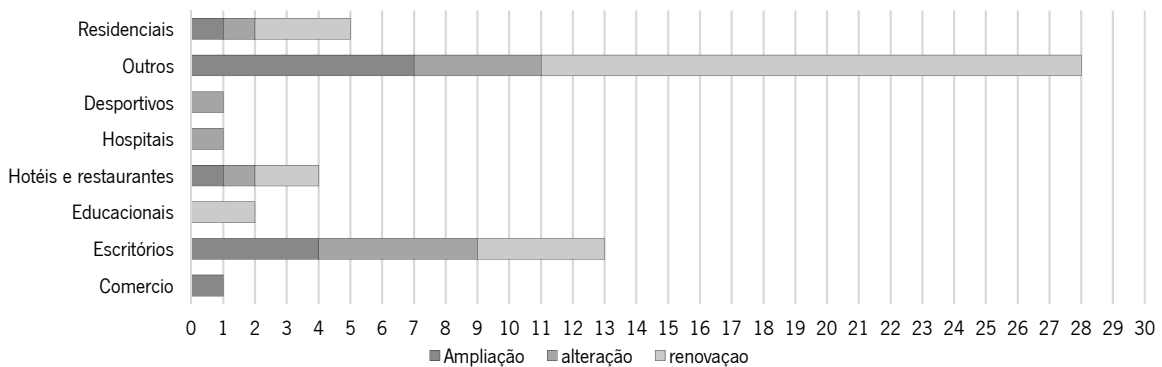


Figura 4.12. Relação entre o tipo de intervenção e o tipo de uso dos projetos em análise. Os usos classificados como "Outros" correspondem a: bibliotecas, industrial, religioso, cultural, transportes, defesa, caves.

Observa-se que as intervenções com membranas têm cada vez mais um caráter permanente de utilização (95%). No que toca à graduação das intervenções<sup>7</sup> dos projetos em análise, verifica-se que maioritariamente são ligeiras (42%) (Figura 4.13).

<sup>6</sup> **Ampliação:** entende-se como uma operação de aumento da área/volume útil inicial do edifício. **Alteração:** refere-se ao trabalho produzido na construção que não se enquadra na manutenção ou na reparação e cujo objetivo é modificar o existente para lhe alterar a sua função (uso) podendo afetar a estrutura resistente do edifício e/ou o layout interior e a sua aparência. Constitui uma alteração a obra de que resulte a modificação das características físicas de uma edificação existente ou sua fração, designadamente a respetiva estrutura resistente, o número de fogos ou divisões interiores, assim como a natureza e a cor dos materiais de revestimento exterior, sem aumento da área de pavimento, implantação ou cêrcea (ECH, 2015). **Renovação:** consiste no redesenho e reconstrução de um componente existente de modo a incorporar novas tecnologias, para dar resposta a novos requisitos ou para adicionar funções que não estavam contempladas no projeto original (Douglas, 2006; Iselin *et al.*, 1993). Em alguns casos corresponde à reposição de componentes do edifício com novos componentes que não existiam na data de construção existente (Ashworth, 1997 *apud* Douglas, 2006).

<sup>7</sup> **Reabilitação ligeira:** compreende pequenas reparações das instalações e equipamentos (Paiva, 2006a). **Reabilitação média:** intervenção mais significativa que a reabilitação ligeira, p.e. reforço de alguns elementos estruturais; **Reabilitação profunda:** para além dos trabalhos descritos anteriormente, compreende a necessidade de alteração de reorganização funcional dos espaços, implicando demolições, reconstruções significativas e resolução de problemas estruturais (Paiva, 2006a). **Reabilitação excepcional:** compreende uma operação com um grau de desenvolvimento muito profundo que em alguns casos obriga à total reconstrução do edifício (Paiva, 2006a).

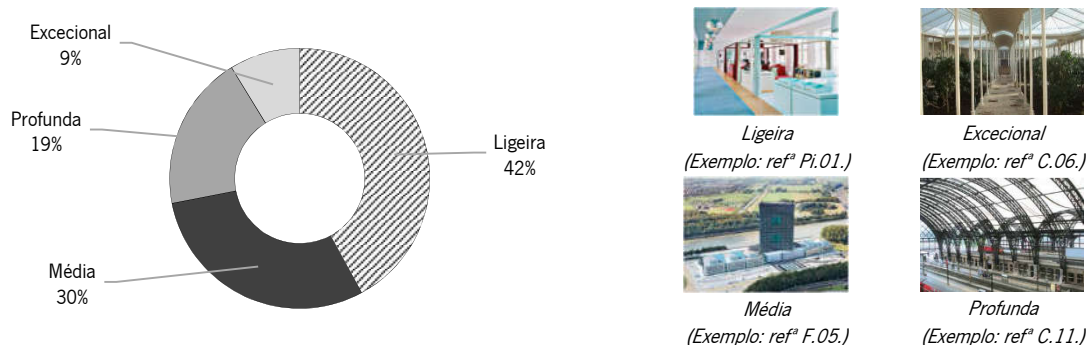


Figura 4.13. Graduação das intervenções de reabilitação dos projetos em análise.

Tabela 4.8. Distribuição dos projetos em análise segundo o ano de construção, o tipo de intervenção e de utilização.

Referência do projeto	Ano da construção pré-existente*	Uso inicial	Uso após intervenção	Conversão? [● = sim]	Tipo de utilização*	Grau de intervenção**
<b>AMPLIAÇÃO</b>						
C.01. Arena de Nimes	27 a.c.	Desportivo	Cultural	●	T	L
C.02. Fuchun Kosa Zou Ma Lou	1300	Residencial	Hotel	●	P	M
C.34. Biblioteca nacional Beyazit	1506	Residencial	Cultural	●	P	L
C.03. Palácio de Igartza	1800	Defesa	Cultural	●	P	L
C.41. Claustro da Abadia de Sables D'Olonne	1800	Religioso	Cultural	●	P	P
C.42. Julianus Shopping	1800	Industrial	Comercial	●	P	L
C.04. Museu Chileno de Arte Precolombina	1807	Cultural	Cultural	●	P	P
C.33. Palácio de Minería	1819	Residencial	Cultural	●	P	L
C.10. Kapuzinercarrée	1889	Escritórios	Comercial	●	P	P
C.12. Imagination Headquarters	1900	Residencial	Escritórios	●	P	M
C.36. Her Majesty's Treasury	1917	Escritórios	Escritórios	●	P	L
C.15. Centro William Rappard, Edifício OMC	1926	Educacional	Escritórios	●	P	M
C.17. Câmara Municipal de Saxony-Anhalt	1929	Escritórios	Escritórios	●	P	L
C.20. Fukiya International Villa Hall	1930	Residencial	Cultural	●	P	L
C.22. Dresden Castle Kleiner Schlosshof	1945	Residencial	Cultural	●	P	E
C.24. Frac Art Centre	1949	Industrial	Cultural	●	P	M
C.37. Colégio Ketteler	1960	Educacional	Educacional	●	P	M
C.28. Praça Devonshire	1970	Comercial	Escritórios	●	P	P
C.29. Infântario De Wismar	1972	Educacional	Educacional	●	P	M
F.04. Biblioteca Nacional King Fahad	1970	Biblioteca	Biblioteca	●	P	P
T.14. Biblioteca Nacional King Fahad	1970	Biblioteca	Biblioteca	●	P	P
F.06. Shishiodoshi House	1980	Residencial	Residencial	●	P	M
Média parcial	73% Antigos: Pré 1960	68% Não residencial	95% Não resid. 41% Cultural	64% ●	95% P	36% L
<b>ALTERAÇÃO</b>						
C.05. Palácio das Artes de Mons	1824	Educacional	Cultural	●	T	L
C.06. Camellia House	1827	Cultural	Cultural	●	P	E
C.38. Galeria Nacional De Londres	1838	Cultural	Cultural	●	P	E
C.09. Câmara Municipal de Vienna	1884	Escritórios	Escritórios	●	P	L
C.13. Masia Villa Celiana	1920	Residencial	Cultural	●	P	M
C.16. Atrio Do Salão de Exposições Do Reno	1928	Cultural	Escritórios	●	P	P
C.18. Edifício Johnson	1930	Escritórios	Escritórios	●	P	P
C.19. Burberry Headquarters, Horseferry House	1930	Escritórios	Escritórios	●	P	P
C.21. Estádio Olímpico de Berlim	1936	Desportivo	Desportivo	●	P	L
C.25. Frøsilo	1963	Industrial	Residencial	●	P	M
F.01. Centro de Gerontologia	1940	Saúde	Saúde	●	P	L
T.11. Ecomembrane	1936	Industrial	Escritórios	●	P	L
Pi.03. Mino	1970	Industrial	Hotel	●	P	M
Média parcial	85% Antigos: Pré 1960	92% Não residencial	92% Não resid. 62% Escritórios	53% S/conv.	92% P	39% L
<b>RENOVAÇÃO</b>						
T.01. Abadia Beneditina de Pannonhalma	996	Biblioteca	Cultural	●	T	L
T.02. Igreja de St. Petri-Pauli	1483	Religioso	Religioso	●	P	L
T.15. Abadia de Dragun	1200	Religioso	Cultural	●	P	P
F.08. San Michele Arcangelo	1580	Religioso	Cultural	●	P	M
C.43. Museu Rafael Coronel	1600	Religioso	Cultural	●	P	M
T.03. Igreja em Versalhes	1700	Religioso	Religioso	●	P	L
Pi.01. Danish Cultural Ministry	1728	Residencial	Escritórios	●	P	L
T.04. Museu da Historia Alemã	1800	Cultural	Cultural	●	P	P
T.05. Sala De Reuniões De Vallée Doller E Soultzbach	1800	Religioso	Cultural	●	P	L
T.06. Cantina De Convento Franciscano	1800	Religioso	Cultural	●	P	L

\* Representação generalizada dos edifícios segundo o ano de construção do pré-existente:

Antigos: pré 1960

Modernos: entre 1961e 1990

Recentes: entre 1991 a 2016.

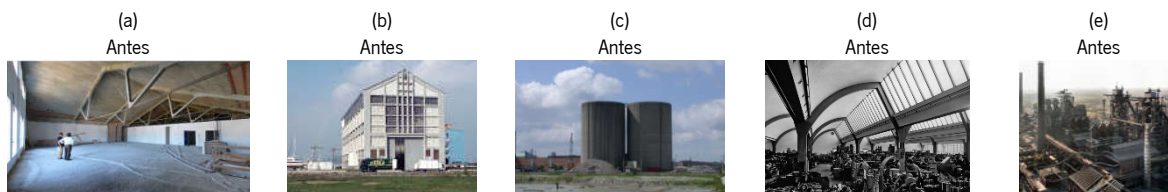
\* S- Sazonal; P – permanente; T – temporário; \*\* L – ligeira; M- média; P – profunda; E - excecional

Referência do projeto	Ano da construção pré-existente	Uso inicial	Uso após intervenção	Conversão? [● = sim]	Tipo de utilização*	Grau de intervenção**
T.07. Museu em Bolonha	1800	Religioso	Museu	●	P	E
C.39. Sede Jean-Paul Gaultier	1800	Residencial	Escritórios	●	P	E
C.35. Estação Carlisle	1847	Transportes	Transportes		P	P
C.07. Estação de Comboios de Salzburg	1860	Transportes	Transportes		P	E
T.08. Igreja Da Elevação De Santa Cruz	1871	Religioso	Religioso		P	E
C.08. Estação de Comboios Sakuragicho	1872	Transportes	Transportes		P	P
T.09. St. Edwards University	1878	Educacional	Educacional		P	L
C.11. Estação de Comboios de Dresden	1898	Transportes	Transportes		P	P
Pi.02. Hotel Evidencia Light	1900	Residencial	Hotel	●	P	M
T.10. Escritórios Logan	1900	Industrial	Escritórios	●	P	L
C.40. Estação de comboios de Wroclaw	1904	Transportes	Transportes		P	P
C.14. Casa do Pintor Lee Jung Seob	1920	Residencial	Cultural	●	P	L
F.09. Kwo Grimselstrom	1925	Industrial	Industrial		P	L
C.23. Igreja de Corbera D'ebre	1948	Religioso	Cultural	●	P	M
F.03. Edifício EDF	1958	Garagem	Escritórios	●	P	M
F.02. Casa em Munique	1956	Residencial	Residencial		P	L
T.12. Igreja De Agnese De Modena	1970	Religioso	Religioso		P	L
C.26. Edifício de Habitação Coletiva em Zamora	1970	Residencial	Residencial		P	L
C.27. Hartley Library Learning Centre	1970	Biblioteca	Biblioteca		P	L
F.05. Westraven	1975	Hotel	Escritórios	●	P	M
T.13. Igreja De St-Ignatus-De-Loyola	1982	Religioso	Religioso		P	L
C.30. Talisman Centre	1983	Desportivo	Desportivo		P	E
C.31. Clube de Tênis Bourg-La-Reine	1992	Desportivo	Desportivo		P	M
F.07. Edifício em Basileia	2000	Escritórios	Escritórios		P	M
C.32. University of West London	2006	Educacional	Educacional		P	L
Média parcial	74% Antigos: Pré 1960	86% Não resid. 34% Religioso	94% Não resid. 26% Cultural	60% S/conv.	97% P	46% L
Média Global	<b>75%</b> Antigos: Pré 1960	<b>80%</b> Não residencial	<b>94%</b> Não residencial	<b>53%</b> S/conversão	<b>97%</b> Permanente	<b>42%</b> Ligeira

#### ● Conversão de uso - caso particular da reabilitação de edifícios industriais

A maioria dos projetos em análise com conversão de uso tem (antes da intervenção) uso residencial (36%) e industrial (18%), e são convertidos em uso final cultural (41%) e de escritórios (31%). Particularmente no que toca aos edifícios com uso industrial, estes são frequentemente caracterizados por apresentarem grande amplitude espacial e flexibilidade do espaço interior; estas características, quando aliadas a uma generosa iluminação natural, fazem destes edifícios fortes candidatos a serem reabilitados com conversão de uso para albergar programas mais singulares de uso coletivo, por exemplo: centros desportivos, galerias de arte, museus e outros espaços culturais que de outra forma estão dependentes do recurso a construção nova. Os edifícios industriais em análise foram convertidos em uso cultural, residencial e serviços (escritórios e alojamento). Na maioria destas intervenções, e porque muitos destes edifícios se encontram obsoletos, sem uso, a reabilitação resulta na ativação do seu uso.

Frequentemente, a arquitetura de edifícios industriais investia na solidez e resistência estrutural, preterindo os critérios de conforto dos utilizadores; por exemplo, quando optava por uma envolvente construída com fraco desempenho para o conforto interior (higrotérmico, térmico, luminico, acústico). Neste sentido, analisando as intervenções em estudo (Figura 4.14), verifica-se que as membranas (pelas suas características) apresentam-se como uma solução para a reabilitação funcional destes espaços por se adaptarem, de forma eficiente<sup>9</sup>, a outras funções com maiores exigências de conforto; por exemplo, por facilmente se adaptarem aos grandes vãos que estes edifícios possuem. A durabilidade média das membranas contrasta com a elevada durabilidade da “estrutura física” dos edifícios industriais, mas acompanha o relativamente curto/médio período de utilização das novas funções que determinam a reabilitação funcional destes espaços.



<sup>9</sup> relação ótima entre os resultados obtidos e os recursos empregues.

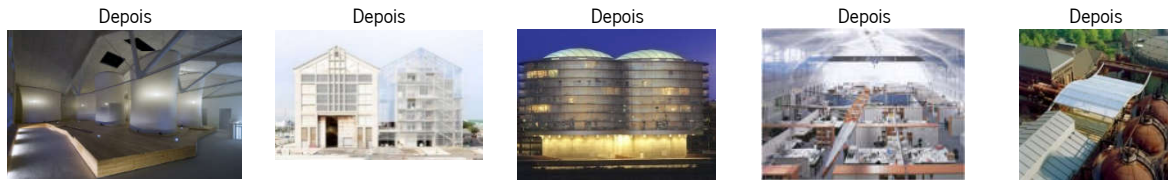


Figura 4.14. Exemplos de intervenções de reabilitação com membranas em edifícios industriais: (a) "Mino" em Itália (projeto ref<sup>o</sup> PI. 03); (b) "FRAC Art Centre" em França (projeto ref<sup>o</sup> C.24); (c) "Frosilo" (projeto ref<sup>o</sup> C.25) na Dinamarca (ano 2005); (d) "Eco membrane" na Alemanha (projeto ref<sup>o</sup> T11); (e) Cobertura móvel e pneumática em ETFE para eventos "Casting house - Landschaftspark Duisburg-Nord" na Alemanha (ano 2003).

Nestes casos de reabilitação de edifícios industriais, é necessário um esforço acrescido para corresponder aos requisitos de sustentabilidade<sup>10</sup> – salubridade, conforto térmico, acústico e visual, poupança de energia, materiais e outros recursos, viabilidade e retorno financeiro, etc. – esforço que deve ser sempre avaliado tendo em conta todo o ciclo de vida do edifício, bem como o esforço necessário à sua demolição e nova construção para os mesmos fins. Um aspeto notável, comum aos projetos acima mencionados (Figura 4.14), é que as mudanças efetuadas não resultaram apenas na modernização do edifício, nem numa abordagem ecologicamente correta, mas ocorreram através da utilização inovadora de materiais simples e económicos que permitiram alcançar qualidades que tornaram a reutilização deste edifício mais lógica do que a demolição e construção nova.

#### 4.3.5. Parâmetros funcionais: conforto e eficiência energética

Ao longo da elaboração das fichas individuais de cada projeto (secções 4.4 e 4.5 do Anexo 4) registaram-se as principais motivações para utilizar soluções com membranas arquitetônicas em intervenções de reabilitação funcional (Figura 4.15). A segurança/proteção apresenta-se como a principal motivação (em 27% dos casos) para a utilização de membranas arquitetônicas nos projetos em análise. Em segundo lugar, apresenta-se a flexibilidade/adaptabilidade/reversibilidade das soluções (24%); e em terceiro lugar o peso (16%).

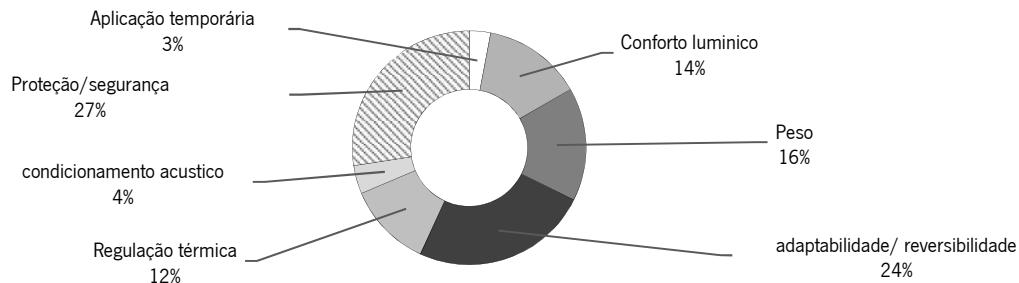


Figura 4.15. Principais motivações identificadas nos projetos em análise para utilizar membranas em intervenções de reabilitação<sup>11</sup>.

As principais tendências relacionadas com parâmetros de conforto e eficiência energética são: controlo térmico, iluminação natural e sombreamento, regulação acústica, impermeabilização, ventilação e aproveitamento de energia solar. Relativamente a estratégias de aproveitamento de energia solar, a melhoria das tecnologias fotovoltaicas de película fina (TFPV) abriu uma importante linha de pesquisa na última década. Contudo, não se registaram projetos de reabilitação com estas estratégias para analisar neste estudo, com exceção dos protótipos da SolarNext AG da Hightex (Figura 4.16) construídos em Rimsting, Alemanha.



Figura 4.16. Vista exterior e interior do protótipo de integração de células fotovoltaicas em membranas (Detail, 2016).

<sup>10</sup> Racionalização do uso de recursos ao longo do tempo, a curto e longo prazo, na procura de equidade a nível social, eficiência a nível económico e minimização dos impactos ambientais; atendendo às necessidades do presente, sem se comprometerem as possibilidades de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades (Relatório Brutland, 1987).

<sup>11</sup> Considera-se que cada projeto pode apresentar mais do que uma motivação para a intervenção de reabilitação funcional.

Nos anos setenta foram propostas muitas estratégias relativamente ao uso de sistemas ativos pneumáticos para regulação térmica. Contudo, foram realizados poucos protótipos e monitorizações. Atualmente, as estratégias de regulação térmica de tecnologias pneumáticas com membranas estão focadas no uso de gases menos densos que o ar (tal como hélio, árgon, azoto) e na combinação com outros materiais (aerogel), o que pode melhorar as propriedades de isolamento. Em 2010 foi aplicada no projeto Talisman Center (ref<sup>a</sup> C.30) uma membrana dupla de fibra de vidro, revestida a PTFE, com manta intermédia de aerogel, comercialmente denominada de “*Tensotherm Lumira Nanogel*” (Birdair, 2016). Esta membrana fornece cinco vezes mais isolamento do que a membrana pré-existente, promove a passagem de luz natural, reduz o risco de condensações e evita perdas de calor decorrentes do aquecimento da água das piscinas.

Para além da adição de isolamento térmico em intervenções de reabilitação funcional, o controlo da iluminação natural e da radiação solar tem sido a estratégia mais desenvolvida nas últimas décadas. Novos materiais como o ETFE oferecem elevados níveis de transmissão de radiação visível, transmissão de raios ultravioleta e de autolimpeza que favorecem a redução do consumo de energia elétrica. Observa-se que os desenvolvimentos mais importantes nas intervenções com membranas ETFE foram alcançados através de estratégias de sombreamento e controlo de ganhos solares nos edifícios. Estas estratégias podem ser classificadas como passivas e ativas. Um exemplo baseia-se na utilização de padrões impressos sobre membranas transparentes (Figura 4.17(a)), ou na combinação de superfícies opacas e transparentes. De outra forma, os sistemas ativos baseiam-se em padrões positivos e negativos sobre diferentes camadas, cuja separação varia em função dos níveis de pressão interior e dos valores de radiação necessários em cada momento do dia (Figura 4.17(b)). Adicionalmente, devido à crescente procura por membranas com melhor desempenho térmico, atualmente já existem membranas com revestimentos de baixa emissividade.

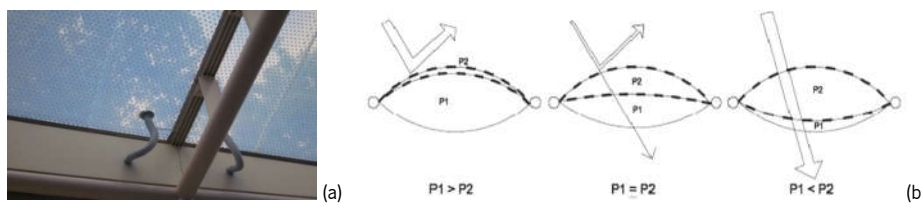


Figura 4.17. Estratégias de sombreamento: (a) passivo - projeto ref<sup>a</sup> C.32. University of West London (imagens cedidas por Architen Landrell); (b) ativo (Gonzalez et al., 2011).

Relativamente às estratégias de ventilação, os projetos em análise mantêm os sistemas construtivos das coberturas e fachadas de vidro, usando janelas, ou almofadas móveis para promover a ventilação natural. As intervenções que utilizam tecnologias construtivas com membranas como se fossem materiais rígidos, mostram que ainda é necessário o aperfeiçoamento de novas estratégias de integração, potenciadas pela propriedades de flexibilidade, como acontece com as coberturas pneumáticas.

Um exemplo de estratégia de ventilação é a intervenção feita no projeto com ref<sup>a</sup> F.05. Westraven. Este projeto consiste na reabilitação de um edifício que possuía o “síndrome do edifício doente”. Optou-se por aplicar uma 2<sup>a</sup> pele em membrana têxtil com trama aberta nas fachadas existentes. A cavidade entre a fachada existente e a fachada têxtil torna-se numa zona amortecedora (“buffer zone”) e a trama da membrana permite que se gerem pequenos “remoinhos de vento” por trás da membrana de modo a neutralizar o efeito do vento. Deste modo, esta solução oferece proteção contra o vento, tornando possível promover a ventilação do interior do edifício, mesmo com todas as janelas completamente abertas, sem provocar correntes de ar indesejáveis. Além disto, fornece proteção solar, sem bloquear a visão do interior para o exterior.

- **Estratégias passivas para obter conforto e economia de energia – exemplificadas através da amostra de projetos de reabilitação de edifícios industriais com membranas**

Todos os elementos que cumprem a sua função através da sua própria existência, ou manuseamento físico (p.e. uma parede opaca com elevada massa térmica, ou um sombreamento exterior ajustável) são elementos passivos, atuam sem consumir energia. Entre as várias estratégias passivas, distinguem-se as “solares passivas”, relacionadas com o conforto térmico, pelo controlo dos ganhos de calor solar (Mendonça, 2005), sendo provavelmente as mais utilizadas. Seguindo a abordagem de aspetos relacionados com a reabilitação



sustentável, apresentam-se alguns exemplos de edifícios industriais reabilitados com membranas - com diferentes estratégias passivas - procurando esclarecer o papel de aumento do desempenho funcional que as membranas podem ter quando adequadamente adaptadas a esses edifícios.

Em síntese, na Figura 4.18 são delineadas algumas estratégias para regulação térmica passiva com membranas. A estratégia (A) consiste em adicionar uma membrana de malha aberta e fixa no paramento vertical interior, ou exterior (dependendo se a fachada original tiver interesse em ser preservada) da parede de fachada, através da qual a radiação solar indesejável e/ou ação do vento no espaço interior é reduzida; deste modo pode promover-se a ventilação natural sem causar efeitos indesejáveis. Esta estratégia também é passível de ser adotada em elementos horizontais, nomeadamente através de tetos falsos com membranas microperfuradas, de modo a incrementar a absorção acústica do espaço a interencionar. Na estratégia seguinte (B), a ventilação natural e a drenagem de águas pluviais (com correção da pendente original) é promovida pela geometria da cobertura. Finalmente, na estratégia (C) uma membrana operável e translúcida é colocada abaixo de uma cobertura transparente, permitindo a redução da passagem de radiação solar indesejável e regular o nível de iluminação natural.

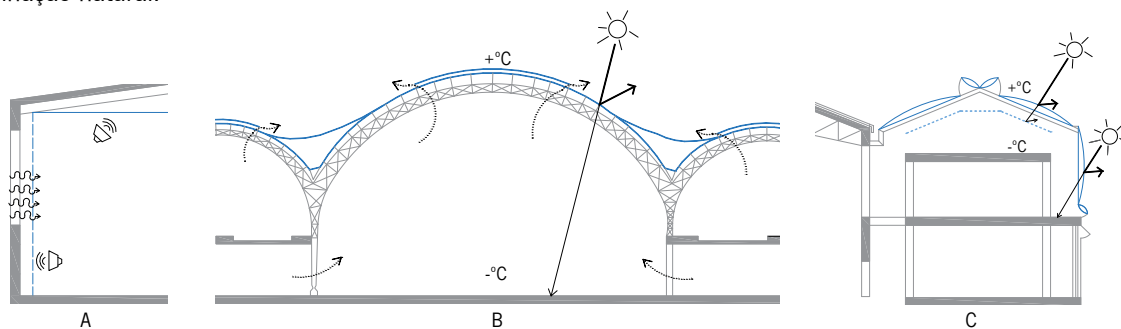


Figura 4.18. Estratégias de regulação térmica passiva com membranas, de modo a evitar o sobreaquecimento do espaço interior do edifício interencionado, bem como promover a melhoria de outros aspetos funcionais (acústicos, lumínicos, etc.). Esquemas conceituais: (A) Escritórios Logan, (B) Estação de comboios de Dresden, (C) Centro cultural FRAC.

As intervenções mais antigas de reabilitação de edifícios industriais com membranas são maioritariamente estações de comboios que precisavam de ser atualizadas de acordo com os novos requisitos de tráfego e segurança. Na Figura 4.19(a) identificam-se as estratégias de desenho passivo adotadas na reabilitação funcional da Estação de comboios de Salzburgo. A cobertura existente (com estrutura e revestimento metálico) apresentava um aumento significativo de sobrecargas causadas pela neve e pelo vento (Tensinet, 2016). Por isso, decidiu-se manter a estrutura metálica existente e substituir o revestimento da cobertura, em chapa metálica ondulada, por uma membrana tensada e com conexões pontuais à estrutura metálica pré-existente. Com esta solução, as cargas externas – neve e vento – só seriam transferidas para a estrutura existente através de determinados pontos. Uma membrana de PTFE foi selecionada devido à sua elevada durabilidade, resistência ao fogo, impermeabilidade, resistência mecânica, translucidez e leveza. Com esta solução, foi possível preservar a aparência dos elementos arquitetónicos centenários.

Na Estação de comboios de Sakuragicho (Figura 4.19(b)), os apeadeiros/ plataformas existentes tinham coberturas de madeira que não permitiam a entrada de luz natural. Na época em que se realizou a intervenção nesta estação, era recorrente reabilitar as coberturas com a substituição do revestimento em madeira por chapas de fibrocimento, ou chapas metálicas onduladas. Contudo, o problema associado à entrada de luz natural no interior das plataformas mantinha-se. Por isso, a solução adotada para ultrapassar este problema consistiu na execução de coberturas abobadadas com membrana de fibra de vidro revestida a PTFE. Esta membrana possuía a translucidez necessária para fornecer luz natural às plataformas, reduzindo a necessidade de consumo de luz natural. Segundo Ishii (1995), na época não havia construções executadas com esta membrana no Japão. Por isso, foram verificados os aspetos relacionados à durabilidade, à resistência a danos causados a objetos aéreos e à sujidade (o problema associado à acumulação de sujidade foi resolvido através da pulverização periódica de água sobre a cobertura de membrana).

A Estação de comboios de Dresden (Figura 4.19(c)), devido à insuficiente manutenção, foi-se deteriorando e, inicialmente, o revestimento original da cobertura (parcialmente envidraçada) foi substituído por um revestimento de madeira que reduziu a entrada de luz natural nas plataformas. De modo a recuperar o desenho da cobertura original, foram removidas as várias alterações realizadas nos últimos 60 anos e, com reforços mínimos, substituiu-se o revestimento em madeira da cobertura por uma membrana de fibra de vidro revestida a PTFE, suportada apenas pela estrutura existente, com arcos em ferro fundido (século XIX). A membrana selecionada transmite 13% da luz natural, reduzindo o consumo de iluminação artificial. A ligação entre a cobertura de membrana e os arcos existentes realizou-se através de uma sub estrutura de tubos metálicos. De modo a evitar sobrecargas sobre a estrutura existente, na eventualidade de ocorrer uma falha na superfície em membrana, criou-se uma rede de cabos (ligando cada treliça dos arcos) para formar um conjunto estável (Foster, 2016).

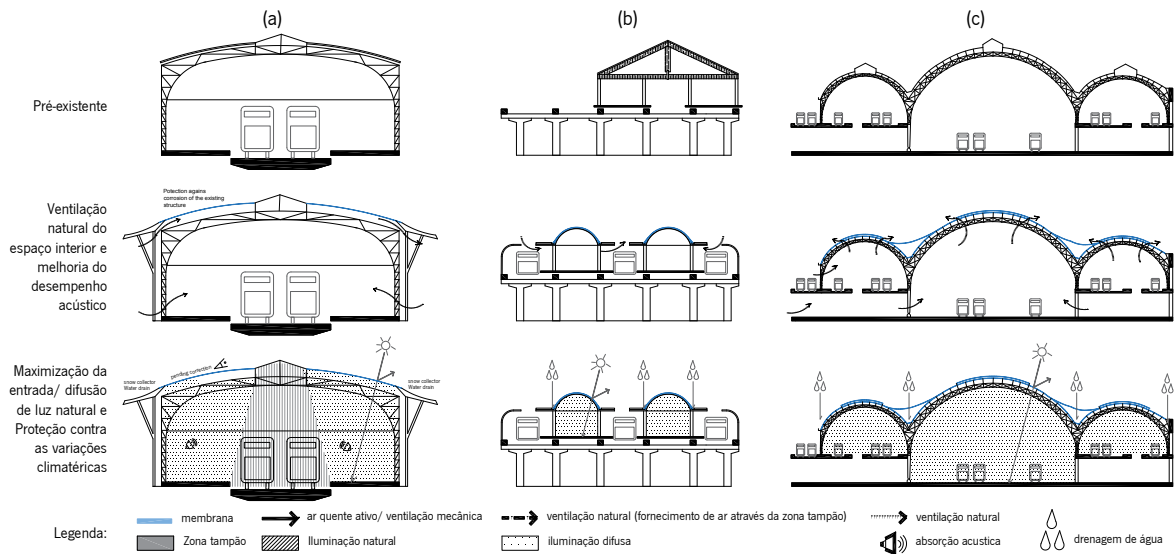


Figura 4.19. Estratégias passivas e ativas para o desenho de soluções com membranas na reabilitação/conversão de estação de comboios: (a) de Salzburgo (Áustria); (b) de Sakuragicho (Japão); (c) de Dresden (Alemanha).

As estratégias apresentadas na Figura 4.20 focam-se em soluções com membranas adotadas na reabilitação de edifícios industriais com constrangimentos de reabilitação pelo exterior, e que levaram a equacionar soluções de reabilitação pelo interior. O projeto Eco Membrane (Figura 4.20(a)) consiste no primeiro exemplo registado de reabilitação de edifícios industriais com membranas, em 1997. O edifício existente (com 1400m<sup>2</sup>) possui estrutura metálica, cobertura sem isolamento térmico, caixilharias em ferro com vidro simples e um espaço interior com fraca iluminação natural. Estas condições estavam longe de fornecer um espaço confortável para o novo departamento de design da empresa Siemens. Além disso, existiam outros constrangimentos para o projeto de reabilitação. Segundo Herzog (2014), a aparência exterior tinha de manter-se inalterada de modo a manter a unidade de conjunto com os restantes edifícios da empresa; a intervenção devia ser mínima, os custos de reabilitação deviam ser baixos e a intervenção devia promover a redução do consumo energético na fase de utilização do edifício. Assim, o pressuposto elementar de que a reciclagem de estruturas industriais obsoletas constitui um ato ecologicamente correto, economizando em resíduos de demolição, novos materiais de construção e consumos energéticos - resultou numa solução arquitetónica inovadora. Foram feitas as intervenções funcionalmente necessárias; manteve-se o revestimento original que fornece proteção adequada a intempéries e adicionou-se uma claraboia na cumieira da cobertura. Internamente, para promover a ventilação natural, foram adicionadas janelas operáveis à faixa envidraçada existente (ao nível do olhar) e adicionou-se um piso técnico com isolamento térmico, pavimento radiante, instalações elétricas e condutas de ar para servir cada local de trabalho. A solução inovadora consiste numa membrana de PVC translúcida, pendurada nas vigas metálicas existentes através de cabos entre os lintéis das novas janelas e a inclinação da cobertura. O ar comprimido entre a membrana e a estrutura existente proporciona isolamento e proteção em forma de tenda, reduz o volume de aquecimento na estação fria, ao mesmo tempo que permite que a estrutura pré-existente se mantenha visível, por trás desta membrana reciclável. Com esta solução, os arquitetos reinterpretaram os



princípios históricos de transparência, permitindo que os utilizadores tenham uma recordação visual constante das tecnologias de construção passadas e futuras.

A força motriz para criar mais espaços com configuração tipo nave (“open space”) em áreas urbanas foi positivamente vista por especialistas como forma de ajudar a revitalizar antigas áreas industriais. A iluminação natural abundante e o pé direito elevado, tornam este tipo de espaços adequados para a conversão em espaços de trabalho. Um exemplo desta situação é o projeto de intervenção dos Escritórios Logan (Figura 4.20(b)) que resultou da conversão de uso industrial em uso de escritórios. Era necessário criar novos compartimentos para usos distintos e adaptá-los aos novos requisitos. O objetivo era manter os ganhos de luz natural, criando espaços visualmente interligados entre si (o grau de privacidade requerido para cada área de trabalho foi definido pelo grau de translucidez da membrana aplicada). A parede divisória em membrana de poliéster com malha aberta e translúcida separa as áreas de trabalho centrais, reduzindo visualmente a escala do espaço; um teto retro iluminado em membrana de PVC tensada difunde a luz uniformemente e sem criação de sombras. O espaço existente apresenta estrutura, caixilharias e tubagens em ferro, desgastados pelo uso e pelo tempo. As soluções de revestimento adotadas para o paramento interior das paredes de fachada, permitem a rápida e fácil ocultação de quaisquer defeitos estéticos em grandes vãos, mantendo a passagem da luz natural e a visualização (em 2º plano) dos elementos de construção originais (como caixilharias e tubagens em ferro) - princípio da transparência. Além disso, este revestimento em membrana foi tensionado para garantir firmeza no toque e pode ser removido sem danificar os elementos de construção existentes. A Figura 4.20(c) representa o conceito de intervenção do projeto Mino, resultante da conversão de uma antiga fábrica de cânhamo numa pousada de juventude. A pousada é concebida como uma “máquina passiva” (Ravalli, 2016), na qual os fluxos de ar são movimentados de modo a obter benefícios para a climatização do espaço, enquanto os sistemas de distribuição e a disposição morfológica das salas (concebidos para minimizar recursos) permitem uma capacidade de alojamento ajustável: mais alta durante a primavera e o verão (ou em eventos especiais) e reduzida ao essencial durante a temporada baixa. Na impossibilidade de dividir este espaço em mais unidades, devido ao facto de só existir uma única entrada de luz e ar, o projeto sugere uma solução de dormitório alternativa, como um acampamento interno: “células” autónomas são definidas de forma independente com uma envolvente em membrana de poliéster translúcido. Não apenas fisicamente, mas também climaticamente independentes, estas “células” têm um sistema pontual de climatização autónomo. Todas as instalações e equipamentos de climatização estão ligados em rede, sob uma plataforma de madeira que pode ser inspecionada e que interliga todas as células. No espaço principal, a ventilação do ar é passiva, facilitada pela posição das janelas no lado norte e por duas torres de ventilação localizadas na cobertura (Ravalli, 2016).

Por toda a Europa existem áreas portuárias com edifícios vazios que têm sido convertidos em áreas residenciais ou centros culturais; a envolvente natural, a localização e a proximidade ao centro da cidade contribuem para o sucesso dessas conversões. Um exemplo disso é o Centro cultural FRAC Art (Figura 4.22(a)), um antigo estaleiro localizado numa frente marítima e com um grande espaço interior. Um dos usos propostos foi um espaço museu para o coletivo de arte FRAC. A intervenção de reabilitação manteve o edifício existente e criou uma ampliação horizontal, um novo edifício com a mesma dimensão e aspeto formal, adjacente ao edifício existente. Esta ampliação apresenta uma envolvente transparente – em membrana de ETFE dupla e pneumática – que permite a visualização do edifício opaco pré-existente. Do ponto de vista económico, a solução adotada (para construir a ampliação e restaurar o edifício existente, com 11129m<sup>2</sup> no total) custou 12 000 000 €; menos 1 000 000 € da verba disponível para reabilitar apenas o edifício existente (Lacaton & Vassal, 2016).

Um outro exemplo é o da conversão de dois silos de cereais da fábrica “*Soya Bean Cake*” em unidades residenciais. Os silos são estruturas cilíndricas mistas, com paredes de alvenaria e anéis de betão, sendo na sua configuração estrutural que reside o conceito de intervenção do projeto Frøsilø (Figura 4.21(h)). As restrições na realização de aberturas em anéis de betão, aliadas à intenção de manter as qualidades do espaço interior do silo - verticalidade e abertura - levaram os projetistas a localizar as unidades habitacionais fora dos silos, convertendo-os em dois grandes átrios. Para enfatizar essa qualidade espacial e proporcionar a máxima iluminação natural, a cobertura do átrio foi executada com uma membrana ETFE transparente. As razões para escolher a membrana ETFE foram: leveza, o fato de dispensar apoios a meio vão (25 metros) e a transparência.

O *Landscape Park Duisburg Nord* foi reabilitado com a intenção de preservar e entender o passado da indústria. A fábrica existente foi fechada em 1985 devido às indicações da Comunidade Europeia para reduzir a produção de aço (Clarke, 2002). No centro deste parque industrial ergue-se uma siderúrgica abandonada, cujas antigas instalações industriais foram utilizadas para uma ampla variedade de usos. A Casting house (Figura 4.21(c)) foi reabilitada para acomodar até 1500 espectadores para vários tipos de eventos (concertos, teatro, cinema, etc.). Uma particularidade deste projeto é o teto transparente e deslizante sobre o espaço exterior. Almofadas de membrana ETFE suportadas pneumaticamente compõem o teto retrátil, montado em carris semelhantes a ondas (SBP, 2016), que ondula entre as grandes tubagens presentes no exterior.

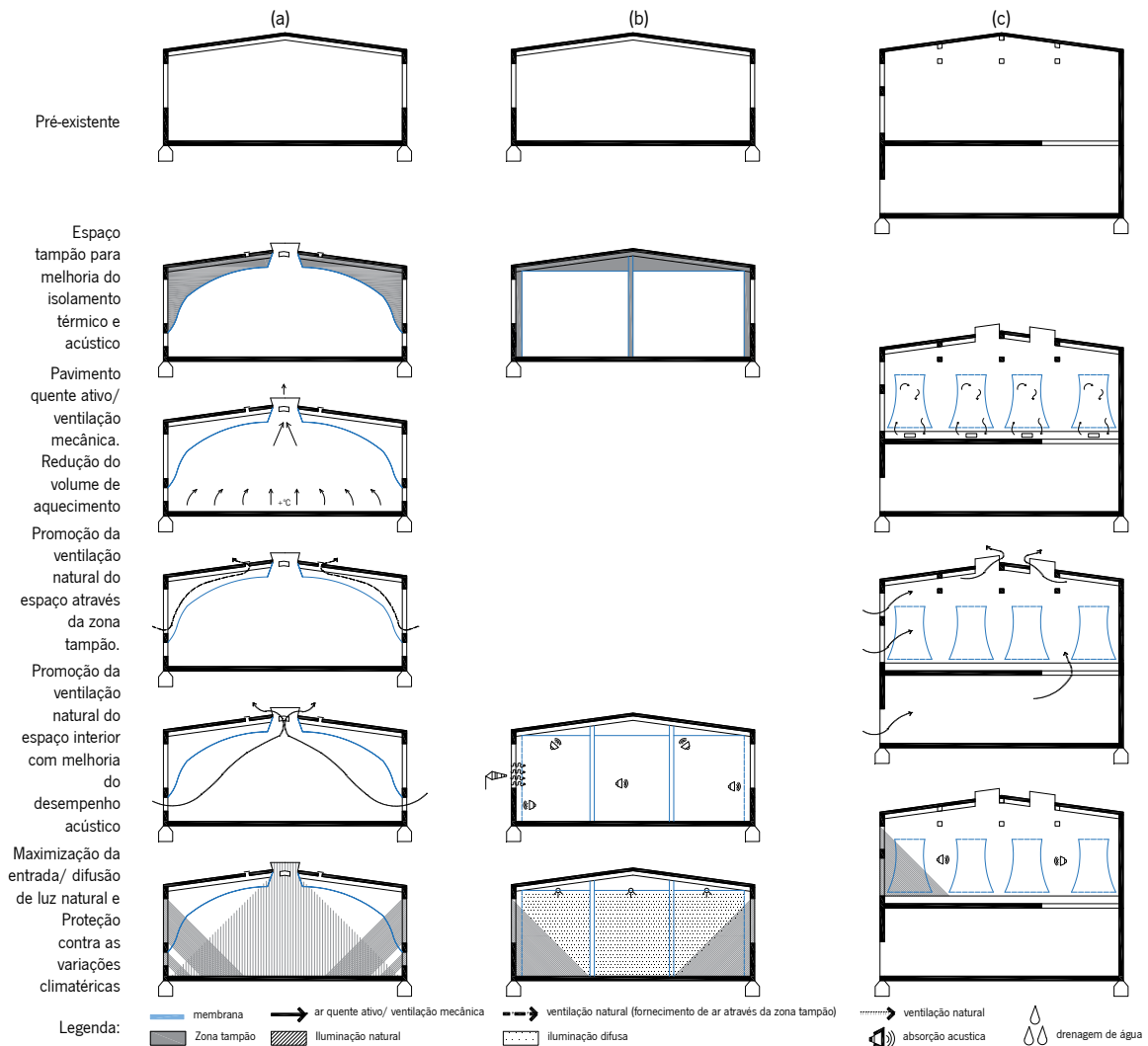
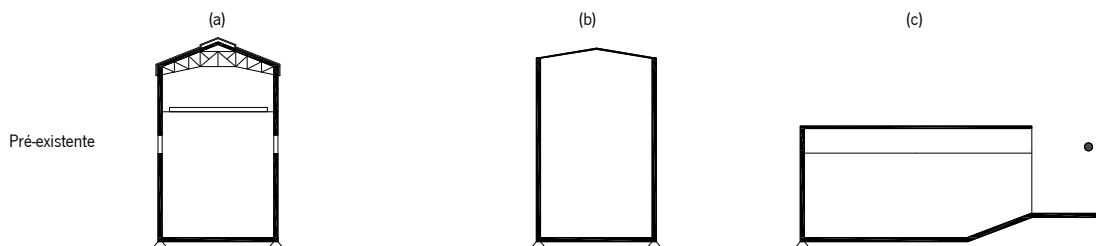


Figura 4.20. Estratégias passivas e ativas para o design de soluções com membranas na reabilitação/conversão de edifícios industriais: (a) *Eco Membrane*; (b) *Escritórios Logan*; (c) *Mino*.



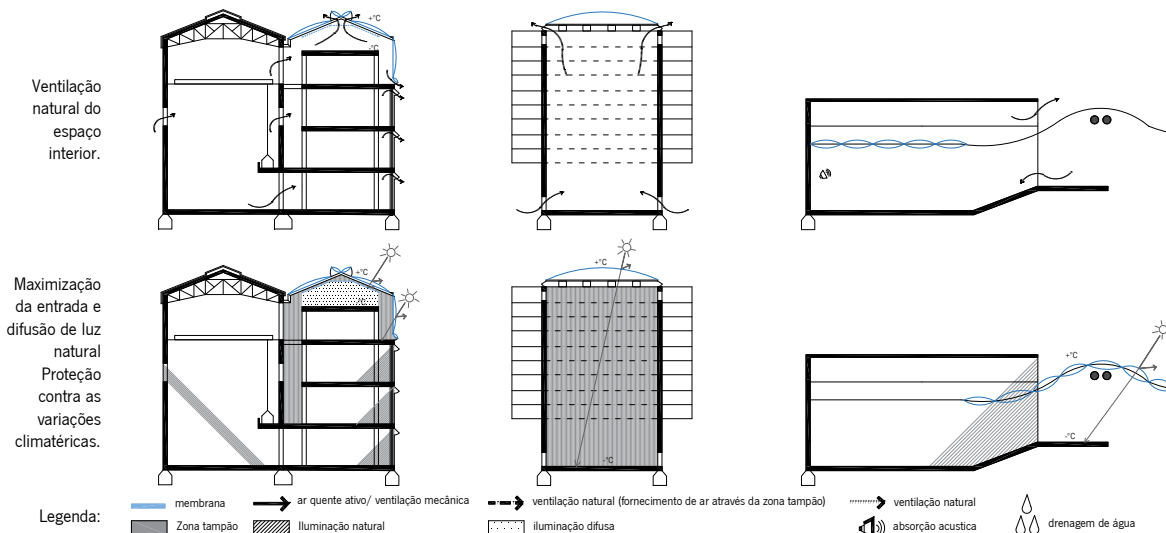


Figura 4.21. Estratégias passivas e ativas para o design de soluções com membranas na reabilitação/conversão de edifícios industriais: (a) FRAC Art Centre; (b) Frøsilo; (c) Casting house, Landschaftspark.

#### 4.3.6. Parâmetros construtivos

Outro critério de análise dos projetos selecionados está relacionado com as tecnologias de construção dos elementos construtivos. Dependendo das melhorias a serem atingidas, recorre-se a diferentes soluções caracterizadas pela combinação com outros materiais, componentes ou estruturas, sintetizadas da seguinte forma:

- Sistema de 2ª pele em membrana, pelo interior ou exterior do edifício, colocada em tensão e executada sobre um suporte existente;
- Sistema de painéis em membrana montado sobre subestruturas, ou painéis feitos de outro material;
- Sistema multicamada constituído por diferentes materiais e tecnologias, no qual as camadas limites em membrana têm função estrutural e de proteção externa e interna, e a(s) camada(s) intermédia(s) não se encontra(m) tensionada(s);
- Sistema de membrana dupla sob pressão com insuflação de ar positiva (alta ou baixa) ou negativa;
- Sistema de vedação e revestimento em membrana pré-tensada, ancorada a uma subestrutura pontual ou perimetral.

As estruturas tensionadas, como o termo refere, atingem capacidade estrutural através de forças de tensão na maioria dos componentes, tais como cabos e membranas, exceto nos componentes estruturais perimetrais rígidos, que são geralmente sujeitos a compressão e flexão. Segundo Lewis (2003), as estruturas tensionadas são normalmente subdivididas em: membranas tensionadas perimetralmente, estruturas pneumáticas e elementos em pré-esforço (como redes de cabos e vigas).

As **estruturas com membranas tensionadas** são compostas por membranas leves (em média com 0.3 a 1.8 kg/m<sup>2</sup>), com elevada flexibilidade e um nível de pré-esforço que gera rigidez na superfície. O estado de tensão é introduzido através de elementos como cabos, cordões ou fitas que podem ser configurados como bordaduras flexíveis. O equilíbrio geral da estrutura é atingido pela rigidez das arestas e dos elementos de suporte, geralmente sujeitos a compressão e/ou flexão. A capacidade de carga da superfície é atingida pela introdução de dupla curvatura e de pretensão.

As **estruturas pneumáticas** incluem todas as estruturas leves em que a capacidade estrutural é atingida através da pressão de ar. Maioritariamente, são subdivididas em duas categorias: estruturas com membrana simples estabilizada apenas por uma pequena diferença de pressão entre o interior e o exterior, e estruturas estabilizadas pela pressão de ar retida entre duas, ou mais camadas de membrana.

As **estruturas com elementos em pré-esforço** podem suportar cargas através de elementos flexíveis lineares sob tensão (redes de cabos), com a exceção dos elementos rígidos de suporte (como vigas de anel

rígido ou mastros). Estas estruturas podem ser subdivididas em redes de cabos que formam superfícies tridimensionais – cúpulas – ou em treliças de cabos numa versão bidimensional.

Verifica-se que a maioria dos projetos em análise apresenta estruturas em membrana tensionada (66%) e com estrutura pneumática (24%) (Figura 4.22). O planeamento de uma intervenção de reabilitação inicia-se com a análise do existente. Verifica-se que o tipo de estrutura dos edifícios intervencionados é maioritariamente mista (55%) (Figura 4.23). Também se constata que 90% das existências não necessitam de ser estruturalmente reforçadas para acolherem as intervenções com membranas arquitetónicas. Verifica-se que os sistemas construtivos em membrana em análise transmitem cargas à estrutura existente através dos seguintes tipos de subestrutura: perimetral (70%), pontual (17%) e linear (13%) (Figuras 4.24 e 4.25). Da amostra de projetos, verifica-se que a maioria das subestruturas perimetrais são aros (46%), caixilhos (30%) e anéis (24%); enquanto as subestruturas lineares são vigas (42%), arcos (35%), treliças (13%) e lintéis (10%). Relativamente às subestruturas pontuais, só se registam mastros e ganchos.

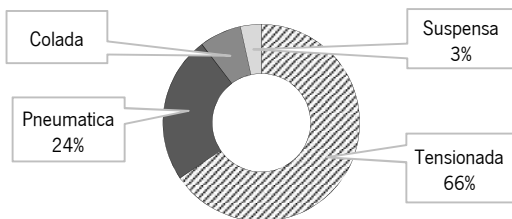


Figura 4.22. Intervenção com membrana – a) distribuição por tipos de aplicação presentes nos projetos em análise.

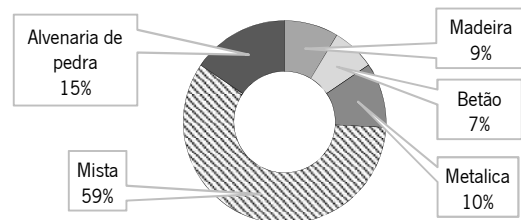
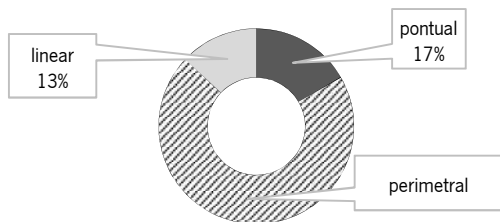
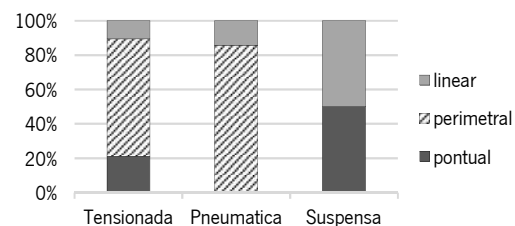


Figura 4.23. Tipo de estrutura existente sobre a qual é feita a intervenção em membrana nos projetos em análise



(a)



(b)

Figura 4.24. (a) Intervenção com membranas – tipos de elementos através dos quais é feita a transmissão de cargas da membrana para a estrutura existente. (b) Sistema de membrana.

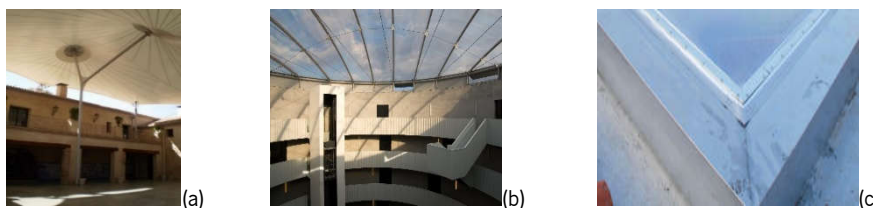


Figura 4.25. Exemplos de pormenores de ligações nos diferentes tipos de transmissão de carga em análise: (a) Pontual – exemplo projeto refª C.13; (b) Linear – exemplo projeto refª C.25; (c) Perimetral – exemplo projeto refª C.03.

Os materiais dos elementos da subestrutura (estrutura secundária) foram analisados de acordo com os diferentes sistemas construtivos de membranas (Figura 4.26). A maioria dos projetos é construída com subestruturas metálicas (61%). Contudo, em sistemas tensionados, são frequentemente utilizadas subestruturas em material polimérico e em madeira (cerca de 30% e 15%, respetivamente). As subestruturas em betão são particularmente utilizadas em embasamentos de unidades de estruturas pneumáticas com grandes vãos, ou em ancoragens de suporte onde a transmissão de carga é demasiado elevada, ou ainda em alguns elementos lineares, como vigas ou vigas de coroamento, onde o desenho arquitetónico deva prevalecer sobre a leveza destes sistemas (tensionados ou pneumáticos).

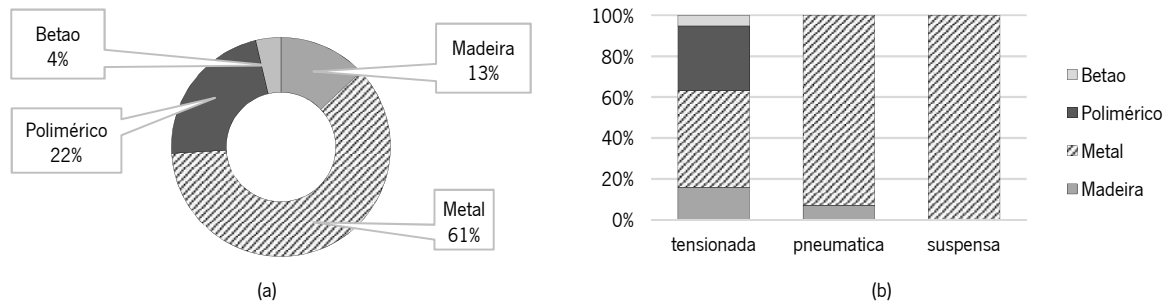


Figura 4.26. Intervenção com membrana – a) material da subestrutura; b) tipo de aplicação de membrana segundo o material da subestrutura.

#### • Materiais em membrana

Verifica-se que as soluções com materiais em membrana são utilizadas de forma independente, ou complementar a outros materiais. Dos materiais em membrana utilizados nos projetos em análise, a membrana de ETFE é a mais utilizada (35%) (Tabela 4.9), principalmente na última década. A autolimpeza, durabilidade e elevada transmissão de luz têm promovido a sua utilização em muitas soluções com caráter permanente. Outras membranas, com tecido de poliéster ou de fibra de vidro revestidos com PVC ou PTFE, também são utilizadas com frequência em situações que requerem maior resistência. Também se regista que os sistemas pneumáticos analisados apresentam, na maioria, duas ou mais membranas (Figura 4.27). A Tabela 10 apresenta as características básicas destas membranas.

Tabela 4.9. Materiais em membrana utilizados nos projetos em análise.

Material da membrana	%	Material da membrana	%
Tetrafluorotileno de etileno (ETFE)	35%	Não tecido de poliéster	0,5%
Tecido fibra vidro revestido politetrafluoretileno (PTFE)	16%	Poliolefina (TPO)	0,5%
Policloreto de vinil (PVC)	10%	Tecido e revestimento PTFE	0,5%
PVC microperfurada	9%	PVDF	0,5%
Tecido poliéster revestido PVC	16%	Rede de polietileno	0,5%
Polietileno de alta densidade (PEAD)	5%	Rede de sisal e polietileno	0,5%
Tecido Poliéster revestido PVC + Fluoreto de polivinilideno (PVDF)	3%	Tecido poliéster	0,5%
Betuminosa + fibra de vidro	0,5%	Tecido poliéster revestido PVC	0,5%
Tecido fibra vidro revestido PTFE + manta aerogel	0,5%	Tecido poliéster revestido a poliuretano (PU)	0,5%
		Veludo	0,5%

Tabela 4.10. Principais características dos materiais em membrana com maior aplicação na reabilitação de edifícios.

Poliéster revestida a PVC	Fibra de vidro revestida a PTFE	ETFE
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais económico;</li> <li>• alta resistência e baixo peso;</li> <li>• adequado para construções retrateis;</li> <li>• o revestimento de PVC emite poluentes quando exposto à radiação UV - durabilidade limitada - 15 a 20 anos - o material fica mais cinzento com o passar do tempo (devido ao acumular de sujidade) (KNIPPERS et al., 2011);</li> <li>• retardador de chama; restrito a certas aplicações.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cada vez mais visto como amigo do ambiente e extremamente durável – duração estimada de 35 anos;</li> <li>• o revestimento em PTFE atua como anti-aderente à sujidade;</li> <li>• reduzida elasticidade e resistência à encurvadura - importante para a fase de pré-montagem;</li> <li>• não combustível.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizada em membranas simples, duplas ou triplas, insufladas ou não; cerca de 0.2 mm de espessura;</li> <li>• comparativamente ao vidro, oferece uma elevada transmitância de raios UV (KNIPPERS et al., 2011);</li> <li>• boa capacidade de impressão, utilizada por exemplo para limitar ou refletir a transmissão de raios solares [5];</li> <li>• bom comportamento tensão-deformação e propriedades isotrópicas;</li> <li>• classificado como não inflamável.</li> </ul>

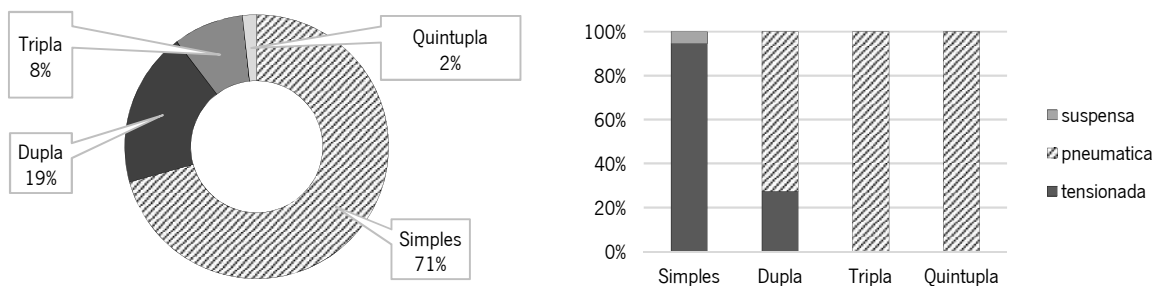


Figura 4.27. Análise do número de camadas em função do sistema adotado nas intervenções com membrana nos projetos em análise.

Em síntese, atendendo a aspetos construtivos, a maioria dos projetos em análise apresenta estrutura mista (55%) e 90% dos elementos construtivos dos edifícios existentes não necessitam de ser reforçados estruturalmente para acomodar as tecnologias construtivas com membranas. Relativamente ao tipo de elemento construtivo, a cobertura é o mais intervencionado com membranas (55%), seguindo-se os tetos (23%). A maioria dos elementos apresenta sistemas construtivos tensionados (76%) ou pneumáticos (24%). No entanto, a maioria das soluções pneumáticas tem um domínio particular em projetos de intervenção em coberturas (75% são pneumáticas). A maioria dos projetos apresenta uma área superficial de membrana que varia entre 51-300 m<sup>2</sup> (30%) e 1000-5000 m<sup>2</sup> (30%); entre outros materiais, como madeira ou poliméricos, a maior parte das subestruturas são executadas com perfis metálicos (61%). Além disso, 95% dos projetos de intervenção analisados apresentam instalações fixas de membrana, sendo as restantes móveis.

#### 4.3.7. Parâmetros económicos

O último parâmetro de análise global dos projetos em análise é o económico. Os resultados apresentados foram obtidos através da análise aos projetos selecionados, que foram realizados em vários países, não estando portanto associados a uma economia de um país específico, mas sim a uma média entre vários. Os elementos construtivos que assumem maior custo médio (custo material + custo de instalação) em intervenções de reabilitação com membrana são as coberturas (449€/m<sup>2</sup>) e as fachadas (250€/m<sup>2</sup>) (Figura 4.28). Importa reter que o custo global das intervenções com membrana varia em função da complexidade do desenho, do tipo de estrutura, das fundações etc., da localização e do custo da mão-de-obra especializada (Tabela 4.11). Os sistemas construtivos em membrana com estrutura pneumática possuem custos mais elevados relativamente aos outros sistemas (Figura 4.29), possivelmente devido à multiplicação de camadas de membrana e aos dispositivos necessários para manter a pressão do ar.

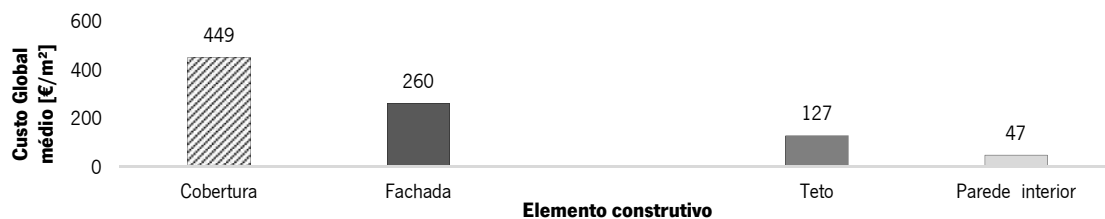


Figura 4.28. Custo por metro quadrado (custo material + custo de instalação) da intervenção com membrana por elemento construtivo.

Tabela 4.11. Decomposição do custo de uma intervenção com membranas (Armijos, 2008) (Fabric Architect, 2018).

Etapas:	Percentagem:
<b>Projeto arquitetónico</b>	(5-15%)
<b>Projeto de dimensionamento estrutural</b>	(5-15%)
<b>Gestão do projeto/ acompanhamento</b>	(5-15%)
<b>Produção da subestrutura</b> (depende se apresentam mastros ou aros para o tensionamento da membrana)	(10-60%)
<b>Transformação da membrana</b> (depende da complexidade do desenho)	(10-60%)
<b>Instalação</b> (depende da localização e da mão de obra)	(10-30%)
<b>Equipamentos</b> (depende do acesso ao local da obra e a localização da mesma)	(5-10%)
<b>Transporte</b>	(1-5%)
<b>Manutenção periódica</b> (sazonal)	(1-5%)

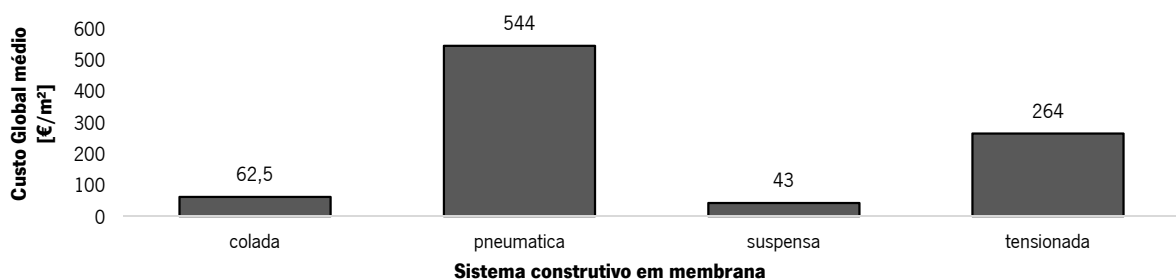


Figura 4.29. Relação entre o custo por metro quadrado e o sistema construtivo em membrana.

As intervenções de ampliação são as que possuem o maior custo global (410€/m<sup>2</sup>) e as de renovação possuem o menor custo global (256€/m<sup>2</sup>) (Figura 4.30). Também se verifica que as intervenções realizadas em edifícios modernos (construídos entre 1960 e 1990) são as que possuem o custo mais elevado (Figura 4.31). A relação entre o custo por m<sup>2</sup> e o grau de intervenção é gradual; à medida que o grau de intervenção aumenta, o custo por m<sup>2</sup> também aumenta (Figura 4.32). As intervenções com grau excepcional apresentam o maior custo global (808€/m<sup>2</sup>), aproximadamente o quádruplo das intervenções com grau ligeiro, devido à singularidade dos projetos que requerem uma maior especialização e detalhe. Verifica-se que o custo médio da intervenção tende a aumentar à medida que a área de intervenção aumenta (Figura 4.33), com exceção das áreas XXL (superiores a 20000 m<sup>2</sup>).

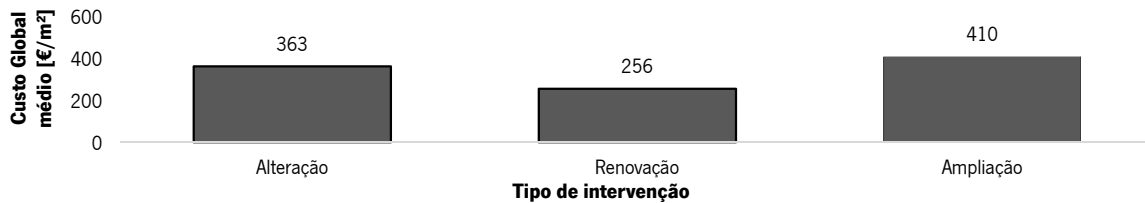


Figura 4.30. Relação entre o custo por metro quadrado e o tipo de intervenção de reabilitação com membranas arquitetônicas.

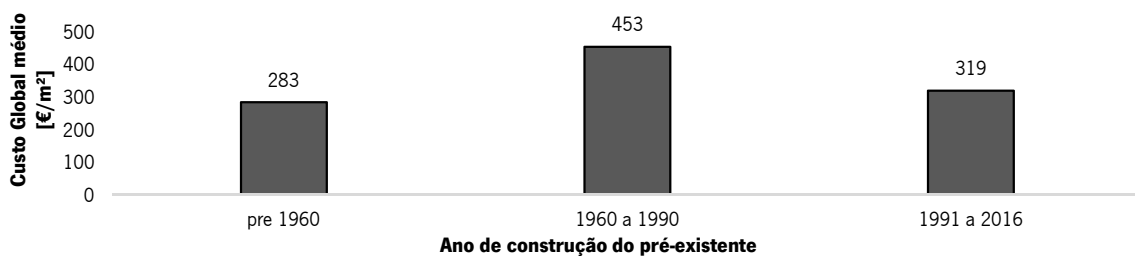


Figura 4.31. Relação entre o custo por metro quadrado da intervenção com membrana e o ano de construção do edifício pré-existente.



Figura 4.32. Relação entre o custo por metro quadrado da intervenção com membrana e o grau de intervenção.

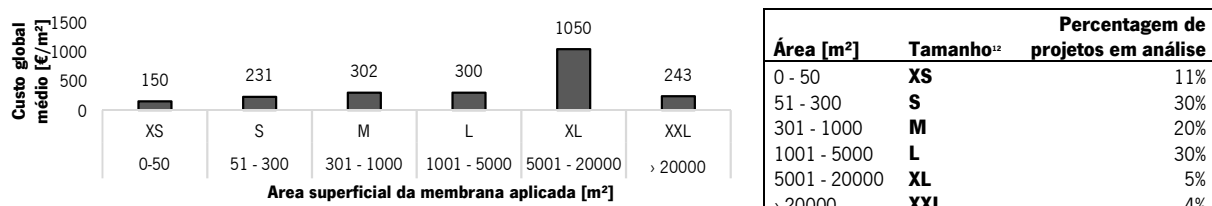


Figura 4.33. Relação entre o custo por metro quadrado da intervenção e a área superficial de membrana aplicada.

Nota: até ao momento, foram apresentados os resultados da análise da totalidade da amostra. Contudo também foi realizada uma análise detalhada da amostra, por elementos construtivos, primários e secundários, onde se mostram pormenores construtivos e descrições detalhadas sobre a ligação da solução membrana ao edifício existente. Esta análise encontra-se no Anexo 4, nas secções 4.1 e 4.2.

#### 4.4. Princípios e abordagens de reabilitação com membranas arquitetônicas

A arquitetura têxtil apresenta potencial para oferecer várias vantagens, como: elevada flexibilidade, reduzido impacto visual, formas orgânicas, modularidade, adequação a qualquer geometria, reutilização, estrutura de suporte leve, fácil transporte, reduzida manutenção e rápida instalação ou desmontagem. No entanto, é

<sup>12</sup> Considera-se a classificação da área superficial definida por Gonzales *et al.* (2011).

necessário investigar sobre as metodologias/abordagens de conceção, bem como o desempenho das membranas arquitetónicas, com o objetivo de assegurar a qualidade da solução em contextos específicos. Segundo os princípios do Conselho Internacional dos Monumentos e Sítios (ICOMOS), as intervenções em edifícios e sítios históricos devem: (1) preservar o caráter histórico e o significado particular; (2) não ser invasivas e serem compatíveis com os valores existentes: dimensionais, de escala e arquitetónicos; (3) diferenciar-se das partes históricas e serem reversíveis.

Segundo Llorens & Zanelli (2016) e Macieira, Mendonça & Guedes (2017), o primeiro princípio enunciado aplica-se principalmente em *abordagens de reposição*, procurando recriar uma seção ou componente em falta no edifício existente. O segundo princípio é considerado, sobretudo, em *abordagens de integração* de novos elementos dentro dos limites espaciais dos edifícios existentes, onde as membranas se tornam elementos de mediação entre o passado e o presente. O último princípio é liderado pelas *abordagens de sobreposição*. Quando a intervenção requer espaço adicional, isso pode implicar a revisão da estrutura existente e exige um bom diálogo entre componentes de construção novos e antigos.

Intervir num edifício antigo é um ato complexo que deve resultar de uma necessidade. A execução dos trabalhos obriga a uma preparação adequada realizada por técnicos especializados, tanto nas fases prévias de avaliação (constituição e estado de conservação do existente - inspeção e diagnóstico) e de projeto, como de execução dos trabalhos. A sensibilidade dos intervenientes deve apelar ao respeito pela estrutura e história do edifício, garantindo, sempre que possível, a reversibilidade das alterações realizadas. Neste âmbito, cabe à intervenção adaptar-se às existências e não o contrário; a compatibilidade estrutural e funcional dos novos materiais em relação aos existentes deve ser assegurada: “(...) a intervenção e respeito pelo Património podem e devem ser ações compatíveis. Cada estrutura é única e só um estudo cuidado permite selecionar a intervenção que melhor se adapta a cada situação. A salvaguarda das decisões passa por isso pelo estudo sistemático das soluções, imprimindo-lhes consistência e enquadramento. A realização de relatórios de inspeção e ou de reforço bem sustentados são a melhor salvaguarda do ato de intervenção” (Guedes *et al.*, 2003).

Assim, para que o arquiteto consiga expressar a sua visão sobre a fusão entre o presente e o passado de um edifício a interencionar, existem muitos fatores, para além dos especificamente arquitetónicos, que necessitam ser considerados. Através de alguns exemplos que se seguem, pretende-se enfatizar que não é apenas a abordagem de justaposição/sobreposição que parece ser compatível com a estética excecional (relativamente às soluções convencionais) das estruturas de membrana, mas também as abordagens de substituição e de integração são preferidas e tecnicamente mais viáveis à justaposição. Através dos seguintes estudos de caso, retiram-se algumas orientações, para uma aplicação mais ampla de membranas arquitetónicas no setor da reabilitação de edifícios no futuro.

#### 4.4.1. *Reposição*

A abordagem de reposição, relativamente às abordagens de integração e sobreposição, requer o nível mais elevado de precisão na fase de conceção, com a finalidade de: (a) preservar o caráter do edifício existente; (b) evitar problemas futuros, garantindo a compatibilidade dos novos elementos em relação aos existentes e (c) permitir um bom desempenho funcional da área renovada. Quanto ao aspeto de compatibilidade, esta abordagem considera que a intervenção deve ser compatível com a dimensão, escala, materiais, estrutura e valores arquitetónicos do existente.

O diagnóstico é uma ferramenta prévia de apoio à decisão em fase de projeto importantíssima; as opções a tomar no projeto de reabilitação devem ter em consideração os resultados desta análise. Por exemplo, no caso do projeto ref<sup>a</sup> C.11 - Estação de comboios de Dresden (Figura 4.34(a)) (Anexo 4) - a opção por uma cobertura em membrana foi tomada tendo em conta as condições da estrutura existente. Devido à leveza da membrana foi possível manter o máximo de elementos estruturais existentes e melhorar as condições luminicas do espaço.

Outro exemplo é o projeto ref<sup>a</sup> C.06.- Camellia house (Figura 4.34(b)) (Anexo 4) - uma das construções em ferro fundido mais antigas da Europa (Architen Landrel, 2016). Uma inspeção ao edifício revelou que a estrutura em ferro se encontrava debilitada para suportar sobrecargas como a neve ou vento, e que existiam muitos vidros quebrados por atos de vandalismo. Também detetou, como falha do projeto original, a reduzida pendente da



cobertura de vidro que não resistiu à ação da neve. Deste modo, para proteger a estrutura, foi desenhada uma segunda cobertura em membrana ETFE (com pendente corrigida) que encaixa sobre a cobertura existente em vidro e ferro. A membrana ETFE, aplicada em perfis de alumínio, é suficientemente resistente para suportar a carga da neve e, não tendo um comportamento frágil, torna-se mais segura do que o vidro. Deste modo o edifício pôde manter a sua função, dado que a membrana translúcida de ETFE assegura: a transmissão de luz necessária; uma reduzida sobrecarga para estrutura existente; e a incorporação de painéis com abertura para permitir a manutenção da cobertura. Uma das dificuldades deste projeto foi a modelação da cobertura em ETFE, devido à complexidade geométrica da cobertura existente. A Figura 4.35 apresenta outros projetos de intervenção com abordagem de reposição/recriação de elementos em falta, através de soluções construtivas que integram materiais em membrana.

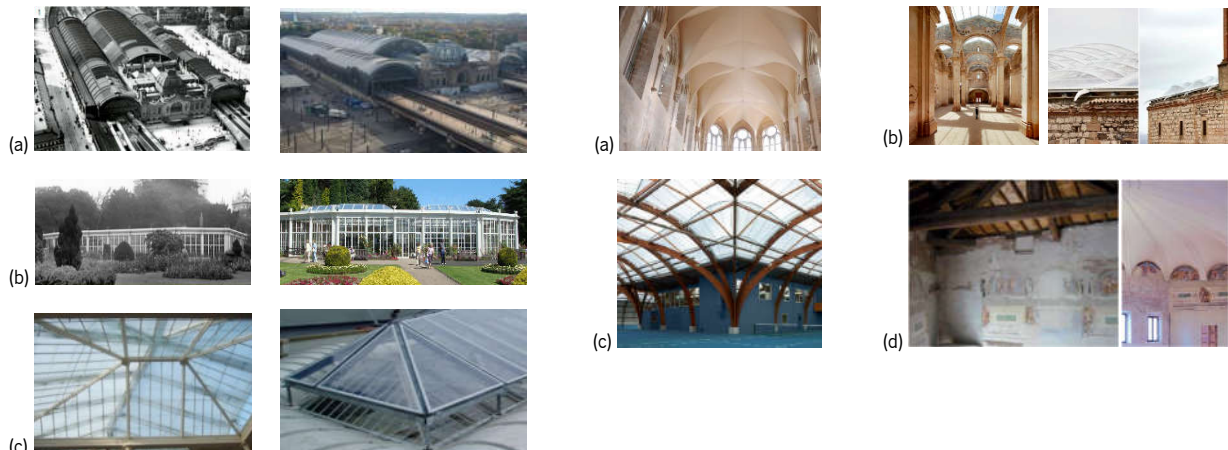


Figura 4.34. (a) Estação de comboios de Dresden (antes e depois da intervenção); (b) Camellia house (antes e depois da intervenção).

Figura 4.35. (a) Igreja kostel Povjšení sv. Kříže – reconstituição de teto abobadado para melhoria do desempenho acústico; (b) Igreja de Corbera d'Ebre; (c) Clube de Ténis Bourq-la-Reine – substituição da cobertura com melhoria das condições lumínicas; (d) Museu de Bolonha (Barrisol, 2016).

#### 4.4.2. Integração

Esta abordagem corresponde à integração de novos elementos dentro dos limites espaciais do edifício (ou conjunto de edifícios) a interencionar, onde as membranas se tornam elementos de mediação entre o passado e o presente. Esta abordagem implica a revisão de toda a estrutura para encontrar um bom diálogo entre materiais e técnicas de construção, novos e antigos. Torna-se um trabalho meticuloso com o objetivo de encontrar: (a) coerência linguística; (b) compatibilidade estrutural e (c) ligações fiáveis.

Quando se intervém em edifícios existentes, geralmente compostos por planos ortogonais, os materiais em membrana têm de deixar de lado a sua liberdade morfológica para se adaptarem às contingências formais destes edifícios. Isso requer o desenho de componentes de transição que garantam a correta conexão entre as membranas e o edifício existente. Esta integração acaba por ser facilitada pela leveza e outras propriedades físicas das membranas que não sobrecarregam o edifício existente, proporcionando proteção e melhorias no desempenho funcional do mesmo.

Na recuperação e reutilização do tecido urbano, as membranas podem "reparar" partes desmembradas, dando nova identidade e funções a espaços secundários. É o caso do projeto de intervenção na sede da empresa Imagination (concebido por Ron Herron em 1990; Architen, 2016) (Figura 4.36(a)) onde, com a reestruturação do um espaço existente entre dois edifícios, eliminando várias instalações de serviço entre eles, criou-se uma grande galeria interior coberta com uma membrana PES/PVC (com uma área aproximada de 590m<sup>2</sup>), garantindo as condições lumínicas necessárias para hospedar um novo uso/função. Um outro exemplo é o Infantário de Wismar (ENOB, 2016) (Figura 4.36(b)), onde o encerramento do espaço entre dois volumes existentes através da criação de uma cobertura pneumática em membrana tripla de ETFE (com entrada de radiação de luz solar regulável através do ajuste da pressão de ar entre câmaras pneumáticas) criou uma zona "tampão" que aumenta a capacidade de regulação térmica e a ventilação dos espaços adjacentes. Assim, não foi necessário reabilitar termicamente as fachadas existentes que confrontam o átrio criado, permanecendo inalterada a sua inércia.

O projeto de intervenção na junta de freguesia de Fukiya (Japão) (Ishii, 1995) apresenta o encerramento de um pátio com uma cobertura em membrana, permitindo construir uma grande sala de reuniões sem suportes intermédios. A conexão entre o novo e o antigo foi inevitável; a nova cobertura do pátio tinha de ser compatível com a configuração estrutural e as características arquitetónicas dos edifícios circundantes. A primeira opção foi uma cobertura em telhas cerâmicas, mas os proprietários desejavam uma cobertura em cobre, uma opção com elevado custo económico. Deste modo, como alternativa, optou-se por uma cobertura em membrana de fibra de vidro revestida a PTFE, com uma cor semelhante à das telhas cerâmicas das coberturas da envolvente circundante próxima (Figura 4.36), não só por fatores económicos, mas também pela possibilidade de alcançar um maior vão sem suportes intermédios.

Construído originalmente em 1900, o projeto de intervenção Escritórios Logan (Newmat, 2016) (Figura 4.36(d)) resultou na conversão de uso de um armazém industrial em escritórios. Para adaptar este espaço foi necessário criar novos compartimentos, com as correspondentes alterações para melhoria das condições acústicas e lumínicas adequadas ao novo uso. Deste modo, decidiu-se adicionar uma segunda pele interior, em membrana translúcida, às superfícies verticais e horizontais existentes. Os tetos falsos, com membrana translúcida e retro iluminada, permitem a difusão de luz artificial sem criação de sombras. O revestimento vertical (dos paramentos interiores da fachada e das divisórias) com membrana de malha aberta PES/PVC tensada atua como um elemento unificador da intervenção. Dissimula quaisquer imperfeições estéticas, ao mesmo tempo que permite manter a passagem da luz natural, melhorar o desempenho acústico (absorção) e manter a visualização dos elementos de construção e instalações originais (como tubagens em ferro, etc.).

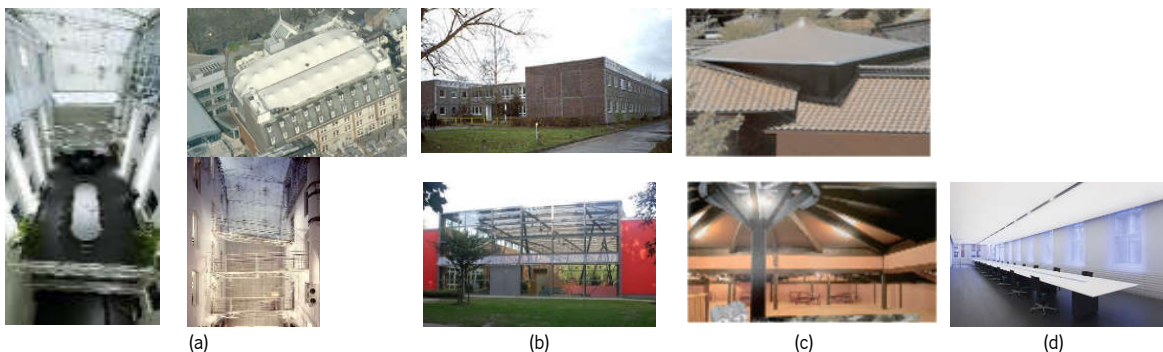


Figura 4.36. (a) Sede da empresa Imagination – vista exterior e interior (Architen, 2016); (b) Infantário de Wismar – antes e depois (ENOB, 2016); (c) Junta de Freguesia de Fukiya (Ishii, 1995); (d) Escritórios Logan – vista interior (Newmat, 2016).

#### 4.4.3. Sobreposição

A adição de funções a um edifício antigo por vezes pode requer a construção de espaço adicional. Quando isso acontece, é necessário rever toda a estrutura e encontrar um bom diálogo entre componentes de construção novos e antigos. Esta abordagem distingue-se da anterior por intervir fora dos limites do edifício existente. A abordagem de sobreposição requer diferentes estratégias para cada intervenção, encontrando o equilíbrio entre dois requisitos opostos: (a) distinguir os novos elementos dos antigos e (b) minimizar o impacto visual dos novos elementos de modo a garantir a perceção dos elementos pré-existentes. Com esta abordagem, pretende-se que a intervenção seja diferenciada das partes existentes e reversível – a reversibilidade da nova intervenção é um aspeto importante a ter em conta pelos projetistas.

O requisito de durabilidade das soluções de reabilitação para edifícios antigos, com valor histórico e cultural, é mais exigente do que nos edifícios contemporâneos, porque a sua vida útil é significativamente maior. Consequentemente, atendendo a uma abordagem de repetibilidade, pode considerar-se que, dependendo das especificações da intervenção, o uso de membranas, mesmo com uma durabilidade de 10-35 anos, constitui uma solução viável. As constantes mudanças funcionais que um edifício atualmente deve suportar, seja para motivos sociais, económicos, ou outros, requerem flexibilidade de uso. As tecnologias de construção com membranas podem atender a estas necessidades, estendendo a vida útil do edifício.

Acima de tudo, pode considerar-se que as soluções de reabilitação com membrana são repetíveis, isto é, quando atingem o final da sua vida útil, podem ser repetidas, ou quando existem mudanças funcionais, podem ser

reutilizadas noutros contextos. Deste modo, estas soluções integram-se no grupo de tecnologias construtivas classificadas de “desenho reversível” (Antonini *et al.*, 2010) por serem facilmente instaladas/desinstaladas e apresentarem um processo de reutilização/ reciclagem relativamente simples, características presentes em todos os projetos de intervenção que constituem a amostra em análise (em detalhe no Anexo 4).

No projeto de intervenção de um edifício do século XIX, “Hotel Evidencia Light” (Lisboa) (Evidencia, 2016) (Figura 4.37(d)), para dar resposta à necessidade de incrementar o desempenho funcional dos compartimentos existentes, selecionou-se uma solução de revestimento com membrana dos paramentos verticais e horizontais interiores existentes – sobretudo devido às reduzidas dimensões desses compartimentos e à possibilidade de renová-los e reutilizar as membranas em cenários futuros – sem danificar os elementos construtivos existentes. Adicionalmente, esta solução em membrana permite: alcançar ganhos de área útil (devido à sua reduzida espessura), incluir isolamento acústico, esconder imperfeições das superfícies existentes e constituir um substrato que pode ser impresso com elementos gráficos.

• **Sobre-cobertura/cobertura de pátios**

As membranas estão a substituir cada vez mais o vidro em coberturas destinadas a encerrar pátios existentes. Nestas intervenções, as vantagens das membranas são: leveza; satisfatória durabilidade e possibilidade de constituir grandes superfícies com uma única membrana (p.e. 5m x 20m), requerendo menos elementos de suporte. Além disso, na maioria dos projetos intervencionados as conexões aos edifícios existentes são reversíveis, não lhes causando danos significativos. No caso do projeto de intervenção “Palácio de Irgatza” (Espanha) (Tejera, Monjo & Torre, 2010) (Figura 4.37(b)), edifício classificado como património cultural, adicionou-se uma cobertura pneumática em membrana de ETFE sobre o pátio existente, com o intuito de preservar o edifício (com estrutura de madeira) dos efeitos das variações climáticas, sobretudo da chuva (muito frequente neste local), melhorando o desempenho higrótérmico e, simultaneamente, aumentando a área útil. No projeto Fuchun Kosa Zou Ma Lou (China) (Archimixing, 2016) (Figura 4.37(c)) - uma casa pátio vernacular – o pátio existente foi encerrado com uma cobertura invertida em membrana simples e transparente de PVC, suportada por uma estrutura em bambu, de modo a aumentar a área útil do edifício. A cobertura em membrana pode ser parcialmente aberta, promovendo ventilação natural e regulação térmica, e, ao mesmo tempo, a sua configuração permite a recolha de águas pluviais para utilização posterior. O projeto de intervenção “Shishiodoshi house” (Avignon Clouet, 2015) (Figura 4.37(d)) resultou numa ampliação vertical (sobreposição) de um edifício construído nos anos 80. Com uma altura de 11 metros, esta ampliação vertical foi executada com estrutura em madeira, totalmente revestida (fachada e cobertura) com uma membrana PES/ PVC tensada, de cor branca. Comparativamente a outras soluções, a opção por um material de revestimento em membrana foi motivada pela sua leveza e reduzido custo.



Figura 4.37. (a) Hotel Evidencia light (Evidencia, 2016), (b) Palácio de Irgatza (Bat Spain, 2016); (c) Fuchun Kosa Zou Ma Lou (Archimixing, 2016); (d) Casa Shishiodoshi (Avignon Clouet, 2015).








**4.5. Motivações funcionais para utilizar membranas**

A maioria das intervenções de reabilitação é motivada pelo fato dos edifícios não cumprirem os requisitos funcionais necessários, ou porque a deterioração do edifício põe em perigo o seu uso. Essas motivações determinam a profundidade das intervenções e que podem levar a significativas mudanças nos edifícios.

Atendendo à amostra de projetos de intervenção apresentada neste capítulo, passam-se a descrever as principais motivações registadas para a utilização de soluções construtivas com membranas em intervenções de reabilitação funcional em edifícios. Analisando a Tabela 4.12, podemos retirar as seguintes conclusões: as

intervenções com membranas arquitetónicas assumem mais do que uma função; a segurança e proteção contra as variações climatéricas apresenta-se como a principal motivação para a utilização de membranas arquitetónicas nos projetos de reabilitação em análise, seguindo-se a adaptabilidade/reversibilidade

Tabela 4.12. Síntese das motivações para a intervenção com membranas, por elemento construtivo.

	Critérios de intervenção						
	 Segurança e proteção contra variações climatéricas	 Peso	 Adaptabilidade Reversibilidade	 Controlo lumínico/ visual	 Regulação térmica	 Condicionamento acústico	 Aplicação Temporária
<b>Cobertura</b>	20%	17%	16%	16%	14%	4%	4%
<b>Fachada</b>	40%	13%	13%	7%	27%	-	-
<b>Tetos</b>	5%	14%	33%	19%	10%	14%	5%
<b>Paredes interiores Paramentos vert.int.</b>	-	-	60%	-	-	20%	20%

#### 4.5.1. Complementaridade: aspetos térmicos e acústicos

Na análise dos projetos selecionados verificou-se que as soluções com materiais em membrana são utilizadas de forma independente, ou complementar a outros materiais. Isto acontece porque, por si só, as membranas não conseguem fornecer as condições necessárias para alcançar um conforto térmico constante no interior de um edifício, devido à sua reduzida massa e isolamento térmico. No entanto, os edifícios existentes (que convencionalmente apresentam elevada massa térmica) podem ser complementados com membranas (simples, ou inseridas em sistemas multicamada) para alcançar outras melhorias funcionais, p.e. acústicas, higrotérmicas e de segurança. Segundo Mendonça (2005) a estratégia de integrar elementos com massa térmica não convencional, ou combinar elementos pesados e leves pode obviar este problema. O contributo destas estratégias, num contexto de reabilitação funcional do edificado, é avaliado nesta tese, pois o desempenho dos edifícios existentes (com soluções construtivas geralmente pesadas) pode ser complementado com membranas arquitetónicas (leves) (Figura 4.38).



Figura 4.38. Esquema conceitual da estratégia de mistura de pesos na reabilitação funcional de edifícios.

A leveza e translucidez são características únicas dos materiais de membrana. Estes podem ser aplicados com propósitos estruturais, mas também com propósitos não estruturais, como em revestimentos exteriores e interiores de edifícios. Deste modo, é possível evitar sobrecargas sobre o existente, oferecendo a resistência necessária. Com a redução de peso, menos material é despendido e menor será o impacto ambiental.

#### • Térmica

Dos projetos de intervenção em fachadas analisados, como o projeto ref<sup>a</sup> F.02 (Casa em Munique) (Anexo 4) (Figura 4.39(a)) e o projeto ref<sup>a</sup> F.03 (Edifício EDF) (Anexo 4) (Figura 4.39(b)), verifica-se que a aplicação da estratégia de complementaridade apresenta resultados positivos para o desempenho térmico dos edifícios intervencionados. A Casa em Munique apresentava um fraco desempenho higrotérmico, muitas pontes térmicas e reduzida estanquidade. Para resolver este problema, aplicou-se isolamento em manta de lã de rocha (12cm de espessura) revestido com uma membrana de polietileno tensionada sobre uma subestrutura de madeira sobre a fachada existente. Comparativamente ao sistema exterior de isolamento térmico composto ETICS correntemente utilizado na reabilitação térmica de fachadas, se o revestimento em membrana for danificado pode ser facilmente reparado, substituído e reciclado. Um outro exemplo de reabilitação térmica é o projeto de intervenção “KWO Grimselstrom” (Figura 4.39(d)), um edifício classificado como património, na Suíça. As grandes janelas foram reforçadas com membrana dupla de ETFE para melhoria do coeficiente de transmissão térmica (valor de U).



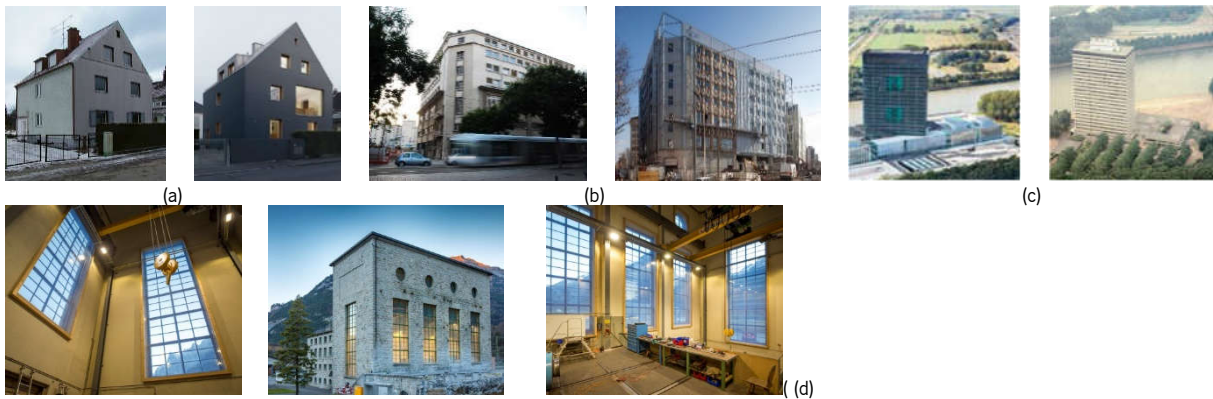


Figura 4.39. Exemplos de reabilitação funcional de fachadas com membranas (antes e depois): (a) Casa em Munique (Kroersch, 2016); (b) Sede da empresa EDF (Ménard, 2013); (c) Westarven (Crone, 2008) e (d) KWO Grimselstrom (Texlon, 2016).

✓ O comportamento térmico dos edifícios convencionais:

As construções convencionais, inseridas no tipo de construção pesada, conseguem alcançar condições térmicas estáveis ao longo do dia e do ano (Mendonça, 2005). A estabilidade destas condições resulta da combinação de massa, isolamento térmico, ventilação, sombreamento e ganhos solares passivos, complementada com equipamentos mecânicos (p.e. radiadores, ar condicionado, etc.). A massa térmica equilibra as variações entre as condições internas e externas: absorve calor com o aumento da temperatura acima da média e liberta-o para o interior quando a temperatura exterior diminui. O isolamento separa o interior do exterior, de modo a que as condições internas se mantenham com o mínimo de consumo energético.

✓ O comportamento térmico das construções em membrana:

As construções com membranas arquitetônicas, inseridas no grupo das construções leves, não oferecem, na maioria dos casos, nem massa térmica, nem isolamento. Normalmente, as membranas arquitetônicas possuem cerca de um milímetro de espessura e um peso próprio de aproximadamente  $1 \text{ kg/m}^2$ . Comparativamente, uma parede simples de tijolo furado possui um peso próprio de aproximadamente  $150 \text{ kg/m}^2$ . O valor de  $U$  (coeficiente de transferência térmica) de uma membrana é de aproximadamente  $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Comparativamente, o valor de  $U$  requerido para uma cobertura convencional em Portugal é próximo de  $0.04 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Como resultado, as membranas arquitetônicas são particularmente sensíveis às mudanças das condições climáticas, sendo afetadas de forma muito mais rápida e significativa do que a maioria dos outros materiais de construção. Mesmo num clima relativamente favorável, num dia de sol o ar interior de um edifício com membrana arquitetônica pode tornar-se  $20^\circ\text{C}$  mais quente do que a temperatura do ar externo, e as temperaturas superficiais registadas em membranas com elevada capacidade de absorção solar podem atingir  $45$  a  $50^\circ\text{C}$  (Harvie, 1995). Por outro lado, sob céu limpo noturno, o ar interior de edifícios com membranas pode atingir menos  $3.5^\circ\text{C}$  do que a temperatura do ar externo (Harvie, 1995). Adicionalmente, não existe qualquer atraso térmico significativo entre a variação de temperatura na superfície exterior e a alteração resultante na sua superfície interior (Harvie, 1995). Comparativamente, uma placa de madeira com 25 milímetros tem um atraso térmico de 25 minutos e uma parede de tijolo um atraso térmico de 5 horas (Evans, 1980).

✓ Necessidade de elevar a resistência térmica das membranas:

As soluções multicamada, como é o caso particular das estruturas pneumáticas de membrana, são uma opção para elevar a resistência térmica das membranas. Atualmente, as estratégias de regulação térmica em estruturas multicamada focam-se na utilização de gases (Nitrogénio) e na combinação com outros materiais, como o aerogel aplicado no projeto de revestimento interior de paredes por Masera *et al.* (2017), que podem aumentar a capacidade de isolamento térmico das membranas. Uma nova membrana multicamada, denominada Tensotherm™, com 1.27 cm de espessura e um peso de  $3.55 \text{ kg/m}^2$ , possui uma camada de manta de aerogel (isolamento térmico translucido de 0.25 cm, com um peso de  $1.76 \text{ kg/m}^2$ ) prensada entre duas camadas de PTFE que permite o isolamento térmico e a transmissão de luz natural. Os primeiros estudos têm mostrado que esta membrana pode reduzir o consumo de energia de aquecimento, ou arrefecimento do interior entre 30 a 70%, dependendo da zona climática. Neste momento, esta membrana está a ser utilizada em toldos e persianas como alternativa económica à substituição de janelas em edifícios antigos (Baker, 2008).

• **Acústica**

O efeito da reduzida massa e espessura das membranas também se faz sentir no desempenho acústico. Os espaços configurados por estes materiais, geralmente, apresentam vários problemas acústicos, como eco, ondas estacionárias, o foco do som e fortes reflexões tardias (depois de 100m), que diminuem significativamente a inteligibilidade da palavra (Nocera, *et al.* 2014). Os problemas/deficiências frequentemente descritos são: reverberação, baixa absorção sonora, problemas associados ao ruído de impacto da chuva e fraco desempenho do isolamento sonoro (Simões, 2000; Nocera *et al.*, 2014; Chemlik *et al.*, 2015). Por isso, segundo Monjo (1985), o alcance de boas condições acústicas, num espaço delimitado por estes materiais, deverá realizar-se através do desenho. Quando utilizadas para a reabilitação de um edifício, sobretudo com elementos construtivo pesados (que na maioria das vezes apresentam materiais refletores acústicos (p.e. gesso, vidro, metal, *etc.*)), as soluções de membrana podem melhorar (através do ajuste das suas características absorventes acústicas) as condições acústicas existentes. A possibilidade de incluir alguma porosidade na membrana, através de microperfurações ou de cardagem, torna-as boas soluções de absorção acústica, por si só, ou quando combinadas com outros materiais isolantes (p.e. mantas de lã de rocha).

Garantir conforto acústico nos espaços encerrados por soluções construtivas que integram membranas não é fácil, uma vez que as tecnologias comumente utilizadas nas soluções convencionais não funcionam para as leves (Dlhy & Minarovicova, 2014). Provavelmente, as aplicações mais interessantes nesse domínio residem em componentes acústicos, como p.e.: estruturas do tipo membrana multicamada, membranas micro perfuradas e membrana absorventes com dupla face. Simões (2000) fornece importantes diretrizes para o desenho de soluções em membrana, com o objetivo de alcançar conforto acústico em espaços envoltos por estas soluções:

- as membranas arquitetónicas são muito transparentes a baixas frequências devido à sua reduzida massa e são muito refletivas em médias e altas frequências; podem causar tempos de reverberação excessivos a partir de 1000Hz; por isso, no desenho de tais espaços, o volume interior deve ser controlado, porque o volume está diretamente relacionado com o tempo de reverberação (de acordo com a fórmula de Sabine);
- em grandes espaços, devido à dimensão das superfícies em membrana, sobretudo no plano horizontal, é possível alcançar uma significativa absorção sonora utilizando um solução com dupla membrana, sendo a interna porosa e permeável;
- a leveza das membranas produz um baixo isolamento acústico, o que contribui para reduzir os índices de inteligibilidade da fala; o principal modo de combater esse aspecto negativo é a prevenção; tomando decisões apropriadas de planeamento urbano, é possível regular a localização de fontes de ruído perturbadoras, como o tráfego de veículos; também deve ser possível utilizar este tipo de soluções (coberturas ou fachadas em membrana) em edifícios localizados em sítios onde estes não causem perturbações a vizinhos/edifícios adjacentes (p.e. com atividades musicais); o uso de barreiras acústicas, feitas com vegetação ou materiais adequados (existem muitas patentes no mercado), também pode ajudar a mitigar significativamente os efeitos do ruído. Além disso, a transmissão sonora através das superfícies em membrana pode ser reduzida em algumas frequências, tornando-as heterogéneas: p.e. segundo Novak (2004) adicionando pequenos pesos à membrana, resultando nas chamadas *membranas com pesos adicionais (Membranes with Additional weights – MAW)*.

A maioria dos projetos de reabilitação em tetos e paramentos interiores consideraram a estratégia de complementaridade para alcance de melhorias no conforto acústico do espaço existente, p.e. projetos ref<sup>a</sup> T.02, T.04, T.06. e T.12. Uma das vantagens da membrana microperfurada consiste na possibilidade de ajustar o nível de absorção acústica de forma precisa, variando a percentagem de microperfurações por superfície de membrana para cada espaço. Variando a distância entre a membrana e a superfície do teto/parede existente, também se consegue alcançar um desempenho acústico ótimo. As membranas podem ser tensionadas abaixo do teto, ou sobre uma parede existente, por ajuste, ou através da técnica de tensionamento por calor. Esta técnica consiste em tensar uma membrana de PES revestida a poliuretano, ou uma membrana de PVC especial (que alonga através da indução de calor sobre a membrana, na fase de instalação), de grande largura (superior a 5m) entre perfis especificamente concebidos para este efeito. Dependendo da cor e do acabamento da membrana, também se pode alcançar uma boa distribuição de luz. Além disso, as membranas também podem ser funcionalizadas para emitir luz ou calor.

No projeto de intervenção do Museu *Schlüterhof* (Nocke & Hilge, 2004) aplicou-se um teto suspenso em membrana dupla de PVC translúcida e microperfurada (Figura 4.40(a)), espaçadas 15cm entre si com molas e conectadas à envolvente existente através de cabos e hastes metálicos. Adotou-se esta solução para incrementar o desempenho acústico do átrio existente (41x41m), encerrado com uma cobertura e paredes de alvenaria de pedra, ou seja, para diminuir o tempo de reverberação, elevado devido à reduzida absorção sonora dos materiais existentes. Além disso, a translucidez da membrana permitiu que a estética do espaço permanecesse inalterada.

As membranas tridimensionais, como malhas 3D, cortinas, tapetes etc. também podem ser utilizadas para absorver sons. No projeto de intervenção com refª PI.01 (Anexo 4) (Figura 4.40(b)), onde as zonas de passagem (fonte de ruído) se encontram no mesmo compartimento dos escritórios, aplicou-se um tapete (membrana 3D “tuffting”) no pavimento para anular os ruídos de impacto e cortinas para absorver sons aéreos, ao mesmo tempo que protegem o espaço da luz solar indesejada e criam um ambiente de concentração aos utilizadores.

Devido à flexibilidade, as membranas podem ser aplicadas de modo a formar uma superfície tridimensional que contribua para a absorção de ruído, como exemplifica o projeto de intervenção na fachada do edifício da Figura 4.40(c), adjacente a uma linha férrea ativa (fonte de ruído). Para superar este problema, aplicou-se uma solução multicamada sobre a fachada existente, composta por manta de material de isolamento térmico e acústico maleável, revestida com membrana poliolefina (à prova d'água) e perfurada com conectores estanques, para criar o efeito tridimensional de *capitoné*.

A milenar abadia beneditina de Pannonhalma (Hungria) refª T.01, património UNESCO, é um dos monumentos mais antigos da Hungria e foi transformada num colégio. Desde 2005, alberga o festival Pannonhalma Arcus Temporum e, para que isso aconteça, foi necessário transformar e adaptar o ginásio deste edifício para um uso diferente, com um orçamento reduzido. Para isso, foi construída uma instalação suspensa no teto (projetada por Dániel Baló *et al.*), constituída por várias camadas de membrana translúcida de polipropileno, distanciadas e dispostas paralelamente entre si (Figura 4.40(d)). Cada camada apresenta uma seção desenhada especificamente para controlar a absorção e propagação do som, resultando, no conjunto, numa ondulação tridimensional, se alcançou uma melhoria acústica do ginásio – amortecendo e dispersando o os sons mais agudos através do espaço (Yatzer, 2016). Além disso, a translucidez da membrana criou um ambiente interior mais adequado para atuações de música clássica, desvanecendo a aparência característica do ginásio.

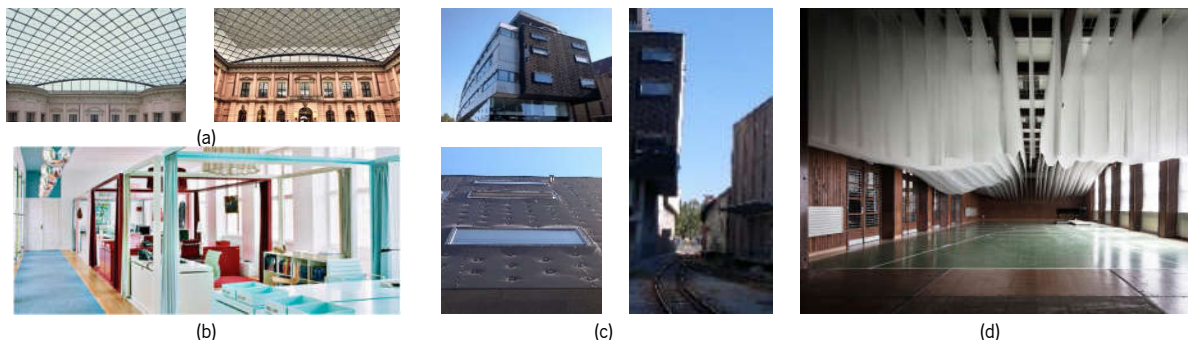


Figura 4.40. (a) Museu *Schlüterhof* (antes e depois) (Nocke & Hilge, 2004); (b) escritórios do Ministério da Cultura Dinamarquês, projetado por Louise Campbell & Marianne Britt Jorgensen. (foto da autora); (c) fachada em membrana “capitoné” num edifício localizado em Basileia, Suíça; (d) vista transversal do ginásio reabilitado com teto em membrana - Benedictine Abbey, Pannonhalma, Hungria.

#### 4.5.2. Aspetos lumínicos

No que diz respeito aos aspetos lumínicos, é evidente, através de vários estudos realizados (Campbell, 1995), uma notável capacidade das membranas em assegurar os níveis de conforto visual necessários para diferentes usos, atuando como elementos difusores lumínicos (no interior, sobretudo quando aplicadas em elementos horizontais, como tetos) ou como sombreadores (interior/externo). As membranas arquitetônicas oferecem uma proteção solar altamente eficiente, uma vez que são capazes de reduzir a radiação solar, ao mesmo tempo que deixam passar a luminância necessária para cada espaço interior. Nos projetos de intervenção em análise, verifica-se que os arquitetos tiram partido desta vantagem. Em alguns casos, esta foi a principal motivação para integrar as membranas nas intervenções de reabilitação.

No projeto de intervenção na sala de espetáculos da *Casa da Música*, no Porto, a equipa de consultores *Inside Outside* projetou uma solução para melhorar o desempenho lumínico desta sala, que possui duas paredes de vidro. Para controlar a intensidade da luz dentro da sala foram instaladas três camadas de cortinas pelo interior de cada parede envidraçada. Deste modo, a sala passou a ter quatro opções diferentes de iluminação, diminuindo assim o consumo de energia elétrica associado à iluminação artificial.

#### 4.5.3. Reabilitar com membranas através de estratégias de regulação funcional passiva

Cada vez mais as soluções construtivas com membranas arquitetónicas, como os sistemas pneumáticos com membrana de ETFE, são implantadas na reabilitação de edifícios históricos, devido aos benefícios estruturais e à contribuição para a regulação funcional passiva (térmica, lumínica, acústica, etc.). Nos parágrafos seguintes apresentam-se projetos de intervenção que constituem exemplos de como os edifícios podem ser atualizados adotando estratégias sustentáveis.

As estratégias de sombreamento num edifício organizam-se em dois grupos: passivas ou ativas. As primeiras baseiam-se no uso de padrões impressos sobre membranas transparentes, ou na combinação entre superfícies opacas e transparentes (definidas como máscaras solares e projetadas de acordo com a incidência solar do local do edifício). Os sistemas ativos baseiam-se em padrões positivos e negativos entre diferentes camadas de membrana, cuja separação varia em função do ajuste entre a pressão do ar e os níveis de radiação necessários em cada momento. Relativamente a estratégias de regulação térmica com uso de energias solares, o desenvolvimento de membranas com tecnologias de filmes fotovoltaicos finos (TFPV) abriu uma importante linha de investigação.

Devido à crescente procura por membranas com melhor desempenho térmico, desenvolveram-se revestimentos para membranas com baixa emissividade. Estes revestimentos baseiam-se essencialmente na mesma tecnologia utilizada para criar isolamento no vidro: constituem uma camada ultrafina de óxido de estanho ou prata. O resultado é uma redução considerável das perdas de calor através da membrana, contribuindo para aumentar a eficiência energética do edifício. Até à data, tornou-se possível combinar o revestimento de baixa emissividade com qualquer cor, aumentando as possibilidades de integração destes materiais em soluções construtivas. Assim, se uma fachada ou cobertura em membrana for projetada corretamente, estas podem ter uma grande influência na redução das necessidades de aquecimento e arrefecimento (Figura 4.41).

A estratégia (A) (Figura 4.41(A)) mostra o princípio climático aplicado no projeto ref<sup>o</sup> F.04 – edifício Westraven em Utrecht (Anexo4). A segunda fachada exterior em membrana, com malha aberta, reduz a entrada de radiação solar no interior dos escritórios e do vento, gerando micro remoinhos de ar entre a fachada em membrana e a fachada existente. Deste modo, a ventilação pode ser criada através da abertura de uma janela, sem causar distúrbios através de correntes de ar indesejadas. Quando se utiliza a membrana pelo interior deve considerar-se a sua cor para que não seja absorvida radiação solar indesejada. Na estratégia (B) (Figura 4.41(B)), a ventilação é promovida pela geometria da cobertura, e na estratégia (C) (Figura 4.41(C)), a membrana funciona como uma fachada cortina. Quando a cortina está fechada o interior mantém-se temperado e, devido à translucidez da membrana, é absorvida alguma radiação solar. Por último, na estratégia (D) (Figura 4.41(D)) é colocada uma membrana operável e translúcida abaixo de uma cobertura de vidro existente, permitindo a redução da radiação solar indesejada e regular o nível de luminosidade necessário para o espaço existente.

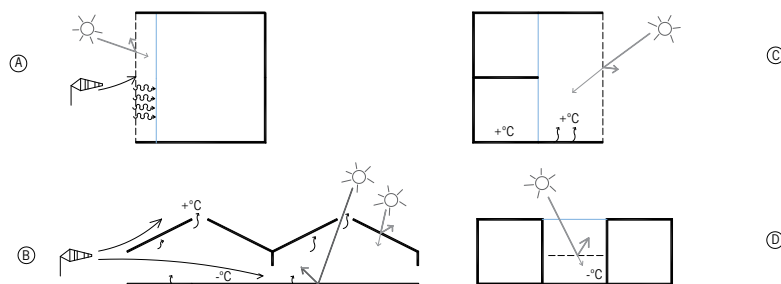


Figura 4.41. Estratégias com membranas para evitar o sobreaquecimento do espaço interior intervencionado.



Cada vez mais as membranas substituem o vidro para executar coberturas de pátios. Os pontos fortes das membranas são a leveza, a reduzida manutenção e a capacidade de execução de grandes superfícies contínuas (com menos elementos de suporte). Por estes motivos e pelo modo como os seus componentes se ligam ao edifício existente, a reversibilidade destas soluções é facilitada sem causar danos. No projeto ref<sup>a</sup> C.17 (Anexo 4) - *Camara de Saxony Anhalt* - utilizou-se uma membrana dupla de ETFE para cobrir o pátio de um edifício antigo. Neste caso, a estrutura da cobertura é composta por uma série de treliças paralelas. Entre os arcos superiores das treliças colocaram-se almofadas pneumáticas unidas através de cintas Bekaert-Belt®. Entre os arcos inferiores das treliças introduziu-se uma membrana simples anticlástica e tensada mecanicamente com as cintas. Desta forma, produziram-se cinco volumes selados e paralelos. A vantagem de utilizar cintas em vez de cabos reside no facto de estas criarem uma superfície plana que não se desloca sobre a superfície da membrana, ao contrário dos cabos. Deste modo, torna-se possível criar grandes vãos sem o uso de perfis de apoio intermédios.

No caso do projeto C.03 (Anexo 4) – *Palácio de Irgatza*, classificado como património – foi feita uma cobertura em membrana ETFE para o pátio existente. Com esta intervenção conseguiu-se proteger o edifício dos efeitos das variações climáticas, principalmente da ação das chuvas (muito frequentes neste local) e melhorar o desempenho higrotérmico deste edifício que possui muitos componentes em madeira.

No projeto de intervenção *Kapuzinerarrée* (Ficha ref<sup>a</sup> C.10. Anexo 4), um pátio subutilizado de 500 m<sup>2</sup> foi transformado num átrio confortável de modo a melhorar o seu comportamento térmico. A dificuldade deste projeto reside no facto da fachada que limita o pátio, classificada como património, não poder ser modificada. Numa primeira abordagem, os arquitetos KKK Ingenieure GmbH, projetaram uma cobertura em vidro, com panos de 2,0m x 1.5m. Contudo, como as paredes do edifício não suportavam o peso dos elementos de vidro, dos caixilhos em alumínio e da estrutura de suporte em aço, tinham de ser adicionadas várias colunas metálicas para distribuir as cargas e reduzir a pressão sobre as fachadas, em particular as cargas horizontais. Como se trata de um edifício histórico, as colunas metálicas propostas não são permitidas. Por isso, a alternativa proposta para cobertura consistiu num sistema pneumático, com membrana de ETFE, composto de 10 almofadas suportadas por uma leve rede de vigas e cabos de aço. Devido à leveza deste sistema, a distribuição de cargas não ameaçou a fachada histórica.

O edifício *Her Majesty's Treasury* em Londres (Figura 4.42(a)), construído em 1917, classificado como património nacional, apresenta uma enorme subcompartimentação de escritórios que não cumpre com os requisitos contemporâneos para este tipo de espaços de trabalho. Por este motivo, em 2002, foram removidas paredes para criar um amplo espaço e os desvãos, subutilizados, foram transformados para promover a ventilação natural dos novos espaços. Estes desvãos, com cinco pisos de altura e cobertos com uma membrana pneumática tripla de ETFE, abrigam novos usos. Como consequência destas mudanças, a eficiência energética do edifício aumentou significativamente. O encerramento dos desvãos, para além de adicionar área útil, foi essencial para a estratégia de regulação funcional passiva. Devido à redução da área de parede em contacto com o exterior, as necessidades energéticas diminuíram. Os desvãos encerrados também funcionam como chaminés térmicas; através da abertura de janelas, o ar exterior entra e o ar residual escapa para os desvãos, onde sobe e é libertado por aberturas convencionais perimetrais no nível superior, com grelhas e almofadas operáveis. Este movimento do ar é promovido pela cobertura pneumática que cria um gradiente de pressão para extrair o ar através do desvão, proporcionando ventilação extra. O mesmo sucede com a cobertura do pátio do edifício *Kapuzinerarrée* (Figura 4.42(b)) e com a cobertura (pneumáticas com membrana de ETFE) do Hospital de Chelsea e Westminster (projetado há cerca de 20 anos). Este tipo de coberturas ajuda a aquecer e arrefecer o edifício através da luz solar e de aberturas de ventilação para promover a ventilação natural por estratificação do ar. Esta estratégia passiva minimiza o consumo energético. Ao contrário dos revestimentos convencionais, a membrana de ETFE, devido ao facto de ser flexível e suportar grandes deflexões, pode ser projetada com grandes aberturas, o que não seria viável utilizando tecnologias convencionais.

No projeto de intervenção do edifício *National Gallery* (Figura 4.43(a)), foi adicionada uma cobertura pneumática em membrana de ETFE que constitui uma segunda pele leve, transparente e estanque, altamente isolada, sobre as claraboias originais do museu. No edifício da sede da empresa *Jean-Paul Gaultier* (Figura 4.43(b)) foi utilizada

uma estrutura pneumática em membrana de ETFE para substituir as claraboias de vidro, criando a ilusão de um oculo totalmente aberto para o céu.



Figura 4.42. (a) Cobertura dos desvãos do edifício "Her Majesty's Treasury", Londres, 2002. (b) Kapuzinercarrée, Aachen, 2002. O uso da cobertura pneumática em membrana de ETFE em vez de vidro permitiu a redução de cargas impostas a este edifício histórico e melhorou o seu desempenho energético.

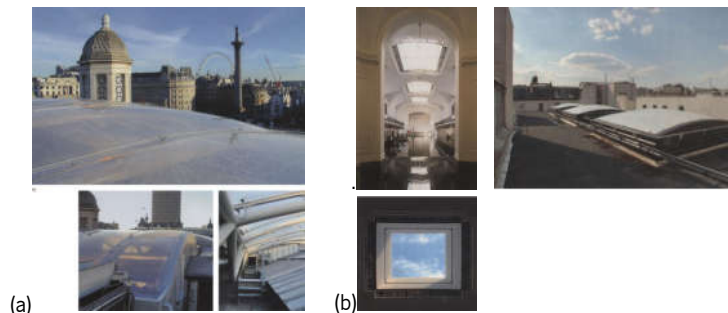


Figura 4.43. (a) National Gallery, Londres, 2003. (b) Sede da empresa Jean-Paul Gaultier, Paris, 2004.

#### 4.5.4. Segurança/proteção: contributos para mitigar o risco para os ocupantes

A opinião pública considera que as construções leves com membranas arquitetónicas são inseguras. Esta é uma opinião corrente que advém da falta de conhecimento sobre o seu comportamento estrutural. As estruturas tensionadas são tão seguras como as tradicionais e, por vezes, ainda mais, pois em caso de colapso, por exemplo, sendo constituídas por materiais e ligações dúcteis, apresentam deformações prévias que alertam para o potencial de risco (Kawaguchi, 2015).

No entanto, os sistemas tensionados apresentam uma rigidez muito inferior à dos sistemas tradicionais. As membranas, ou outros materiais presentes neste tipo de construções, são considerados pontos fracos. Segundo Knippers *et al.* (2011), isto só se verifica nos casos em que a membrana colabora na estabilidade de todo o sistema construtivo; nestes casos, se qualquer elemento colapsa (não só a membrana, mas também cabos, etc.) a estabilidade de todo o sistema é posta em causa. No entanto, as membranas correntemente utilizadas são mais resistentes do que as estruturas de suporte (p.e. mastros, cabos, etc.), pelo que surgem poucos problemas associados à resistência destes materiais.

Relativamente à sua origem, o colapso de uma estrutura pode classificar-se em duas macro áreas: colapso devido a fatores naturais (p.e. vento, neve, sismos, etc.) ou fatores humanos (p.e. erros de dimensionamento, vandalismo, etc.) No primeiro caso, toda a estrutura colabora para resistir às forças externas; uma boa conceção formal, detalhes construtivos e instalação podem, por exemplo, criar estruturas tensionadas capazes de suportar ventos fortes. Atualmente, com o conhecimento tecnológico e os materiais disponíveis é possível reduzir o risco de colapso (Forster & Mollaert, 2009).

No que diz respeito aos fatores humanos, os erros de projeto acontecem, mas são raros. Resultam de acontecimentos excecionais, de uma má avaliação das condições de uso/carga da estrutura, ou má avaliação, por exemplo, das condições do substrato base para as fundações. Quanto ao vandalismo ou ataques, estes são certamente um problema que tem de ser resolvido na fase de conceção. As membranas e os cabos são considerados pontos fracos devido à sua reduzida espessura. Contudo, as membranas podem ser puncionadas, ou cortadas após um forte contacto com elementos afiados, sendo extremamente raro que isto aconteça acidentalmente. No pior dos cenários, um pequeno corte (10-20cm) numa membrana não significa o colapso da estrutura; no caso das estruturas pneumáticas, o sistema é usualmente concebido para compensar a perda de

ar através de uma bomba de ar. Além disso, as membranas tensionadas são projetadas para evitar a propagação do rasgo. No caso de cabos, estes são, na maioria das vezes, feitos de aço e são necessários alicates especiais para cortá-los. No entanto, a possibilidade de ocorrer um ato de vandalismo deve ser considerada; apesar de difícil e às vezes impossível, deve evitar-se o contato direto das pessoas com os pontos mais fracos da estrutura.

Kawaguchi (2015) aponta que, devido à reduzida massa das construções em membrana, estas dificilmente são afetadas por cargas resultantes de eventos sísmicos. Por outro lado, da observação e registros feitos por Kawaguchi, conclui-se que o vento, ou neve forte, atingem severamente os grandes vãos das construções em membrana; algumas construções em membrana ficaram danificadas durante os fortes tufões de 1999 e 2004, e em 2005 e 2014 devido à sobrecarga de neve, à semelhança do que sucedeu com outro tipo de construções. Contudo, nestes casos há que avaliar se se tratou de um evento extraordinário previsto, ou não no dimensionamento. As observações de Kawaguchi (2015) também indicam que, em algumas coberturas, a falha antecipada das membranas (comparativamente aos materiais convencionais) pode ter contribuído para a proteção de elementos estruturais de danos mais graves. Como se observa na Figura 4.44(b), com uma solução de cobertura convencional, o colapso foi total e provocou danos mais severos comparativamente à cobertura com membrana (onde a estrutura da cobertura foi preservada). O papel da membrana enquanto "limitador de força" deve ser reconhecido e pode ser considerado como um elemento positivo na conceção de um edifício (Kawaguchi, 2015). Esta pode ser uma das potencialidades das membranas para reabilitação funcional de coberturas, por exemplo, na medida em que pode contribuir para a durabilidade das construções.

Para evitar estes problemas nas estruturas com membranas, segundo Monjo-Carrió (2016), devem considerar-se as seguintes medidas preventivas: (1) considerar na fase de projeto todas as sobrecargas possíveis devido a ações externas de acordo com os Eurocódigos e os dados climáticos do local; (2) utilizar uma membrana com a necessária resistência mecânica, de acordo com o projeto de estabilidade (implicando que os fatores de segurança cubram possíveis erros de produção, transformação e instalação da membrana – usualmente entre 2 e 4); (3) utilizar membranas reforçadas em pontos específicos, onde estão sujeitas a esforços mais elevados, como em esquinas, pontos de ancoragem, perímetros, *etc.*; (4) providenciar dupla curvatura (superfície anticlastica) com pendente e tensão suficiente para assegurar a drenagem de águas; (5) providenciar um sistema de drenagem suplementar para evitar a acumulação de água na superfície em membrana.

Quando integradas em elementos arquitetónicos, as membranas podem resolver problemas de segurança, mitigando, sobretudo, o risco para os ocupantes dos edifícios, tanto durante (como meios auxiliares de proteção, Figura 4.44(c)) como após a intervenção.



Figura 4.44. Colapso de cobertura devido a queda de neve intensa em 2014 (Fujimi, Japão): (a) Cobertura leve convencional com revestimento metálico e (b) cobertura alternativa com membrana (Kumagaya Sports Park) (Kawaguchi, 2017). (c) Meios auxiliares de proteção.

#### • Salubridade

As tecnologias de construção com membranas também podem ser aplicadas em intervenções com requisitos de segurança sanitária, como elemento de contenção, para oferecer proteção contra os efeitos de materiais perigosos, como o amianto. O projeto de reabilitação da Igreja de St. Ignatus-Loyola (ref<sup>o</sup>T13, Anexo 4) constitui um exemplo de intervenção para eliminar os efeitos negativos da cobertura existente em amianto. Conforme ilustra a Figura 4.45 aplicou-se um teto falso em membrana para conter as partículas libertadas pela cobertura

existente em amianto. A par disso, a aplicação da membrana também permitiu uma renovação estética e melhorias no conforto luminoso do espaço interior.

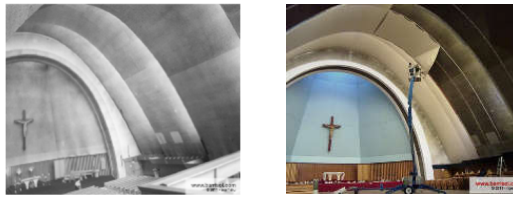


Figura 4.45. Vistas interiores da Igreja de St. Ignatus-Loyola (ref<sup>o</sup>T.13, Anexo 4) antes e depois a intervenção (Barrisol, 2018).

#### • Fogo

A maioria das membranas é composta por materiais poliméricos (feitos a partir de polímeros orgânicos ou petróleo) e por isso é combustível. Contudo, mesmo com a adição de retardantes, até agora não se conseguiram alcançar membranas incombustíveis e sem emissão de fumos; a adição desses retardantes, por vezes aumenta a toxicidade dos fumos libertados durante a combustão. Por este motivo, neste momento é impossível usar membranas poliméricas em construções onde a resistência ao fogo seja um requisito prioritário. É necessário realizar mais estudos para o desenvolvimento de medidas ativas e passivas de proteção contra incêndios para membranas de base polimérica. Já foram realizados ensaios para incorporar resinas à base de fibras cerâmicas (incombustíveis) em materiais compósitos, mas ainda não se conhecem os resultados.

Quando a membrana de ETFE foi sugerida pela primeira vez para uso arquitetónico, as autoridades reguladoras do setor da construção foram naturalmente cautelosas e permitiram que esta fosse usada, mas com restrições. As restrições estavam relacionadas com o comportamento de outros materiais poliméricos, conhecidos por serem combustíveis, por emitirem gases tóxicos, ou gotejarem quando atingiam o ponto de fusão em cenários de incêndio, representando riscos significativos para a segurança dos ocupantes. Desde que foi aprovado, inicialmente pelas autoridades de construção alemãs, em 1984, e depois no Reino Unido, em 1985, o ETFE ganhou ampla aceitação em muitos domínios regulamentares. Desde então, aprovam-se projetos com a condição de que a membrana ETFE não seja meramente consentida, mas sim indispensável/necessária para a constituição da envolvente de determinados edifícios. O fator chave desta mudança reside no desempenho para a proteção da vida dos ocupantes, resultante da combinação entre características funcionais e estruturais dos sistemas construtivos que incorporam membranas de ETFE.

Um dos atributos mais importantes do ETFE, comparativamente a outros materiais de construção poliméricos, é o seu desempenho ao fogo que, juntamente com o seu peso reduzido, o levou a aplicações em domínios como o da indústria aeroespacial, onde a NASA e fabricantes como a Airbus o utilizam como isolante elétrico. Embora combustível, o ETFE é inerentemente pobre em inflamabilidade, devido à presença de flúor na sua estrutura química, e de baixo índice de oxigénio, o que o torna auto extingüível. Em contraste com materiais como o PVC, que liberta dioxinas quando queimado, o ETFE apenas produz gases tóxicos quando queimado em temperaturas superiores a 800°C. Contudo, dadas as quantidades de ETFE tipicamente presentes e comparativamente ao monóxido de carbono altamente tóxico gerado pelo próprio fogo, este efeito é insignificante. Acima de 200°C a membrana de ETFE amolece e, como está sob tensão, falha. Nos sistemas pneumáticos utilizados para a construção de invólucros, dado que a membrana de ETFE é pré-esforçada por insuflação, ela encolhe e surgem aberturas que expõem a nuvem de gases quentes para a atmosfera. Por outro lado, quando incorporados, os dispositivos de auto-ventilação também evitam a acumulação de calor que pode causar explosão ou colapso do edifício; a auto-ventilação transforma instantaneamente um espaço interior num espaço ao ar livre, permitindo que os átrios sejam classificados como espaços externos.

A membrana de ETFE foi submetida com sucesso a testes ao fogo por autoridades de todo o mundo, incluindo a União Europeia, os Estados Unidos, a Rússia e a China. Por apresentar um volume interior maior do que o máximo permitido pelos códigos de construção chineses, o projeto de proteção contra incêndios do Centro Aquático Nacional de Pequim apresentou desafios consideráveis. Longe de estarem predispostos a apoiar o uso de ETFE, apesar do fato de este ser pouco combustível, as autoridades chinesas proibiram-no inicialmente. No entanto, essa objeção foi superada pela demonstração de como as propriedades de auto-ventilação da membrana ETFE reduzem o risco de perigo de vida dos ocupantes.

Para oferecerem proteção em condições de fumo e fogo, nas quais as temperaturas não chegam a 200 graus Celsius, as soluções pneumáticas de ETFE podem incorporar aberturas de ventilação convencionais. Estas aberturas em elementos pneumáticos de ETFE são mais eficientes do que as aberturas com materiais convencionais devido às dimensões que podem atingir (Figura 4.46(a)). A maior abertura de ventilação com membrana de ETFE pneumática, construída até ao momento, compreende uma almofada única com 25 metros de comprimento e 3 metros de largura, um tamanho viável pelo facto da deflexão não ser crítica para a montagem de elementos pneumáticos de ETFE (Lecuyer, 2008). No mercado também existem difusores de fumos que apresentam um fio de resistência térmica com 4 milímetros de diâmetro - uma tecnologia robusta, desenvolvida para manter os tubos de óleo no Ártico a temperatura constante - incorporada nos limites da almofada e ativada por sensores de incêndio, ligados ao sistema de alarme. Este sistema também é passível de ser aplicado em sistemas construtivos com membrana simples tensionada de ETFE (Figura 4.46(b)). Quando ativado, o fio aquece e, operando como uma lâmina, corta a membrana ETFE de modo a que o fumo se liberte para a atmosfera. Após 60 segundos de ativação, 50% da área é ventilada e após 90 segundos alcança-se 100%. Nesse momento, a membrana encontra-se cortada em todas as arestas exceto numa, onde se mantém ligada e pendurada. Este sistema é 100% eficiente, a área de abertura é comparada favoravelmente com outros sistemas: aproximadamente 50% melhor do que as persianas e 60% para as aberturas de ventilação convencionais. Além disso, o sistema de abertura com fio quente representa 10% do custo das aberturas convencionais, apesar de ser necessário substituí-lo após ser ativado. Recomenda-se, portanto, que os elementos construtivos em membrana de ETFE incorporem estratégias híbridas de libertação de gases que comecem pela abertura de pontos de ventilação seguidas pela ativação do fio quente, até que o fumo seja eliminado, evitando-se assim a necessidade de extração mecânica dos gases libertados pela presença de fogo no interior do edifício.

O projeto da Escola *Tanaka Business*, em Londres, incorpora os benefícios dos elementos construtivos com membrana de ETFE na proteção em caso de incêndio. Esta escola, um edifício com seis andares, encontra-se cercada por edifícios académicos dos anos 60 e possui uma cobertura em membrana de ETFE que une estes edifícios, criando um átrio. Neste átrio realizou-se a primeira aplicação da tecnologia de abertura automática com fio quente (Lecuyer, 2008). Deste modo, o átrio foi classificado como um espaço externo e todas as janelas existentes nas fachadas que confrontam o átrio continuaram a manter a sua função de ventilação natural (Figura 4.46(b)), evitando-se assim a incorporação de sistemas eletromecânicos dispendiosos para a proteção contra incêndio do edifício existente.

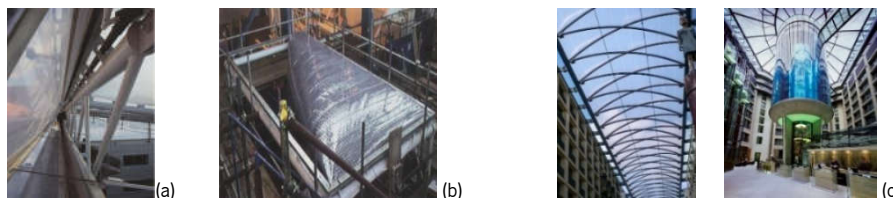


Figura 4.46. (a) Por serem leves e flexíveis, as aberturas de ventilação em membrana de ETFE podem ser muito maiores do que as aberturas convencionais; (b) ativação de sistema de corte da membrana de ETFE com um fio quente, em torno do perímetro da cobertura, para promover a ventilação do espaço subjacente (Lecuyer, 2008); (c) átrio do hotel DomAquaree (Voss, 2018).

- **Queda**

Ao contrário do vidro, a membrana de ETFE não quebra nem cai, o que constitui uma mais-valia em termos de proteção. O projeto de reabilitação *DomAquaree*, em Berlim, terminado em 2004, demonstra como este atributo foi explorado para resolver um problema de segurança invulgar. O conjunto de edifícios existentes apresentam ruas entre si que foram cobertas por coberturas pneumáticas em membrana de ETFE (formando galerias comerciais), e um dos átrios criados possui um aquário com cinco andares (Figura 4.46(c)). Todos os espaços foram originalmente projetados com coberturas de aço e vidro. No entanto, como o aquário constitui uma arrojada obra de engenharia, surgiu a preocupação com o risco de queda do vidro da cobertura, que punha em causa a integridade estrutural do aquário (Voss, 2018). A transparência, leveza, facilidade de instalação e adequação a formas geométricas irregulares da membrana de ETFE resolveram essa preocupação. Cada cobertura apresenta diferentes especificações. A cobertura do átrio dos escritórios apresenta membrana tripla de ETFE transparente, concebida principalmente para alcançar um elevado isolamento térmico, e a cobertura do



espaço comercial apresenta membrana dupla de ETFE transparente, simplesmente para servir de proteção climática. O nível de desempenho mais elevado é alcançado com uma membrana pneumática quádrupla de ETFE impressa para a cobertura do átrio do hotel que compreende uma envolvente dinâmica, fornecendo níveis variáveis de isolamento térmico e de sombreamento, tanto para o aquário, quanto para os quartos do hotel voltados para o átrio. O padrão impresso é constituído por pontos finos e irregularmente dispersos; foi concebido para parecer o mais invisível possível. No verão, quando as membranas impressas são fechadas e sobrepostas, a transmissão de luz é de 35%; no inverno, as membranas são separadas através da insuflação de ar para aumentar o isolamento térmico e aumentar a transmissão de luz para aproximadamente 50%. Para além disso, a estrutura e as almofadas de ETFE foram projetadas para que o anel central da cobertura possa ser removido, de modo a permitir acesso à manutenção do aquário. Segundo Lecuyer (2008) estas coberturas de ETFE com estrutura metálica custaram metade do orçamento da proposta inicial em vidro com estrutura metálica, apresentando ganhos na fase de construção e nas restantes fases do ciclo de vida, resultantes do facto deste tipo de cobertura ser mais leve, menos rígida e dispensar a aplicação de dispendiosos pórticos e conectores indispensáveis para a manutenção das coberturas de vidro.

O modo de queda “benigno” da membrana ETFE abre caminho a mais aplicações. As quedas de vidro temperado, amplamente divulgadas, causadas pela inclusão de sulfeto de níquel, continuam a levantar preocupações sobre as instalações suspensas de vidro (Karlsson, 2017) e têm motivado muitos donos de obra a considerar opções mais seguras. No Reino Unido, devido a esse problema, vários instaladores apenas aplicam painéis de vidro suspensos com redes de malha de aço inoxidável, para reduzir o risco de ferimentos em caso de queda. A membrana de ETFE foi utilizada para dar resposta a este problema no centro comercial Mall em Atenas, uma zona comercial ao ar livre construída para as Olimpíadas de 2006 que foi posteriormente coberta com uma envolvente pneumática de ETFE.

Não obstante os seus atributos estruturais e o modo de falha benigno, a membrana de ETFE é extremamente robusta. Durante a construção da Estação Southern Cross, em Melbourne, os sindicatos ameaçaram interromper o trabalho devido a preocupações com a queda de trabalhadores, durante a instalação de claraboias em membrana de ETFE. Essa preocupação desapareceu após realizar-se um ensaio experimental, atirando para a claraboia pneumática um saco de areia com 50 kg, de uma altura superior a 5 metros. Como resultado, a membrana de ETFE não se rompeu e foi-lhe atribuída a classificação de não-frágil. A implicação mais ampla desse resultado é que o acesso externo para instalação e manutenção de coberturas em membrana de ETFE não exige instalações de segurança dispendiosas, tornando-as económicas.

- **Sismos, tempestades e explosões**

A capacidade de as membranas receberem cargas instantâneas extremamente elevadas, combinada com a sua elevada tolerância à deflexão, tornam-as adequadas para aplicações em locais sujeitos a terremotos, condições climáticas severas, ou com risco de explosão. Em testes de simulação do desempenho perante furacões, por exemplo, as almofadas com membrana pneumática tripla de ETFE tiveram um bom desempenho; embora as duas membranas externas tenham sido rompidas, a interna permaneceu intacta (Lecuyer, 2008). Por outro lado, testes de explosão de uma bomba demonstraram que a membrana consegue absorver cargas instantâneas muito elevadas. A demonstração deste atributo abriu novas aplicações da membrana de ETFE, nomeadamente para edifícios institucionais e infraestruturas de transportes que são cada vez mais alvo de ataques bombistas. Este facto foi tido em conta no projeto HM Treasury, em Londres, e na recuperação do edifício da Embaixada Britânica em Istambul, onde a antiga cobertura de vidro do átrio, destruída por uma bomba em 2004, foi agora substituída por uma cobertura em membrana pneumática de ETFE. Da mesma forma, a cobertura do novo Terminal 5 do Aeroporto de Heathrow foi concebida em membrana de ETFE, num período em que os riscos de segurança aumentaram significativamente, em resposta a uma exigência que determinava que os materiais empregues na construção do terminal não produzissem fragmentos afiados no caso de uma explosão.

As estruturas em membranas são particularmente estáveis segundo ações horizontais, como as que ocorrem em eventos sísmicos (Mollaert, 2004). O risco torna-se menor quando a configuração da estrutura tensionada apresenta elementos de suporte rígidos, como mastros ou pilares, que não colapsem, pois em última instância é preferível que seja a membrana a rasgar. A flexibilidade das estruturas com membranas permite que estas se

adaptem para dar resposta de forma eficiente a diferentes ações de carga; a membrana e os restantes componentes da estrutura têm de funcionar em conjunto, como se exemplifica concetualmente na Figura 4.47. Conforme referido no capítulo anterior, na secção 3.5.2., o papel da membrana enquanto "limitador de força" deve ser reconhecido e pode ser considerado como um elemento positivo na fase do projeto de reabilitação. Em regiões sísmicas, onde o colapso de tetos suspensos é frequentemente reportado, podem ocorrer problemas de segurança para os ocupantes associados à projeção de materiais pesados. Por isso, as membranas são cada vez mais aplicadas em tetos suspensos para substituir materiais convencionais (pesados), evitando-se a projeção de materiais perante a ocorrência de eventos de risco sísmico Kawaguchi (2015).



Figura 4.47. Edifício da empresa têxtil Komatsu Seiren no Japão, envolvido por centenas de cabos de fibra de carbono – Cabkoma – que no conjunto funcionam como um tecido, uma membrana, atuando como elemento de reforço sísmico (conceção arq. de Kengo Kuma) (Komatsu Matere, 2018).

#### • Reforço e monitorização

No *Manual de Gestão do Património Cultural Mundial* refere-se que “sem o respeito e o cuidado diário das comunidades locais, que são os verdadeiros guardiões do Património Mundial, nenhuma quantia de fundos ou exército de especialistas será suficiente para proteger os locais” (UNESCO, ICCROM, ICOMOS, & IUCN, 2013). Adicionalmente à manutenção regular, o cuidado diário corresponde, sobretudo, à monitorização continua da eficácia dos instrumentos e procedimentos de preservação. Neste sentido, as estruturas em membrana oferecem uma opção para integrar, ou proteger os equipamentos de monitorização.

Três exemplos de aplicações de membranas para monitorização de elementos estruturais, constituem o resultado do projeto europeu Multitexco (Heyse et al., 2015). O objetivo deste projeto é promover a competitividade das médias e pequenas empresas europeias do setor têxtil e da construção civil, com soluções para os seguintes sub-setores: (1) têxteis técnicos para reforço sísmico de paredes de alvenaria; (2) estruturas têxteis multifuncionais para aplicações geotécnicas e (3) têxteis de elevado desempenho para estruturas tensadas. O projeto MULTITEXCO já está antecipando novas normas, aumentando a consciencialização do setor têxtil e da construção para os benefícios dos têxteis técnicos, agregando novos produtos e guias de aplicação numa base de dados que estará disponível na página de internet do projeto ([www.multitexco.eu](http://www.multitexco.eu)). Adicionalmente, para cada campo de aplicação alvo, desenvolveram-se membranas com sensores integrados. Estas membranas-sensores não fornecem apenas estabilidade estrutural, mas também informações internas sobre a integridade e validação do projeto de dimensionamento estrutural. Além disso, a membrana-sensor também pode ser utilizada como um sistema de alerta. No estudo de Heyse *et al.* (2015) apresenta-se em detalhe cada uma das três áreas de aplicação destes sensores em membranas: (1) vias e aterros, (2) reabilitação de paredes de alvenaria e (3) estruturas tensadas. Heyse et al. (2015) ilustra essas aplicações com os seguintes exemplos<sup>13</sup>: (a) geotêxteis com sensores integrados para alerta de deslizamento de terra iminente em vias e aterros; (b) rede de reforço com sensor de propagação de fissuras, na reabilitação de paredes<sup>14</sup> exteriores ou interiores, suscetíveis a deformações para fora do plano (o sensor desenvolvido é impresso no tecido *Eq-Top®*); (c) nova geração de membranas com sensores incorporados para estruturas tensionadas.

#### 4.5.5. Mudança de paradigma na procura da flexibilização do espaço

A constante evolução e mutação dos estilos de vida e dos agregados familiares têm levado a um reequacionar dos modos de habitar e à crescente necessidade de propor habitações mais evolutivas e adaptáveis (Coelho *et al.*, 2003; Roos, 2011). Verifica-se, no entanto, que em Portugal, a maior parte dos alojamentos existentes não cumpre satisfatoriamente esse designio, apresentando, por exemplo, soluções de divisórias interiores pesadas e

<sup>13</sup> Estes exemplos encontram-se apresentados em detalhe em Heyse *et al.* (2015).

<sup>14</sup> A reabilitação de paredes de alvenaria é particularmente importante para a proteção de edifícios sujeitos a ações sísmicas. As estruturas de alvenaria não reforçadas são altamente vulneráveis porque, sendo originalmente projetadas para cargas gravitacionais, muitas vezes não podem suportar as cargas horizontais dinâmicas em caso de fortes terremotos. Daí a necessidade de utilizar métodos eficientes para a reabilitação de edifícios de alvenaria existentes, com sistemas de monitorização integrados para evitar/alertar possíveis danos estruturais.

estáticas (Mendonça, 2014). Este problema revela-se importante quando se trata de reabilitar edifícios existentes. Neste sentido, por exemplo, a solução *ADjustMembrane*<sup>15</sup> (Figura 4.48(a)) constitui uma resposta válida. Esta solução construtiva integra um revestimento em membrana e um núcleo flexível que atinge rigidez através do seu tensionamento entre o teto e o pavimento. Constitui uma solução leve, modular, ajustável e reutilizável, alternativa à construção de paredes interiores pesadas. Esta solução elimina as perdas associadas aos processos de instalação/desinstalação e permite a autoconstrução da compartimentação interior, não necessitando de mão-de-obra especializada.

A flexibilidade dos espaços de uma habitação pode aumentar a vida útil do edifício e, conseqüentemente, aumentar o ciclo de vida dos materiais. A flexibilidade pode ser alcançada através de: (1) flexibilidade passiva - espaços neutros e polivalentes; ou (2) flexibilidade ativa - através de elementos interiores móveis que permitem a transformação da unidade habitacional (como se exemplifica na Figura 4.49(b), com o conceito de teto falso em membrana retrátil que pode ser aplicado em espaços com pé direito elevado, com benefícios para a redução do temporária do volume útil para climatização de um espaço como se verifica no estudo de Ma & Kawaguchi, (2016)). A segunda estratégia pode permitir transformações diárias, sazonais ou anuais da unidade habitacional, pois aumenta capacidade de adaptação às necessidades de mudança do utilizador. Isto representa poupança de energia e recursos.

Quando se trata de intervir em sítios ocupados, onde existem limitações de área, sem tempo para grandes obras, ou quando existem superfícies irregulares, as soluções de revestimento com membrana, por exemplo, tornaram-se opções interessantes. Uma das vantagens dos sistemas de tetos tensados com membranas, por exemplo, é permitir intervenções de reabilitação em sítios ocupados, uma vez que não exigem a remoção de objetos do interior do compartimento a intervir, a instalação é rápida e não gera resíduos.



Figura 4.48. (a) esquema de montagem de uma variante da solução *ADjustMembrane* (© Macieira, M. apud Mendonça, 2014). (b) Conceito de teto falso em membrana retrátil - para redução do volume útil para climatização/melhoria das condições acústicas de espaços com pé direito elevado.

#### 4.6. Desafios atuais e futuros para a utilização de membranas

Dado que nos futuros quadros comunitários de apoio para o desenvolvimento dos processos produtivos será dado relevo aos seguintes aspetos: promoção da adaptação às mudanças climáticas; gestão de prevenção de riscos; proteção do ambiente e uso eficiente de recursos, optou-se por incluí-los na avaliação da eficiência das soluções de reabilitação em estudo.

##### 4.6.1. Reflexão 1: membranas e princípios para alcançar a eco-eficiência

As membranas comuns para a construção são materiais à base de polímeros que têm origem em combustível fóssil<sup>16</sup>. No entanto, supõe-se que estas se tornem em componentes de construção muito leves, comparativamente aos convencionais, e que, devido à sua leveza, envolvam menos materiais resistentes (de

<sup>15</sup> Resultante de um projeto de investigação nacional.

<sup>16</sup> Para ultrapassar o problema ambiental associado à membrana de PVC, por exemplo, têm decorrido investigações no sentido de substituir o PVC por um material mais reciclável, contendo fibras naturais, tal como o cânhamo. Além disso, também se tem introduzido com sucesso um novo revestimento de superfície com óxido de titânio, para melhorar as propriedades de anti-aderência e impermeabilização dos materiais de membrana.



base natural, ou não) do que outros componentes pesados tradicionais. Deste modo, torna-se necessário entender as suas potencialidades e limites reais em termos de eco-eficiência.

Os pontos-chave sobre a aplicação da metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV) a construções/soluções construtivas com membranas têm sido apontados por vários autores. Monticelli & Zanelli (2016) destacam a dimensão tempo como um paradigma para orientar o nível de detalhe na aplicação da ACV ao projeto de concepção com membranas. A importância da definição do tempo de vida e da função do edifício, desde as fases iniciais do processo de concepção, deve ser considerada entre os primeiros requisitos de projeto.

Considerando a natureza temporária ou permanente das membranas arquitetônicas, Monticelli & Zanelli (2016) identificam estratégias de concepção, com o intuito de orientar escolhas técnicas e materiais: (1) para as “permanentes”, deve prestar-se mais atenção à fase operacional (necessidades de aquecimento e arrefecimento, etc.), incluindo a necessidade de maior isolamento da envolvente exterior, maior massa, mais materiais e, conseqüentemente, maior impacto ambiental durante o processo de produção; (2) para as “temporárias”, onde impacto dos componentes do edifício permanece proeminente, considerando que em algumas situações não existe consumo de energia operacional, é extremamente importante prestar-se mais atenção à fase de concepção, a expectativa de vida, que é quase sempre conhecida e definível. Deste modo, destacam-se duas opções: opção 1) é preferível se a vida útil for superior a 30 anos – esta opção consiste na utilização de elementos de construção com elevado impacto ambiental, (energia incorporada) e durabilidade, onde o impacto ambiental pode ser diluído por um maior número de anos vida útil; opção 2) se a vida útil for inferior a 30 anos – esta opção consiste em escolher materiais com baixa energia incorporada, ou então com elevada durabilidade, que possam ser reutilizados/reciclados - desta forma, o impacto total é subdividido em múltiplos ciclos.

Entre os estudos de vários autores (Monticelli, 2010; Chilton *et al.*, 2013; Monticelli *et al.*, 2013; Monticelli & Zanelli, 2016) destacam-se três princípios para alcançar eco-eficiência com construções com membrana. O primeiro princípio consiste em verificar o rácio perímetro da subestrutura/superfície coberta, no caso de membranas aplicadas em coberturas ou fachadas: quanto maior for a área de uma superfície em membrana menor será o comprimento perimetral da subestrutura, reduzindo-se assim a quantidade de materiais e o conseqüente impacto ambiental (fazer mais com menos). O segundo princípio consiste em verificar o rácio sistemas de fixação (ou estrutura primária)/membrana: é necessário dimensionar e verificar a quantidade de elementos dos sistemas de fixação e de suporte de cargas. O terceiro princípio consiste em verificar a relação estrutura da membrana/carga mecânica da estrutura, considerando aço ou madeira como os principais materiais estruturais utilizados: otimizar a forma, o comportamento mecânico e estrutural de uma estrutura em membrana. A otimização destes rácios conduzirá a uma boa exploração das características e comportamentos dos materiais em membrana relativamente a outros materiais de construção tradicionais, menos leves e flexíveis.

#### • Estado da arte sobre o ciclo de vida dos materiais em membrana

Relativamente ao estado da pesquisa científica sobre a ACV dos materiais de membrana aplicados no setor da construção, algumas publicações recentes<sup>17</sup> abordam este assunto, mas o número de publicações ainda é muito baixo. Além disso, e talvez mais importante, torna-se óbvio, analisando a informação existente, que parece haver uma elevada incerteza na utilização de dados utilizados sobre ACV. Por exemplo, os valores encontrados de energia primária total não renovável para uma membrana de ETFE, diferem significativamente: entre 26,5 MJ/kg (Monticelli *et al.*, 2009) a 210 MJ/kg (Robison *et al.*, 2001). Os valores fornecidos na única Declaração Ambiental de Produto (DAP) sobre a membrana de ETFE publicada até ao momento são ainda maiores (>300 MJ/kg). No que diz respeito à ACV completa e às DAPs, existem algumas empresas precursoras, por exemplo: as empresas *Vector Foiltec*, *Nowofol* e *Dyneon para a membrana de ETFE*; a *Serge Ferrari*<sup>18</sup> e a *Evea*, para a membrana de poliéster revestida a PVC. O ponto de situação atual (meados de 2017) sobre o assunto da reciclagem dos materiais de membrana mais comuns é o seguinte: para a membrana de PES/PVC existe um

<sup>17</sup> Nomeadamente Robison *et al.* (2001), Mollaert (2003), Fernandez (2006), Ashby *et al.* (2007), Monticelli *et al.* (2009), Monticelli (2010), Knippers *et al.* (2011), Cremers (2013), Monticelli *c. et al.* (2013), Chilton *et al.* (2013), Fournier (2013), Monticelli & Zanelli (2016).

<sup>18</sup> Esta empresa também promove um processo de reciclagem para este tipo de membrana, chamado “TEXILOOP”, que já está operacional há anos e que ajuda a melhorar os valores de ACV.

processo de reciclagem operacional (p.e. o processo *Texyloop*); a membrana de ETFE, enquanto copolímero, é reciclável; existe um processo de reciclagem, à escala laboratorial, da membrana de fibra de vidro revestida a PTFE, desenvolvido pela *Dyneon/3M* e a Universidade de Bayreuth, que se encontra comercialmente ativo, contudo na prática corrente, o destino deste tipo de membrana é o aterro.

• **Alternativas às membranas poliméricas de origem fóssil**

Segundo Knippers *et al.* (2011) existe uma necessidade urgente de investigar acerca dos problemas que os polímeros causam no fim da sua vida útil, com a reciclagem. Este assunto é particularmente pertinente para as membranas compostas por vários materiais, praticamente inseparáveis e altamente resistentes a produtos químicos. Com a crescente sensibilização para os impactos ambientais e exigência da legislação associada, é cada vez mais difícil destinar estes materiais para aterro.

Atualmente, a produção global de membranas consome aproximadamente 40% de fibras naturais (algodão, linho, cânhamo, etc.) e 60% de fibras sintéticas (poliéster, polipropileno, poliamida, fibras de celulose, acrílicas, etc.), com uma tendência favorável para as últimas. As fibras naturais são claramente um recurso renovável. No entanto, enfrentam uma série de restrições significativas (como a disponibilidade de solos agrícolas adequados para cultivo, o consumo de água, as mudanças climáticas, etc.) que limitam a sua oferta à crescente procura de fibras. Por outro lado, as fibras sintéticas são feitas predominantemente com base em recursos fósseis não renováveis e para produzir estas fibras é necessário fazer grandes investimentos financeiros, nomeadamente para construir as unidades de produção. Contudo, o aumento dos preços de combustíveis fósseis no mercado mundial pode constituir um fator dissuasor para o aumento da produção deste tipo de fibras.

As fibras naturais de linho, cânhamo ou rami estão a ser correntemente utilizadas como substitutos da fibra de vidro nos revestimentos automóveis, por exemplo. Contudo, estas fibras naturais continuam embebidas em polímeros petro-químicos convencionais que limitam as vantagens ecológicas. Uma alternativa, praticada no campo das fibras celulósicas, é a produção de fibras através de biomassa vegetal. Aqui os avanços na biotecnologia industrial abriram novos horizontes, o que levou à produção de novos tipos de fibras, por exemplo, à base de ácido poliláctico obtido a partir do amido de milho. As principais limitações desta alternativa são: os custos e lentos processos de desenvolvimento.

A substituição de polímeros com base petro-química por resinas à base de materiais naturais é ainda difícil. Os bio-polímeros, tais como o ácido poliláctico (PLA, feito de amido) estão a ser utilizados em grandes quantidades para a produção de recipientes e embalagens. No entanto, o desenvolvimento de polímeros naturais, fabricados a partir de amido, açúcar, ou óleos vegetais com elevada resistência mecânica e níveis de durabilidade adequados para a utilização na construção de edifícios, ainda se encontra numa fase muito precoce.

Em que medida os bio-polímeros podem ser adequados para suportar cargas e terem aplicações em soluções construtivas, para que possam substituir matérias-primas finitas, é uma questão para a qual ainda se procura uma resposta, e será um dos desafios para os investigadores na área de materiais nos próximos anos (Grabe, 2010).

*4.6.2. Reflexão 2: o imperativo da adaptação às alterações climáticas e redução do consumo energético*

O que mais impulsionou o Homem a criar abrigos totalmente artificiais foram provavelmente as alterações climáticas que se sucederam ao período glacial iniciado há cerca de um milhão e quinhentos mil anos atrás. Ao estabelecerem um novo contexto ambiental, que exigia ao Homem maior capacidade de adaptação, estes fenómenos impulsionaram o desenvolvimento da inteligência humana. A adequação a condições mais difíceis conduziu ao apurar do fabrico de ferramentas, vestuário e abrigos, levando o Homo Habilis a organizar a sua vida de forma a poder procurar os recursos alimentares que escasseavam cada vez mais e a realizar migrações desde África, onde foram encontrados os primeiros vestígios humanos, até à Europa e à Ásia (Kronenburg, 1995).

As mudanças climáticas são uma preocupação premente para o sector da construção. Vários especialistas têm desenvolvido estudos, novos materiais, processos construtivos, normas e regulamentos para reduzir as emissões globais de gases com efeito de estufa no setor da construção e reabilitação de edifícios. Contudo, existe um

desafio paralelo: ajudar a sociedade a adaptar-se a um clima que já está em mudança, e que vai continuar a mudar por muitos anos.

Importa realçar que os impactos das mudanças climáticas não serão iguais em todas as partes do mundo, nem serão iguais para todas as pessoas, ecossistemas e infra-estruturas. Aqueles com maior exposição ou sensibilidade aos impactos climáticos, ou que tenham menor capacidade de adaptação, serão os mais afetados. Por outro lado, com o aumento da população tem-se sentido a necessidade de colonizar áreas onde existem condições climáticas extremas.

O nosso ambiente construído, e a forma como os edifícios são concebidos, construídos e cuidados, evoluiu em resposta a um clima que tem sido constante durante centenas de anos. Esse clima está a mudar a um ritmo sem precedentes e os nossos edifícios podem ter de enfrentar condições climáticas muito diferentes. Neste contexto, surgem algumas questões: (1) qual será o comportamento dos edifícios existentes perante um aumento significativo da radiação solar, de chuvas e ventos mais frequentes? (2) como é que os edifícios existentes podem ser protegidos e qual o custo associado? (3) Que medidas devem ser tomadas para garantir a segurança do parque edificado existente e ainda a construir? Estas são questões a ter em conta na reabilitação de edifícios, e por isso não surpreende que muitos governos não tenham a certeza de como abordar as decisões relacionadas à adaptação climática de uma maneira que atenda aos desafios ambientais, económicos e sociais de forma eficiente e equitativa (UNDP et al., 2012).

Os efeitos das alterações climáticas significam que os edifícios estarão sujeitos ao aumento de eventos climáticos mais frequentes e agressivos. As construções com membranas já provaram que são eficientes em ambientes extremos aos limites convencionais. Apesar das suas limitações térmicas, a sua capacidade de fornecer abrigo a baixo custo, e o potencial para cobrir grandes áreas em condições adversas, contribuirão para o aumento da sua utilização, dando resposta às questões anteriores.

Poderemos começar a ver as implicações deste tipo de alterações em eventos como o campeonato do mundo de futebol no Qatar em 2022, onde as condições extremas elevarão o desempenho térmico para o topo da lista de prioridades no desenho dos edifícios, já que não se pode exigir que atletas internacionais, oriundos de outros climas, se adaptem facilmente a um clima tão adverso. Adicionando a estas preocupações o aumento da exigência regulamentar e dos preços da energia, prevê-se que este possa constituir um desafio interessante para o desenho de soluções térmicas com materiais em membrana.

Por exemplo, uma ideia a desenvolver é a de cobrir as coberturas existentes com membranas com coloração branca para reduzir o efeito da radiação solar indesejada. Estas coberturas podem ser operáveis/adaptáveis em função da necessidade de proteção, pois também pode existir a necessidade de ventilação, ou captação de radiação solar que pode ser feita pela cobertura existente e que tradicionalmente possui uma coloração mais escura. O aumento do caudal das águas pluviais também tem de ser considerado e as coberturas em membrana podem integrar um sistema de drenagem de águas que seja redimensionável. Por outro lado, tratando-se de uma cobertura em membrana, devido às suas propriedades de flexibilidade, a sua pendente poderá ser ajustável, apresentando inclinações adequadas aos novos caudais. Comparando três cores de coberturas: verdes (com vegetação), pretas e brancas, Sproul *et al.* (2014) concluem que as coberturas com cor branca, apresentam menor temperatura superficial e oferecem mais benefícios económicos, sendo três vezes mais eficientes que as outras coberturas no combate às mudanças climáticas. O uso de membranas translúcidas que refletem a radiação solar, torna possível a redução do consumo energético para iluminação artificial no interior dos edifícios. Além disso, como referido no Capítulo 3, as membranas com elementos fotovoltaicos integrados também são interessantes para capturar e armazenar a energia necessária para a utilização dos edifícios.

#### 4.6.3. Reflexão 3: membranas e desempenho estrutural

- **Estruturas em membrana para cobertura de pátios em edifícios antigos**

Salinas & Hernández (2014) demonstraram que as estruturas de membrana são os sistemas estruturais mais adequados para cobrir pátios de edifícios antigos, comparativamente aos sistemas estruturais tradicionais, como

os arcos metálicos, cascas de betão armado, ou treliças de madeira. Esta afirmação foi demonstrada através de dois estudos de caso: *Palácio de Minería* (México) e *Hospital Feminino* (México). Contudo, transversalmente, em todos os projetos que constituem a amostra do presente trabalho, também se discutem as mesmas vantagens, sobretudo nos seguintes projetos: *Dresden Castle Kleiner Schlosshof*, *Museu Chileno de Arte Precolombina*, *Kapuzinercarrée*, *Palácio de Igartza* e *Palácio das Artes de Mons*.

Mesmo que a durabilidade das membranas seja limitada a 20 ou 30 anos - dependendo das fibras utilizadas (geralmente fibras de poliéster ou vidro), das condições climáticas ou da poluição do local onde elas estão localizadas e da qualidade das fibras - devido ao reduzido peso próprio das membranas, as estruturas em membrana constituem sistemas estruturais altamente eficientes para cobrir, por exemplo, pátios de edifícios antigos, sobretudo se encontrarem-se implantados em solos com reduzidas propriedades mecânicas e ou zonas sísmicas (Salinas & Hernández, 2014), pois não é necessário considerar a adição de grandes cargas gravitacionais sobre a estrutura antiga. Contudo, é necessário considerar as forças que serão transmitidas através dos cabos e mastros para a estrutura antiga através dos pontos de ancoragem ao edifício e que desempenham uma função muito importante.

Quando se concebem estruturas em membrana para edifícios antigos, é essencial analisar cuidadosamente a estrutura existente, de modo a projetar (desenhar e dimensionar) os elementos de ancoragem: mastros, arcos, cabos, ou qualquer outro novo elemento estrutural. Deve dar-se especial atenção às forças de tração geradas durante o processo de pré-tensão da membrana, bem como durante a ação de ventos fortes. Por exemplo: (1) o facto de se executar uma cobertura para um pátio existente, localizando as suas fundações no centro do pátio e não sobre os elementos estruturais do edifício irá evitar forças de ancoragem sobre o mesmo e libertar a fixação das extremidades em membrana; (2) o facto de se adicionar uma sobre-cobertura leve, como se exemplifica com o projeto ref<sup>a</sup> C.06.- *Camellia house*, permitirá reduzir as sobrecargas (p.e. decorrentes da acumulação de neve) sobre a estrutura existente, ao mesmo tempo que corrige as pendentes da cobertura original.

- **Elementos de ancoragem**

A intervenção no *Hospital Feminino* constitui um bom exemplo onde as condições acima mencionadas atingiram um nível superior; na Figura 4.49(a) é possível ver os pormenores de ancoragem da estrutura de membrana ao edifício antigo. A estrutura antiga do edifício, composta por abobadas de tijolo apoiadas sobre vigas metálicas em I (introduzidas no início do século XX), encontrava-se muito fraca para garantir a rigidez necessária para suportar as forças de tração geradas pela estrutura de membrana. Por este motivo, os elementos de ancoragem foram fixados no pavimento da laje abaixo da laje de cobertura, de tal modo que as forças de tração são contrabalançadas pelo peso-próprio de todo o piso superior. As vigas de aço I apoiadas nos eixos estruturais do edifício funcionam como pontes e permitiram fixar elementos de ancoragem ao longo das vigas de acordo com as exigências do projeto.

No *Palácio de Minería* (construído em 1817, edifício classificado como património nacional e no qual a cobertura antiga foi substituída por lajes de betão armado (em 1973) apoiadas em vigas de aço) foi adicionada uma cobertura em membrana sobre o pátio existente. Um dos requisitos da Comissão de Proteção do Património foi o de não afetar os tetos ornamentais em gesso existentes abaixo da cobertura onde se instalaram os elementos de ancoragem da cobertura em membrana. Por este motivo, foram concebidos elementos de ancoragem especiais de forma a conectar os mastros e cabos da cobertura em membrana, introduzindo apenas 7cm – com varões de aço em forma de U - dentro da laje de betão armado existente, de acordo com o desenho e imagens presentes na Figura 4.49(b); cada varão de aço em U foi fixo à laje a cada 30 cm com cola estrutural e abraçando um perfil em I. As vigas em I são compridas o suficiente (aprox. 9 m) para garantir que todas as forças (tração, compressão e corte) que atuam nos pontos de ancoragem ao edifício existente sejam transmitidas, tanto quanto possível, em amplas superfícies da estrutura antiga.

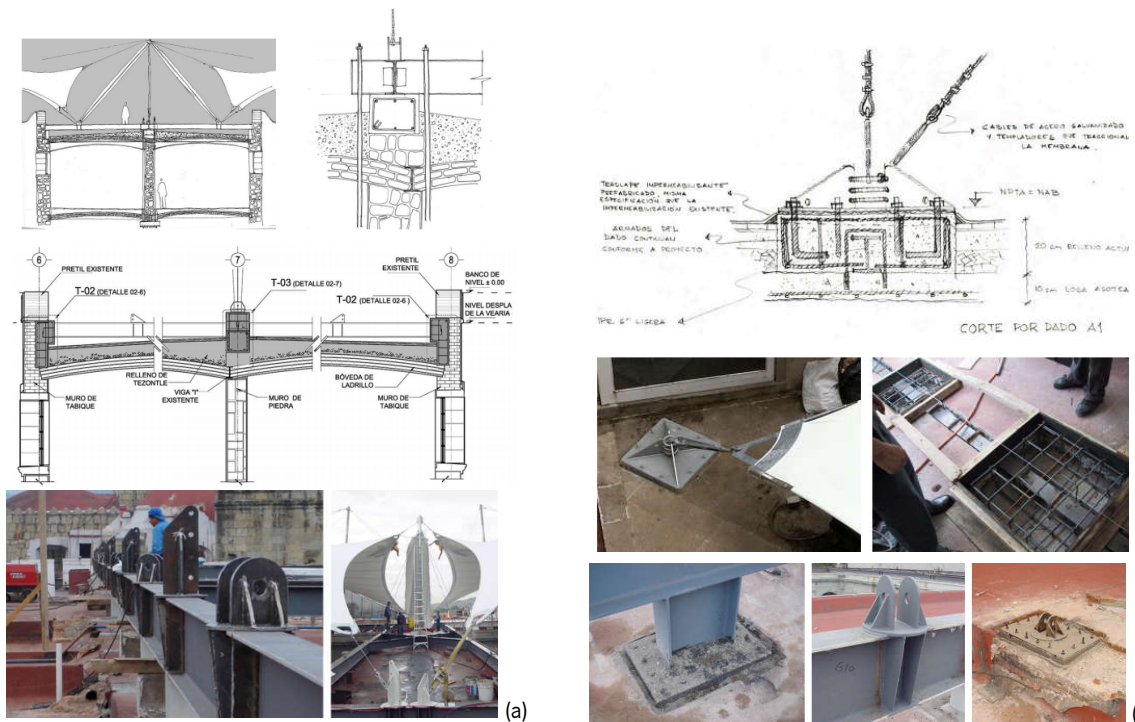


Figura 4.49. Pormenores de ancoragem: (a) no “Hospital Feminino” (México); (b) de mastros e cabos da estrutura de membrana sobre a laje de betão armado do “Palácio de Minería” (México).

#### • Limitações regulamentares

Apesar das estruturas com superfícies tensionadas terem sido introduzidas há mais de 60 anos, ainda não existe uma norma europeia harmonizada para dimensionamento de estruturas de membrana. Contudo, para os edifícios convencionais, os Eurocódigos estão bem estabelecidos. Em contrapartida, para os edifícios existentes e estruturas temporárias, como as estruturas com superfícies tensionadas, ainda é necessário realizar mais trabalhos de investigação que conduzam à sua normalização.

Atualmente, as normas internacionais relativas ao dimensionamento e execução de estruturas tensionadas apresentam lacunas consideráveis, especialmente em aspetos relativos à superfície da membrana. Segundo Beccarelli (2015), as principais discrepâncias com os atuais códigos de dimensionamento estrutural relacionam-se sobretudo com as cargas e os fatores de segurança. As análises estruturais baseiam-se nas combinações de carga mais desfavoráveis. No entanto, o uso direto das distribuições de carga prescritas pelos regulamentos, desenvolvidos para edifícios convencionais, conduz a diversas imprecisões devido ao comportamento não linear das estruturas de membrana e ao seu comportamento à deflexão -uma distribuição de cargas convencional, pode facilmente resultar numa deflexão inesperada que pode levar à acumulação de água ou neve e ao colapso progressivo da estrutura em membrana (Beccarelli, 2015). Por outro lado, as ações sísmicas que constituem uma ameaça para os edifícios convencionais, nos sistemas construtivos com estruturas em membrana tensionadas são geralmente negligenciáveis devido à sua reduzida massa. Além disso, as formas superficiais únicas destas estruturas impedem o uso direto dos coeficientes de distribuição de cargas associadas à neve e à pressão do vento, fornecida pelos códigos de dimensionamento estrutural para soluções construtivas com geometrias convencionais (Beccarelli, 2015).

No contexto Europeu, o dimensionamento estrutural de edifícios e outras obras de engenharia civil, ou produtos de construção é regulamentado por uma série de dez normas europeias (EN 1990-EN 1999) conhecidas por Eurocódigos. A sua aplicação é extremamente ampla, desde as bases para o dimensionamento estrutural até às ações sobre as estruturas; também descrevem os procedimentos para o dimensionamento de cada sistema construtivo (betão, metal, estruturas mistas (metal e betão), madeira, alvenaria, geotecnia, estruturas sismo-resistentes, alumínio). O dimensionamento da estrutura de suporte rígida das estruturas tensionadas é geralmente realizado de acordo com as prescrições apresentadas em cada Eurocódigo. Contudo, a parte mais exigente do projeto, a membrana ou a rede de cabos, fica ao critério do projetista. A única norma europeia

atualmente disponível sobre estruturas de membrana é a EN 13782:2005 “*Estruturas temporárias – segurança de tendas*” (Stranghøner *et al.*, 2016). Esta área de aplicação restringe-se sobretudo aos requisitos de segurança para tendas que necessitam de ser incluídos na conceção, dimensionamento, fabrico, instalação, manutenção, utilização e em ensaios de mobilidade de tendas temporariamente instaladas com mais de 50 m<sup>2</sup> de área de implantação. No entanto, segundo Beccarelli (2015) e Stranghøner *et al.* (2016), esta norma é a única referência para estruturas em membrana que apresenta: termos e definições fundamentais; requisitos gerais de conceção; análise e exame; princípios de análise numérica; ações; verificação de estabilidade e equilíbrio; ancoragens ao solo; outros componentes estruturais; critérios especiais de projeto, fabrico e instalação; ensaios, procedimentos para aprovação; manual de utilização; comportamento ao fogo e coeficientes aerodinâmicos para tendas redondas.

Atualmente, existe um grupo de trabalho denominado *WG 5 Membrane structures*, criado para incorporar as estruturas em membrana na nova geração de eurocódigos (Stranghøner, N. & Uhlemann, 2016; Louro *et al.*, 2016; Pyl *et al.*, 2016). A metodologia utilizada para dimensionar estruturas tensionadas baseia-se nos seguintes Eurocódigos: (a) as estruturas com rede de cabos calculam-se com base nos princípios do estado limite último, de acordo com o Eurocódigo 0 e 1 (Pyl *et al.*, 2016); (2) os elementos de suporte são calculados de acordo com a norma do Eurocódigo 3 para o aço; (3) o pré-esforço é considerado como uma ação única e permanente “G+P” para estruturas de aço com elementos tensionados (p.e. a rede de cabos de Paduart). Ainda não está estabelecido um Eurocódigo específico para estruturas de membrana pré-esforçada e por isso são projetadas e analisadas do mesmo modo que as estruturas com rede de cabos, usando as mesmas combinações de carga.

As características, os requisitos e os métodos de ensaio para membranas têxteis revestidas destinadas a estruturas temporárias e tendas encontram-se sintetizados na Norma Europeia EN 15619:2008+A1:2010 “*Tecidos com revestimentos poliméricos - segurança de estruturas temporárias (tendas) - especificação para tecidos revestidos destinados a tendas e estruturas relacionadas*”. Esta norma introduz o conceito de diferentes níveis de desempenho para cada característica, o que permite a escolha do nível apropriado de cada característica: massa por unidade de área, comportamento mecânico de tração, resistência ao desgaste, aderência do revestimento, estabilidade dimensional, solidez à cor e intempéries, suscetibilidade para o desenvolvimento de microrganismos, aparência, alongamento sob carga após exposição ao calor, deformação residual após exposição ao calor e carga, penetração de água, ou reação ao fogo para obter um “perfil de produto” que satisfaça os requisitos de um tipo específico de uso. Uma abordagem similar é proposta pela Norma Japonesa “Métodos de ensaio para materiais em membrana (tecidos revestidos) — Qualidades e desempenhos” desenvolvida pela Associação de Estruturas em Membrana do Japão (MSAJ/M-03:2003) (Beccarelli, 2015). No entanto, devido ao campo de aplicação, o conteúdo não oferece uma descrição exaustiva à abordagem de conceção e aos aspetos teóricos relativos ao dimensionamento e conceção de uma estrutura permanente. Por isso, a Associação Europeia de Estruturas em Membranas (TensiNet) desenvolveu o Guia de Projeto TensiNet (Foster & Mollaert, 2004) que apresenta o estado do conhecimento mais completo e atualizado neste campo, realizado com o contributo de vários grupos de investigação, projetistas, produtores de materiais associados, desenvolvedores de ferramentas informáticas e fabricantes que operam na Europa. Este conjunto de contribuições representa o ponto de partida para o desenvolvimento do futuro Eurocódigo 10, pelo Comité Europeu de Normalização (CEN TC250 Working Group 5). Além disso, o desenvolvimento do novo Eurocódigo é atualmente suportado por um dos grupos de trabalho de um projeto sobre novas membranas estruturais.

De acordo com Stranghøner *et al.* (2016), o futuro Eurocódigo lidar com critérios específicos para: conceção e cálculo (vãos pequenos/grandes, temporário/permanente, interior/exterior, transportável/transformável); métodos de análise; premissas de carga adequadas para superfícies duplamente curvas; propriedades do material (determinação e certificação); modelos de materiais avançados; fatores de segurança parciais, padrões de corte; análise de reforços, conexões e pormenorização; modelos integrados, fabrico, manutenção, exame e ensaio.

- **Eficiência estrutural: integração de elementos de flexão ativa em membranas**

A capacidade de mudança de forma é uma das propriedades das membranas arquitetónicas. Algumas membranas permitem a flexão e, conseqüentemente, podem ser enroladas ou dobradas. Esta propriedade

facilita o processo de transporte e de instalação, bem como a aplicação em coberturas retráteis e pneumáticas, ou noutra tipo de sistemas.

Segundo Lihenard & Knippers (2015), a introdução de estruturas de suporte híbridas “com flexão ativa” (Figura 4.50(a)), para libertar a fixação perimetral das superfícies em membrana, constitui uma solução muito eficiente. Estas estruturas exploram a interdependência entre força e forma. Nestes sistemas complexos, o equilíbrio é formado com base nas condições de contorno e na geometria, bem como nas propriedades mecânicas dos elementos estruturais elásticos e na sua formação topológica. Isto levanta questões sobre a procura da forma e que exigem abordagens numéricas e métodos analógicos.

O projeto *Isoropia*<sup>99</sup> (Inke, 2018) (que significa balanço, equilíbrio e estabilidade) constitui outro exemplo em que se explora a eficiência estrutural das estruturas de membranas. A “isoropia” explora uma arquitetura ultra-leve, através do equilíbrio entre tensão e compressão; as membranas em malha têxtil incorporam varões de fibra de vidro e, juntos, encontram o equilíbrio e a forma (Figura 4.50(b)). *Isoropia* investiga como a conceção assistida por computador nos permite repensar o uso de materiais na arquitetura. Neste projeto considera-se que a prática corrente de adicionar materiais para formar elementos de construção e edifícios é altamente desperdiçadora. Pois os materiais e técnicas atuais não apenas esgotarão os recursos do nosso planeta, como também não serão capazes de satisfazer a necessidade de habitação da população global crescente. A utilização de malhas têxteis permite moldar e integrar todos os elementos construtivos. Com esta nova técnica não há necessidade de qualquer pós-processamento das membranas fabricadas – pois encontram-se prontas para serem instaladas quando saem da máquina de tricotar.



Varões de GFRP são embebidos numa membrana têxtil, atados em feixes e que conduzem aos postes de fundação em GFRP.

Figura 4.50. (a) Exemplo de estrutura híbrida – protótipo experimental (Lihenard & Knippers, 2015). (b) Instalação com as estruturas híbridas desenvolvidas no âmbito do projeto de investigação *Isoropia* para a 16<sup>a</sup> Bienal de Arquitetura em Veneza (Inke, 2018).

Desenvolvimentos recentes na indústria da construção mostraram uma clara evolução das construções tradicionais para edifícios com envolventes sensíveis e adaptáveis, equipados com sensores e capazes de interagir com o ambiente circundante (com base na recolha de dados de temperatura, humidade, radiação solar, etc.). Na secção 4.3 do Anexo 4 apresenta-se uma síntese de projetos de investigação contemporâneos em que os resultados gerados constituem o futuro das soluções de reabilitação funcional com membranas.

#### 4.6.4. Reflexão 4: avaliação numérica do desempenho térmico das construções com membranas

Atualmente a avaliação do desempenho térmico das construções com membranas baseia-se em aproximações e pressupostos. Na maior parte dos casos, estas simplificações são importantes (Harvie, 1995). A maior parte das construções onde se utilizam membranas não exigem elevados níveis de desempenho térmico, pois outras exigências tendem a ter prioridade sobre estes aspetos. No entanto, quando o desempenho é crítico, podem sobre-dimensionar-se equipamentos e instalações de climatização para mitigar os problemas que possam ocorrer. Contudo, num clima global em mudança, com o aumento dos custos de energia torna-se relevante dispor de ferramentas informáticas para profissionais inexperientes pois, questões anteriormente consideradas insignificantes, começarão a ganhar relevo (Devulder, 2005). Nesse sentido, Harvie (1995) enunciou as seguintes medidas de melhoria das análises térmicas: (1) melhoria na disponibilidade de informação por parte dos produtores; (2) inclusão de modelos CFD com uma definição mais rigorosa dos seus limites; (3) aumento do poder das ferramentas informáticas para avaliações numéricas dinâmicas (com mudança de comportamento

<sup>99</sup> Este projeto foi desenvolvido pelo consórcio entre CITA (Centro de Tecnologia de Informação e Arquitetura, KADK - conceção e computação - Dinamarca), Structure (dimensionamento), AFF (A. Ferreira & Filhos, SA Portugal - produção da malha têxtil), DSM Dyneema B.V (Fibras), Alurays Lighting Technology GmbH (iluminação) e com o patrocínio de Toppglass Italy (varões de GFRP), Sofistik (análise FE) e SIKA (colas).

durante longos períodos de tempo); (4) aperfeiçoamento da simulação dos fenómenos de evaporação e condensação; (5) validação dos modelos com dados obtidos em avaliações experimentais e (6) redução do custo das avaliações numéricas para permitir o aumento da sua utilização.

#### 4.7. Conclusões

Os principais líderes mundiais para a proteção do património têm apoiado cada vez mais o desenvolvimento de construções têxteis de qualidade como sistemas de proteção do património arquitetónico ameaçado, seguindo altos padrões de proteção, flexibilidade e reversibilidade, algo que as membranas arquitetónicas podem garantir. Enquanto no passado as membranas eram utilizadas, sobretudo, em sistemas de cobertura, atualmente, com a elevada diversidade de requisitos, várias soluções arquitetónicas têxteis constituem uma resposta clara a muitas necessidades relativas à proteção e valorização do património edificado. No presente capítulo apontaram-se as tendências mais relevantes de aplicação de membranas em intervenções de reabilitação. A amostra analisada, com 70 projetos, mostra a ampla gama de possíveis usos para membranas arquitetónicas em projetos de reabilitação, destacando as atuais boas práticas e definindo recomendações para apoiar a tomada de decisões, no sentido de se alcançar uma aplicação mais ampla dos materiais e tecnologias construtivas com membranas em futuras intervenções de reabilitação de edifícios. Como complemento a este capítulo, encontra-se no Anexo 4 um estudo relativo às tecnologias construtivas em membrana para diferentes elementos construtivos.

Da análise geral dos projetos de reabilitação selecionados, considerando a leveza, resiliência e flexibilidade das tecnologias de construção com membranas, verifica-se que estas podem ser preferidas às convencionais, tornando-se soluções inevitáveis em contextos de reabilitação específicos, em particular quando as necessidades de redução de peso, a reversibilidade e a rapidez de instalação surgem como critérios de decisão prioritários. Alguns milímetros de membrana podem constituir uma superfície auto portante (integrada num sistema de tração/pneumático) e um filtro solar seletivo capaz de absorver ou refletir luz ultravioleta ou infravermelha sempre que necessário; também pode ser utilizada para suportar materiais de isolamento térmico ou acústico.

Observou-se que as intervenções de reabilitação com soluções de membrana têm cada vez mais um caráter permanente de utilização. Quanto à utilização de membranas na reabilitação de edifícios não residenciais, os usos culturais, de escritórios e religiosos são os que apresentam mais utilizações; são usos onde existe uma maior necessidade de renovar a imagem e de expandir a sua capacidade, e as membranas são materiais que facilmente dão resposta a essas necessidades. No entanto, o uso residencial ainda apresenta alguns obstáculos, entre os quais o principal é o económico, porque os custos de aquisição ainda são elevados quando se comparam, por exemplo, com os revestimentos convencionais. No entanto, é necessário fazer uma avaliação custo benefício e de ciclo de vida para determinar as vantagens da utilização de soluções construtivas com membranas, alternativamente a soluções construtivas convencionais. Contudo, no uso residencial, as membranas são mais utilizadas em soluções para proteção solar exterior ou interior.

No que diz respeito aos aspetos luminicos é evidente, a partir da análise realizada, uma notável capacidade das membranas em assegurar os níveis de conforto visual necessários para os diferentes tipos de usos, em particular com a capacidade de adaptação às necessidades de luz direta ou difusa. Para além disso, as membranas arquitetónicas continuam a ser eficientes na proteção solar, uma vez que são capazes de reduzir a radiação solar sem prejudicar os níveis de luminosidade adequados para cada espaço. De facto, existem estudos que mostram que as soluções em membrana (p.e. persianas, cortinas) tradicionalmente utilizadas para regulação luminica do espaço interior, também contribuem para reduzir significativamente as perdas de calor sem ser necessário intervir nos janelas<sup>20</sup>.

Verifica-se que os projetos com soluções pneumáticas têm aumentado significativamente, sobretudo em sistemas de coberturas e menos em fachadas. A melhoria dos materiais e tecnologias construtivas com membranas e a mediatização de alguns projetos também ajudaram neste aumento. O desenvolvimento de novos materiais com maior resistência a ataques físicos, químicos e biológicos, como o ETFE, ou outros revestimentos de membranas, têm favorecido a aplicação destas soluções, sobretudo na cobertura de pátios de edifícios que

---

<sup>20</sup> Segundo Baker (2008), uma combinação destes sistemas pode reduzir as perdas de calor em 62%, apenas 1% menos do que através da instalação de vidros duplos.



carecem de proteção. As intervenções que utilizam tecnologias construtivas com membranas como se estas fossem materiais rígidos, mostram que ainda é necessário o aperfeiçoamento de novas estratégias de integração (p.e. são necessários ajustes considerando as propriedades de flexibilidade das almofadas pneumáticas). Contudo, com a utilização do sistema de cintas flexíveis *Bakaert®* no projeto ref<sup>a</sup> C.17 e o desenvolvimento de vigas pneumáticas “Tensairity®” já se deram os primeiros passos.

Considera-se que utilização de estruturas em membrana em edifícios pode ser dividida em três propósitos principais. Em alguns casos, o propósito é a substituição/reposição, procurando recriar/repor uma parte perdida do edifício. Outras vezes, o propósito é a integração de elementos intermédios entre espaços novos e antigos, resultando numa revisão de toda a estrutura de modo a ligar o antigo e o novo. Outro propósito é o de sobrepor, destacando, tanto quanto possível, a diferença entre antigo e o que está sendo adicionado, ou seja, garantido uma clara distinção entre volumes e permitindo ao utilizador interpretar a dinâmica, ou os contrastes entre essas estruturas.

Apesar das vantagens apresentadas, verificou-se que os materiais em membrana ainda são subutilizados na reabilitação de edifícios, comparativamente aos restantes materiais de construção. O desempenho destes materiais, em intervenções de reabilitação, bem como o processo/abordagens de conceção, necessitam de mais investigação para garantir a melhor resposta a cada contexto específico, em estreita relação com a peculiaridade dos edifícios existentes. A promoção de soluções com membranas para a melhoria do desempenho funcional de edifícios existentes, encontra-se em desenvolvimento e são necessários mais estudos comparativos entre as soluções de reabilitação com membranas e as soluções de referência/convencionais. Por esse motivo, nos capítulos seguintes 6, 7 e 8 apresenta-se: (1) o desenvolvimento de algumas propostas com base nas abordagens arquitetônicas/propósitos de reabilitação identificados neste capítulo; (2) os resultados da avaliação da eficiência (multicritério – qualitativa e quantitativa) de soluções construtivas com membranas arquitetônicas aplicadas nos edifícios tomados como caso de estudo - antes e depois da intervenção com membranas - para os exercícios de reabilitação funcional enunciados na Tabela 4.14. Os testes de avaliação (Tabela 4.14) servem para demonstrar em que medida as soluções de reabilitação com membranas arquitetônicas podem constituir alternativas eficientes às soluções construtivas convencionais de referência, em cenários de intervenção de reabilitação funcional. Os exercícios apresentados nos capítulos 6, 7 e 8, apresentam-se por ordem crescente de escala de intervenção. De seguida, no Capítulo 5, apresenta-se a metodologia de avaliação adotada para avaliar a eficiência das soluções de reabilitação funcional com membranas, comparativamente às soluções convencionais de referência.

Tabela 4.13. Síntese e justificação dos casos de estudo selecionados para avaliar a eficiência das soluções com membranas propostas.

	Abordagem arquitetónica da intervenção		
	Capítulo 6: Teste 1 - Integração	Capítulo 7: Teste 2 - Sobreposição	Capítulo 8: Teste 3 -Reposição
<b>Objetivo:</b> <i>avaliar a eficiência segundo as seguintes abordagens</i>	Integração de elemento não estrutural transparente para encerrar varandas em edifícios antigos.	Ampliação vertical sobre edifício com limitações estruturais.	Reposição de cobertura e teto abobadado sem adição significativa de massa num edifício classificado como património.
<b>Principais motivações/requisito:</b>	Regulação térmica e acústica passiva; facilidade de instalação; reduzido peso próprio; flexibilidade; reversibilidade <sup>21</sup> .	Reduzido peso próprio; facilidade de instalação; flexibilidade; reversibilidade.	Regulação acústica e luminica; reduzido peso próprio; reversibilidade; flexibilidade; baixa intrusividade <sup>22</sup> .
<b>Propósito/melhorias funcionais expectáveis</b>	Obter melhorias funcionais (sobretudo térmicas e acústicas); ampliar a área útil de ocupação.	Obter melhorias funcionais (sobretudo térmicas) com conseqüente redução do consumo energético; redução de sobrecarga estrutural; ampliar a área útil de ocupação.	Obter melhorias funcionais (sobretudo acústicas e luminicas); obter proteção contra as variações climáticas; baixa intrusividade; aumentar a utilização do espaço existente
<b>Escala da intervenção</b>	<b>Pequena</b>	<b>Média</b>	<b>Grande</b>
<b>Graduação da intervenção<sup>23</sup></b>	Ligeira	Média/profunda	Excecional
<b>Aspetos para avaliar a eficiência da solução proposta</b>	Económicos; patrimoniais e culturais; sociais; segurança (mitigação de riscos para os ocupantes); construtivos; funcionais e impacto ambiental (ACV e potencial de adaptação às alterações climáticas).		

<sup>21</sup> Conceito de levar a cabo uma intervenção num edifício, ou em parte deste, de forma que este possa retornar ao estado anterior, num qualquer momento futuro. Adoção de materiais e técnicas que permitam a sua remoção, de preferência total, em caso de avanço da técnica no futuro. Princípio que tem subjacente o reconhecimento de que a técnica está em permanente evolução e o legado patrimonial, mesmo vernacular, se deve sobrepor a soluções irreversíveis (que recorrem a materiais ou técnicas não passíveis de remoção sem provocar danos à construção original).

<sup>22</sup> A adoção de medidas de baixa intrusividade tem como base a aplicação de soluções de menor impacto (que podem ter diferentes leituras, por exemplo: visual, estrutural, funcional, etc). Em termos arquitetónicos a falta de compreensão da lógica espacial e das características específicas levam normalmente a processos intrusivos que alteram a leitura do edifício e dos seus espaços.

<sup>23</sup> Ver explicação no item 4.3.4.

## Capítulo

# 05

### *Modelo adotado para avaliação da eficiência relativa*

#### **5.1. Introdução**

A premissa inicial desta tese é que a eficiência relativa das soluções de reabilitação que utilizam membranas arquitetônicas necessita de ser avaliada, de modo a permitir que estas sejam comparadas com as soluções convencionais, ajudando os decisores a seleccionar a melhor solução. Para tal, neste capítulo propõe-se um modelo multicritério de apoio à tomada de decisão para solucionar este problema, utilizando para tal: árvores de decisão, métodos multicritério (como o método aditivo simples - *Simple Additive Weighting* – SAW - e o processo de análise hierárquica - *Analythic Hierarchy Process* - AHP) e uma análise de sensibilidade. Neste âmbito, a avaliação da eficiência<sup>1</sup> depende de critérios funcionais, mas também económicos, tecnológicos, ambientais, sociais, culturais, de segurança, *etc.*. A seleção dos critérios e a respetiva atribuição de pesos foi realizada por um grupo de especialistas através de um inquérito – que definiu o cenário base, com o objectivo de maximizar o desempenho funcional (p.e. comportamento térmico/consumo energético na fase de utilização do edifício) e minimizar os recursos empregues (p.e. materiais, económicos). A solução de reabilitação mais eficiente, entre um conjunto pré-definido de alternativas, foi obtida através da implementação do modelo proposto em três casos de estudo, que serão apresentados nos capítulos 6, 7 e 8.

O processo de tomada de decisão para seleccionar a melhor opção envolve um conjunto alargado de interesses divergentes, incluindo aspectos construtivos (p.e. alterações planimétricas e volumétricas, tempo de montagem), funcionais/sociais/culturais (p.e. melhorias arquitectónica, estéticas e conforto interior), económicos, ambientais, *etc.*. Em particular, a crescente importância atualmente atribuída aos aspetos de compatibilidade ambiental conduz os projetistas a combinarem, em simultâneo, o uso de materiais energeticamente eficientes e soluções técnicas que maximizem poupanças. Por isso, devem ser estudadas soluções alternativas às convencionais, sobretudo quando os custos e o peso das soluções construtivas para reabilitar um edifício constituem factores inibitórios (para proprietários, projectistas, investidores e outras partes envolvidas). De acordo com o que foi referido no capítulo anterior, as tecnologias construtivas que fazem uso de membranas arquitetônicas constituem alternativas interessantes para os casos onde o uso de soluções convencionais/tradicionais em intervenções de reabilitação é limitado, sobretudo pelo seu peso e nível de reversibilidade/intrusividade. Os sistemas construtivos leves (onde se incluem aqueles que utilizam materiais em membranas) disponíveis para melhorar o desempenho funcional (p.e. eficiência energética e conforto interior) são inúmeros e, conseqüentemente, identificar a solução de reabilitação mais adequada é um tópico de grande importância.

Conseqüentemente, os agentes decisores necessitam de ferramentas que auxiliem a tomada de decisão, ou seja, a escolher a opção mais vantajosa. Idealmente, o nível de eficiência dessas soluções, configurado por um modelo de avaliação, deve incluir critérios que permitam aos decisores realizarem uma análise compreensiva das alternativas disponíveis, através da definição de objectivos para cada critério - maximizar ou minimizar – de modo a fazerem a escolha mais adequada.

#### *5.1.1. Breve revisão do estado do conhecimento sobre ferramentas de apoio à decisão para intervenções de reabilitação*

Para conceber e implementar uma intervenção de reabilitação eficiente é necessário realizar uma procura exaustiva de soluções que possam ser utilizadas, que depende de um grande número de factores. Existe um

---

<sup>1</sup> A palavra eficiência tem origem no termo latim *efficientia* e refere-se se à relação entre os resultados obtidos e os recursos empregues. Por outras palavras, a eficiência é o uso racional dos meios existentes para alcançar um objetivo previamente determinado; trata-se da capacidade de alcançar os objetivos e as metas programadas com o mínimo de recursos e tempo disponíveis, conseguindo desta forma a sua otimização.

grande desenvolvimento de modelos e métodos utilizados por vários autores para apoiar a escolha das melhores soluções de reabilitação sob diferentes perspectivas, ou seja, que consideram múltiplos critérios. Estas metodologias podem ser categorizadas em duas abordagens principais: (1) modelos em que as alternativas são explicitamente conhecidas *à priori* e (2) modelos em que as alternativas são implicitamente definidas na configuração de um modelo de otimização (Asadi *et al.*, 2014). Mas também podem ser classificados como sendo: *offline* ou *online* (Ferreira *et al.*, 2013). No estudo de Ferreira *et al.* (2013) identificou-se um grande número de ferramentas de apoio à tomada de decisão para intervenções de reabilitação de edifícios, cerca de 40 (incluindo ferramentas desenvolvidas em contexto nacional). Nesse estudo mostra-se que o ambiente e a economia são os critérios/aspectos mais avaliados; os aspectos sociais são menos mencionados e os subcritérios mais avaliados estão relacionados com o conforto térmico.

A abordagem *offline* consiste num problema de decisão discreto (utilizado quando se avalia um reduzido/número finito de alternativas). Esta abordagem utiliza sistemas modernos de controlo, conectados via *web*, para otimizar, p.e. em tempo real, os sistemas energéticos e o conforto interior na fase de utilização do edifício.

Alguns exemplos de sistemas *offline* de apoio à tomada de decisão, no âmbito de intervenções de reabilitação de edifícios, podem ser referidos, tais como: (a) o modelo multicritério *knapsack* proposto por Alanne (2004), utilizado para ajudar os projectistas a seleccionarem as acções de reabilitação mais viáveis, na fase de conceção; (b) o método desenvolvido por Serrano-Jimenez *et al.* (2019), que permite avaliar em tempo real as poupanças energéticas e económicas das intervenções de reabilitação, em função de vários cenários que relacionam energia e ocupação, permitindo comparações com outros edifícios; (c) a metodologia para encontrar uma solução ótima de reabilitação térmica, através de redes neurais artificiais, que relacione o consumo energético com o custo associado ao ciclo de vida do edifício (Almeida & Freitas, 2016); (d) a metodologia de avaliação multicritério, que considera aspectos ambientais, económicos e sociais, de várias soluções de reabilitação energética para edifícios residenciais, com base em índices de eficiência (Lizana *et al.*, 2016).

Também se podem referir alguns exemplos de abordagens com sistemas *on-line*, tais como: (a) a aplicação BeSmart2 (Tereso & Amorim, 2015) - desenvolvida em linguagem C# e que implementa os métodos AHP, SMART e Funções de Valor – permitindo comparar várias alternativas através de vários critérios, mantendo sempre um *backup* permanente do modelo e dos resultados e fornecendo uma estrutura para incorporar novos métodos no futuro; (b) a metodologia e *software XENIOS* (Dascalaki & Balaras, 2004) que permite avaliar vários cenários para a reabilitação de hotéis, através da qual os utilizadores realizam uma auditoria preliminar e se realiza uma primeira avaliação do custo/eficiência das práticas de reabilitação energética; (c) o sistema *online* multicritério de apoio à decisão para o sector da construção desenvolvido por Kaklauskas *et al.* (2007); (d) a ferramenta *MultiOpt*, desenvolvida por Chantrelle *et al.* (2011), constituída por um algoritmo genético (NSGA-II) combinado com o *TRNSYS* e bases de dados económicas e ambientais, para a optimização de operações de reabilitação; (e) o sistema *Interactive Data Flow (IDF)* que tira partido das vantagens da modelação de informação para a construção (*Building Information Modelling - BIM*), da modelação energética de edifícios (*Building Energy Modelling - BEM*) e técnicas de análise do processo hierárquico (*Analytical Hierarchy Process - AHP*) – a utilização conjunta destas ferramentas melhora o processo de decisão e fornece dados para definir um plano de estratégia de reabilitação (Tronchin *et al.*, 2016); (f) Antipova *et al.* (2014) apresenta uma ferramenta sistematizada para encontrar a solução de reabilitação ótima para um edifício, com base num rigoroso programa linear de mistura inteira (*Mixed-Integer Linear Program - MILP*), que considera os princípios de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), avaliando deste modo o impacto de cada alternativa em avaliação (considerando para tal todas as fases do ciclo de vida) para o resultado final.

Da revisão literária observa-se que os Métodos de Decisão MultiCritério (MDMC) têm ganho popularidade no processo de selecção de soluções para a reabilitação de edifícios.

O modelo proposto nesta tese utiliza-se a abordagem metodológica em que todas as alternativas são conhecidas *à priori* e combina uma abordagem mista - online e off-line - na qual o decisor atribui pesos a cada critério de avaliação e onde a soma ponderada de todos os critérios permite determinar a melhor solução.

## 5.2. Modelo multicritério proposto para auxiliar a tomada de decisão/avaliar a eficiência das soluções de reabilitação em estudo

Dado que o problema de decisão (que será apresentado em cada um dos capítulos 6, 7 e 8) considera vários critérios, este torna-se complexo, sendo necessário definir um modelo de decisão multicritério. Neste tipo de modelos, normalmente, não é possível encontrar uma alternativa que seja melhor do que as restantes para todos os critérios em simultâneo. Por isso, é necessário a intervenção do agente de decisão para se chegar a uma conclusão, através da atribuição de pesos/obtenção do vetor de prioridades para cada critério. De facto, os problemas multicritério não têm objectivamente uma solução óptima. Apenas existe uma solução preferida, que pode variar para diferentes agentes de decisão, dependendo da importância atribuída a cada critério. Por isso, nesta tese, para além do modelo multicritério (composto por árvores de decisão, métodos SAW e AHP) também se propõem utilizar a análise de sensibilidade – resultando no modelo proposto para avaliar a eficiência das soluções propostas para a reabilitação funcional de edifícios. Os métodos AHP e SAW métodos foram selecionados porque são simples, robustos, repetíveis, objetivos, e comumente reconhecidos como válidos em vários estudos realizados no sector da construção civil (Zanakis *et al.*, 1998; Zheng, Jing, Huang *et al.*, 2010). Segundo Tupenaite *et al.* (2010) Estes métodos permitem considerar a importância relativa de vários critérios, por um grupo de decisores, de modo a selecionar a melhor *alternativa, ou seja, a que* apresenta o maior valor global.

O estudo de um problema com abordagens genéricas de decisão multicritério (*Multi Criteria Decision Analysis - MCDA*) inclui três fases principais: estruturação, avaliação e recomendações, que interagem constantemente entre si (Clemen & Reilly, 2001). A implementação de MCDA é um processo não linear que compreende várias etapas. Estas etapas podem ser sintetizadas como (Clemen & Reilly, 2001): (1) identificação do problema/objetivo, agentes e critérios de decisão; (2) identificar alternativas; (3) decompor e modelar o problema-, (4) escolher as melhores alternativas-, (5) realizar a análise de sensibilidade e (6) dar recomendações para a implementação das alternativas seleccionadas. A estrutura do modelo de decisão proposto é sumariamente apresentada na Figura 5.1 e alguns detalhes sobre a sua implementação são apresentados nas secções seguintes.

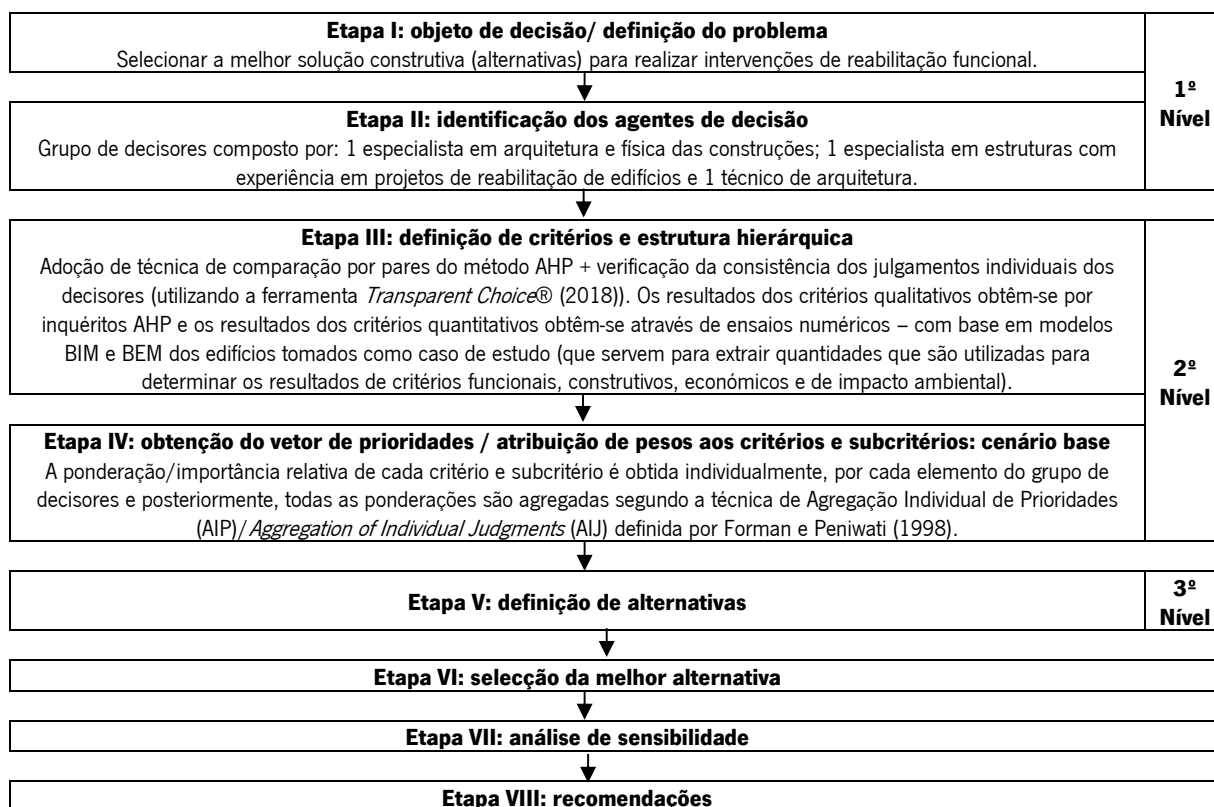


Figura 5.1. Fluxograma do processo adotado no modelo de avaliação proposto (adaptado de Clemen & Reilly (2001)).

### 5.3. Etapa I: definição do problema

O problema de decisão consiste em selecionar a melhor alternativa/solução construtiva para realizar intervenções de reabilitação funcional, considerando múltiplos critérios.

### 5.4. Etapa II: identificação dos decisores

Os decisores são responsáveis pela seleção dos critérios e atribuição de pesos aos mesmos. O grupo de decisores considerado nesta tese é composto por: 1 especialista em arquitetura e física das construções; 1 especialista em estruturas com experiência em projetos de reabilitação de edifícios e 1 técnico de arquitetura. Idealmente, a dimensão do grupo de decisores deve ser maior, mas neste caso, é apenas composto por 3 elementos. Isto porque: (1) é difícil encontrar um grande número de especialistas disponíveis para fazer as comparações por pares e que (2), simultaneamente conheçam bem as alternativas em análise. Contudo, em trabalhos futuros, a atribuição de pesos pode ser atualizada por um grupo de decisor maior e relativamente a outras necessidades específicas.

### 5.5. Etapa III: definição dos critérios e estrutura hierárquica

Os critérios são ferramentas que permitem comparar várias ações e alternativas relativamente ao ponto de vista dos agentes de decisão. Para realizar uma comparação por pares, recomenda-se que o número de critérios esteja entre três e sete, nunca excedendo nove, de modo a que a comparação não seja muito extensa e que o resultado seja coerente (Saaty, 1990). Para aplicar os métodos AHP e SAW nas próximas etapas é necessário definir todos os critérios e níveis de prioridade (como se exemplifica na Figura 5.2). O método AHP decompõe o problema de reabilitação em sub-problemas (critérios), que por sua vez são decompostos em sub-sub-problemas (subcritérios) e por aí adiante, até o problema ficar representado numa árvore de decisão (Figura 5.2). Para suportar a escolha dos critérios considerou-se um conjunto de recomendações propostas por Saaty (1980). Com base nisto e na revisão da literatura, o grupo de decisores selecionou um número específico de critérios quantitativos e qualitativos para cada caso de estudo (que serão apresentados nos capítulos seguintes). Estes critérios foram selecionados com o objetivo de definir os aspetos sob os quais a eficiência relativa das alternativas de reabilitação funcional deve ser quantificada (cobrindo aspectos económicos, sociais/estéticos/patrimoniais, construtivos, de segurança, funcionais e ambientais).

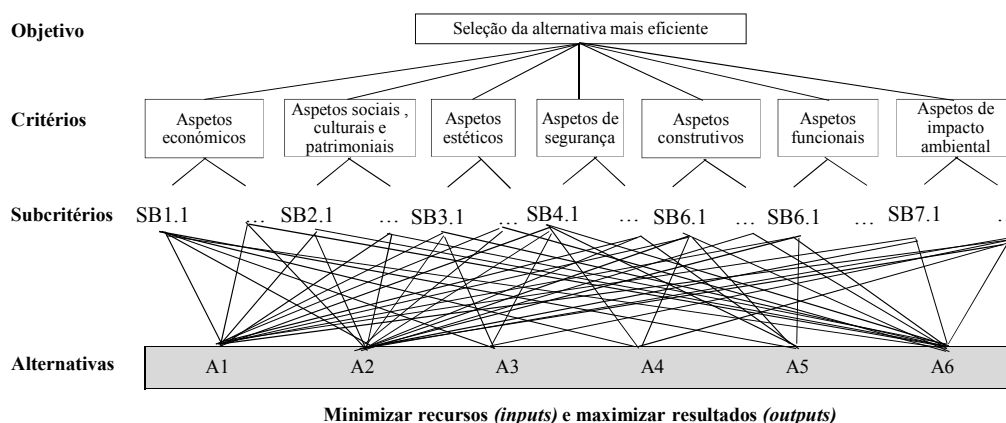


Figura 5.2. Exemplo de estrutura hierárquica AHP para selecionar a melhor/mais eficiente solução de reabilitação funcional.

De modo a acelerar a avaliação dos casos de estudo considerados nesta tese (capítulos 6,7 e 8), segundo os critérios quantitativos selecionados, criou-se um modelo *BIM* para cada edifício/caso de estudo que permitiu extrair quantidades e serviu de ponto de partida para criar um modelo *BEM* (utilizado para avaliar as necessidades energéticas de todos os cenários de reabilitação). Todos os critérios são avaliados para cada alternativa dos casos de estudo. Os resultados dos subcritérios quantitativos (associados a aspetos funcionais, construtivos e ambientais) são obtidos através de ensaios numéricos com ferramentas informáticas como o *Design Builder®* e *One Click LCA®*. Os resultados dos subcritérios quantitativos associados a aspetos económicos são obtidos através da consulta a várias bases de dados, fornecedores de materiais, instaladores, etc. O modelo proposto não considera aspectos estruturais quantitativos, por estar fora do âmbito deste estudo

(apesar de terem interesse para trabalhos futuros) e os custos associados ao fim de vida (reciclagem, aterro, etc.) dada a (1) grande incerteza no seu cálculo e (2) reduzida influência no custo total das alternativas.

A avaliação dos subcritérios qualitativos realiza-se através da atribuição de pontos, obtidos pela agregação de julgamentos individuais do grupo de decisores. Para cada subcritério qualitativo é fornecida uma descrição e uma escala numérica/qualitativa para avaliação do mesmo.

### 5.6. Etapa IV: obtenção do vetor de prioridades – atribuição de pesos aos critérios/subcritérios

Idealmente considera-se apropriado adotar um sistema de atribuição de pesos capaz de considerar a importância relativa de cada critério/subcritério. Caso contrário, todos os critérios teriam a mesma importância, o que não corresponde à realidade. Por isso, nesta etapa, a atribuição de pesos aos critérios/subcritérios realiza-se através da comparação por pares entre os elementos do segundo nível hierárquico de decisão, ou seja, entre critérios e entre subcritérios. Esta técnica insere-se no método de apoio à tomada de decisão AHP (Saaty, 1980) e neste modelo utiliza-se, parcialmente, o algoritmo de Tupenaite *et al.* (2010) (Figura 5.3(a)). O AHP tem-se tornado cada vez mais popular devido ao facto da sua utilidade ser superior à de outros métodos (Cheng & Li, 2001).

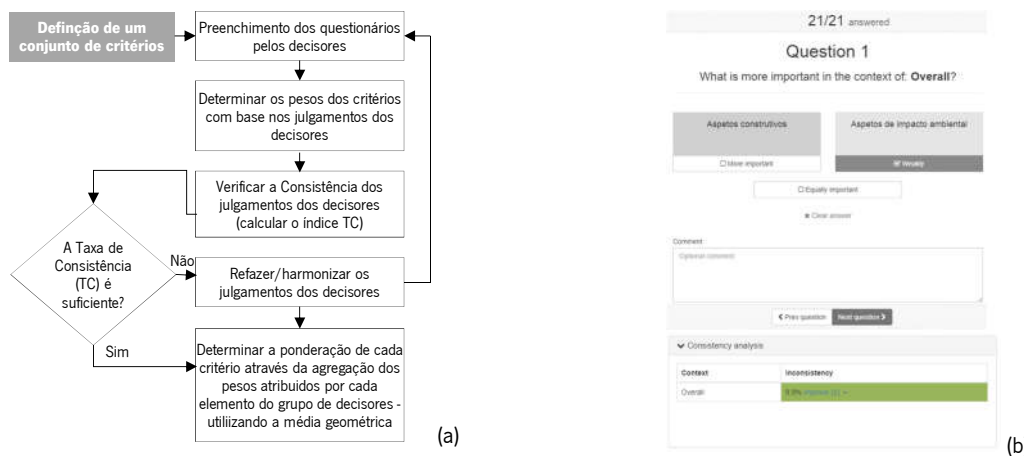


Figura 5.3. (a) Algoritmo para determinar o peso dos critérios através da comparação por pares (adaptado de Tupenaite *et al.* (2010)). (b) visualização parcial do questionário realizado com Transparent Choice AHP tool (2018).

Para realizar a comparação por pares é necessário utilizar uma escala para normalização dos resultados. As comparações realizadas pelo grupo de decisores, através de um questionário (modelado com o *Transparent Choice AHP tool* (2018) - Figura 5.3(b)), consistem em matrizes de julgamentos. Para preencher estes questionários propõe-se utilizar a escala fundamental de Saaty (1990), que varia entre 1 e 9 (Tabela 5.1). As comparações por pares realizam-se apenas entre critérios e entre subcritérios, atendendo ao problema de decisão – formando matrizes de julgamento. Posteriormente, utilizou-se o método de vetores próprios para obter os vetores de prioridade local nas matrizes de comparação por pares (ou seja, para atribuir um peso a cada critério). A consistência da comparação por pares também deve ser testada, aplicando o índice de consistência (IC) (de acordo com Saaty (1980)); se IR for inferior a 0.1, considera-se que a comparação por pares é aceitável. Depois, os julgamentos individuais de todos os decisores são agregados através da sua média geométrica (técnica de Agregação de Julgamentos Individuais (AIJ) de Forman e Peniwati (1998)) e por fim, obtêm-se os pesos locais e globais de cada critério e subcritério (exemplificados na Tabela 5.2).

Tabela 5.1. Escala numérica de Saaty (1980).

Nível de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os elementos <b>a</b> e <b>b</b> possuem igual importância.
3	Moderadamente mais importante	A experiência e o julgamento favorecem levemente o elemento <b>a</b> sobre o elemento <b>b</b> .
5	Forte importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente o elemento <b>a</b> sobre o elemento <b>b</b> .
7	Muito forte importância	O elemento <b>a</b> domina fortemente sobre o <b>b</b> , demonstração possível.
9	Importância absoluta	A evidência favorece o elemento <b>a</b> sobre o <b>b</b> com o maior grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermédios	Utilizados quando se procura uma condição de consenso entre dois elementos.
Inverso dos valores anteriores: 1/2; 1/3; 1/4; 1/5; 1/6; 1/7; 1/8; 1/9		Estes valores representam a oposição recíproca dos níveis de importância. Por exemplo, se "9" significa que <b>a</b> é muito mais importante do que <b>b</b> , "1/9" significa que <b>b</b> é muito menos importante do que <b>a</b> .

Como as comparações matriciais são subjetivas, deve ser calculada a taxa de consistência (Figura 5.4). Se a taxa for inferior a 0.10 (sendo este o valor máximo proposto por Saaty (1980) para que as avaliações numa matriz de comparações sejam consideradas consistentes), os julgamentos são aceitáveis. Caso contrário, o processo deve ser repetido. Na última etapa, os pesos locais dos vários decisores são agregados para obter o peso final dos critérios e subcritérios a adotar no método SAW.

Tabela 5.2. Exemplo de cenário de decisão (base) – resultados da atribuição de pesos para cada critério e subcritério.

Nº	Peso	Critério	Nº	Código	Peso local	Peso global	Subcritério
C1	50%	Critério 1	1	SC1.1	30%	15%	Subcritério 1.1
			2	SC1.2	30%	15%	Subcritério 1.2
			3	SC1.3	30%	15%	Subcritério 1.3
			4	SC1.4	10%	5%	Subcritério 1.4
C2	25%	Critério 2	5	SC2.1	25%	6%	Subcritério 2.1
			6	SC2.2	11%	3%	Subcritério 2.2
			7	SC2.3	52%	13%	Subcritério 2.3
			8	SC2.4	12%	3%	Subcritério 2.4
C3	25%	Critério 3	9	SC3.1	100%	25%	Subcritério 3.1

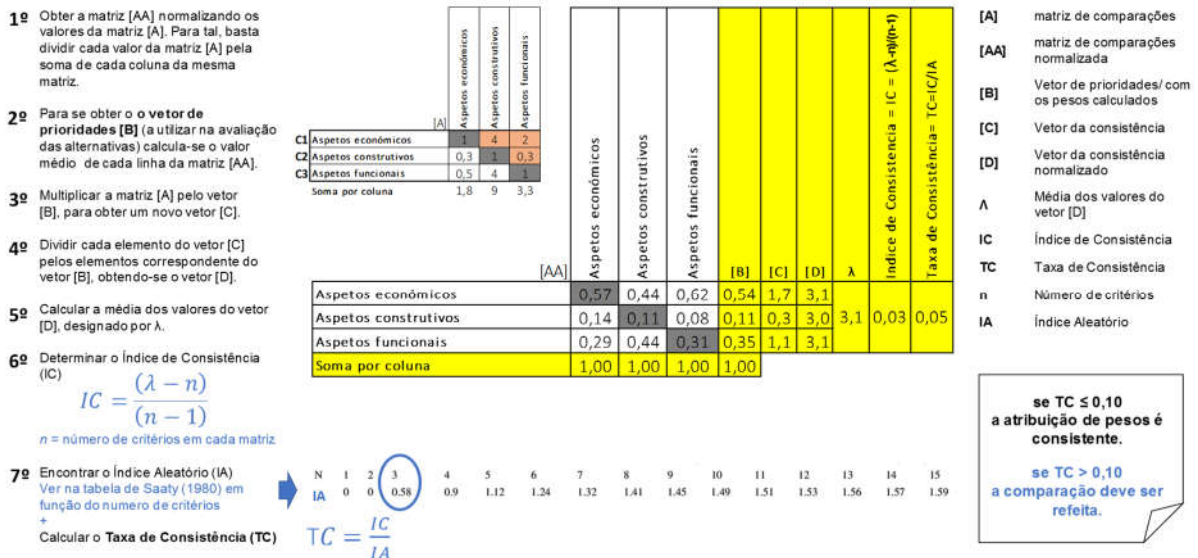


Figura 5.4. Esquema síntese com as etapas do processo de verificação da taxa de consistência.

### 5.7. Etapa V: alternativas

As alternativas correspondem às opções disponíveis, entre as quais o agente de decisão pode escolher uma. Nesta tese, as alternativas em análise correspondem às soluções construtivas apresentadas para cada casos de estudo/teste (nos capítulos 6, 7 e 8).

### 5.8. Etapa VI: normalização dos critérios e avaliação multicritério

Após a atribuição de pesos aos critérios e subcritérios, a próxima etapa consiste em atribuir pontuações a todo o conjunto de critérios, através de um único valor de pontuação. O uso de uma função de ponderação aditiva simples permite converter todos os critérios num valor global único. Para tal, utiliza-se o método de ponderação aditiva simples (Simple Additive Weighting - SAW); um método amplamente utilizado, onde a pontuação final de cada alternativa resulta da soma ponderada dos vários critérios, utilizando para tal uma escala numérica comum. Por conseguinte, utilizando a pontuação atribuída a cada critério em análise (exemplificado na Tabela 5.2), a fórmula utilizada para calcular a pontuação de cada alternativa é a seguinte:

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}$$

$V_i$  – pontuação global para a alternativa  $i$ ;  
 $w_j$  – peso do critério  $j$ ;  
 $r_{ij}$  – valor da alternativa  $i$  para o critério  $j$ ;  
 $n$  – número do critério.

(1)

Para agregar todos os critérios é necessário uma escala de conversão. A escala global a utilizar varia de 0 a 1 (sendo 0 o pior e 1 o melhor). Considerando que o objectivo seja minimizar (Equação 2) ou maximizar (Equação 3), as funções utilizadas para converter os valores dos critérios numa escala de 0 a 1 são as seguintes:

$$V(C) = \frac{(Cmax - C)}{(Cmax - CMin)} \quad (2)$$

$$V(C) = \frac{(C - CMin)}{(CMax - CMin)} \quad (3)$$

onde  $Cmax$  é o valor máximo do critério;  $C$  é o critério em avaliação;  $Cmin$  é o valor mínimo do critério.

A avaliação de diferentes critérios com diferentes unidades de medida e grandeza requiere normalização. A normalização dos critérios tem por objetivo: (1) evitar o efeito de escala na agregação de diferentes indicadores e (2) solucionar o problema de alguns critérios serem do tipo “quanto maior melhor” e outros “quanto maior pior”. Este processo é eficaz porque normaliza todos os critérios, atribuindo o valor de 1 à melhor solução e 0 para a pior; isto simplifica todo o processo, evitando erros e confusões.

Na presente etapa, todos os valores associados a cada alternativa, previamente normalizados segundo a função para maximizar ou minimizar, devem ser multiplicados pelo respectivo peso global. Posteriormente, estes valores são modelados utilizando uma árvore de decisão (exemplificada na Figura 5.5), onde a melhor alternativa será a que apresentar a pontuação mais elevada. A ferramenta informática utilizada nesta tese para implementar este modelo foi o *Precision Tree*, um add-in do *Microsoft Office Excel*, da *Palisade Decision Tools* (2018).

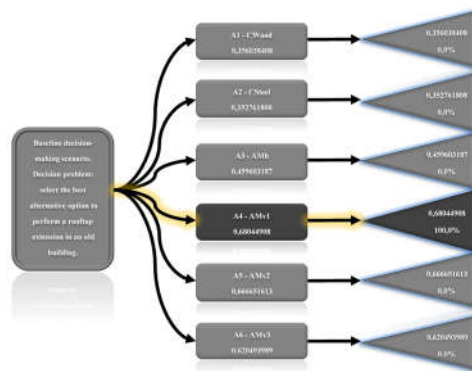


Figura 5.5. Exemplo de “árvore de decisão” utilizada para determinar qual a melhor alternativa (aparece destacada com cor diferente) para resolver um problema de decisão multicritério. Gráfico obtido através da aplicação informática *Precision Tree* da *Palisade Decision Tools* (2018).

Dependendo dos intervenientes/agentes de decisão no processo de reabilitação, a atribuição de pesos aos critérios, ou seja, o vetor de prioridades, pode ser diferente. Por isso, a penúltima etapa deste modelo consiste em realizar uma análise de sensibilidade, descrita na secção que se segue.

### 5.9. Etapa VII: análise de sensibilidade

Neste modelo, o método adotado para realizar a análise de sensibilidade consiste na simulação de todos os cenários de decisão possíveis, através da distribuição uniforme do peso dos critérios, por múltiplos ciclos. Em cada ciclo, seleciona-se um critério e o peso deste varia entre 0% a 100%, em iterações de 10 em 10% (como se exemplifica na Tabela 5.4) – cada iteração corresponde a um cenário. O procedimento adotado é o seguinte: cada critério é selecionado e o seu peso é alterado, gerando um total de  $11 \times Cn$  cenários de decisão (onde  $Cn$  corresponde ao número de critérios). Por exemplo, no ciclo C1, o peso do critério C1 varia entre 0 e 100%, enquanto os restantes critérios apresentam igual peso, relativamente à percentagem disponível, ou seja, se o peso de  $C1=X\%$  então  $C2=C3=C4=C5=C6=C7=(100-X)\%/6$ . A eficiência de uma alternativa deve ser relativa à melhor opção. Para determinar a eficiência da pior alternativa relativamente à melhor, determina-se a menor das duas e calcula-se a média; se a média for baixa significa que a eficiência da melhor alternativa relativamente à pior é reduzida. A percentagem da eficiência para cada alternativa obtém-se através da equação (4):

$$Ax \text{ Eficiência}_{Cy} = \frac{Ax\%}{A \text{ max}} \quad \text{onde } Ax \text{ é a alternativa em avaliação para o ciclo } Cy; Ax\% \text{ é a alternativa em avaliação, ponderada e normalizada; } A \text{ max é a melhor alternativa do ciclo } Cy. \quad (4)$$



Com este procedimento é possível determinar a alternativa mais eficiente (ou seja, a que predomina como sendo a melhor, na maioria dos cenários) e em que cenários essa alternativa deixa de ser a preferida.

Tabela 5.1. Exemplo dos cenários considerados na análise de sensibilidade, com a variação do peso atribuído a cada critério.

Atribuição de peso a cada critério –cenário base (gerado pelo grupo de decisores seleccionado para esta tese)						
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Aspetos económicos	Aspetos sociais, culturais e patrimoniais	Aspetos estéticos	Aspetos de segurança	Aspetos construtivos	Aspetos funcionais	Aspetos de impacto ambiental
15%	8%	7%	22%	12%	30%	6%
Ciclos de atribuição de pesos aos critérios de decisão						
Ciclo C1		Ciclo C2		Ciclo C3		Até ao ciclo C7
C1	Peso atribuído a cada critério restante (C2 – C7)	C2	Peso atribuído a cada critério restante (C1; C3 – C7)	C3	Peso atribuído a cada critério restante (C1; C2; C4 – C7)	... C7
1	<b>Cenário 1</b>	0%	16,7%	0%	16,7%	
2	<b>Cenário 2</b>	10%	15,0%	10%	15,0%	
3	<b>Cenário 3</b>	20%	13,3%	20%	13,3%	
4	<b>Cenário 4</b>	30%	11,7%	30%	11,7%	
5	<b>Cenário 5</b>	40%	10,0%	40%	10,0%	
6	<b>Cenário 6</b>	50%	8,3%	50%	8,3%	...
7	<b>Cenário 7</b>	60%	6,7%	60%	6,7%	
8	<b>Cenário 8</b>	70%	5,0%	70%	5,0%	
9	<b>Cenário 9</b>	80%	3,3%	80%	3,3%	
10	<b>Cenário 10</b>	90%	1,7%	90%	1,7%	
11	<b>Cenário 11</b>	100%	0,0%	100%	0,0%	

### 5.10. Etapa VIII: discussão de resultados e recomendações

Esta última etapa destina-se a identificar os aspetos que necessitam de ser melhorados para que o desempenho global da alternativa seleccionada, como sendo a melhor para resolver o problema de decisão, possa ser incrementado. Em futuros trabalhos, a atribuição de pesos pode ser atualizada relativamente a necessidades específicas do decisor.

**Nota/considerações finais:** em síntese, neste capítulo, mostrou-se em que medida os modelos de avaliação multicritério podem ser utilizados para apoiar tomadas de decisão associadas a intervenções de reabilitação e, de nos capítulos seguintes pretende-se implementar o modelo proposto para determinar em que medida as soluções que utilizam membranas arquitectónicas constituem uma alternativa eficiente às soluções convencionais. Salienta-se que o resultado final depende de um número finito de alternativas, não sendo necessariamente as ótimas.

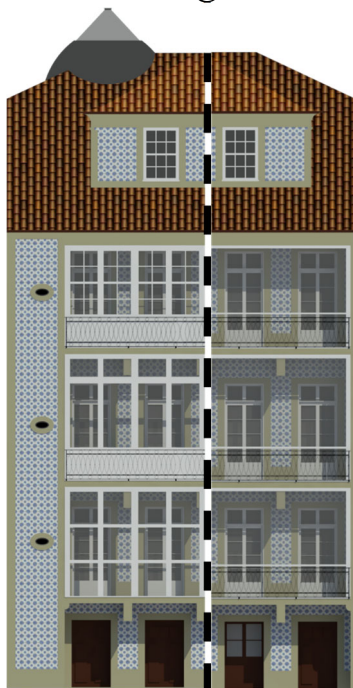
De seguida - nos capítulos 6, 7 e 8 - apresentam-se os casos de estudo/testes onde foi implementado o modelo descrito neste capítulo. Uma vez que todas as etapas deste modelo são válidas para avaliar todos os casos de estudo apresentados nos próximos capítulos, a descrição detalhada de cada etapa, apresentada neste capítulo, não voltará a ser repetida nos capítulos seguintes.

**Agradecimento:** deste capítulo derivou em parte o artigo publicado em *Architectural Engineering and Design Management*, 21 de Agosto de 2019, direitos de autor reservados a Taylor & Francis, disponível *online* em: <http://www.tandfonline.com/DOI: 10.1080/17452007.2019.1656597>.

## Capítulo

# 06

### *Teste nº 01 - abordagem de integração*



*Figura 6.1. Imagem síntese das soluções construtivas de referência para encerramento de varandas (à esquerda) e alternativa proposta em membrana (à direita).*

*Entende-se por abordagem integrada a adoção de soluções que se confinam ao limite físico do edifício a reabilitar, ou seja, que se integrem nos limites físicos do mesmo. O presente exercício avalia a eficiência de soluções alternativas, numa abordagem arquitetónica de integração, para criação de espaços de ganhos solares-passivos indiretos/estufas integradas<sup>1</sup>/marquises<sup>2</sup>, resultantes do encerramento de varandas existentes para aumento da área útil, reorganização espacial e melhoria do desempenho térmico-energético/acústico dos edifícios, especialmente antigos. Serão averiguadas as orientações solares onde a integração deste tipo de soluções pode ocorrer com sucesso e explorar os aspetos construtivos e de compatibilidade arquitetónica das soluções de estufa integrada com membranas, enquanto alternativas às soluções de referência identificadas, com vidro. Em particular, pretende-se auxiliar os arquitetos a avaliar corretamente (em termos funcionais, económicos e ambientais) as consequências do uso deste tipo de sistema solar-passivo, com recurso a elementos construtivos de membrana, sobretudo em climas onde as necessidades de aquecimento são superiores às de arrefecimento, como sucede no Norte e Centro de Portugal. Para realizar uma análise comparativa entre as várias soluções, foram avaliados aspetos de impacto ambiental e económico no ciclo de vida e aspetos térmicos (por experimentação e simulação), apontando as vantagens e limitações das soluções em membrana. Para realizar a recolha de dados experimentais, implementou-se um protótipo de uma solução em membrana num edifício antigo selecionado como caso de estudo. Estes dados permitiram validar as simulações numéricas de comportamento térmico e testar aspetos relacionados com o processo construtivo.*

<sup>1</sup> As estufas integradas são sistemas solares passivos com ganhos indiretos que podem ser facilmente integradas para a reabilitação de um edifício, devido à simplicidade da sua construção e de instalação na estrutura do edifício. Quando integradas num edifício habitacional, as estufas, apresentam duas funções principais: melhorar o balanço energético da habitação e aumentar a área útil de habitação. As abordagens e considerações projetuais para a realização de espaços com estas funções são muito distintas e, por isso, para conceber uma estufa que sirva as duas funções, é necessário estabelecer compromissos na fase de conceção. O desempenho energético no compartimento adjacente a uma estufa é obtido através dos ganhos solares diretos (representados pela radiação que penetra diretamente no ambiente através das superfícies transparentes da estufa) e dos ganhos solares indiretos (obtidos pela fração de energia solar que atravessa a área transparente da estufa e é absorvida pelas paredes opacas do mesmo, com uma transferência sucessiva de energia para o espaço adjacente, devido à temperatura do ar na estufa ser geralmente superior à temperatura do ar exterior) (Oliveti *et al.* 2014).

<sup>2</sup> Uma marquise é um tipo de estufa, que pode ser definido como: varanda protegida por paredes envidraçadas; modelo vernacular de ampliação de um espaço habitável; compartimento de dimensões reduzidas.

## 6.1. Introdução

### 6.1.1. Reflexão sobre a reabilitação térmica/energética em Portugal

A adoção de medidas de melhoria da eficiência energética e ambiental é absolutamente fundamental para os países em que o consumo de energia para aquecimento é contínuo no período de inverno. Contudo, a realidade climática, cultural e económica nacional é diferente (Freitas *et al.*, 2010) e, por isso, as opções técnicas têm de ter em consideração, sobretudo, o conforto passivo, pelo que a opção por determinadas soluções e o seu dimensionamento devem ser sempre fundamentadas por critérios técnicos e económicos objetivos.

A conservação de energia, no período de inverno, conduz a elevadas espessuras de isolamento térmico (consubstanciada em exigências regulamentares crescentes) que se traduzem numa maior complexidade construtiva e em consequentes patologias/anomalias de carácter higrotérmico (aumento do risco de condensações no interior dos elementos construtivos e na superfície exterior das fachadas, que aumentam o risco de degradação). Segundo Freitas (2015), quando se utilizam técnicas de isolamento pelo interior, que reduzem a inércia térmica, deve questionar-se se em edifícios cujas famílias não os aquecem, por razões económicas ou culturais, se justifica fortes espessuras de isolamento térmico, cujo resultado prático será uma redução mínima das perdas no inverno, mas um substancial aumento da temperatura no verão. A especificidade climática de Portugal não se coaduna com a Diretiva 2010/31/EU para a eficiência energética, pensada para os climas frios do norte da Europa onde a eficiência energética se afigura como uma prioridade, tendo em conta os inevitáveis custos com aquecimento (Freitas, 2015). Em Portugal, o clima, os aspetos económicos e os próprios hábitos culturais determinam um comportamento diferente. De um modo geral, o aquecimento não é feito de forma contínua, mas apenas quando os ocupantes sentem essa necessidade. A prova-lo está o facto de a maior fatia do consumo energético nas casas portuguesas estar alocada às cozinhas. A percentagem do aquecimento no consumo doméstico de energia em Portugal é de 21% (dados de 2012), sendo que a média da Europa é de 67%. O peso do aquecimento e do arrefecimento no consumo global de energia em Portugal é de apenas 4%, o que obriga, segundo Freitas (2015), a colocar a tónica no conforto e não na eficiência energética. Isto consegue-se adaptando as soluções às condições de utilização do edifício; bem como explorando abordagens integradas de reabilitação, com soluções solares passivas e reversíveis, como o encerramento de varandas com elementos transparentes, em alternativa à adição de isolamento térmico sobre a superfície exterior ou interior de fachadas, sobretudo as de edifícios antigos.

### 6.1.2. Justificação do caso de estudo

A principal motivação para encerrar varandas é aumentar a usabilidade do espaço, protegendo-o das variações climáticas, da poluição e do ruído. Do ponto de vista estrutural, o encerramento de uma varanda forma uma barreira que protege a estrutura interna contra a água da chuva, a neve e a poluição do ar. Outro benefício é o aumento da temperatura interior dos espaços adjacentes (Hilliaho, 2017). A combinação destes benefícios diminui a presença de humidade nas paredes externas do compartimento adjacente e constitui uma boa proteção estrutural, particularmente vantajosa para aumentar a vida útil das estruturas de betão armado não resistentes ao gelo e ao degelo, comuns edifícios dos anos 70 (Matilla, 2002), adiando a sua reabilitação entre seis e dez anos – traduzindo-se numa intervenção com impacto positivo nos custos de manutenção dos edifícios.

Segundo Hilliaho (2017), a motivação para encerrar varandas com elementos transparentes não é a de otimizar as condições de conforto do compartimento adjacente, ou reduzir custos energéticos, e isso resulta da: a) crença generalizada de que os espaços envidraçados não têm nenhum benefício direto na poupança energética em termos de consumo; b) falta de informação acessível sobre os principais fatores que afetam a poupança de energia para aquecimento e o comportamento interior dos espaços envidraçados; c) complexidade e intensidade de trabalho dos atuais procedimentos de cálculo e d) não existência de requisitos especiais para a climatização dos espaços interiores de varandas envidraçadas. O facto de existirem utilizadores que deixam as varandas envidraçadas parcialmente abertas no inverno, ou totalmente fechadas no verão, é revelador da falta de conhecimento do público em geral sobre os benefícios de poupança do consumo energético para aquecimento deste tipo de soluções. Por isso, existe necessidade de fornecer informação sobre o impacto que o encerramento de varandas pode ter no consumo de energia e no conforto interior dos espaços existentes.

Em Portugal, dos 3.5 milhões de edifícios existentes, cerca de 2.5 milhões (aprox. 65%) foram construídos antes de 1990 (INE, 2013) – ano da publicação do primeiro regulamento das características de comportamento térmico de edifícios – data antes da qual a aplicação de materiais de isolamento térmico era praticamente inexistente, resultando em edifícios com fraco desempenho energético. Por conseguinte, quando se justifique<sup>3</sup>, a utilização de espaços solares (estufas) ligados a estes edifícios é muito atraente, dado o grande potencial solar de Portugal (Figura 6.2), e apresenta vantagens económicas, em comparação com as abordagens tradicionais baseadas na utilização de isolamento térmico (Aelenei *et al.*, 2014).

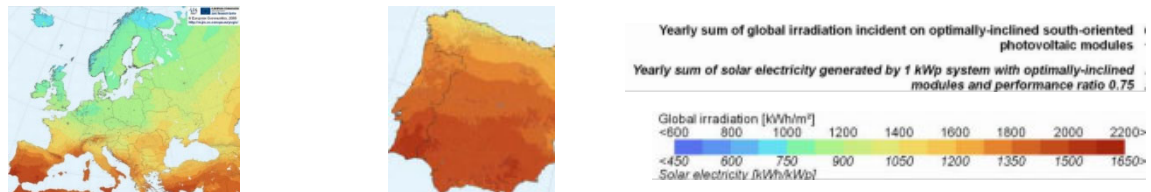


Figura 6.2. Dados anuais de irradiação global na Europa; potencial de energia fotovoltaica (Enterra, 2018).

Segundo Aelenei *et al.* (2014), as estufas integradas foram utilizadas com êxito na reabilitação de edifícios existentes com fraco desempenho energético. De um modo geral, os estudos mostram que as estufas podem ser eficazes durante todo o ano, se devidamente concebidas para tirar pleno partido do clima local e o sobreaquecimento for resolvido por meios passivos. Para além disso, também se verifica que as necessidades de aquecimento são superiores às necessidades de arrefecimento na maior parte do território de Portugal. Num estudo sobre a influência das estufas para o desempenho térmico de um edifício residencial, Aelenei *et al.* (2014), através de simulações numéricas, verificou que o potencial de poupança energética no inverno é muito significativo, variando entre 100% em Faro, 77% no Porto e até 48% em Bragança. Contudo, relativamente ao desempenho térmico no verão, algumas localizações ficam sujeitas a risco de sobreaquecimento. É de referir que neste estudo se avaliou a influência de vários fatores no desempenho térmico de um edifício residencial com vários tipos de estufa: adossada, integrada, parcialmente integrada e em 6 cidades portuguesas: Lisboa, Porto, Faro, Bragança, Évora, Coimbra.

As intervenções de reabilitação funcional podem resultar em ampliações, renovações ou alterações; sendo relevante referir que, de acordo com o INE (2017), 68% das intervenções de reabilitação em Portugal são ampliações (Figura 6.3(a)) e que 49% dos 63 projetos de reabilitação com membranas identificados no Capítulo 4 corresponde a intervenções de ampliação (Figura 6.3(b)).



Figura 6.3. (a) Percentagem de trabalhos de reabilitação por tipo de intervenção (adaptado de INE, 2017). (b) Tipos de intervenção de reabilitação com membranas.

Relativamente ao tipo de ampliação a que se refere este capítulo, menciona-se o seguinte: corresponde à extensão de espaço útil fechado, que não envolve a criação de novos volumes ou pavimentos, porque estes já existiam no contorno do edifício antes da intervenção de reabilitação. Por isso, a abordagem arquitetónica associada a este tipo de intervenção é designada por integração. No âmbito de uma reabilitação funcional, a adição de funções a um edifício através de uma ampliação pode levar à revisão de toda a estrutura de modo a encontrar um diálogo entre os novos e os antigos elementos construtivos, tornando-se um trabalho metódico, com o objetivo de encontrar: (a) coerência linguística; (b) compatibilidade estrutural e (c) ligação viável entre diferentes materiais e tecnologias.

<sup>3</sup> Partindo do princípio que a estrutura base não apresenta danos significativos, o grau das intervenções está maioritariamente associado a decisões arquitetónicas (espaço, função, conforto, etc.) que podem impor grandes alterações/transformações.

## 6.2. Conceção de estufas

### 6.2.1. *Arquitetura da transparência: as estufas ao longo dos séculos*

Durante séculos, grandes envidraçados constituíram interessantes características arquitetónicas e estruturais em edifícios, donde resultaram grandes espaços fechados, novas soluções arquitetónicas e detalhes inovadores (Hix, 1974) (Pevsner, 1976). Globalmente, os espaços envidraçados da maior parte dos edifícios portugueses contariam essa tendência. A maior parte destes espaços são bastante simples e relativamente pequenos; encontram-se integrados em edifícios residenciais e sua principal função é servir como um espaço exterior abrigado. Desde a década de 1970, a maioria dos blocos de apartamentos em Portugal foi construída com varandas envidraçadas.

Durante séculos, espaços envidraçados, como as estufas, têm constituído espaços de climatização passivos, permitindo mediar a transição entre o interior da habitação e o clima exterior. A primeira estufa, denominada de estufa *lápiss specularis*<sup>4</sup> começou por ser construída durante o Império Romano e estava associada à conservação de frutos a uma escala distrital (Tresider *et al.*, 1986). O “efeito de estufa” já era conhecido e utilizado pelos Romanos como fonte suplementar de calor para o *caldarium* (Yañez, 1998). Contudo, só no Renascimento é que o antecessor original da estufa emergiu. O *Jardim Botânico* surgiu pela primeira vez em Pisa, em 1543, e rapidamente este tipo de estrutura se difundiu por toda a Europa (Tresider *et al.*, 1986). Deste modo, a estufa, por permitir a plantação de plantas exóticas, passou a representar um atributo de extravagância da aristocracia, um bem necessário para a integração social de indivíduos importantes (Patrício *et al.*, 1998).

Um exemplo de uma solução de estufa integrada em edifícios residenciais que se aproxima das soluções de referência identificadas para este estudo, é a solução vernacular dos Balcãs denominada de *hayat ou liakoto*, uma solução arquitetónica de espaço intermédio (estufa integrada) no segundo andar de edifícios residenciais. Em Persa e Árabe, *hayat* significa espaço coberto, ou anexo de um edifício; constitui uma ampliação horizontal localizada no segundo andar de um edifício destinado a promover o conforto térmico do edifício. É um espaço protegido, construído principalmente com madeira e argila, fechado por vidros e persianas de madeira exteriores; possui 1.5m de profundidade, podendo considerar-se um corredor. No inverno, as janelas são fechadas de modo a fornecer isolamento térmico, enquanto no verão as janelas são abertas para promover a ventilação natural dos compartimentos adjacentes ao *hayat*. As persianas permanecem fechadas no exterior de modo a proteger o espaço intermédio e os adjacentes da chuva e dos ganhos de calor no verão. Os benefícios desta solução foram reconhecidos em climas moderados nos séculos XVI – XVII.

Durante a Revolução Industrial, o desenvolvimento das indústrias de ferro e de vidro permitiram a generalização das estufas por todo o Reino Unido, alcançando a população em geral, independentemente do seu *status* social. Além disso, durante este período, em França, a ideia de residência comum para pessoas e plantas ganhou expressão através das estufas (como resultado de um profundo culto e admiração da Natureza), numa altura em que os Expressionistas do século XX argumentavam que a arquitetura devia transparecer o pensamento social, materializado através de soluções construtivas transparentes. Apesar da sua inegável importância como abrigo para plantas, levando ao crescimento de frutos fora do seu ambiente natural, apenas nos anos 80 do século XX, arquitetos e engenheiros começaram a associar as estufas à economia de energia e ao conforto térmico (Hurpy *et al.*, 1981 *apud* Patrício *et al.*, 1998). Deste modo, o reaparecimento das estufas resultou como uma consequência das crises energéticas ocorridas em 1970.

Na atualidade, as estufas também se tornaram espaço habitáveis. Exemplo disso é o projeto de reabilitação funcional dos edifícios G, H, I do quarteirão do *Grand Parc* em Bordéus (transformação de 3 edifícios sociais construídos no início dos anos 60) que consistiu na adição de estufas/jardins de inverno, com aumento da área envidraçada (a sul) para melhoria das condições luminicas. Neste projeto, concebido pelos arquitetos Lacaton & Vassal, as estufas, para além de melhorarem o desempenho térmico do edifício, redefinem os espaços de estar existentes através da criação de ligações entre compartimentos, ajudando ao mesmo tempo a regular a sua temperatura interior (El Croquis, 2015). Além do mais, este projeto constitui um exemplo de uma reabilitação

<sup>4</sup> Conhecido como espelho, é um tipo de pedra de gesso selenítica espelhada e translúcida. Foi um mineral altamente valorizado na Roma antiga, explorado para a produção de janelas em vidro.

feita com custos reduzidos. O edifício existente, julgado desprovido de qualidades estéticas e funcionais (El Croquis, 2015), passou a ter tipologias maiores, com mais espaços de estar, mais conforto e uma melhor integração com a envolvente circundante ao edifício.

#### 6.2.2. *Aspetos a considerar na ampliação do espaço habitável com uma envolvente transparente para aproveitamento dos ganhos solares*

Na fase inicial da conceção de um espaço com uma envolvente transparente, designado de *estufa*, deve definir-se o seu propósito: (1) melhorar o balanço energético da habitação e/ou (2) criar uma zona que pode ser temporariamente habitável. Será importante definir antecipadamente quais os aspetos mais importantes para cada propósito, pois alguns podem apresentar efeitos opostos.

Quando a superfície transparente da estufa é pequena comparativamente à área útil do edifício, a massa térmica não é relevante, sendo o ar quente introduzido na habitação através de aberturas ou ventilação forçada (Fabute, 2003 *apud* Mendonça, 2005). Contudo, quando a proporção entre a superfície transparente e a área útil da habitação é de 1/6 ou mais, deverá incluir-se massa térmica para reduzir as flutuações de temperatura na estufa: uma parede de separação entre a estufa e o compartimento adjacente com 20 a 30cm de material com elevada densidade, um pavimento de estufa de 10 a 15cm de betão, ou bidões de água poderão ser utilizados para este fim (Mitjá, 1999 *apud* Mendonça, 2005). Um outro aspeto a considerar é o isolamento da estufa durante a noite. Deverá ser isolada, tanto a superfície transparente, com um dispositivo de proteção que proporcione algum isolamento térmico noturno, como os vãos de separação entre a estufa e a habitação (Mitjá, 1999, *apud* Mendonça, 2005).

As estufas aplicadas como sistemas de ganho solar passivo apresentam alguns conceitos e princípios de funcionamento comuns aos duma estufa agrícola. Em ambos os casos pretende-se a criação de um microclima, onde a temperatura é incrementada por influência da radiação solar, sendo o efeito de estufa o mecanismo que ocasiona este incremento. Em síntese, existem vários aspetos que são importantes na concepção de estufas, dos quais se destacam, segundo Mendonça (2005): (1) orientação - desta depende em grande medida a eficácia da captação de energia solar por parte da estufa; a orientação a Sul é sempre ótima, já que interessa incrementar os ganhos na estação fria; (2) tipo de estrutura - dependendo do material que se utilize, o tipo de estrutura do caixilho vai influenciar o fator de obstrução do sistema, pelo que se torna importante optimizá-lo, para além da consideração de fatores económicos; (3) material transparente empregue - o fator mais importante é o tipo de material transparente utilizado e do qual irá depender a quantidade de energia transmitida e retida, determinada em função da selectividade do seu espectro; as suas características fixam a opacidade aos comprimentos de onda larga, estabelecendo a intensidade do efeito de estufa: quanto mais escuras forem as superfícies opacas da estufa, mais eficazmente a massa térmica pode armazenar o calor durante o dia e libertá-lo durante a noite.

#### • **Comportamento térmico das estufas**

Devido à grande superfície de captação solar, as temperaturas diurnas que se fazem sentir no interior das estufas são muito elevadas e, durante a noite, pelos inevitavelmente elevados coeficientes de transmissão térmica das superfícies transparentes, tornam-se frias. Por este facto, as elevadas oscilações de temperatura só podem ser toleradas em espaços anexos não úteis, onde não há exigências de conforto. No desenho de estufas adossadas a espaços habitáveis, temos uma situação de ganho indireto, podendo neste caso aproveitar-se ao máximo esta possibilidade. O calor captado pela estufa pode levar-se diretamente a qualquer lugar da habitação, ou ser armazenado pela massa térmica para se poder utilizar em período noturno, quando já não há radiação solar. Se existir uma superfície transparente a separar a estufa do compartimento adjacente, um fragmento da radiação solar pode atravessar a estufa, sendo transmitido diretamente pelas superfícies transparentes, especialmente quando a altura do Sol é baixa, nos meses de Inverno (Figura 6.5(a)). No caso de também existirem paredes maciças localizadas entre a estufa e a habitação, estas jogam um papel similar ao de uma parede de Trombe, pelo que neste caso temos um sistema de ganho indireto por convecção natural. Desenvolve-se um fluxo de calor por condução da superfície quente para o pavimento e o solo, e uma troca de calor por convecção irá aquecer o ar da estufa. Este último fenómeno reduz as perdas de calor da habitação e providencia ganhos de calor; o calor acumulado libertar-se-á durante a noite (Figura 6.4(b)). A circulação de ar, em sistema fechado, entre o compartimento útil e a estufa, é desenvolvida devido ao efeito de termossifão, tal como numa

Parede de Trombe. Esta transferência de calor por convecção pode ser diminuída, aplicando portas e janelas estanques ao ar, ou aumentada com a aplicação de aberturas, orifícios, ou ventiladores mecânicos. O ar quente poderá ser direcionado naturalmente para o interior do compartimento útil através de aberturas na parte superior (Figura 6.4 (b) e (d)), ou forçado a dirigir-se para baixo, através de ventilação forçada (Figura 6.5). Os ventiladores podem ser acionados manual ou automaticamente, no caso de serem controlados por termostatos situados dentro da habitação. Se a temperatura do ar na estufa excede a do compartimento, as aberturas entre a estufa e a casa deverão ser abertas, com o fluxo de calor por convecção a proporcionar um ganho de calor.

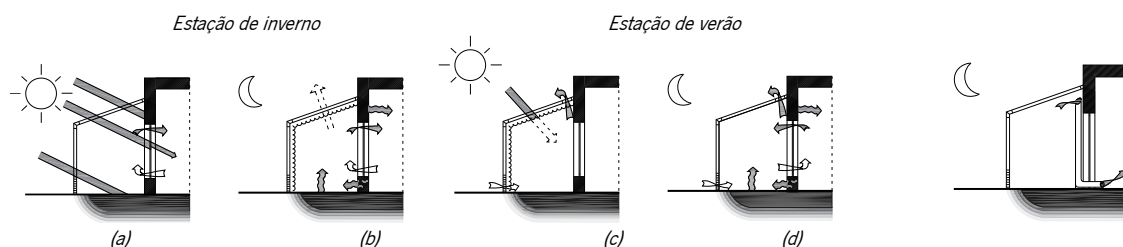


Figura 6.4. (a) e (c) Estufa adossada durante o dia (adaptado de MENDONÇA, 2005); (b) e (d) Estufa adossada durante a noite com sistema termostifão de fluxo do ar.

Figura 6.5. Sistema de fluxo de calor suportado por dispositivos mecânicos.

A inclusão de massa térmica na estufa permite amortecer as oscilações de temperatura. Não é indispensável, mas é importante quando se pretende obter condições mínimas de habitabilidade. As paredes de separação entre habitação e estufa são as mais indicadas para a colocação da massa térmica; estas recebem radiação solar direta durante o dia, conduzindo uma parte para a habitação e outra para manter a estufa quente. Para além disso, a massa da parede servirá para reduzir a amplitude térmica diária no compartimento útil. No presente caso de estudo, as paredes existentes, que passaram a ser de mediação entre a estufa e o compartimento adjacente, apresentam uma inércia térmica elevada. Uma outra posição para colocar a massa térmica é o pavimento da estufa. Neste caso deverá ser constituído por um material pesado, com uma grande capacidade térmica. Se for num piso térreo, não deverá ser isolado relativamente ao terreno situado por baixo, já que este também pode constituir uma fonte de calor quando a temperatura da estufa é baixa. No entanto, é importante um bom isolamento perimetral do pavimento da estufa para evitar a perda do calor armazenado (Fabute, 2003 *apud* Mendonça, 2005).

A grande superfície exterior transparente da estufa permite a captação da energia solar, mas apresenta o inconveniente das grandes perdas térmicas a que dá origem. As medidas para reduzir estas perdas podem ser de vários tipos, e aplicam-se ao presente caso de estudo, destacando-se:

- Tipo de material transparente ou translúcido utilizado: a utilização de pano simples permite a máxima entrada de radiação solar, mas não evita a rápida descida da temperatura durante o período noturno, acompanhando a eventual descida da temperatura exterior em regiões de grande amplitude térmica diária. Formas de reduzir este fenómeno passam pela duplicação de panos transparentes, reduzindo as perdas, e pela adoção de materiais transparentes com tratamentos de baixa emissividade na superfície. A colocação de três ou mais panos transparentes, ou de elementos translúcidos não é recomendável, pois o efeito de redução das perdas térmicas não compensa a diminuição na quantidade de radiação solar que entra na habitação e, sobretudo, pelo incremento da complexidade e custo acrescidos (Mendonça, 2005; Historic Scotland, 2015);
- Isolamento noturno: o isolamento móvel é mais eficaz, já que permite reduzir drasticamente as perdas térmicas nocturnas da estufa sem diminuir a quantidade de radiação solar captada durante o dia. Os problemas que esta solução comporta são económicos e de localização e recolha do isolamento durante o dia, quando não é necessário.

Em síntese, a generalidade das estufas apresenta as seguintes vantagens: reduzem as perdas de calor do edifício, atuando como espaço tampão; a variação de temperaturas dia/noite nos espaços habitáveis adjacentes é pequena; a estufa adossada pode adaptar-se perfeitamente a edifícios já existentes e permite o incremento da superfície habitável. Por outro lado, a generalidade das estufas apresenta os seguintes inconvenientes: a eficácia térmica da estufa varia muito segundo a sua configuração, o que torna difícil prever o seu comportamento; a construção de estufas de elevada eficácia térmica apresenta custos elevados, pois requerem grandes superfícies



a isolar durante a noite; as oscilações de temperatura dentro da estufa são consideráveis e convertê-la em espaço habitável é caro, pois requer a inclusão duma elevada massa térmica adicional (Mitjá,1986 *apud* Mendonça, 2005; Oliveti *et al.*, 2014), principalmente se não for num piso térreo, ou o edifício onde se integre não possuir elevada inercia térmica.

### 6.2.3. Materiais utilizados nas superfícies transparentes

Na escolha do tipo de material transparente empregue deverão considerar-se vários aspetos, dos quais se destaca: o espectro da transmitância; a vida útil do material; o custo económico; a energia incorporada. Os principais materiais transparentes utilizados em estufas são o vidro e as membranas poliméricas. A Figura 6.6 e Tabela 6.1 apresentam as propriedades óticas de vários polímeros em painel e em membrana, tendo por comparação o vidro.

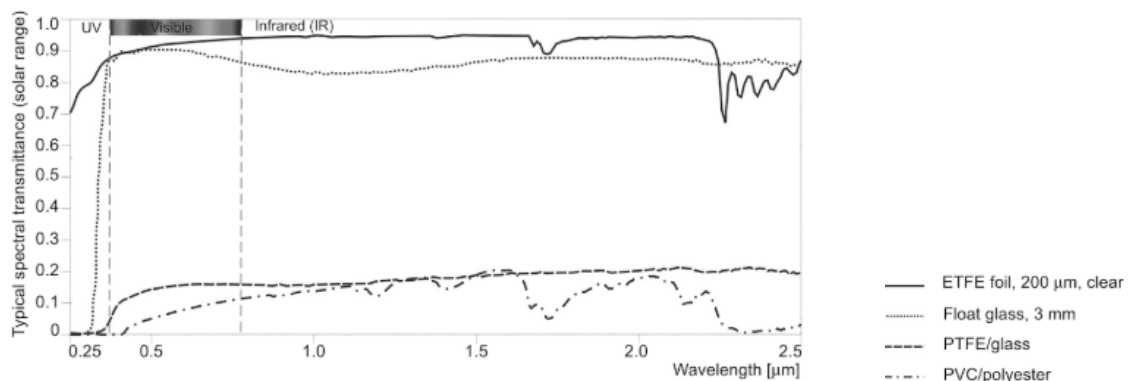


Figura 6.6. Transmissão solar típica de vários polímeros e membranas, numa faixa de radiação solar UV, visível e próxima de IR (0.25 - 2.5 µm comprimento de onda (wavelength)), comparativamente ao vidro (Ming Wei Sun *apud* Knippers *et al.*, 2011).

Tabela 6.1. Propriedades relevantes de alguns materiais translúcidos e transparentes (*adaptado de Knippers et al., 2011*).

	Vidro Simples	Membrana PVC simples	Membrana ETFE simples	Membrana ETFE dupla em painel Holscot (2017)
<b>Espessura (mm)</b>	3	0.8	0.25	0.25 (30) 0.25
<b>Peso próprio (kg/m<sup>2</sup>)</b>	7.50	1.16	0.43	0.86
<b>Transmissão solar T<sub>sol</sub> (direto)</b>	87%	85%	93%	84%
<b>Refletância solar R<sub>sol</sub> (direta)</b>	8%	9%	6%	6%
<b>Transmissão visual T<sub>vis</sub> (direta)</b>	90%	88%	92%	81%
<b>Refletância visual</b>	8%	10%	7%	7%
<b>Transmitância UV</b>	66%	82%	86%	-
<b>Refletância UV</b>	8%	11%	12%	12%
<b>Emissividade térmica normal (T = 300K)</b>	0.90	0.60	0.83	0.83

- **Vidro (material de referência)**

O vidro é o material que inicialmente se utilizou nas estufas, já que era o único que dispunha das características exigidas para o seu invólucro. Quando utilizado em estufas apresenta um comportamento seletivo face ao espectro de radiação solar (Figura 6.6). Para comprimentos de onda curtos (<0,8 µm), a transparência do vidro simples é da ordem dos 90%. No entanto é relativamente opaco às radiações de comprimentos de onda longos (>5 µm), pelo que a radiação libertada pelo solo ou laje de pavimento e paredes se reflete maioritariamente na face interior do vidro e não se perde para o exterior, produzindo-se o efeito de estufa. Para além disso, o espectro de radiação solar praticamente não se altera ao atravessar o vidro. A radiação térmica não produz nenhum efeito de degradação ao vidro, tal como a água, ou mesmo os elementos químicos resultantes da poluição atmosférica, pelo que se pode utilizar por um longo período de tempo, quase indeterminado em condições normais (Colás, 1987 *apud* Mendonça, 2005).

Por outro lado, o vidro apresenta algumas desvantagens, tais como: pouca resistência mecânica (ao impacto); elevado peso (Tabela 6.1) que exige estruturas de suporte com alguma dimensão que produzem obstrução e limitam os ganhos solares; custo elevado resultante de um processo de fabrico onde são necessárias altas temperaturas, logo um gasto intensivo de energia, com reflexo igualmente negativo no impacto ambiental pela produção de CO<sub>2</sub>; transporte e manuseamento delicados.



- **Membranas poliméricas (alternativa mais comum)**

A introdução de membranas poliméricas em estufas agrícolas representou uma autêntica revolução, já que permitiu um aumento muito significativo da sua área. Estas trouxeram igualmente a utilização de estruturas mais simples e ligeiras, com o que se conseguiu um menor factor de obstrução e uma redução muito significativa do custo. Em termos de estufas destinadas a espaços habitacionais, como a área não é tão significativa, a utilização de membranas poliméricas não é tão vantajosa como no caso das estufas agrícolas (Colás, 1987 *apud* Mendonça, 2005). O polímero em forma de membrana mais utilizado em estufas é o Policloreto de vinilo (PVC). Com membranas de PVC (espessura: 0,8mm) o efeito de estufa é menor do que com chapas de PVC, já que estas últimas conseguem maiores diferenças de temperatura entre o interior e o exterior (Colás, 1987). De todos os materiais poliméricos o PVC é o mais económico, e por isso o mais utilizado. Tem boa resistência mecânica ao rasgo produzido pelo vento e gera um bom efeito de estufa. Apresenta também uma boa resistência química aos poluentes atmosféricos e uma condutibilidade térmica menor do que o vidro.

As principais vantagens desta membrana são: baixo custo; baixo peso próprio, que permite reduzir a estrutura de suporte e, conseqüentemente, o fator de obstrução associado a esta; boa estanquicidade ao ar e à chuva; e maior resistência mecânica ao impacto. As características negativas que poderão ser apontadas são as seguintes: menor transparência; efeitos de condensação devido ao arrefecimento noturno (podem reduzir-se introduzindo uma duplicação da membrana com uma caixa de ar de 3 a 5cm (Mendonça, 2005)); menor durabilidade que o vidro, tendo que ser substituído nalguns casos após somente cinco anos de uso; pouca resistência à intrusão; reduzido isolamento acústico.

- **Membrana de ETFE (alternativa menos comum)**

A membrana de ETFE consiste numa película de filme polimérico feito dum copolímero resultante da ligação de monómeros de etileno e tetrafluoretileno (Robbin, 1996). Em 1938, Dupont sintetizou pela primeira vez o Teflon® PTFE (Politetrafluoretileno), que apresentava reduzida fricção e uma resistência química invulgar (Vector Foiltec, 2016). O advento do PTFE abriu caminho para o desenvolvimento de outros produtos à base de fluoropolímeros, incluindo o ETFE (Etileno Tetrafluoretileno), e no início dos anos 70 foram comercializadas as primeiras películas extrudidas de ETFE sob as marcas Tefzel® e Hostaflon®. Os primeiros setores a reconhecer plenamente o potencial deste material foram a indústria das piscinas e dos jardins zoológicos<sup>5</sup>. Este material consegue ser praticamente tão transparente como o vidro, mas ao mesmo tempo ser flexível, apresentar uma grande resistência à tração e leveza, o que o torna o único material passível de ser utilizado em soluções de membrana transparente autoportante. Craig Schwitter, da Buro Happold Consulting Engineers, estudou e usou películas de ETFE e catalogou as suas propriedades (Robbin, 1996), concluindo que, ao contrário de outras membranas poliméricas, as de ETFE são praticamente insensíveis aos raios ultravioleta; apresentaram uma perda de resistência do material inferior a 10%, após um teste de exposição solar acelerada equivalente a 10000 horas de exposição solar real. Amostras expostas a condições naturais (no Arizona e em Bombaim) também tiveram um bom comportamento; a durabilidade expectável é de 25 a 50 anos. As membranas de ETFE também são resistentes à água e à maior parte dos poluentes químicos que se encontram vulgarmente no ar. Apresentam uma grande resistência ao rasgo e uma grande capacidade de alongamento antes da ruptura (28N/mm<sup>2</sup>), o que significa que pequenos furos não se propagam. As membranas de ETFE podem ser fabricadas com uma grande variedade de transparência (20-95% de transmissão luminosa); pode ser aplicado pigmento de cor à membrana durante o fabrico, ou impressas tramas sobre as mesmas.

A membrana ETFE é resistente às chamas e quando derrete não forma gotas quentes (Robbin, 1996). Para além disso, apresentam um custo de produção relativamente baixo (Robbin, 1996). Todas as estruturas pneumáticas, como os painéis encapsulados, por exemplo, são bons isolantes térmicos, especialmente quando formados por mais de três membranas de ETFE. Contudo, a membrana de ETFE perde resistência a cerca de 60°C, o que a torna desaconselhada para climas extremamente quentes (Robbin, 1996). As uniões entre membranas e os remates perimetrais (tipo keders) são soldados a quente de modo a tornarem-se estanques; normalmente são fixas a caixilhos de alumínio extrudido.

---

<sup>5</sup> A primeira e mais antiga estrutura comercial em Teflon® foi encomendada em 1982 para o Jardim Zoológico de Burgers (Vector Foiltec, 2016).

#### 6.2.4. Estrutura da estufa/encerramento de varanda

Para a realização das estruturas de suporte das superfícies transparentes podem empregar-se diversos materiais: madeira, metal (ferro, aço inox e alumínio), plásticos (usualmente PVC), betão ou tijolo. O primeiro a ser utilizado foi a madeira, por ser o material mais acessível. Continua a ser o mais económico, apesar de ter uma durabilidade menor que as outras soluções, se não for prévia e periodicamente tratada. Para além disso, a estanquicidade fica comprometida pelas dilatações que sofre, além do elevado fator de obstrução resultante da secção dos perfis apresentar grandes dimensões. A sua grande vantagem é a baixa condutibilidade térmica, além do fator ambiental, já que se trata de um material renovável e com pouca energia incorporada. Os materiais metálicos apresentam a vantagem de, relativamente à madeira, conseguirem com menores secções a mesma resistência, permitindo diminuir muito o fator de sombreamento no envidraçado. Permitem ainda uma boa estanquicidade que normalmente é superior nas soluções de alumínio. As principais desvantagens relacionam-se com o elevado impacto ambiental associado à produção dos perfis e ao custo de fabrico.

Considerando a disposição da estufa, esta pode ser integrada (como se avalia na presente tese) ou adossada. Na Figura 6.7(a) mostra-se um exemplo de estufa adossada e, na Figura 6.7(b), de estufa integrada.



Figura 6.7. Esquemas em planta de estufas: (a) estufa integrada e (b) estufa adossada i (Mendonça, 2005).

- **Estufa integrada**

A estufa integrada apresenta vantagens, tais como: a redução das perdas térmicas do edifício e a facilidade de transferência de calor da estufa para a habitação, por apresentar maior superfície de ligação entre ambas (Oliveti *et al.* 2014). Apesar de menos versáteis, as estufas integradas, quando previstas na conceção de um edifício, fornecem uma maior variedade de possibilidades de ligações arquitetónicas e funcionais entre a estufa e a habitação. Um tipo comum de estufa integrada é a varanda envidraçada, vulgarmente denominada de *marquise*. Este tipo de solução encontra-se frequentemente nas fachadas posteriores de edifícios do Porto dos finais do século XIX e início do século XX, como se pode ver nos exemplos da Figura 6.8. Também se encontram exemplos de estufas integradas em projetos de reabilitação de arquitetura moderna e contemporânea. A Figura 6.9 apresenta um desses exemplos.



Figura 6.8. Varandas envidraçadas (estufa integrada) tradicionais, localizadas em edifícios dos finais do século XIX no Porto.



Figura 6.9. Estufas integradas num edifício contemporâneo – projeto de reabilitação do edifício de habitação coletiva, Bairro da Bouça (2004), Porto.

- **Estufa adossada**

As estufas adossadas apenas partilham uma parede com a habitação. Apresentam muita flexibilidade para a conceção arquitetónica, incluindo o aproveitamento solar passivo em edifícios já existentes, por exemplo permitindo cobrir terraços ou varandas existentes. As estufas adossadas com fachadas laterais e coberturas transparentes, devido à maior área envidraçada, recolhem teoricamente mais energia. No entanto, existe o risco de sobreaquecimento, especialmente no Verão. As mudanças sazonais na altura e azimute da radiação solar podem resultar em importantes ganhos no verão em superfícies horizontais e em superfícies verticais orientadas a Este ou Oeste, bem como maiores perdas durante no Inverno pela superfície de envidraçado, tornando o

balanço energético mais desfavorável, pelo menos para o clima temperado português. Devido a este fenómeno, as estufas adossadas são menos indicadas que as integradas (Aelenei *et al.*, 2014).

Na Figura 6.10 apresentam-se dois exemplos experimentais de estufas adossadas – que também constituem ampliações horizontais – que se destacam por estenderem a área pavimentada para fora dos limites exteriores do edifício, ao contrário do que se sucede correntemente, em que a estufa resulta do encerramento de uma varanda ou terraço existentes. Em intervenções deste tipo, quando se justifique a adoção de soluções leves, as membranas também podem constituir alternativas interessantes, com vantagens construtivas. A Escola de Arquitetura e de Engenharia de Estrasburgo realizou um protótipo de uma ampliação horizontal envidraçada - *Grefe habitable* (enxerto habitável) (Le Moniteur, 2016) (Figura 6.10(a)), concebido por uma equipa multidisciplinar de estudantes, com o intuito de conciliar a reabilitação térmica com a preservação do património arquitetónico. Com uma estrutura principal em aço, estrutura secundária em alumínio e laje de pavimento em betão, este protótipo apresenta superfícies com vidros duplos. Esta solução de estufa possui 12 m<sup>2</sup> de área e 3.50 m de altura e pode acomodar qualquer tipo de uso; a sua execução custou 90 000 euros e foi 80% financiada pela Fundação Arconic e o grupo EDF/ES (Electricité de Strasbourg). A melhoria do desempenho energético, do conforto dos utilizadores e da aparência exterior do edifício também estiveram presentes na conceção da intervenção *Hi-pod* (Figura 6.10(b)). Utilizou-se proteção solar integral, vidros duplos e isolamento para melhorar o desempenho térmico da habitação renovada. O acesso à luz natural e à ventilação também foi maximizado, proporcionando aos seus utilizadores uma regulação mais eficaz do conforto. O método de instalação permitiu que os ocupantes permanecessem no edifício durante a intervenção. Para isso, o *Hi-Pod* foi concebido como uma estrutura pré-fabricada, em madeira, permitindo que os componentes estruturais leves fossem cortados e montados de forma eficiente fora do local de intervenção. O tempo necessário para incorporar o *Hi-pod* na fachada foi inferior a quatro horas, incluindo transporte e instalação. Enquanto exemplo do potencial de utilização das membranas, o revestimento exterior e/interior desta estrutura também poderia ser em membrana, aligeirando ainda mais esta solução.

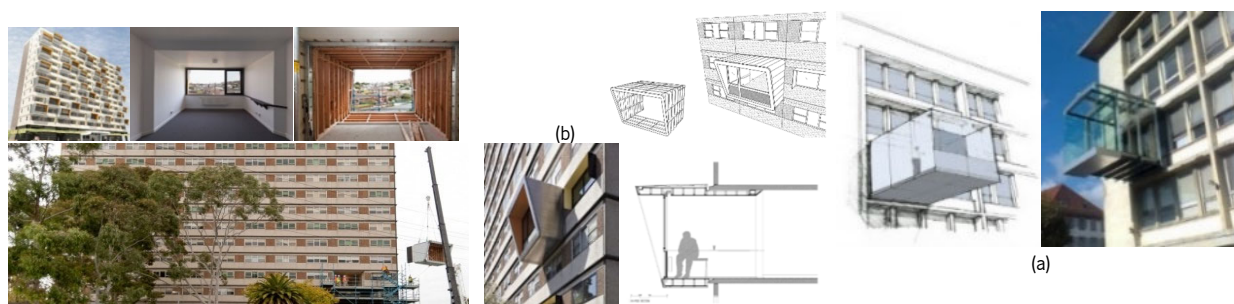


Figura 6.10. Exemplos de ampliações horizontais com criação de estufas adossadas: (a) “Grefe habitable” (enxerto habitável) (Moniteur, 2016); (b) Hi-pod (©BKK + Peter Elliott + Urban Design).

### 6.3. Caso de estudo: casa portuense do século XIX

As preocupações higienistas que emergem por toda a Europa a partir do século XVIII traduzem-se, entre outros aspetos, na construção de redes públicas de saneamento e na criação de regulamentos, tendentes a melhorar as condições de salubridade das populações urbanas. No Porto, nas duas últimas décadas do século XIX, o Regulamento de Salubridade das Edificações Urbanas determina a construção de sanitários nas habitações e a sua ligação à rede pública de saneamento recentemente construída. Segundo Teixeira (2014) esta medida vem acrescentar um novo espaço à tipologia de habitação, através da introdução de pequenos sanitários exteriores, em todos os pisos, sobrepostos numa espécie de “coluna” anexa às fachadas de tardoz; para o seu acesso, construíram-se largas varandas com 1.00 a 1.20m de largura, apoiadas em enormes cachorros, fechadas por marquises logo após a sua construção, ou pouco tempo depois. A construção destes sanitários, pelo facto de serem exteriores às habitações, não introduz alterações na sua forma tipológica, alterando apenas a composição do alçado de tardoz. Na realidade, a integração de estufas/ espaços solares/ marquises no enquadramento de uma reabilitação funcional deste tipo de edifícios pretende: (1) conferir proteção ao acesso dos sanitários, sem prejudicar o conforto lumínico nos compartimentos adjacentes; (2) criar um espaço de estar e (3) aumentar o conforto térmico e acústico nos compartimentos adjacentes.

Pelos motivos acima mencionados, e de modo a avaliar a eficiência das soluções em membrana para a envolvente transparente da estufa, selecionou-se, para caso de estudo, um edifício na cidade do Porto com uma tipologia comum aos edifícios do século XIX, comumente denominados de casa burguesa. De modo a validar, através de ensaios experimentais, os resultados relativos ao desempenho térmico da integração de estufas neste tipo de edifícios, construiu-se um modelo funcional de uma solução proposta alternativa em membrana de PVC cristal que foi instalado no edifício.

Nos pontos seguintes descreve-se o caso de estudo e as soluções de referência e alternativas propostas para o encerramento das varandas do edifício caso de estudo (replicáveis noutros edifícios com a mesma tipologia), tornando-as espaços solares passivos e extensões do espaço habitável existente. Note-se que este edifício já possuía varandas parcialmente encerradas com uma solução de estufa tradicional.

### 6.3.1. Descrição do edifício caso de estudo - Caracterização geométrica e construtiva

O edifício selecionado como caso de estudo, uma moradia unifamiliar de cinco pisos (sendo o último um piso recuado), apresenta características idênticas às da grande maioria das casas construídas na cidade do Porto no século XIX: construção confinada entre edifícios com um alçado posterior constituído por varandas corridas interrompidas pelo espaço do sanitário. A fachada principal do edifício está orientada a Este, as empenas Norte e Sul estabelecem contacto com outras duas construções (com características análogas e sem ocupação) e a fachada tardoz, onde foi construído o protótipo de uma das soluções propostas, está orientada a Oeste (Figura 6.11).

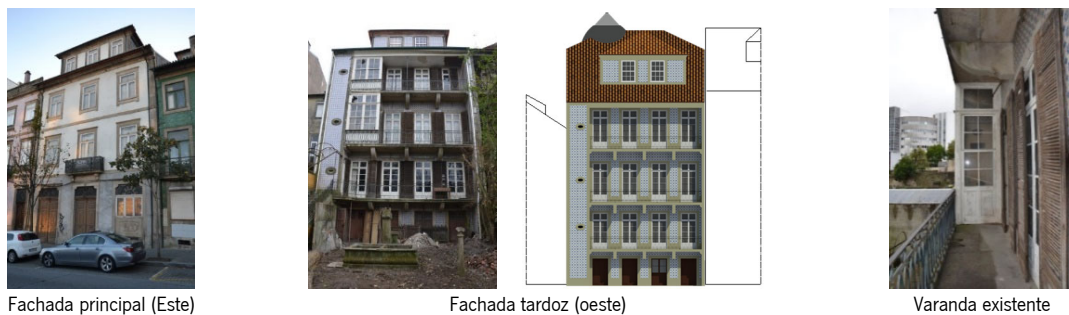


Figura 6.11. Vistas exteriores das fachadas e perspetiva de uma das varandas a intervir.

Da observação e visita ao edifício foi possível retirar informação acerca da constituição dos elementos construtivos: as paredes exteriores e algumas paredes interiores são construídas em alvenaria de pedra de granito; as restantes paredes interiores são constituídas por tabique e os tetos são de gesso aplicado sobre um fasquio pregado sobre barrotes ou directamente à estrutura de vigas dos pisos; a fachada principal é revestida exteriormente por reboco de saibro e cal enquanto a fachada Oeste apresenta azulejos cerâmicos pintados; as vigas e revestimentos dos pavimentos são de madeira, assim como a estrutura de apoio à cobertura. Ambas as fachadas possuem janelas operáveis, com caixilharia em madeira pintada e vidro simples (3 mm de espessura), sendo a área envidraçada correspondente a cerca de 13% da área de pavimento. Todas as portas do edifício são de madeira. As portas/janela da fachada tardoz são envidraçadas, possuem portadas interiores em madeira e portadas/venezianas em madeira pelo exterior (dispositivo de sombreamento). Em dois dos pisos existem estufas com solução construtiva tradicional que fecham parcialmente a área da varanda. A cobertura do edifício é inclinada, com desvão utilizado e revestimento cerâmico. A Tabela 6.2 sintetiza as características técnicas da envolvente do edifício e a Tabela 6.3 reúne informação geral sobre o edifício.

Tabela 6.2. Características técnicas da envolvente do edifício selecionado (para calcular as necessidades energéticas).

Elementos	Solução existente
Paredes exteriores (fachadas)	$U = 2.90 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
Cobertura (com sótão não útil)	$U = 3.80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
Envidraçados (fachada principal)	$U = 4.70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ; $gT_{\text{interio}} = 0.70^*$ ; $gT_{\text{verao}} = 0.85^*$
Envidraçados (fachada posterior)	$U = 3.70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ; $gT_{\text{interio}} = 0.70^*$ ; $gT_{\text{verao}} = 0.46^*$
Sistema de AQS	Cilindro elétrico com 50mm de isolamento; $\eta = 0,90$ ; sem coletores solares
Inércia térmica	média

\*gT adimensional

Tabela 6.3. Informação geral sobre o edifício tomado como caso de estudo.

<b>Características gerais</b>	
Localização	Porto
Orientação solar da fachada a integrar a estufa para monitorizar	Oeste
Tipologia	Moradia unifamiliar
Contexto do sítio	Urbano
Número de ocupantes	0
Número de pisos	5
Área útil de aquecimento	395.0 m <sup>2</sup>
Área implantação	231.4 m <sup>2</sup>
Pé direito útil	4.0 m
Profundidade e largura	21.5 m e 10.5 m
Área total da envolvente do edifício	1260.0 m <sup>2</sup>
Rácio envolvente/ volume do edifício	0.28

O edifício possui um piso abaixo da cota de entrada (-1) com salas de arrumos e acesso ao logradouro posterior pela fachada tardoz. As escadas principais têm início no centro do edifício e ligam o piso 0 ao piso 3; não dispõe de um sistema de climatização, nem de dispositivos de ventilação mecânica. A ventilação natural é assegurada pela chaminé, bem como pela abertura aleatória de janelas e portas. A Figura 6.12 apresenta as plantas do edifício.

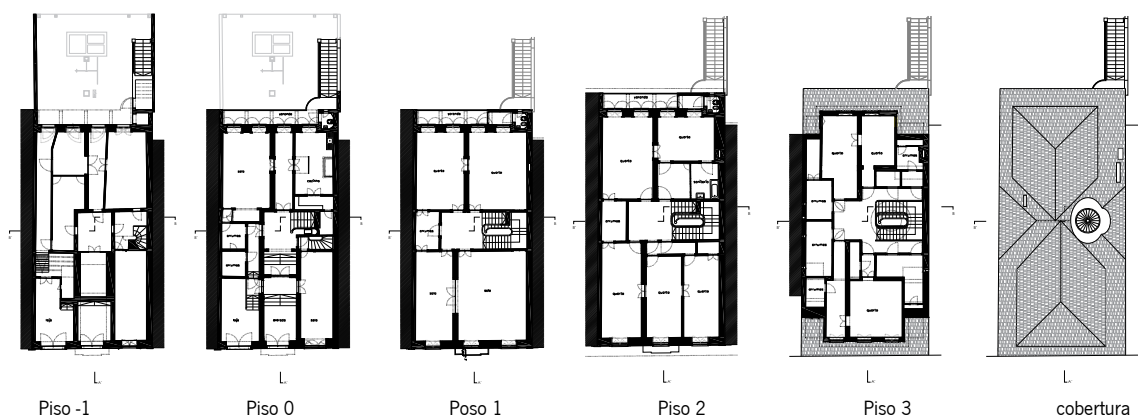


Figura 6.12. Plantas do edifício tomado como caso de estudo (gentilmente cedidas pela Arquiteta Adriana Floret (Floret, 2017)).

O uso de *marqueses* em edifícios construídos antes de 2006<sup>6</sup> é uma solução recorrente, dado o grande potencial solar de Portugal e as vantagens económicas que estes sistemas oferecem quando comparados com abordagens tradicionais de reabilitação baseadas em isolamento térmico. As estufas anexas foram utilizadas com sucesso na modernização e reabilitação de edifícios existentes com fraco desempenho energético, uma vez que, na maior parte do território português, as necessidades de aquecimento são mais elevadas do que as necessidades de arrefecimento, especialmente nas regiões a norte. O clima da cidade do Porto torna por isso interessante projetar uma solução de estufa em membrana a implementar no edifício em estudo. A Tabela 6.4 apresenta as principais características climáticas da cidade do Porto.

Tabela 6.4. Principais características climáticas da cidade do Porto (REH, 2013).

<b>Parâmetros</b>	<b>Data</b>
Zona climática de inverno	I2
Dias de aquecimento (°C dias)	1610
Período de aquecimento convencional (meses)	6.7
Zona climática de verão	V1
Radiação incidente numa superfície transparente orientada a sul (kWh/m <sup>2</sup> . mês)	93
Amplitude térmica diária média (°C)*	9

\* Diferença entre a temperatura mínima e máxima média diária para o mês mais quente da estação de arrefecimento.

### 6.3.2. Soluções de referência

Em Portugal, a integração de estufas no projeto de arquitetura de edifícios novos é reduzida (Patrício *et al.*, 1998). Isto deve-se ao facto do inverno em Portugal não ser muito severo, comparativamente a outros países.

<sup>6</sup> Destaca-se que, em Portugal, o setor residencial representa 17% do consumo de energia, com cerca 25% deste consumo atribuído a sistemas HVAC (Aelenei *et al.*, 2014). Aproximadamente 65% do parque edificado foi construído antes da implementação do primeiro regulamento térmico (RCCTE), pelo que muitos dos edifícios apresentam fraco desempenho energético.



Contudo, as estufas, vulgarmente denominadas de *marquises* (varandas envidraçadas), aparecem frequentemente associadas a ampliações horizontais de edifícios anteriores ao século XX, devido sobretudo à necessidade de proteger a ligação a um novo compartimento (com dimensões reduzidas) destinado a uso sanitário. Segundo Teixeira (2014), a construção das paredes inferiores das *marquises*/estufas tradicionais é, em tudo, semelhante às paredes das fachadas em madeira, utilizando uma estrutura de barrotes em forma de gaiola, constituída por prumos, travessanhos e vergas, de modo a garantir a existência de uma grande superfície envidraçada para iluminação dos espaços interiores da habitação, sendo, no restante, preenchida por um duplo tabuado colocado na vertical e na diagonal. Normalmente, sobre este tabuado, pelo interior é pregado um fasquio até à altura do rodapé para receber o acabamento de argamassa/reboco e, pelo exterior, é pregado um ripado que receber o revestimento de soletos de ardósia, ou chapa ondulada. Embora raro, é possível encontrar o revestimento exterior destas paredes realizado com reboco (Teixeira, 2014). Os vãos, que ocupam uma significativa área da superfície das paredes das marquises, são usualmente revestidos por janelas de corrediça ou guilhotina.

No presente estudo, após a observação de exemplos de estufas presentes em território nacional, atribuiu-se uma classificação segundo a época de construção, através das seguintes designações: estufas tradicionais (Figura 6.13 (a) (b) (c)), convencionais (Figura 6.13(d) e Figura 6.14) e contemporâneas (Figura 6.14 (e) e (f)). Posteriormente, na análise comparativa relativa aos aspetos térmicos, económicos e ambientais, são apresentados e detalhados os sistemas construtivos utilizados nos diferentes tipos de estufas em estudo.

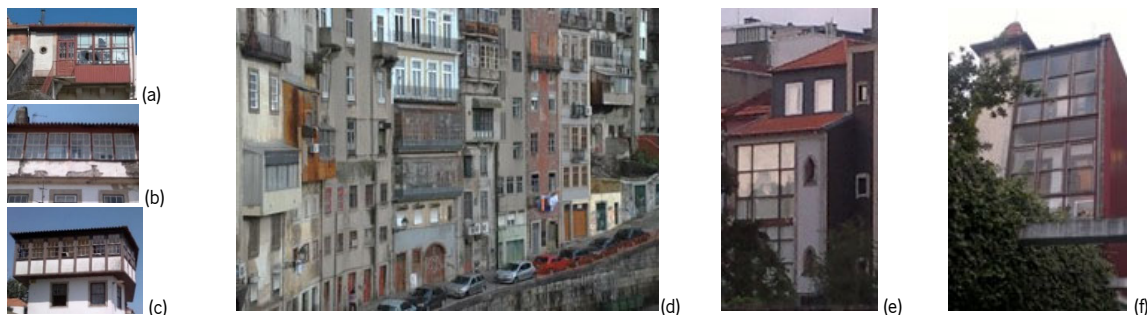


Figura 6.13. Exemplos de soluções de estufas integradas em Portugal: (a) solução tradicional (Porto); (b) e (c) soluções tradicionais (Valeça do Minho); (d) mistura de soluções tradicionais e convencionais (Porto); (e) e (f) soluções contemporâneas, (Porto).



Figura 6.14. Exemplos de estufas correntemente utilizadas, exemplos recolhidos em edifícios localizados na cidade do Porto: (a) e (b) estufas tradicionais; (c), (d), (e) estufas convencionais.

Segundo Gonçalves et al. (1998), as estufas em Portugal apresentam algumas características comuns, como: único vão transparente, orientado sobretudo a sul, e elevada área transparente em relação à superfície de pavimento (entre 60% a 250% da área de pavimento da estufa).

### 6.3.3. Soluções alternativas em membrana

Uma solução construtiva com membrana pode ser preferida a uma solução de vidro corrente quando o peso, ou a flexibilidade é um requisito essencial. Atualmente, um dos mais promissores materiais em membrana utilizados na reabilitação funcional de edifícios para substituir o vidro é o ETFE (ver capítulo 4). Contudo, também se utilizam membranas de PVC cristal; a Figura 6.15 mostra alguns exemplos recentes de intervenções de reabilitação funcional com integração de estufas em membrana de PVC cristal para melhorar o seu desempenho térmico do edifício. Esta solução é muito mais económica que a membrana em ETFE, mas apresenta uma durabilidade inferior e requer mais manutenção.

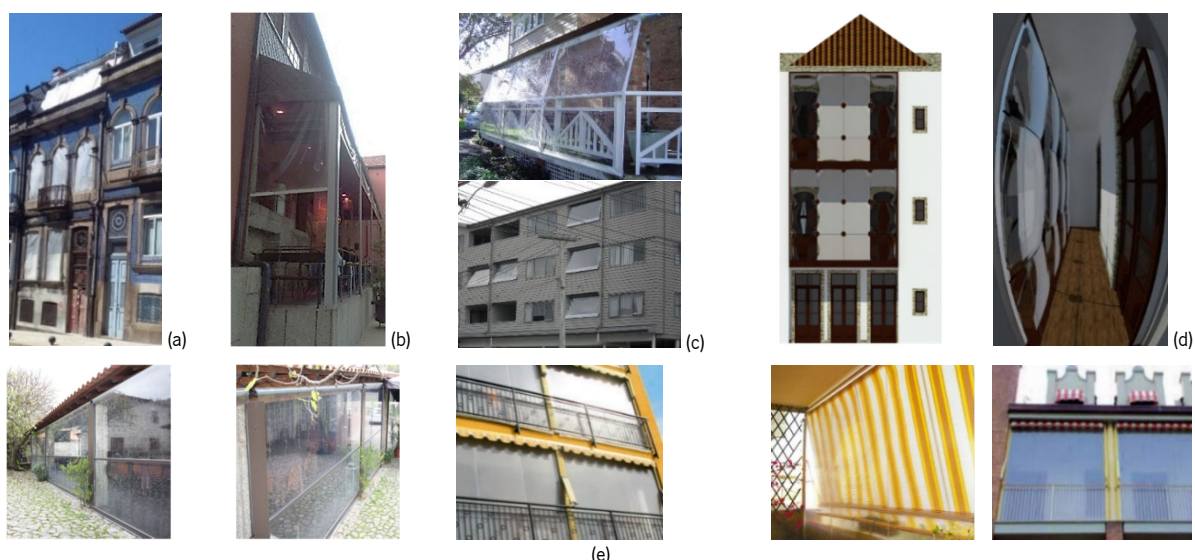


Figura 6.15. (a) Exemplo de membrana aplicada como elemento de proteção provisória durante intervenção de reabilitação. (b) Exemplos de cortina vertical e cobertura de alpendre em membrana impressa com imagem de ardósia (creditos autora) e (c) cortinas verticais com outras configurações (Total Cover, 2015). (d) Proposta de solução de encerramento de varanda com membrana pneumática (em almofadas modulares (créditos: autora). (e) Exemplos de estufas com membrana de PVC cristal (Graça & Mendes Lda., 2016).

#### 6.4. Soluções alternativas em membrana - propostas

Na conceção das duas soluções de estufa alternativas às de vidro – a solução EM (estufa em membrana de PVC cristal) e a EP2M (estufa em painel encapsulado em membrana dupla de ETFE) - apresentadas de seguida, considera os princípios de conceção de estufas enunciados em 6.2.2. Com base na análise da Tabela 6.4 (secção 6.2.3), selecionaram-se duas membranas com propriedades óticas equivalentes às do vidro para a proposta de soluções de estufa alternativas: a membrana de PVC cristal<sup>7</sup> simples e a de ETFE (dupla - encapsulada em painel).

Nas soluções propostas optou-se por aplicar uma membrana com padrão translúcido na parte inferior da fachada da estufa (numa faixa horizontal com 1.20m de altura), de modo a conferir privacidade aos utilizadores do espaço (Figura 6.16(b)). Como forma de alcançar uma adequação estética/coerência linguística com os outros elementos construtivos existentes no edifício a intervencionar, também é possível imprimir ou aplicar padrões na membrana que reproduzam desenhos característicos dos sistemas tradicionais, como se exemplifica na Figura 6.16(a).

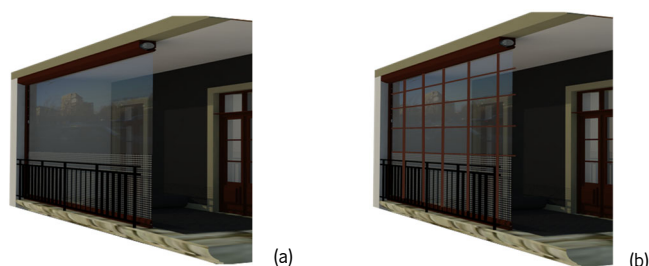


Figura 6.16. (a) Exemplo de padrão aplicado sobre a membrana para conferir privacidade. (b) Exemplo de aplicação de padrão alusivo aos sistemas de caixilharia tradicional para vidros sobre membrana transparente (créditos: autora).

##### 6.4.1. Solução EM – Estufa com Membrana PVC cristal simples

O sistema construtivo da solução EM consiste numa membrana transparente operável em rolo, com guias/perfis laterais e inferiores (contrapeso) (Figura 6.17), que inclui um sistema de fecho por pressão, de modo a encerrar hermeticamente a área da estufa, protegendo-a do vento e da chuva. A opção 1 adota um sistema de aquecimento do compartimento adjacente à estufa por convecção passiva (Figura 6.17).

O objetivo de todos os sistemas de aquecimento solar passivo é capturar o calor do sol através dos materiais que constituem o edifício, e libertar esse calor durante os períodos em que não existe radiação solar, de forma a

<sup>7</sup> Membrana de Policloreto de Vinilo calendrada e com propriedades semelhantes às do vidro.

manter o espaço interior confortável. Como tal, um outro aspeto a considerar é o isolamento da estufa durante a noite. Para tal, consideraram-se duas opções, A e B, para isolar, tanto a superfície transparente, como as paredes e vãos de separação entre a estufa e a habitação. A opção A contempla a integração de portadas de madeira para promover o isolamento térmico noturno (Figura 6.17E), mas com furações para permitir a circulação de ar quente, por convecção, na estação de inverno. A opção B contempla uma cortina isolante junto da fachada transparente da estufa durante o período noturno, ou quando a temperatura exterior é inferior à temperatura no interior da estufa (Figura 6.22).



Figura 6.17. Esquemática dos princípios adotados na concepção da solução proposta.



Figura 6.18. Ilustração da solução no período diurno na estação de (a) aquecimento e de (b) arrefecimento.

No que toca a questões de ventilação e regulação térmica, de modo a permitir a circulação de ar quente formado na estufa para o compartimento adjacente, considerou-se a introdução de aberturas operáveis na parte superior da estufa, onde as temperaturas são mais elevadas, e na parte inferior onde as temperaturas são inferiores (Figura 6.17). Estas aberturas podem ser operadas manualmente, ou com motores controlados

\* Podem ser referidas duas opções para a posição das portadas de madeira existentes, ou de outros elementos de ligação entre a estufa e o compartimento a climatizar: “aberta” quando a temperatura na estufa é superior à temperatura requerida no interior - a porta entre a estufa e a casa pode (e deve) estar aberta quando se necessitam ganhos; “fechada” quando a temperatura no interior da estufa é menor do que no interior da casa.



termostaticamente que abrem e fecham automaticamente dentro da gama de temperaturas desejadas. Também existem outras soluções de regulação térmica, como sombreadores (Figura 6.18), ou cortinas com membrana isolante, operáveis manualmente ou através de sensores (ver Opção B). Na estação de verão, a membrana transparente será recolhida totalmente durante o período diurno e noturno e as portadas de madeira serão encerradas durante o período diurno, de modo a reduzir a entrada de calor no interior da habitação (Figura 6.18).

### Opção A: portadas de madeira

As opções convencionais para reduzir a perda de calor das janelas, tais como persianas, cortinas e estores, podem resultar em reduções significativas na perda de calor sem a necessidade de alterar os componentes construtivos da janela (Figura 6.19). Segundo Wood et al. (2009) e Craven e Garber-slaght (2011), uma combinação destes sistemas pode reduzir a perda de calor em até 62%, apenas 1% a menos do que através da instalação de vidros secundários. Embora isso resulte na redução dos níveis lumínicos, em espaços com ocupação noturna isso não é significativo, pois é à noite que a temperatura do ar exterior é menor, ou seja as perdas de calor são maiores, sendo necessário adotar medidas de retenção de calor. Por outro lado, as portadas de madeira (obturadores), existentes em muitos edifícios construídos em meios urbanos até ao século XIX, podem reduzir as perdas de calor através das janelas até 51% (Wood *et al.*, 2009). No entanto, devido ao custo desta solução, muitos edifícios rurais construídos até ao século XIX não possuem portadas de madeira nas janelas. Restaurar portadas de madeira é geralmente simples e os benefícios são consideráveis, como mostra a Figura 6.20(b). Além disso, o desempenho térmico pode ser melhorado através da aplicação de uma membrana de aerogel (9mm *Spacetherm*) (Figura 6.20(c)), resultando numa redução da perda de calor de 60% (Wood *et al.*, 2009). Tal isolamento pode ser fixado nas superfícies interiores das portadas de madeira, preenchendo vazios existentes resultantes dos relevos (“almofadas”) presentes nas portadas tradicionais, e rematados com uma camada fina de contraplacado.

Nos casos em que não existem portadas, ou quando a ocupação é sobretudo diurna, propõe-se a integração de portadas feitas com painéis encapsulados com membranas de ETFE (Figura 6.21) para permitir que estas fiquem fechadas durante o dia, atuando como vidros secundários, mas com a flexibilidade de uma portada. Tal solução pode ser particularmente benéfica em edifícios de uso comercial ou com maior ocupação diurna.

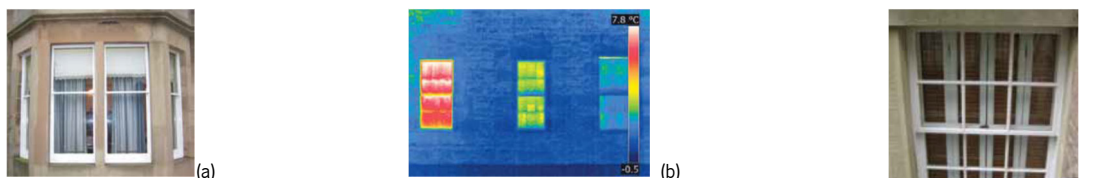


Figura 6.19. (a) As cortinas tradicionais podem resultar em significativas reduções de perdas de calor pelas janelas. (b) Imagem capturada com camara termográfica que mostra os benefícios das portadas de madeira (à direita), comparativamente a não ter (à esquerda), ou ter apenas cortinas (ao centro) (Baker, 2008).



Figura 6.21. (a) Portadas de vidro que atuam como vidros duplos. (b) Membrana de ETFE tensada e com padrão refletor que pode ser utilizada para execução de portadas alternativas às de vidro.

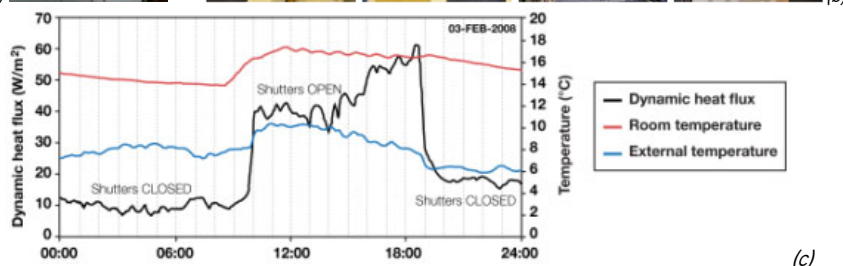


Figura 6.20. (a) Tradicionais portadas de madeira e (b) portadas restauradas com membrana super isolante de aerogel, (c) fluxo dinâmico de temperatura de um compartimento com as portadas restauradas e testadas por Baker (2008)

### Opção B: membrana interior de retenção de calor junto da membrana exterior transparente

Uma membrana recentemente desenvolvida, que constitui um exemplo da presente Opção B, é o Cortinado Funcionalizado Energeticamente Eficiente – Cortfee - desenvolvido pela empresa nacional Têxteis Penedo em parceria com o CITEVE, ao abrigo de um projeto de I&D. O Cortfee consiste num material têxtil impregnado com materiais com mudança de fase; trata-se de um cortinado energeticamente eficiente, capaz de reduzir as trocas de calor através das janelas de uma habitação e, por essa via, contribuir para o aumento da sua eficiência energética (Figura 6.22). No inverno, a radiação solar que entra na estufa aquece a envolvente do espaço fechado. O calor produzido na estufa deve ser transportado para os espaços centrais do edifício através de entradas apropriadas. Durante a noite, para reduzir as perdas de calor através das superfícies transparentes, encerra-se a estufa com a membrana de retenção. No verão, o procedimento é invertido: durante o dia, o excesso de aquecimento do espaço da estufa deve ser prevenido através de sombreamento do mesmo, enquanto à noite a libertação de calor deve ser assegurada através de uma franca ventilação do espaço.

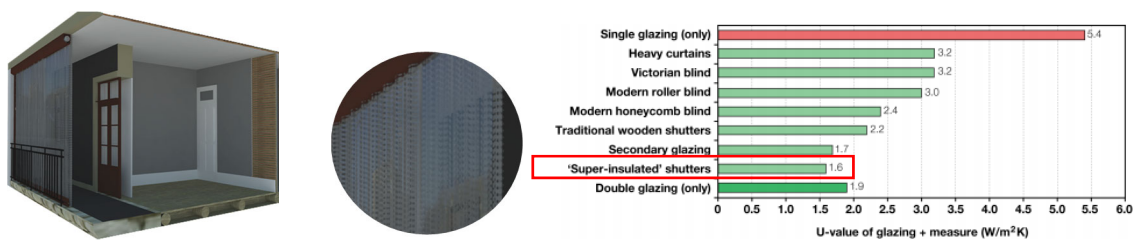


Figura 6.22. (a) Membrana com material de mudança de fase, para retenção de calor pelo lado interior da membrana transparente que encerra a varanda. (b) Resultados experimentais da adoção de soluções em membrana para melhoria do isolamento térmico de superfícies envidraçadas, medidos e testados por Baker (2008).

#### 6.4.2. Solução EP2M – Estufa com Painel Encapsulado em dupla Membrana de ETFE

Os painéis encapsulados em dupla membrana de ETFE possuem uma moldura em alumínio na qual é encapsulada a membrana de ETFE, através de um processo de contração térmica e soldadura, com aproveitamento da redução dimensional do material para criar tensão ao longo da moldura de alumínio, permitindo tensionar a membrana sem a necessidade de insuflar o painel. Os painéis podem ser facilmente montados em estruturas de suporte, ou simplesmente fixados com peças semelhantes às que se utilizam para realizar a montagem de soluções em vidro. A vantagem destes painéis consiste em não necessitarem de ser pressurizados, dispensando assim o uso de sistemas de insuflação (com custo elevado) para manter a membrana tensionada. Deste modo, é possível alcançar uma solução de estufa em membrana (Figura 6.23(b)) equivalente à solução de estufa em vidro simples, beneficiando da utilização de um material mais leve, menos frágil e mais robusto, com propriedades termo-óticas superiores.

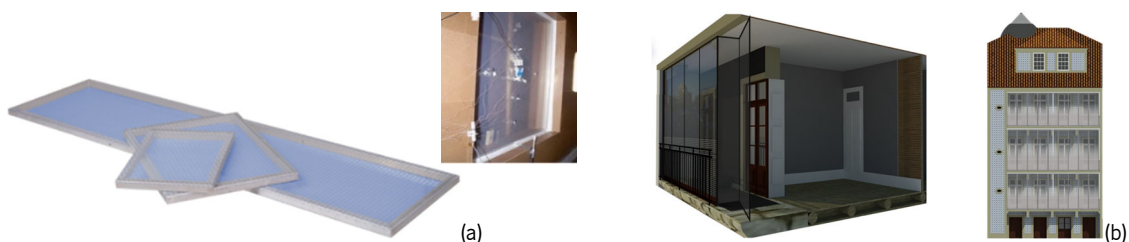


Figura 6.23. (a) Variedade de dimensões dos painéis encapsulados em dupla membrana de ETFE (Holscoct, 2017). (b) Ilustração dos painéis encapsulados em membrana ETFE instalados na vertical para encerramento de uma varanda.

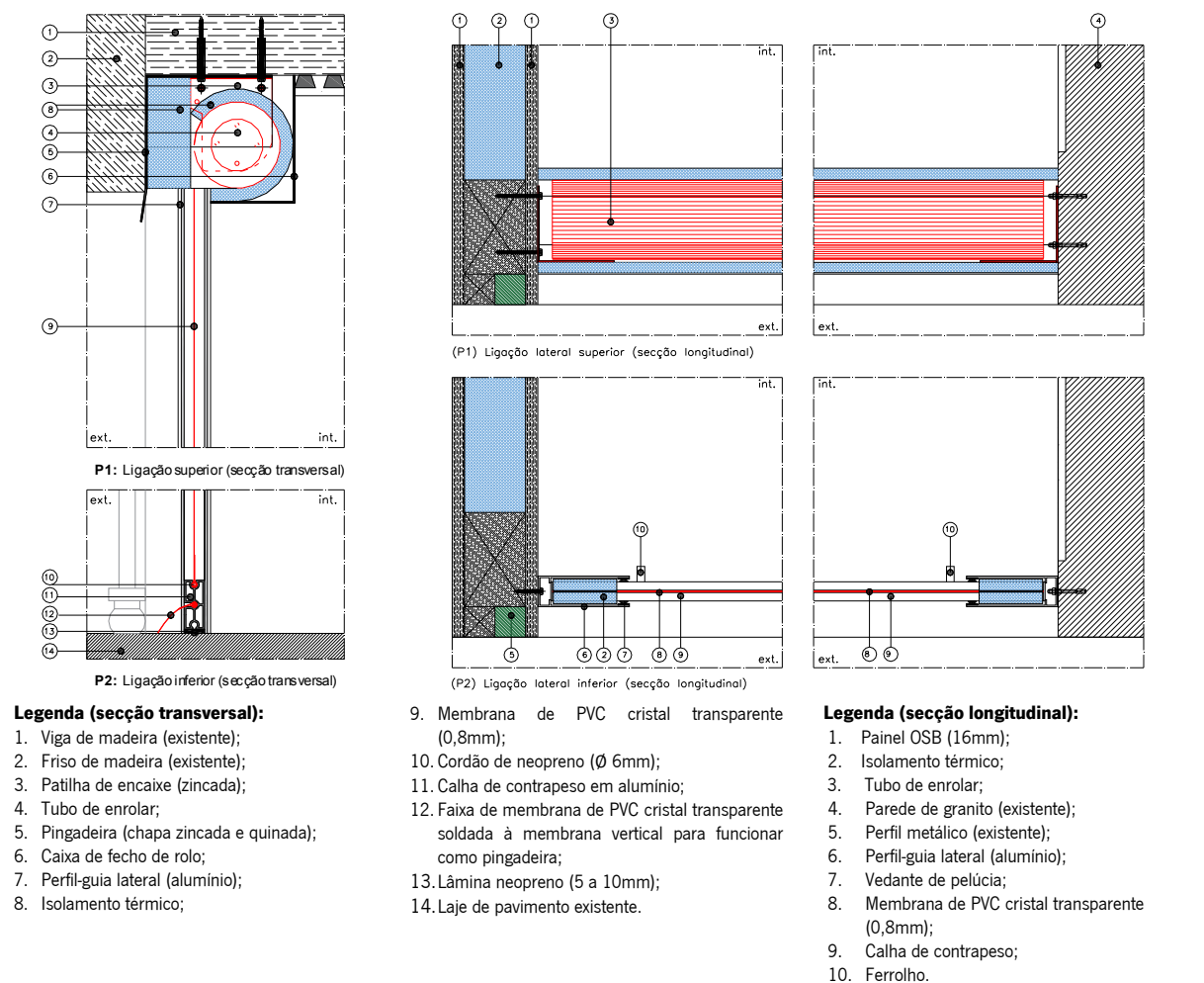
Os benefícios da utilização de painéis em membrana de ETFE para fins arquitetónicos<sup>9</sup> são vários: permite personalizar o desenho da solução – os painéis podem ser encaixados em conjunto para formar uma variedade

<sup>9</sup> A empresa Holscot (2017), em parceria com a Universidade de Nottingham, procurou avaliar em que medida o sistema de painéis em ETFE poderia ser desenvolvido para se integrar em aplicações arquitetónicas. Deste modo, foi avaliado o desempenho ótico e térmico deste sistema e verificou-se que os painéis possuem um desempenho térmico equivalente ao dos vidros duplos. Adicionalmente, também se realizaram ensaios experimentais numa estufa isolada, para avaliar o seu desempenho térmico e ótico, de acordo com as várias estações do ano e condições climáticas. Concluiu-se que a temperatura dentro da estufa monitorizada torna-se muito elevada nos meses de verão e requer aquecimento, quando ocupada, nos meses de inverno (Martin *et al.*, 2016). Martin *et al.* (2016), também concluiu que os níveis de luminância são demasiado elevados se o espaço for utilizado regularmente por ocupantes; contudo, este fato pode ser benéfico para elementos vegetais. Em ambos os casos, os problemas de sobreaquecimento e de excesso luminoso podem ser ultrapassados através de sombreamento e ventilação adequados.

de soluções; a forma modular (Figura 6.23(a)) reduz o tempo de construção, sem necessidade de mão-de-obra, ou equipamento especializado; apresenta propriedades térmicas equivalentes às dos vidros duplos; podem ser facilmente reparados, ou substituídos quando danificados. Adicionalmente, devido ao facto da membrana ETFE ser tensada através da moldura do painel e não através de técnicas de insuflação, não existe o risco de falha da estrutura se esta for punçoada ou danificada.

### 6.4.3. Protótipo funcional da solução EM: aspetos construtivos

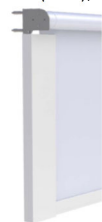
Um protótipo da solução EM foi instalado no edifício seleccionado como caso de estudo, encerrando-se apenas uma varanda do mesmo. Para além da realização de ensaios experimentais higrótérmicos, a montagem deste protótipo também permitiu testar o processo construtivo desta solução. Nas Figuras 6.24 e 6.25 apresentam-se os pormenores construtivos do protótipo, e nas Figuras 6.26 e 6.27 o registo fotográfico da montagem.



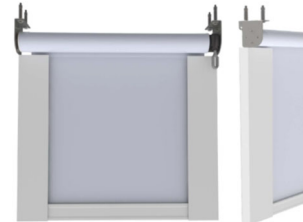
#### Componentes:

Membrana	Perfis e tubo de enrolar	Sistema de fecho
Membrana de PVC cristal transparente com 650g/m <sup>2</sup> , espessura 0,8mm.	Calhas laterais em alumínio (secção com: 120mm x 40mm) + Tubo enrolador em chapa zincada com acionamento manual + Suporte de fixação em aço Inox	Um par de ferrolhos em aço, situados nas extremidades das calhas de contrapeso (Permitem trancar a cortina vertical pelo lado interior).

Fixação do rolo à parede ou teto; suporte de fixação em aço inox; acabamento com caixa (cofre); acessórios em alumínio.



Fixação lateral

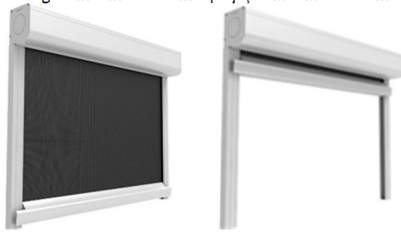


Fixação superior

Figura 6.24. Pormenores construtivos. Secção transversal e longitudinal com indicação dos componentes que constituem a solução EM (em membrana de PVC cristal).

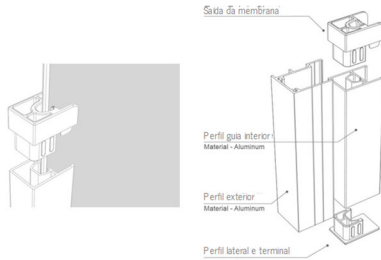
**Cortina vertical em membrana com sistema de calha zip (CZ) para maior estanquidade e resistência ao vento e chuva**

Largura máxima de 5.8m e projeção máxima de 3.0m



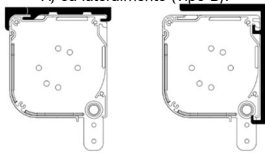
**Calha ajustável e de fácil deslizamento da membrana**

É fácil de instalar porque os componentes permitem uma grande flexibilidade. O perfil interior em borracha mantém o zip sempre dentro da calha.



**Método de instalação simples**

Este sistema é fácil de instalar em qualquer situação. Pode ser fixo superiormente (Tipo A) ou lateralmente (Tipo B).

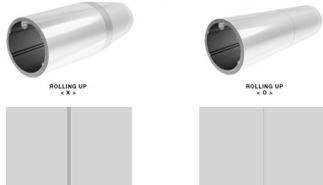


Tipo A

Tipo B

**Soldagem invisível entre membranas**

A membrana de PVC cristal danifica-se devido à diferença de espessura causada pelo processo de soldagem convencional (Tipo C). Contudo, existem recentes tecnologias de soldagem de membranas sem qualquer diferença na espessura (Tipo D).

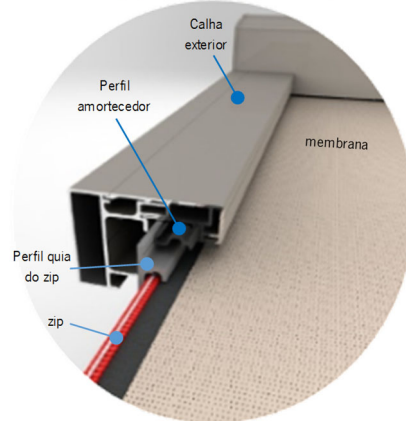


Tipo C

Tipo D

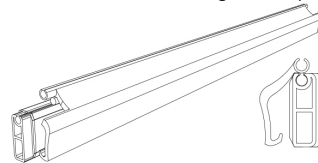


O sistema **calha com zip** (fecho) é projetado exclusivamente para manter a membrana esticada e no lugar. As bordas da membrana permanecem na calha e são seladas a quente à borda do zip, portanto, nunca haverá desgaste do tecido.



**Barra de contrapeso**

O perfil tipo gancho funciona em conjunto com a calha zip conectada à calha lateral. O peso da barra mantém a membrana no lugar e evita que se desloque.



A barra de contrapeso possui uma faixa de vedação grande e flexível, eficaz na vedação de superfícies irregulares, texturizadas ou que não estejam niveladas.

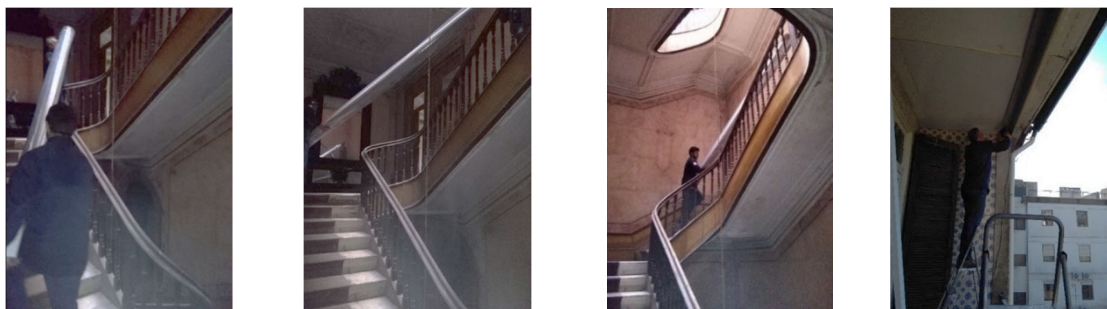


Figura 6.25. Detalhes do sistema de cortina vertical com tecnologia de calha zip (Oztech, 2019; Shy-Zip, 2019).



Figura 6.26. Cortina vertical em PVC cristal tensada para encerramento da varanda do edifício selecionado como caso de estudo.





Transporte e montagem:

- A cortina em membrana de PVC cristal vem enrolada num perfil tubular com 4.20 metros de comprimento e foi transportada por duas pessoas, bem como os restantes componentes, através das escadas interiores do edifício.
- A montagem durou 2 horas e foi realizada por duas pessoas.



Vista da varanda existente encerrada com membrana de PVC tensada



Fachada tardoz com protótipo.



Posição de fecho: cortina vertical encerrada.



Posição de abertural total.

Figura 6.27. Registo fotográfico da montagem do protótipo.

## 6.5. Avaliação de critérios quantitativos

### 6.5.1. Método

O esquema apresentado na Figura 6.28 constitui uma síntese do método adotado no presente exercício para avaliar a eficiência relativa das soluções alternativas em membrana.

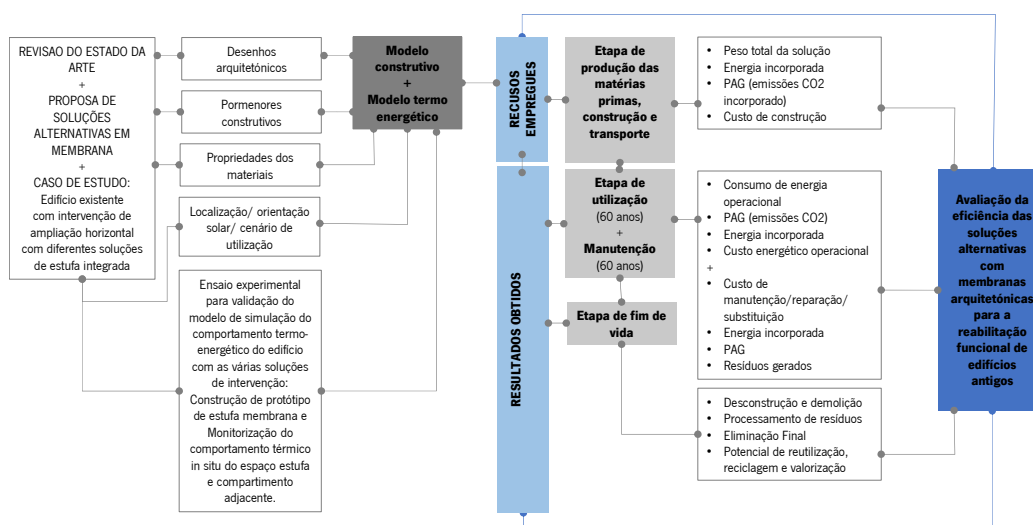


Figura 6.28. Esquema do método adotado para avaliação da eficiência das soluções alternativas com membranas arquitetónicas.

### 6.5.2. Soluções construtivas em análise

No presente estudo, o espaço da estufa é considerado uma ampliação horizontal do edifício na fachada posterior (Figura 6.31 s/E), orientada a Poente e com as características geométricas presentes na Figura 6.8 e na Tabela 6.1. O pé-direito da estufa é de 3.25m e a dos compartimentos existentes adjacentes é de 4.00m; a largura da estufa, no cenário de aplicação a todo o edifício, corresponde à largura das varandas existentes, que é de 9.00 m e das quais se acede a compartimentos adjacentes. Em síntese apresentam-se as soluções de estufa consideradas para avaliação comparativa nesta tese: na Figura 6.29 apresenta as soluções de referência e a na Figura 6.30 as soluções alternativas com membranas arquitetônicas. Posteriormente, na secção 6.5.3 será determinada, por simulação, a orientação solar da fachada mais favorável para adoção deste tipo de intervenção de reabilitação funcional.

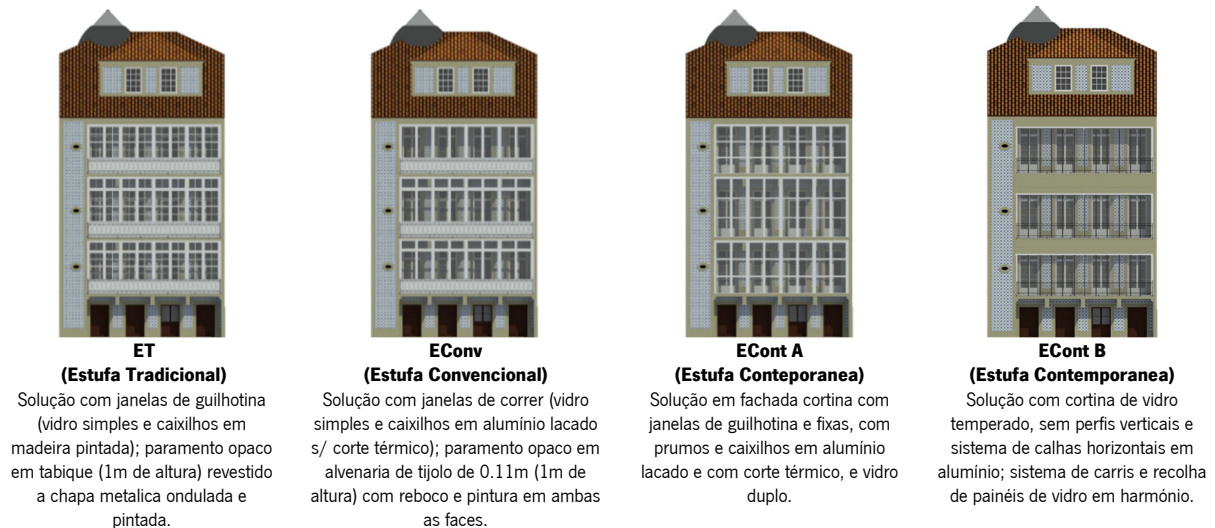


Figura 6.29. Fachada tardoz com as diferentes soluções de referência para estufa integrada numa intervenção de reabilitação funcional.



Figura 6.30. Fachada tardoz com e sem as diferentes soluções alternativas de estufa com membranas (créditos: autora).

De modo a promover a privacidade dos ocupantes do edifício, é possível adicionar uma membrana em malha (com fator de abertura superior a 15%) a cada solução de estufa sem comprometer significativamente o desempenho térmico. A Tabela 6.5 apresenta as principais características das soluções de estufa em estudo.

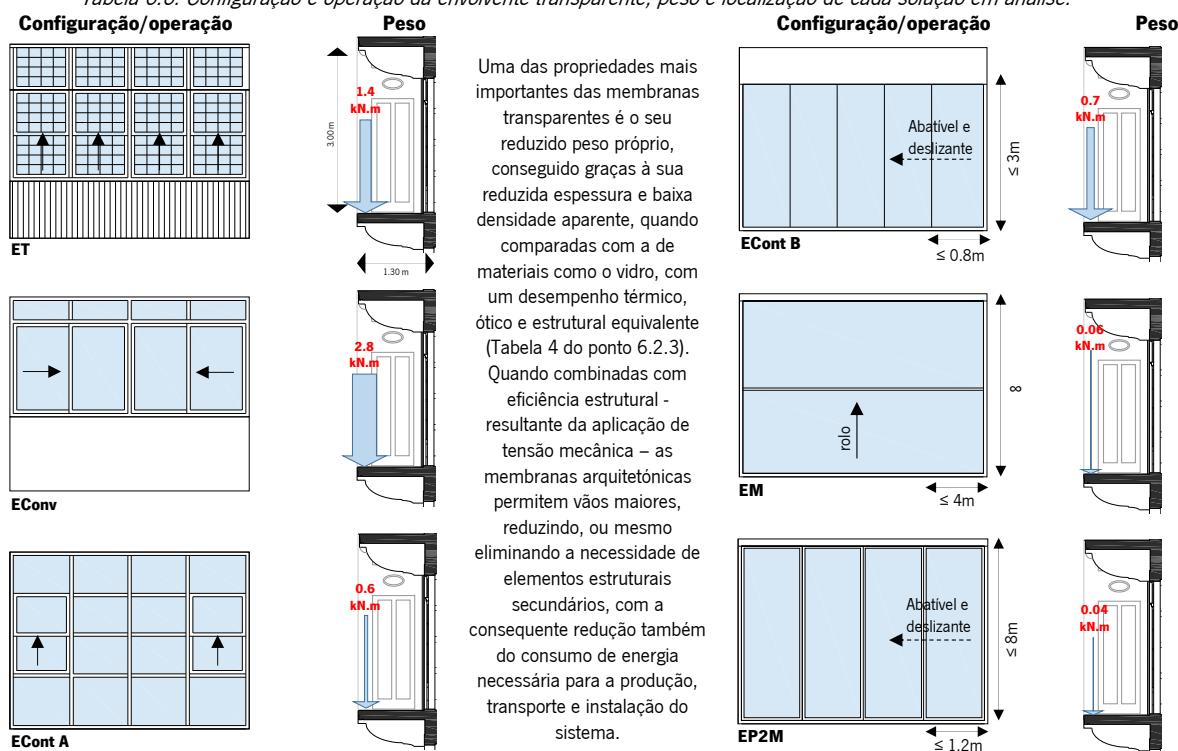
Tabela 6.5. Caracterização das soluções de estufa em avaliação.

Designação:	Soluções de referência				Soluções alternativas	
	ET	EConv	ECont A	ECont B	EM	EP2M
Área de fachada (m²)	100	100	100	100	100	100
Material da estrutura	Madeira	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Alumínio
Material transparente	Vidro 3mm	Vidro 6mm	Vidro 4(16)4mm	Vidro 10mm	Membrana PVC cristal (0.80mm)	Membrana ETFE 0.25 (30) 0.25mm
Área transparente	60%	60%	80%	80%	95%	95%
Área opaca/fator de obstrução	40%	40%	20%	20%	5%	5%
Área transparente operável	30%	50%	50%	75%	95%	85%
Peso próprio (kg/m²)	46	95	19	22	1,9	1,8
Peso total da fachada (kg)	4600	9500	1900	2200	191	176
Vidro (kg/m²)	7.5	15.0	20.0	25.0	-	-
Membrana (kg/m²)	-	-	-	-	1.16	0.86

Designação:	ET	EConv	ECont A	ECont B	EM	EP2M <sup>6</sup>
<b>Propriedades termo-ópticas do material transparente</b>						
Valor de U (W/(m <sup>2</sup> .°C)) <sup>1,2</sup>	5.1	6.5	3.3	5.0	5.6 <sup>5</sup>	3.0 <sup>5</sup>
Valor g <sup>*</sup>	0.89	0.87	0.65	0.84	0.85	0.85
Transmissão solar T <sub>sol</sub> (direto) (%) <sup>1,3</sup>	91	90	81	89	85	84
Relutância solar R <sub>sol</sub> (direta) (%) <sup>1,3</sup>	8	8	15	8	4	4
Transmissão visual T <sub>vis</sub> (direta) <sup>1,3</sup>	88	85	73	81	90	90
Emissividade térmica normal (T 300K) <sup>1,3</sup>	0.90	-	-	-	0.95	0.83
<b>Propriedades mecânicas do material transparente</b>						
Módulo de elasticidade, E (GPa)	50 - 90	50 - 90	50 - 90	50 - 90	2.4 - 4.1	0.5
<b>Isolamento acústico (dB)</b>	29	32	30	35	20	30
<b>Durabilidade do material transparente (anos)</b>	+ 60	+ 60	+ 60	+ 60	30	60
<b>Período de manutenção (anos)</b>	10	10	10	10	30 (substituição)	Não necessita; é auto lavável
<b>Custo construção (€/m<sup>2</sup>)</b>	117	138	393	194	63	170
<b>Aspetos construtivos/limitações/Vantagens</b>	Vãos p/ abertura até 80 cm	Vãos p/ abertura até 80 cm	Vãos p/ abertura até 80 cm	Altura até 3m; esp. 10mm e Largura de cada painel ≤ 80cm	Largura ≤ 4m Altura ilimitada Contraventamento horizontal a cada 1,2m.	Largura ≤ 1.2m Altura ≤ 8m Permite realizar formas curvas.

Notas: 1) Programa informático Calumen II segundo norma EN410-2011 (Saint Gobain, 2012); 2) Santos & Matias (2006); 3) Knippers et al. (2011); 4) Architekten (2016) e Monticelli et al. (2009); 5) Birdair (2017); 6) Holscot (2016).

Tabela 6.6. Configuração e operação da envolvente transparente; peso e localização de cada solução em análise.



### 6.5.3. Avaliação de aspetos térmicos e energéticos operacionais no ciclo de vida

Um dos propósitos do presente trabalho é avaliar, através de ensaios experimentais in situ e ensaios numéricos com ferramentas informáticas, o potencial de redução do consumo de energia operacional para aquecimento dos espaços adjacentes às varandas encerradas com soluções transparentes, adotadas em intervenções de reabilitação funcional de edifícios antigos. A investigação consistiu na monitorização da temperatura do ar em duas varandas encerradas e nos respetivos compartimentos adjacentes na estação de inverno e de verão do ano de 2017.

#### • Programa de cálculo selecionado

O *EnergyPlus* é um programa da autoria do Departamento de Energia (*Department Of Energy - DOE*) dos Estados Unidos da América e é uma das ferramentas mais utilizadas na área da térmica de edifícios, focando a análise em parâmetros energéticos e de conforto. O programa funciona em regime transitório e o respetivo manuseamento é bastante complexo, justificando-se a existência de interfaces destinadas a facilitar a sua

utilização. Por conseguinte, optou-se por selecionar o programa de interface de acesso ao *EnergyPlus* – o *DesignBuilder* (2016) versão 5.0.1.024 - em que a introdução e manipulação de dados é bastante amigável. Uma vez que o *DesignBuilder* utiliza o *EnergyPlus* como motor de cálculo - cuja fiabilidade já foi aferida por vários autores (Wall, 1998; Maile, 2007; Crawley, *et al.*, 2005) - considerou-se que seria adequado utilizar esta ferramenta. As vantagens em utilizar o *DesignBuilder* em detrimento de outro programa de cálculo disponível no mercado são várias: permite construir geometrias bastante complexas e aceder a uma extensa base de dados de materiais do *EnergyPlus*, sendo, contudo, possível o próprio utilizador especificar novos materiais e as respetivas características. No que toca às condições climáticas exteriores, o *DesignBuilder* possui uma extensa base de dados (1258 locais), disponibilizando, para cada localidade, valores horários (para um ano típico) de parâmetros como a temperatura, humidade relativa, velocidade e direção do vento, bem como dados relativos à radiação solar.

O *DesignBuilder* é um programa frequentemente utilizado para auxiliar tomadas de decisão na fase de projeto de um edifício - como a orientação solar, forma, equipamentos, etc. – de modo a avaliar o impacto térmico/energético de determinadas escolhas, mas também como ferramenta para avaliar o comportamento do edifício depois de construído, como é o caso do presente estudo. Tal como foi referido, o programa pode aceder a bases de dados com valores detalhados (anuais, mensais, diários, horários) das condições atmosféricas exteriores. Contudo, é possível alterar estes valores para valores medidos no exterior, como no presente exercício.

- **Dados de entrada**

Os dados de entrada são: propriedades termofísicas das superfícies transparentes, caixilhos, paredes e pavimentos; dimensões, forma e orientação solar; dados meteorológicos recolhidos *in situ* (valores de radiação direta e difusa, ângulo de incidência de radiação solar, azimute solar e ângulo zénite, temperatura e humidade do ar exterior).

- a) *Método de cálculo*

Os edifícios simulados com o *DesignBuilder* são compostos por diversos blocos que, por sua vez, são compostos por “zonas”, conjunto de superfícies, com ou sem aberturas. É a partir da definição das “zonas” que o programa calcula todos os dados de saída. Tendo o nível ‘zona’ como unidade base, os valores que o programa fornece para um bloco, ou edifício, corresponde à média ponderada dos valores obtidos para a “zona” pela respetiva área. O modelo considerado pelo *EnergyPlus/DesignBuilder* reduz cada “zona” a um ponto (ou seja, a um nó), pois considera que o ar interior de uma zona está suficientemente misturado ao ponto de se considerar a temperatura uniforme (Gonçalves, 2010). De acordo com Rodrigues *et al.* (2009) “(...)o modelo não-estacionário mais simples para simular o comportamento termo energético de um local é o que recorre apenas a um nó de cálculo do ar interior”. Este tipo de modelo baseia-se no princípio da conservação da energia, estabelecendo-se que a “taxa de variação da energia térmica no nó é igual ao somatório dos fluxos de calor que carregam o nó” (Rodrigues *et al.*, 2009). Assim, o *DesignBuilder* é um programa especialmente dedicado ao cálculo de parâmetros térmicos para volumes, sendo, contudo, possível obter informações relativamente a temperaturas superficiais ativando uma opção para esse efeito. Na Figura 6.31(a) encontram-se esquematizados os princípios referidos, nomeadamente as trocas de calor entre uma “zona” genérica e o ambiente em que esta se insere. O ambiente em análise encontra-se sujeito aos efeitos da: (1) temperatura do ar, assumindo-se que o exterior se encontra a uma temperatura superior à do interior, (2) radiação (solar direta, difusa e refletida e interna), (3) ventilação (infiltração, admissão e extração de ar) e (4) atividade (produção de calor e humidade). Estes quatro fenómenos são os principais responsáveis pelo comportamento térmico global do edifício e devem ser detalhadamente descritos aquando da modelação do edifício. Com base nestes fenómenos é possível estabelecer a Equação (1). Esta equação diferencial é uma equação de conservação de energia e está na base dos cálculos efetuados pelo *DesignBuilder* (Energy Plus, 2013).

Uma varanda envidraçada é um espaço solar passivo. As duas principais fontes de calor são a energia da radiação solar e as perdas térmicas do edifício adjacente. A intensidade de ambas as fontes variam significativamente, dependendo da hora do dia e da estação do ano (Figura 6.31(b)). As perdas térmicas são maiores no inverno e a radiação solar é mais forte na primavera, verão e outono.



$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} Q_t + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{infiltr} C_p (T_{\infty} - T_z) + Q_{sys} \quad (1)$$

Em que:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  = Energia armazenada na zona térmica (W);

$C_z = \rho_a C_p^{ar} C_i$ ;

$C_p^{ar}$  = Massa volúmica do ar (kg m<sup>-3</sup>);

$C_i$  = Fator de ponderação de transferência de calor sensível (°C m<sup>3</sup>);

$\sum_{i=1}^{N_{si}} Q_t$  = Somatório dos ganhos internos por convecção (W);

$h_i$  = Coeficiente de troca de calor (W m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup>);

$A$  = Área da superfície (m<sup>2</sup>);

$T_s$  = Temperatura da superfície i (°C);

$T_z$  = Temperatura da zona (°C);

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} m_i C_p (T_{zi} - T_z)$  = Transferência de calor devido à mistura de ar entre zonas;

$T_{\infty}$  = Temperatura da zona i (°C);

$m_{infiltr} C_p (T_{\infty} - T_z)$  = Transferência de calor devido à infiltração de ar exterior (W);

$T_{\infty}$  = Temperatura exterior (°C);

$Q_{sys}$  = Transferência de calor a partir de sistemas de climatização (W).

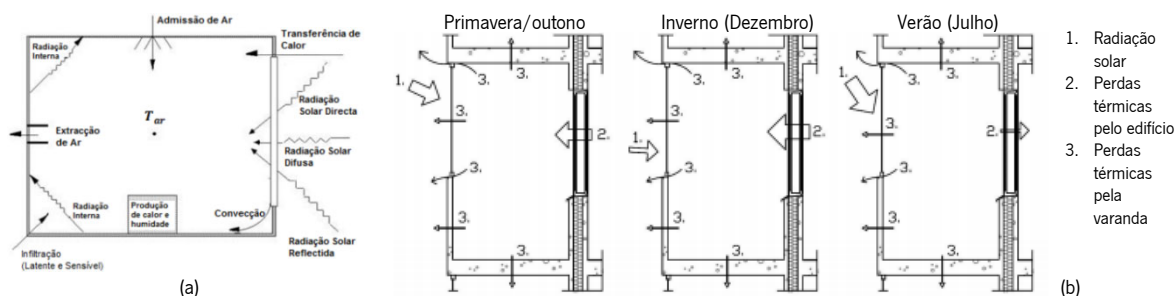


Figura 6.31. Balanço térmico: (a) numa zona genérica (Gonçalves, 2010); (b) de varandas encerradas com elementos transparentes em diferentes estações do ano (Hilliaho, 2017).

• **Dados de saída**

As simulações têm por base valores climáticos horários, disponibilizados pelo DesignBuilder, ou introduzidos pelo utilizador, sendo os valores disponibilizados pelo programa valores estatísticos e não valores que se verificaram num determinado ano. Este tipo de cálculo inclui ganhos solares através dos envidraçados. O efeito do sistema de climatização definido considera também que há transferência de calor por condução e convecção entre zonas. O *DesignBuilder* permite simular o edifício como um todo e obter resultados detalhados para cada compartimento. Os dados de saída do programa são vários, referindo-se, por exemplo, parâmetros de conforto (temperatura interior, radiante e operativa), humidade relativa interior, balanços de calor, bem como ganhos internos (solares pelas janelas).

• **Construção do modelo de cálculo**

Embora o objetivo da modelação baseada em programas de cálculo automático seja a representação fiel da realidade, o modelo será sempre uma cópia adaptada e simplificada dessa realidade; as simplificações exigem que, tanto o objeto, como a metodologia de cálculo do programa tenham sido entendidos antes da modelação. O edifício em estudo foi modelado de acordo com as características apresentadas em 6.3. desenhando-se no *DesignBuilder* um edifício com cinco pisos, orientado com a fachada tardoz a Oeste (Figura 6.32), como acontece na realidade. No que diz respeito às paredes interiores, foram apenas modeladas as paredes do piso 1 e 2. A existência das escadas que ligam os três andares foi representada através de uma abertura. A cobertura inclinada foi desenhada com a geometria existente (inclinação de cerca de 30°).

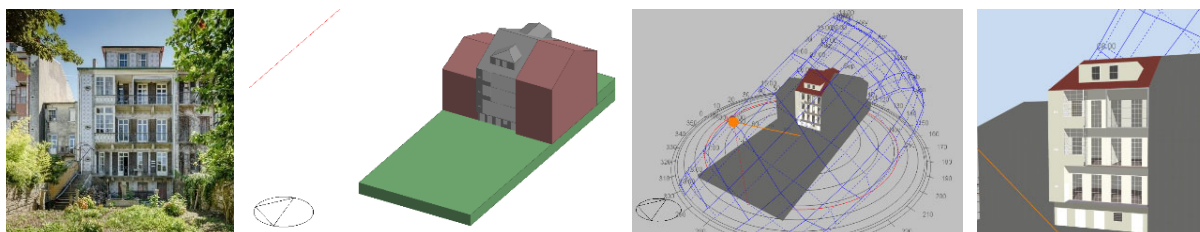


Figura 6.32. Modelo desenhado em DesignBuilder.

Os elementos construtivos foram introduzidos tendo por base a informação recolhida no edifício. Como para muitos materiais não se possuía valores reais das propriedades térmicas, assumiu-se um valor médio. Na Tabela 6.7 apresentam-se as propriedades termofísicas dos elementos construtivos.

Tabela 6.7. Propriedades termofísicas dos elementos construtivos.

Elemento construtivo	U (W/(m <sup>2</sup> . °C))	Material de construção	e (m)	λ <sup>1</sup> (W m . °C)	Calor específico <sup>2</sup> (J kg . °C)	Densidade <sup>2</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
Parede exterior (fachada principal)	2.15	Reboco cal/ areia	0.05	0.72	840	1760
		Granito	0.55	2.80	1000	2600
		Reboco de gesso	0.03	0.51	960	1120
Parede exterior (fachada tardoz)	2.20	Cerâmico	0.03	1.30	840	2300
		Argamassa cal/areia	0.02	0.72	840	1760
		Granito	0.55	2.80	1000	2600
		Reboco de gesso	0.03	0.51	960	1120
Paredes interiores	1.70	Reboco de gesso	0.03	0.51	960	1120
		Fasquiado + Tabuado de madeira+fasquiado	0.06	0.15	1880	550
		Reboco de gesso	0.03	0.51	960	1120
Teto piso 2 e 3	2.25	Fasquiado	0.02	0.15	1200	550
		Reboco de gesso	0.03	0.51	960	1120
Pavimento interior	0.95	Soalho em madeira	0.03	0,15	2720	650
		Vigas/ caixa de ar	0.30	-	-	-
		Fasquiado madeira	0.02	0.15	1200	550
		Reboco de gesso	0.03	0.51	960	1120
Pavimento exterior	2.65	Granito	0.55	2.80	1000	2600
		Soalho em madeira	0.03	0.15	2720	650
Pavimento terreo	1.13	Vigas/ caixa de ar	0.30	-	-	-
		gravilha	0.50	1.30	920	2240
		Telhas cerâmicas	0.03	1.00	800	2000
Cobertura inclinada com desvão	2.93	Vigas/ caixa de ar	0.30	-	-	-
		Fasquiado madeira	0.02	0.15	1200	550
		Reboco de gesso	0.03	0.51	960	1120
		Painel OSB	0.02	0.13	1700	650
Nova parede exterior (introduzida para delimitar a estufa criada)	0.36	XPS	0.08	0.04	1400	25
		Painel OSB	0.02	0.13	1700	650

Fontes: 1 –Sastre (2000) e Mendonça (2005); 2- ITE 50 e Design Builder (2016).

As superfícies transparentes encontram-se caracterizadas na Tabela 6.8. Através da consulta da publicação editada pela Porto Vivo (2013), obteve-se o valor da transmissão solar e do fator solar g; o valor da transmissão térmica foi retirado do ITE 50 (Santos & Matias, 2006). Relativamente à cortina vertical em rolo com membrana transparente em PVC utilizada na construção do protótipo, recorreu-se aos dados presentes na ficha técnica Texout (2017).

Tabela 6.8. Propriedades das superfícies transparentes existentes e da membrana empregue na construção do protótipo utilizado no ensaio experimental.

Envidraçados	Descrição	Uwdn (W/(m <sup>2</sup> . °C))	g (-)	Transmissão luminosa (-)
Exteriores 1	Vidro simples, 3mm; caixilharia de madeira.	5.1	0.85	0.90
Exteriores 2	Vidro simples, 3mm; caixilharia de madeira; dispositivo de oclusão noturna pelo interior (portadas de madeira)	3.7	0.70 (inverno) 0.46 (verão)	0.90
Claraboia exterior	Vidro simples 3mm	5.8	0.85	0.90
Exterior proposto	Cortina vertical em membrana de PVC transparente; caixilhariás em alumínio.	5.6	0.85	0.92

#### • Validação do modelo de cálculo - set up experimental

Após a sua criação, o modelo foi calibrado com as medições realizadas *in situ* e os dados meteorológicos recolhidos. Estas medições foram realizadas ao longo de 7<sup>10</sup> dias na estação de inverno (aquecimento) -12 a 19 de Março de 2017 - e 7 dias na estação de verão (arrefecimento) -17 a 23 de Agosto de 2017.

A recolha de valores *in situ* foi obtida através de sensores (modelo 42270 *Extech* (Extech, 2017)) que registaram os valores de temperatura e humidade do ar<sup>11</sup>: na estufa/espaco solar criada através do encerramento da varanda existente com o protótipo da solução alternativa com membrana de PVC cristal; no compartimento adjacente à estufa (piso 2, fachada oeste) e no compartimento sem estufa adjacente (piso 1, fachada oeste), de acordo com a localização indicada na Figura 6.33 e nas condições descritas na Tabela 6.9. Os sensores foram colocados no centro geométrico dos respetivos espaços (Figura 6.34). Optou-se por colocar os sensores nas

<sup>10</sup> Apenas foram recolhidos dados durante 7 dias devido às limitações no acesso ao edifício em estudo.

<sup>11</sup> Em intervalos de 15 minutos e em modo contínuo (24h).

divisões anteriormente referidas de forma a aferir se o compartimento sem estufa tem um comportamento térmico distinto do compartimento adjacente a uma estufa.



Figura 6.33. Localização dos registadores com sensores de humidade e temperatura do ar.

Tabela 6.9. Condições em que decorreu o ensaio experimental do edifício.

	Estação de inverno (aquecimento)	Estação de verão (arrefecimento)
<b>Período de medição</b>	12 a 19 de Março de 2017 (dias com céu limpo)	17 a 23 de Agosto 2017 (dias com céu limpo)
<b>Estufa em membrana</b>	Fechada 24h por dia.	Fechada 24h por dia.
<b>Portas/ janelas do compartimento adjacente</b>	Fechadas. Contudo estas janelas apresentam uma permeabilidade ao ar elevada.	Fechadas. Contudo estas janelas apresentam uma permeabilidade ao ar elevada.
<b>Ocupação</b>	Não	Não
<b>Climatização</b>	Não	Não

Na semana da estação de arrefecimento também se registaram os valores de humidade e temperatura do ar na estufa integrada, existente no edifício e com solução tradicional, e no respetivo compartimento adjacente (Figura 6.34).



Figura 6.34. Localização dos registadores com sensores de humidade e temperatura do ar na Estufa Tradicional (ET) existente (direita) e no compartimento adjacente (esquerda) na semana de verão.

De modo a simular o edifício nos intervalos de tempo considerados, foi necessário modelar as condições climáticas exteriores, de acordo com aquilo que se verificou na realidade. Os dados climáticos introduzidos no programa de cálculo *DesignBuilder* foram obtidos através dos registos da estação meteorológica do Laboratório de Física das Construções (LFC), localizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), na cidade do Porto, e selecionando os dados climáticos relativos ao período de medição in situ, mais os sete dias precedentes. No *site* da *internet* do LFC (2017) são disponibilizados vários valores, não estando as medições divididas em períodos de tempo iguais. Consequentemente, para introduzir os parâmetros climáticos no *DesignBuilder*, houve necessidade de calcular médias horárias. Nos ficheiros climáticos, o programa aceita apenas a introdução de um valor para cada hora do dia. A estação meteorológica do LFC/FEUP recolhe valores relativos à temperatura e humidade relativa do ar, radiação atmosférica, radiação solar difusa e global, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento.

Os valores referentes à radiação solar são medidos na horizontal, como é habitual nas estações meteorológicas. Contudo, o programa requer mais dados meteorológicos de entrada, como radiação direta normal. Uma vez que a radiação solar tem uma grande influência no comportamento térmico dos edifícios, recorrendo a métodos de cálculo aproximados, calculou-se o valor da radiação direta normal e utilizaram-se estes valores em vez dos valores históricos que o programa fornece para a cidade do Porto. De acordo com Duffie & Beckman (2006) e Rosa (2009), a radiação global horizontal é composta por uma parcela direta e outra difusa, como mostram as Equações (2) e (3). Por outro lado, é possível relacionar a radiação direta horizontal e a global, como mostra a Equação (4). Nas Equações (2) a (10) mostra-se como a radiação direta normal pode ser calculada a partir da radiação global horizontal. Para  $\Delta t = 1$  hora, numa superfície horizontal, tem-se:

$$R_{\text{global horizontal}} = R_{\text{direta horizontal}} + R_{\text{difusa horizontal}} \quad (2)$$

$$R_{\text{difusa horizontal}} = R_{\text{global horizontal}} - R_{\text{direta horizontal}} \quad (3)$$

$$R_{\text{direta horizontal}} = R_{\text{direta normal}} \cos \theta_z \quad (4)$$

$$R_{\text{direta normal}} = \frac{R_{\text{direta horizontal}}}{\cos \theta_z} = \frac{R_{\text{global horizontal}} - R_{\text{difusa horizontal}}}{\cos \theta_z} \quad (5)$$

$$\cos \theta_z = \cos \Phi \cos \delta \cos \omega + \sin \Phi \sin \delta \quad (6)$$

O ângulo que relaciona a radiação direta horizontal e normal é o zénite solar ( $\theta_z$ ). Este depende da latitude ( $\Phi$ ), da declinação ( $\delta$ ) e do ângulo horário ( $\omega$ ), podendo variar entre  $0^\circ$  e  $\pm 180^\circ$ . Como os outros parâmetros foram recolhidos na FEUP, utilizou-se a respetiva latitude e longitude para os cálculos que se seguem ( $\Phi = 41.1781^\circ\text{N}$  e  $L_{loc} = 8.593^\circ\text{W}$ ).

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \sin B - 0.006758 \cos 2B + 0.000907 \sin 2B - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \sin 3B \text{ (rad)} \quad (7)$$

Para o cálculo do ângulo horário, é necessário ter em conta que este será negativo entre a meia-noite e o meio-dia solar e positivo na outra metade do dia. A diferença entre a hora para que se quer calcular o valor de  $\omega$  e o meio dia, multiplicada por  $15^\circ$  é o valor de  $\omega$ . Consequentemente, é necessário determinar a hora solar para cada hora sideral ou civil.

$$\text{Hora solar} - \text{Hora civil} = 4 \text{ min} \times (L_{st} - L_{Loc}) + E + (60 \text{ min, se hora de verão}) \quad (8)$$

$$\text{Em que: } E = 229.2 (0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \text{ (min)} \quad (9)$$

$$B = (n - 1) \frac{306}{365} \quad (10)$$

Tabela 6.10. Valores de n.

Mês	n para dia i	Mês	n para dia i	Mês	n para dia i	Mês	n para dia i
Janeiro	i	Abril	90 + i	Julho	181 + i	Outubro	273 + i
Fevereiro	31 + i	Maiο	120 + i	Agosto	212 + i	Novembro	304 + i
Março	59 + i	Junho	151 + i	Setembro	243 + i	Dezembro	334 + i

Por exemplo, para o dia 8 de Março às 10h00, obtêm-se os seguintes valores:

$\Phi = 41.18^\circ = 0,72 \text{ rad}$ ;  $L_{loc} = -8.60^\circ = 0.15 \text{ rad}$ ;  $n = 67$ ;  $B = 1.14$ ;  $\delta = -0.09 \text{ rad}$ ;  $E = -11.47 \text{ min}$ ;

Hora solar - Hora civil = -45.86 min; Hora solar = 9:14h;  $\omega = 41.46^\circ$  e  $\cos\theta_z = 0.50$

De modo a introduzir os dados recolhidos na estação meteorológica relativos ao período em estudo (12 a 19 de Março de 2017), utilizou-se a ferramenta informática *Elements*<sup>12</sup> (2017) que permite editar o ficheiro climático existente (na base de dados *DesignBuilder*) para a cidade do Porto (em extensão .epw). Uma vez criado o ficheiro climático, simulou-se o edifício para os dias em que as medições foram realizadas, de acordo com os elementos construtivos considerados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11. Parâmetros considerados para a calibração do modelo.

Parâmetro	Consideração
Paredes e pavimentos	Tabela 6.6
Cobertura	Tabela 6.6
Envidraçados	Tabela 6.7
Claraboia exterior	Tabela 6.7
Aquecimento/ arrefecimento	Sem equipamentos de climatização ou aquecimento de águas sanitárias

Como se pretendeu validar as simulações a partir do ensaio experimental, consideraram-se as mesmas condições em que foi realizado o ensaio. Deste modo, considerou-se para todos os compartimentos: densidade de ocupação nula; produção de ganhos internos a partir de equipamentos nula, bem como nulo o consumo de eletricidade para iluminação, aquecimento de águas sanitárias e climatização; todas as portas e janelas encontravam-se encerradas durante o período de medição (24h) e as portadas estavam abertas permanentemente.

Relativamente à ventilação natural, atribuiu-se a classe de exposição 1, de acordo com o REH (2013), e estabeleceu-se um caudal de infiltração de ar através de dispositivos de admissão (como portas, portadas, janelas existentes e protótipo de cortina vertical construído in situ) mesmo quando estes se encontravam fechados, de 0.3rph/50Pa para a EM, de 5rph/50Pa para ET e de 15rph/50Pa para todos os compartimentos do edifício (valor de referência para edifícios antigos, segundo os ensaios realizados com *Blower Door Test*) (Zou, 2010; Alfano *et al.*, 2016; Hilliaho, 2017).

<sup>12</sup> *Elements* é uma ferramenta informática gratuita, de código aberto e multiplataforma para criar e editar ficheiros climáticos personalizados.



Doravante, vão utilizar-se as seguintes abreviaturas para os espaços em análise: s/E – sem Estufa; EM – Estufa com Membrana; EP2M – Estufa Painel Encapsulado em dupla Membrana; ET – Estufa Tradicional; EConv – Estufa Convencional; EContA – Estufa Contemporânea A; EContB – Estufa Contemporânea B; CAEM – Compartimento Adjacente Estufa Membrana; CAPEM – Compartimento Adjacente estufa Painel Encapsulado em dupla Membrana; CAET - Compartimento Adjacente Estufa Tradicional; CAConv - Compartimento Adjacente estufa Convencional; CAContA - Compartimento Adjacente estufa Contemporânea A; CAContB - Compartimento Adjacente estufa Contemporânea B; CSE – Compartimento Sem Estufa.

As Figuras 6.35 e 6.36 apresentam gráficos com a comparação dos valores da temperatura e humidade relativa do ar interior obtidos por cálculo e *in situ*, para a EM na semana de inverno e de verão. Da observação das curvas, conclui-se que existe uma razoável aproximação entre os valores calculados e os valores medidos *in situ*, ocorrendo a temperatura máxima e mínima na EM ao mesmo tempo que as máximas e mínimas no exterior. A Figura 6.36 mostra que os valores calculados para a ET se aproximam dos valores medidos *in situ*.

Verificou-se que a temperatura do ambiente exterior condicionou claramente a temperatura no interior da estufa EM e que neste espaços se verificaram grandes flutuações da temperatura diária, chegando na semana de inverno a cerca de 45°C (Figura 6.35). Os picos de temperatura do ar calculados para a EM não são coincidentes no tempo e nos valores (+2°C média) com os da temperatura do ar medidos *in situ*. Os picos de temperatura do ar calculados na EM estão atrasados cerca de uma hora (máximo), o que se pode justificar pelo fato de no programa de cálculo se ter subvalorizado o efeito da inércia térmica, pois quanto maior for a inércia térmica, maior é o atraso entre picos de temperatura. A inércia térmica considerada pelo programa foi inferior à real, pois não se consegue incluir o efeito da estrutura de madeira.

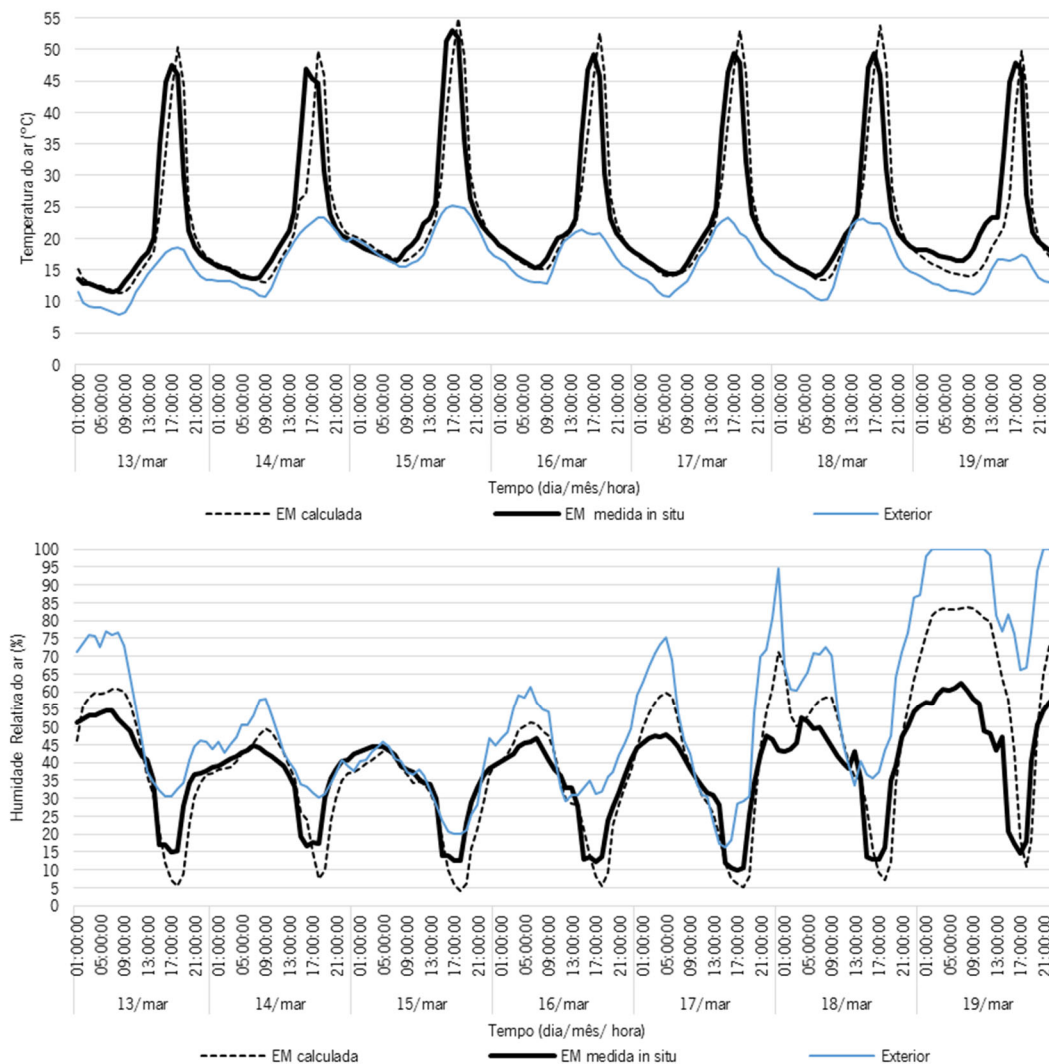


Figura 6.35. Validação do modelo para a EM na semana de inverno.

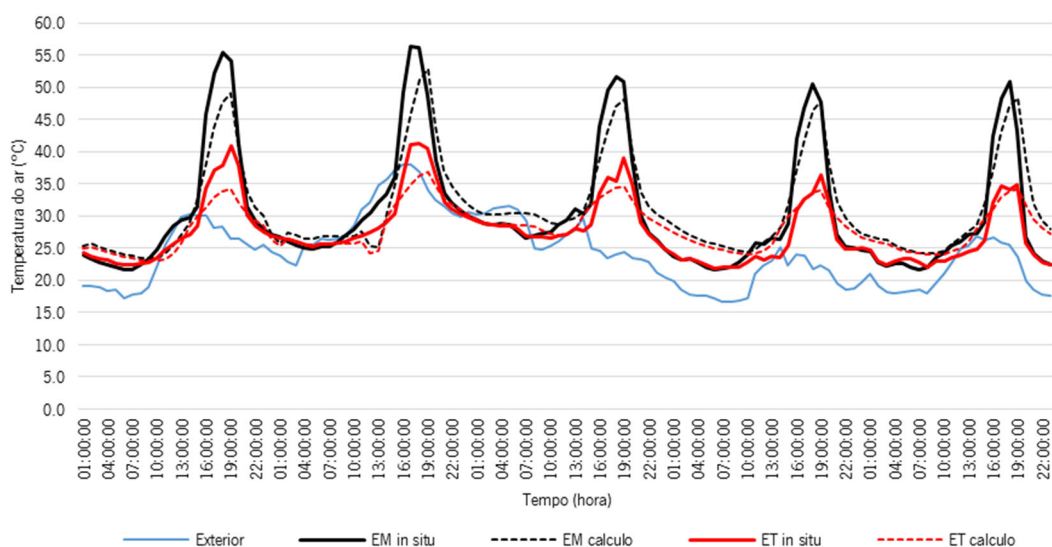


Figura 6.36. Validação do modelo para a ET e EM para a semana de verão.

A Figura 6.37 e 6.38 apresentam a mesma comparação, mas para o CAEM e o CAET. Ao contrário do que acontece na EM, a curva relativa à temperatura do CAEM e CAET é bastante estável (aprox. 16°C *in situ* e 17°C calculado na semana de inverno e aprox. 27°C em média na semana de verão). Em geral, conclui-se que os valores calculados se aproximam dos valores medidos com uma variação máxima de  $\pm 10\%$ .

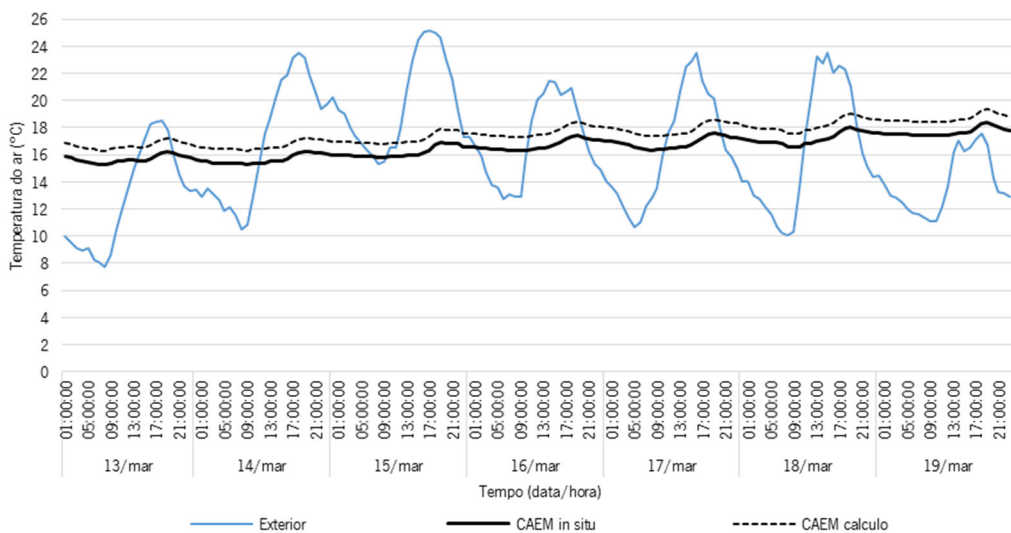


Figura 6.37. Validação do CAEM na semana de inverno.

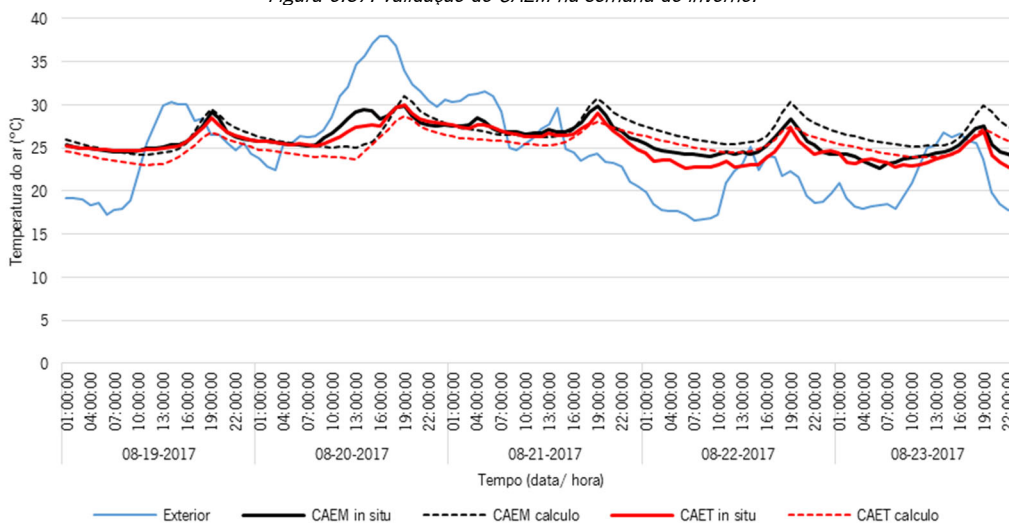


Figura 6.38. Validação do CAEM e CAET na semana de verão.



A Figura 6.39 e 6.40 comparam os valores calculados e medidos *in situ* para o CSE, que possui a mesma área útil, área envidraçada e orientação solar do CAEM. Da observação das curvas, conclui-se que existe uma razoável aproximação entre os valores calculados e os valores medidos *in situ*.

No que diz respeito aos valores medidos *in situ*, verifica-se que existem flutuações da temperatura diária mais significativas do que no CAEM/CAET. Isto reflete a influência positiva que o encerramento da varanda com uma EM/ET apresenta para a estabilização da temperatura nos respetivos compartimentos adjacentes, em oposição a um compartimento sem EM/ET, em particular num edifício antigo com as características construtivas do edifício selecionado.

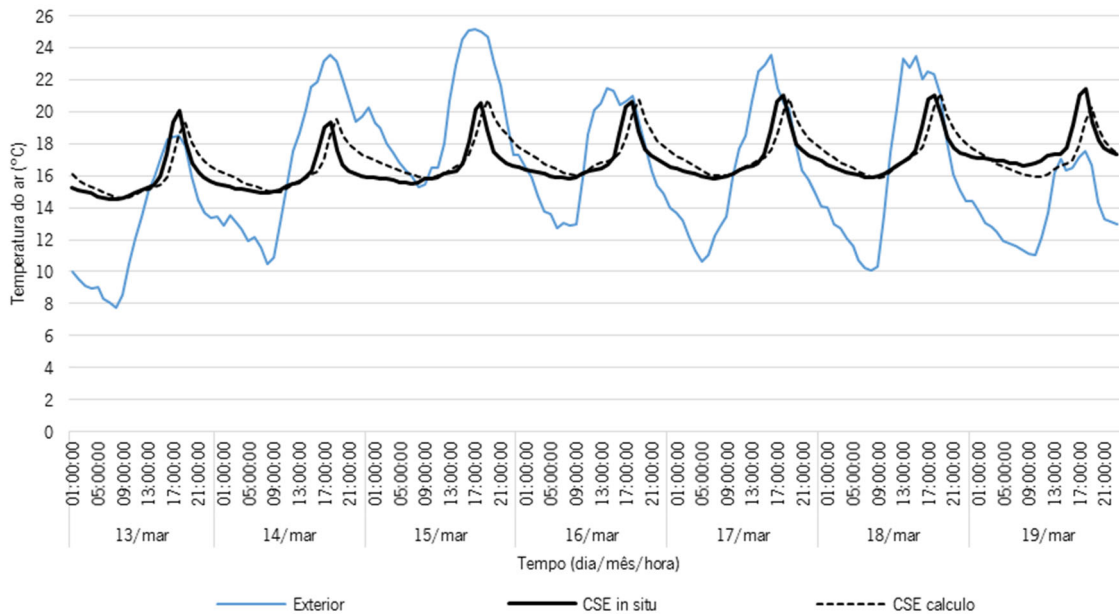


Figura 6.39. Validação do CSE para a semana de inverno.

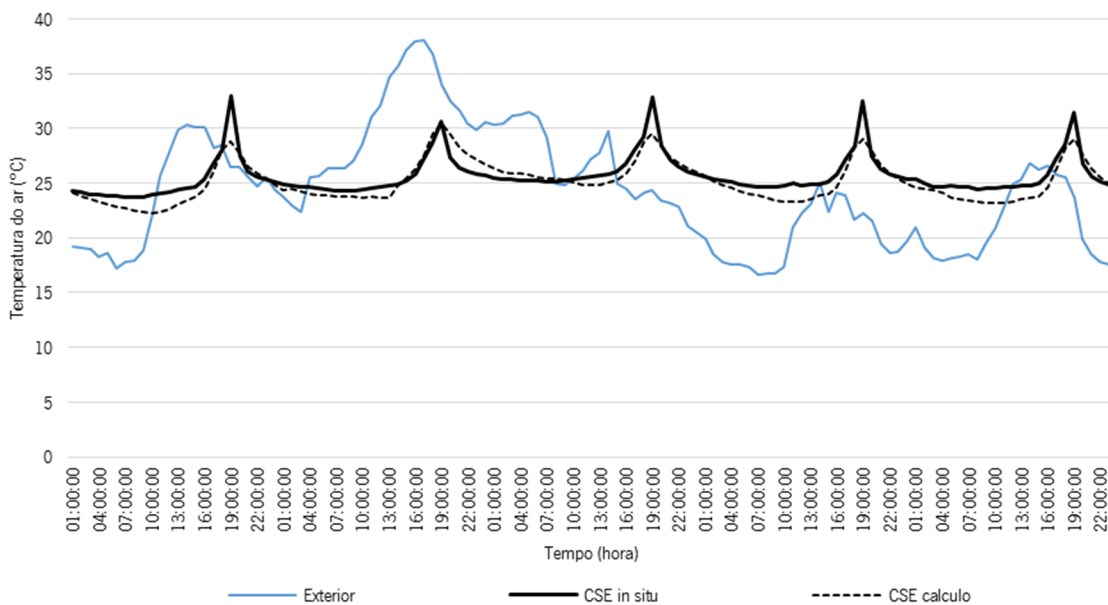


Figura 6.40. Validação do CSE para a semana de verão.

A validação do modelo foi realizada através da comparação entre os valores calculados e os obtidos experimentalmente. A diferença média entre o pico de temperatura do ar medido *in situ* e calculado na EM é de aprox. 2°C; no CAEM e CAET é de aprox.  $\pm 3^\circ\text{C}$ ; e no CSE é de 2°C. As diferenças entre os resultados calculados a partir do modelo e os medidos *in situ* é no máximo 10%, em termos de temperatura média do ar e

de Humidade Relativa média do ar para o CAEM/ CAET, 5% para a EM e 10% para a ET. Da análise global das Figuras 6.35 a 6.40 conclui-se que o modelo calculado é suficientemente representativo da realidade, sendo utilizado para a análise comparativa que se segue.

• **Conforto térmico**

Com base no modelo calibrado anteriormente, realizaram-se simulações do comportamento térmico do edifício, sem climatização e com diferentes tipos de estufas, para dois cenários<sup>13</sup>, considerando uma semana típica de inverno e uma semana típica de verão (Tabela 6.12). A diferença do cenário 1 para o cenário 2 reside na adoção de medidas passivas para arrefecimento e aquecimento do espaço estufa e dos compartimentos adjacentes.

Tabela 6.12. Cenários para averiguar o comportamento térmico das estufas e dos compartimentos habitáveis com e sem estufas.

		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Infiltração de ar (rph/50Pa)
<b>Estufas</b>	ET; EConv; EContA; EContB; EM; EP2M	Janelas das estufas sempre fechadas.	Meses de <b>arrefecimento</b> , janelas da estufa abertas: 30%(ET); 50% (EConv); 50% (E ContA); 75% (EContB); 95% (EM); 95% (EP2M) Meses de <b>aquecimento</b> : janelas da estufa sempre fechadas	Janelas das estufas sempre fechadas.	0.3 5 (ET)
<b>Compartimentos adjacentes</b>	CSE; CAEM; CAEP2M; CAET; CAEConv; CAEContA; CAEContB	Janelas dos compartimentos sempre fechadas.	Meses de <b>arrefecimento</b> : Janelas sempre fechadas. Meses de <b>aquecimento</b> : CSE - janelas sempre fechadas o ano inteiro. Restantes compartimentos adjacentes - janelas abertas diariamente entre as 12h30 e as 18h30 e fechadas no restante período horário. Restantes compartimentos – janelas sempre fechadas.	Janelas dos compartimentos sempre fechadas e portadas fechadas apenas entre as 20h e as 8h.	15 (Hilliho, 2017)

Na semana típica de inverno, no cenário 1, em que as janelas estão sempre fechadas, verifica-se, por observação da Figura 6.41 e Tabela 6.13, que as soluções EM, EP2M e Econt B, e os respetivos compartimentos adjacentes, apresentam mais horas de conforto e temperaturas médias superiores às do CSE. O cenário 2, com abertura de janelas localizadas na parede de meação entre a estufa e o compartimento adjacente, permitiu verificar que existe um aumento do número de horas de conforto nos CAE relativamente ao CSE, apesar de não ser significativamente maior do que o do cenário 1. Os compartimentos onde mais se verifica o aumento de horas de conforto, com a adoção do cenário 2 são: CAEM, CAEP2M e CAEContB. Por outro lado, verifica-se que a temperatura é mais estável, sofre menos oscilações, no CAEM e CEP2M, ou seja nas soluções alternativas de estufas (Figura 6.41).

Na semana típica de verão, no cenário 1, em que as janelas estão sempre fechadas, a Figura 6.42 e Tabela 6.14 mostra que as soluções EM, EP2M e Econt B apresentam mais horas de sobreaquecimento e, conseqüentemente, menos horas de conforto do que a ET, EConv e EContA; isto deve-se, sobretudo, ao facto destas soluções apresentarem menor infiltração de ar e uma área transparente maior. Contudo, para os compartimentos adjacentes a diferença não é significativa. Comparativamente ao CSE, verifica-se uma redução significativa das horas de conforto dos compartimentos adjacentes às estufas. Posto isto, testou-se a opção da estufa em membrana aberta, durante os meses de verão, que devido ao seu sistema construtivo permite a sua abertura a 100%. Assim, para a mesma semana de verão, no cenário 2 (Figura 6.42 e Tabela 6.12), verifica-se que as mesmas soluções apresentam um comportamento oposto, ou seja, mais horas de conforto relativamente às soluções de estufa convencionais; isto deve-se à área de abertura das janelas nas estufas ser maior na EM, EP2M e EContA do que na EConv e EContB. Em contrapartida, as horas de conforto aumentam na ET devido ao facto de esta apresentar uma área opaca maior. Verifica-se um aumento das horas de conforto nos compartimentos adjacentes a estufas, comparativamente ao compartimento sem estufa (CSE) para o cenário 2. Com a adoção do cenário 2, a abertura da EM e da ET contribuem para a redução da temperatura nos respetivos compartimentos adjacentes na estação de arrefecimento e para o aumento na estação de aquecimento.

Os compartimentos adjacentes e o CSE com as portadas fechadas em período noturno (CSE Cenário 3). Na Figura 6.43 apresentam-se os resultados do comportamento térmico do compartimento sem estufa para o cenário 3, ou seja, com as portadas interiores fechadas em período noturno (entre as 20h e as 8h). Optou-se por

<sup>13</sup> Apenas para efeitos de simulação, não tendo implicações na solução construtiva per si.

não se realizar a simulação conjunta de estufa e portadas operáveis de modo a considerar os efeitos em separado. Comparando com os restantes cenários, Tabela 6.15, conclui-se que a que a opção de ter as portadas fechadas no período noturno não representa uma grande diferença para o compartimento sem estufa e por conseguinte, também não o representará para as soluções com estufa.

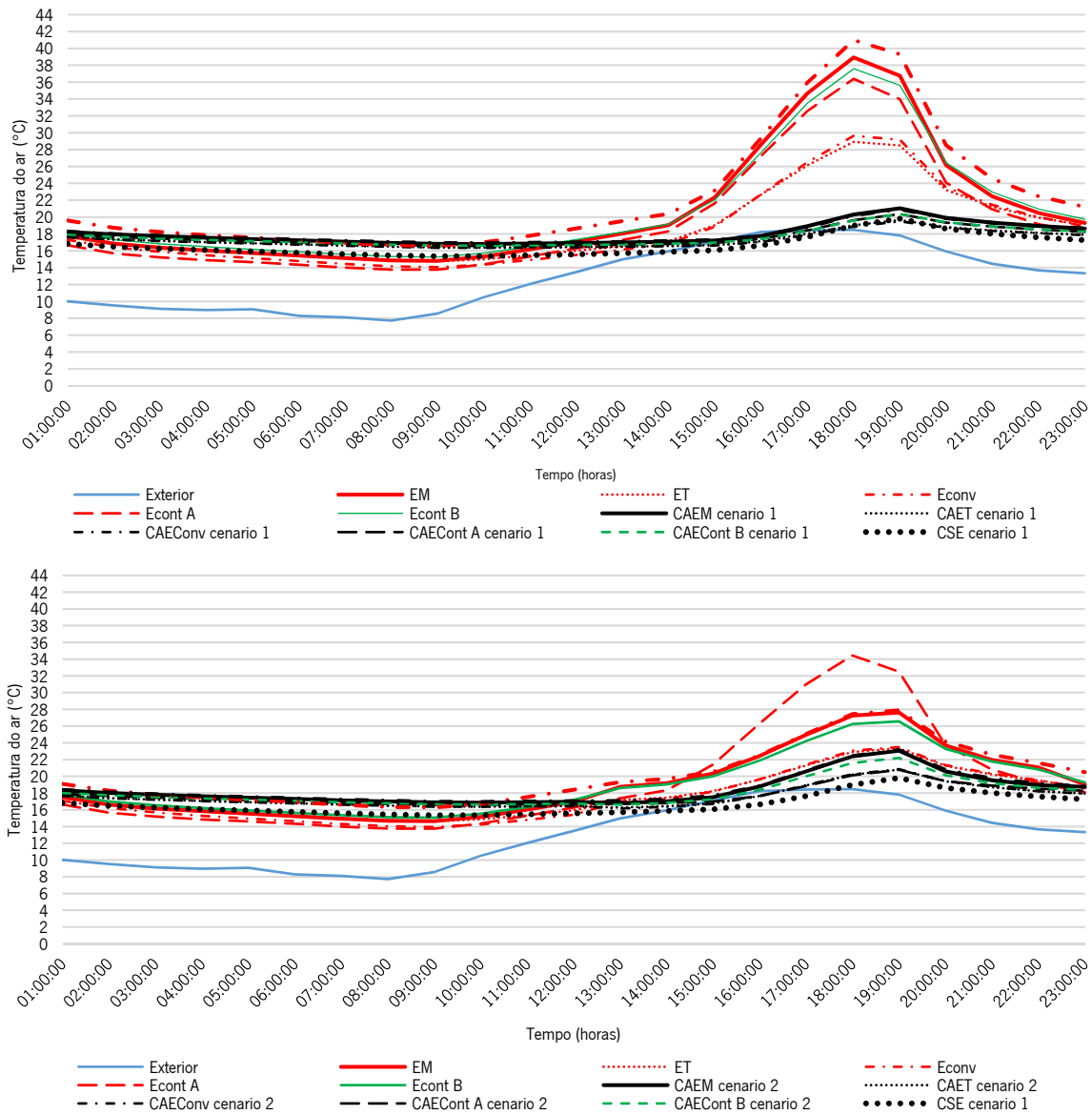


Figura 6.41. Análise comparativa entre os vários tipos de estufas e o compartimento habitável adjacente com e sem estufas – cenários 1 e 2 (de cima para baixo), um dia de uma semana típica de inverno.

Tabela 6.13. Horas de conforto na varanda encerrada com os vários tipos de estufas e no compartimento habitável adjacente com e sem estufas – semana típica de inverno – para o cenário 1 e 2.

	Exterior	EM	EP2M	ET	Econtv	Econt A	Econt B	CAEM	CAEP2M	CAET	CAEContv	CAECont A	CAECont B	CSE
<b>Cenário 1</b>														
HORAS DE CONFORTO	54	71	107	72	66	62	80	125	129	76	72	97	99	57
TEMPERATURA MÉDIA	16	20	21	19	19	19	20	19	19	18	18	18	18	17
TEMPERATURA MÁXIMA	25	42	43	31	32	40	40	23	23	21	21	22	22	22
TEMPERATURA MÍNIMA	8	15	17	15	14	14	15	17	17	16	16	17	17	15
<b>Cenário 2</b>														
HORAS DE CONFORTO	54	84	122	93	84	65	95	134	137	81	80	97	107	59
TEMPERATURA MÉDIA	16	19	21	19	18	19	20	19	19	18	18	18	18	17
TEMPERATURA MÁXIMA	25	30	30	25	26	37	29	25	25	23	23	23	24	22
TEMPERATURA MÍNIMA	8	15	16	15	14	14	15	17	17	16	16	17	17	15

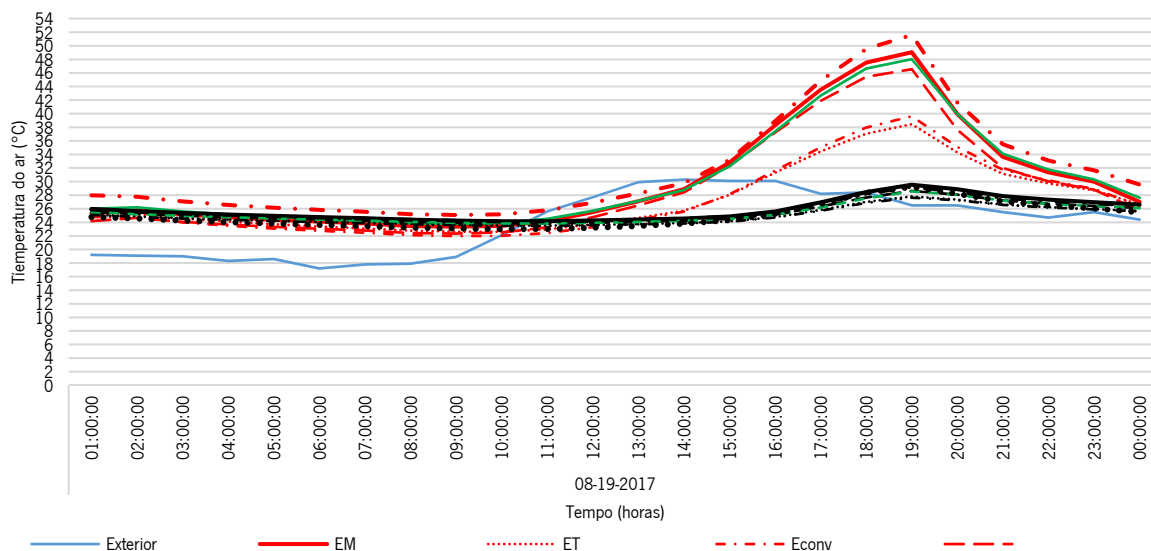


Figura 6.42. Comparativo entre os vários tipos de estufas e o compartimento habitável adjacente com e sem estufas – cenários 1 e 2 (de cima para baixo), num dia de uma semana típica de verão.

Tabela 6.14. Horas de conforto na varanda encerrada com os vários tipos de estufas e no compartimento habitável adjacente com e sem estufas – semana típica de verão – para o cenário 1 e 2.

	Exterior	EM	EP2M	ET	Econv	Econt A	Econt B	CAEM	CAEP2M	CAET	CAEConv	CAECont A	CAECont B	CSE
<b>Cenário 1</b>														
HORAS DE CONFORTO	64	18	0	30	42	31	11	12	12	42	43	27	27	48
TEMPERATURA MÉDIA	24	29	30	27	27	28	29	26	26	26	26	26	26	25
TEMPERATURA MÁXIMA	38	53	55	41	43	51	51	31	31	29	29	30	30	31
TEMPERATURA MÍNIMA	17	23	25	23	22	22	24	24	24	24	23	24	24	23
<b>Cenário 2</b>														
HORAS DE CONFORTO	64	99	70	94	35	28	74	70	75	57	70	28	54	48
TEMPERATURA MÉDIA	24	21	24	22	26	28	24	24	24	25	25	26	25	25
TEMPERATURA MÁXIMA	38	33	37	34	36	48	38	32	32	29	31	31	30	31
TEMPERATURA MÍNIMA	17	15	18	17	23	23	17	22	22	23	22	24	23	23

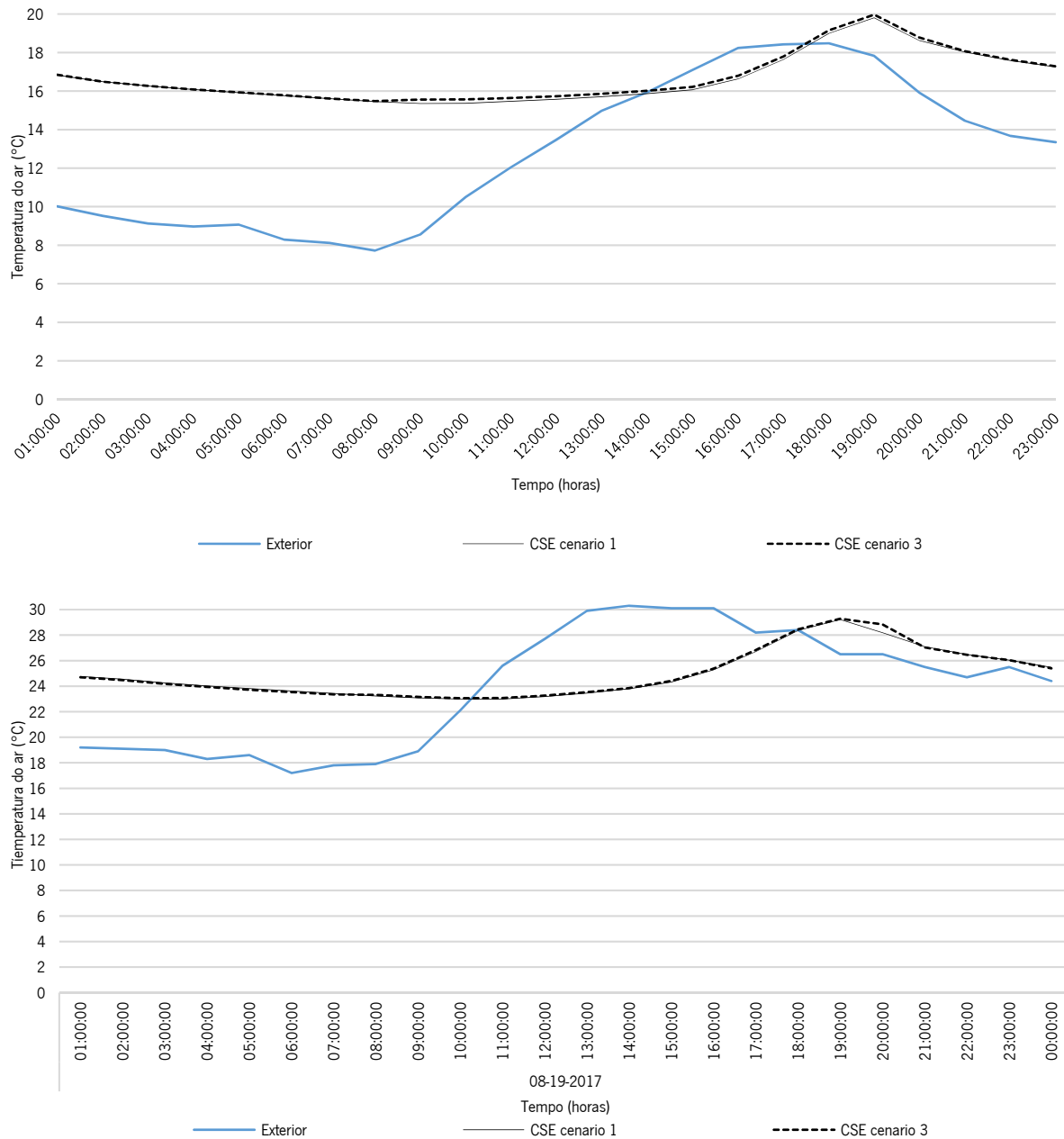


Figura 6.43. Comparativo entre os cenários 1, 2 e 3 para o compartimento sem estufa – num dia de uma semana típica de inverno e de uma semana típica de verão (de cima para baixo).

Tabela 6.15. Horas de conforto no compartimento sem estufa para o cenário 1, 2 e 3.

Semana típica de inverno	Horas de conforto	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
Exterior	54	16	25	8
CSE cenário 1	57	17	22	15
CSE cenário 3 (com portadas)	<b>56</b>	<b>17</b>	22	15
Semana típica de verão				
Exterior	64	24	38	17
CSE cenário 1	48	25	31	23
CSE cenário 3 (com portadas)	<b>50</b>	<b>25</b>	31	23

• **Cálculo das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento**

Os resultados do comportamento térmico apresentados anteriormente apontam para que a adoção de espaços solares/estufas para este tipo de edifícios tenha um efeito positivo. Contudo, de forma a realizar uma avaliação comparativa efetiva, decidiu-se calcular o consumo energético para o edifício, com e sem os diferentes tipos de soluções de estufa. Para o cálculo do consumo energético para aquecimento e arrefecimento utilizou-se, como

referido, o programa DesignBuilder. Simularam-se 7 modelos de edifício: 1 modelo do edifício sem estufas e 6 modelos de edifício em que cada um apresenta os tipos de estufa mencionados nas Figuras 6.29 e 6.30.

O comportamento térmico do edifício modelo, com e sem as soluções de estufa em análise, foi simulado para um ano inteiro, de acordo com os cenários indicados na Tabela 6.12 e as condições indicadas na Tabela 6.16. Em todos os modelos, assume-se uma taxa de renovação do ar a partir de infiltrações constantes em todo o edifício: de 15rph(50Pa) nos compartimentos adjacentes e sem estufa, de 5rph(50Pa) na ET e de 0.3rph(50Pa) nos restantes tipos de estufa. Por outro lado, dependendo da época do ano e para determinados períodos do dia, acrescentou-se um caudal mais elevado, também constante, devido à abertura de janelas.

Tabela 6.16. Condições de simulação.

Parâmetro	Observação
Paredes e pavimentos	Tabela 6.7
Envidraçados exteriores	Tabela 6.8
Sistema de climatização <sup>14</sup>	Radiador elétrico para aquecimento (COP 1)
7 dias por semana, 24h ligado	Ar condicionado para arrefecimento (COP 3)
Condições de climatização para aquecimento/arrefecimento	Temperatura do ar interior $\neq$ $>$ 18°C nos meses de aquecimento (outono e inverno) e $\leq$ 25°C nos meses de arrefecimento (primavera/ verão).
Ventilação na estufa	5rph(50Pa) na ET e 0rph(50Pa) nas restantes estufas
Ventilação nos compartimentos adjacentes à estufa	15rph(50Pa) (Hilliaho,2017)

#### • Resultados em função da orientação solar

De modo a averiguar a influência da orientação solar da fachada intervencionada, na impossibilidade de realizar ensaios experimentais para todas as orientações solares, após a validação do modelo com base nos ensaios experimentais efetuados no edifício com fachada orientada a Oeste, compararam-se os resultados da simulação de consumo energético do edifício com diferentes orientações solares e segundo os Cenários 1 e 2. Foram calculadas as necessidades energéticas de todo o edifício, antes e após a implementação de cada solução de estufa, e em particular para os respetivos compartimentos adjacentes. Efetuou-se assim o cálculo da quantidade de energia necessária para arrefecimento (não ultrapassando 25°C) e aquecimento (não descendo abaixo de 18°C), com o sistema de climatização definido na Tabela 6.16.

Começando por caracterizar o edifício sem intervenção (s/E), segundo os dados apresentados na Figura 6.44, verifica-se que este apresenta mais necessidades energéticas para aquecimento do que para arrefecimento, qualquer que seja a orientação solar da fachada onde se encontram as varandas. Em geral, no Cenário 1 verifica-se que existe uma redução significativa do consumo energético do edifício intervencionado com estufas (26% em média) relativamente ao edifício sem estufas. Verifica-se também que, dependendo da orientação solar da fachada intervencionada com as várias estufas em análise, a redução de consumo é variável, atingindo um máximo significativo de 34% na orientação a Sul (c/EP2M) e um mínimo de 13% na orientação a Oeste (c/ET).

Observando os resultados na Figura 6.44 e Tabela 6.17 verifica-se: (1) de um modo geral, as necessidades de arrefecimento são significativamente inferiores às de aquecimento neste edifício tipo com ou sem estufas; (2) a orientação solar da fachada onde a redução do consumo energético é maior, relativamente ao edifício s/E é a Sul (em média 31%) e a menor é a Oeste (em média 23%); (3) o consumo anual do edifício c/EP2M é o que mais diminui, entre 32% a 38% face ao consumo do edifício s/E, sobretudo devido à diminuição do consumo para aquecimento.

Observando os resultados na Figura 6.45 e Tabela 6.18 verifica-se que: (1) entre todas as soluções de estufa em análise, a EP2M é a que possibilita a maior redução de consumo energético para aquecimento, face ao CSE; (2) o consumo para arrefecimento aumenta significativamente no CEP2M, CAEM, CAECont A e CAECont B, sobretudo nas orientações solares da fachada a Este, Oeste e Sul, face ao CSE, devido ao facto de no Cenário 1 as janelas das estufas se encontrarem fechadas na estação de arrefecimento, gerando momentos de sobreaquecimento deste espaço; (3) contudo, o consumo energético total permanece inferior face ao CSE; (4)

<sup>14</sup> O sistema de aquecimento considerado foi o radiador elétrico (por ser aquele mais utilizado neste tipo de edifícios) com um coeficiente de desempenho (COP) de 1. Relativamente ao sistema de arrefecimento, correntemente, os utilizadores deste tipo de edifícios não utilizam equipamentos para arrefecimento na estação de verão. Contudo, considera-se a utilização de um sistema de ar condicionado (COP 3) apenas para determinar o consumo energético associado às necessidades de arrefecimento.

particularmente, na orientação solar Norte, o encerramento da varanda favorece o edifício existente, funcionando como uma zona tampão para evitar perdas de calor na estação de aquecimento, uma vez que as necessidades de arrefecimento são praticamente nulas.

A orientação solar mais favorável para a redução do consumo energético é sul (Figura 6.44), mas apresenta problemas de sobreaquecimento na estação de arrefecimento. Deste modo, analisa-se a influência da adoção de medidas passivas para aquecimento e arrefecimento das estufas e respetivos compartimentos adjacentes com o Cenário 2. Segundo os resultados do Cenário 1, selecionaram-se duas orientações solares para balizar os resultados: a orientação solar onde há mais reduções de consumo energético (Sul) e a orientação onde se verificou menos (Oeste).

Refere-se que as várias soluções de estufa em análise se distinguem: pela relação entre área opaca/transparente; material aplicado nessas áreas e características técnicas/construtivas que limitam a percentagem de abertura da área transparente (indicada na Tabela 6.5) de cada tipo de estufa. Por conseguinte, estas diferenças acentuam-se nos resultados do Cenário 2. Posto isto, com a adoção das medidas enunciadas no cenário 2, verificou-se uma redução significativa do consumo energético para aquecimento e arrefecimento no edifício com EP2M e orientação Sul (Figuras 6.46 e 6.47) (Tabela 6.19).

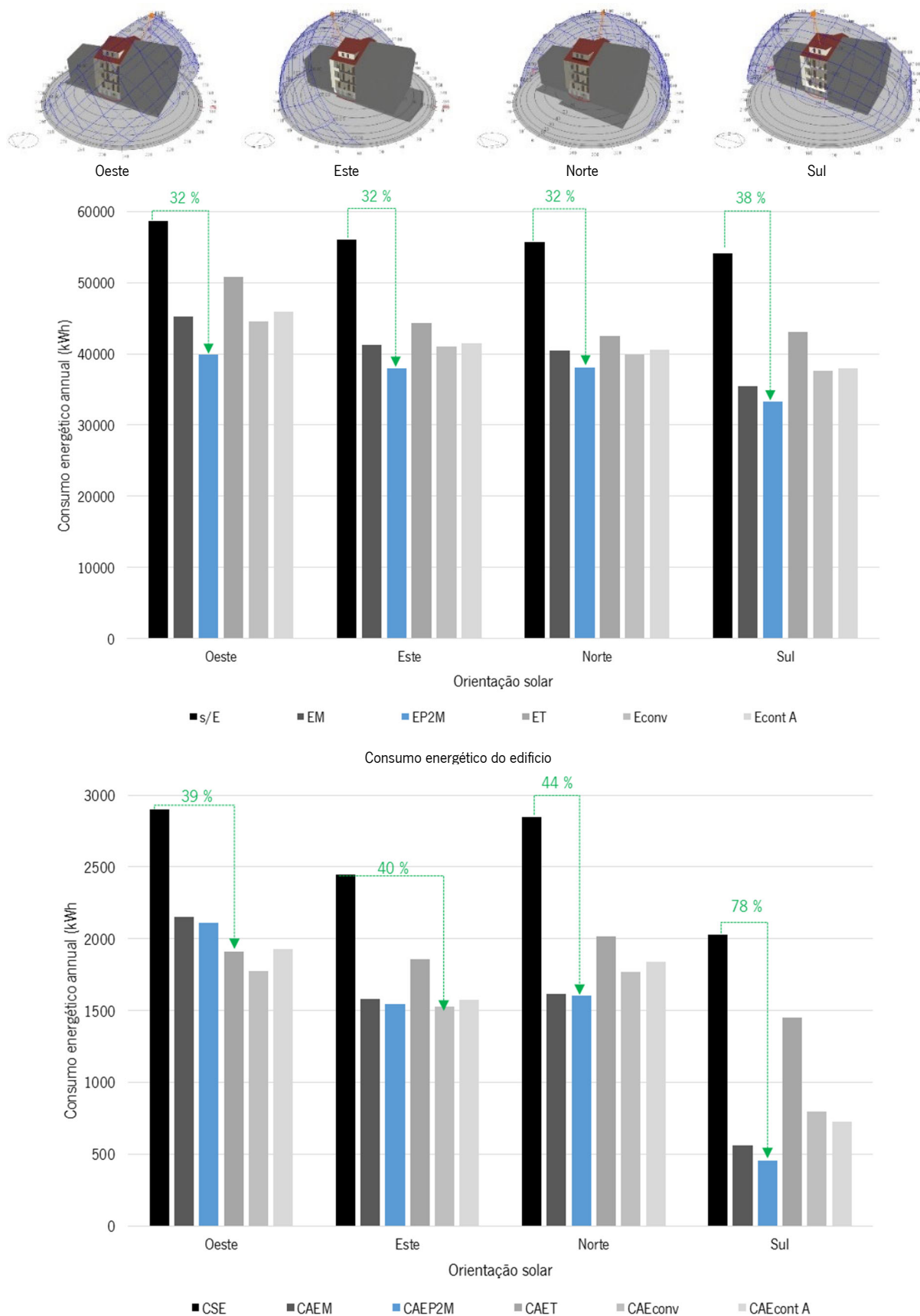
De um modo geral, com o cenário 2, o compartimento adjacente às estufas beneficia mais com a estratégia de arrefecimento do que com a estratégia de aquecimento (com abertura das janelas existentes na parede de meiação entre o compartimento e a estufa (nas horas em que a temperatura máxima é atingida na estufa), atingindo uma redução mínima e máxima de consumo energético de 2% (c/ET) e 91% (c/EP2M) respetivamente (Figuras 6.48 e 6.49) (Tabela 6.20).

Tabela 6.17. Consumo energético para o edifício sem e com as diferentes soluções de estufa - cenário 1 segundo orientação solar.

		Edifício							
Cenário 1		s/E	c/EM	c/EP2M	c/ET	c/EConv	c/ECont A	c/ECont A	Média*
OESTE	Consumo energético p/arrefecimento (kWh/ano)	1746	3739	1505	604	1373	1867	2482	
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	56875	41491	38344	50162	43167	44001	42046	
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m <sup>2</sup> )	112	85	74	95	83	86	83	
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>58621</b>	<b>45229</b>	<b>39849</b>	<b>50766</b>	<b>44540</b>	<b>45867</b>	<b>44528</b>	
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-23%</b>	<b>-32%</b>	<b>-13%</b>	<b>-24%</b>	<b>-22%</b>	<b>-24%</b>	<b>-23%</b>
ESTE	Consumo energético p/arrefecimento (kWh/ano)	1252	2074	1005	869	1036	1176	1504	
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	54826	39171	36933	43498	39940	40339	39581	
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m <sup>2</sup> )	108	77	71	83	77	78	77	
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>56078</b>	<b>41245</b>	<b>37938</b>	<b>44367</b>	<b>40976</b>	<b>41515</b>	<b>41085</b>	
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-26%</b>	<b>-32%</b>	<b>-21%</b>	<b>-27%</b>	<b>-26%</b>	<b>-27%</b>	<b>-27%</b>
NORTE	Consumo energético p/arrefecimento (kWh/ano)	964	571	518	645	580	583	566	
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	54735	39922	37506	41898	39277	40018	39509	
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m <sup>2</sup> )	108	76	71	80	75	76	75	
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>55699</b>	<b>40492</b>	<b>38024</b>	<b>42543</b>	<b>39858</b>	<b>40601</b>	<b>40075</b>	
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-27%</b>	<b>-32%</b>	<b>-24%</b>	<b>-28%</b>	<b>-27%</b>	<b>-28%</b>	<b>-28%</b>
SUL	Consumo energético p/arrefecimento (kWh/ano)	970	1197	777	754	730	775	912	
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	53139	34274	32537	42272	36860	37178	36124	
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m <sup>2</sup> )	105	66	62	80	70	71	69	
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>54109</b>	<b>35471</b>	<b>33314</b>	<b>43025</b>	<b>37590</b>	<b>37953</b>	<b>37036</b>	
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-34%</b>	<b>-38%</b>	<b>-20%</b>	<b>-31%</b>	<b>-30%</b>	<b>-32%</b>	<b>-31%</b>
<b>MÉDIA de redução do consumo*</b>			<b>-28%</b>	<b>-34%</b>	<b>-20%</b>	<b>-27%</b>	<b>-26%</b>	<b>-28%</b>	

Nota: \* redução em relação ao edifício sem estufas.





Consumo energético do compartimento habitável sem estufa e com estufa  
 Figura 6.44.Redução do consumo energético do edifício sem e com os vários tipos de estufa em análise (em cima) e para compartimento sem ou adjacente à estufa (em baixo) - Cenário 1 segundo a orientação solar.

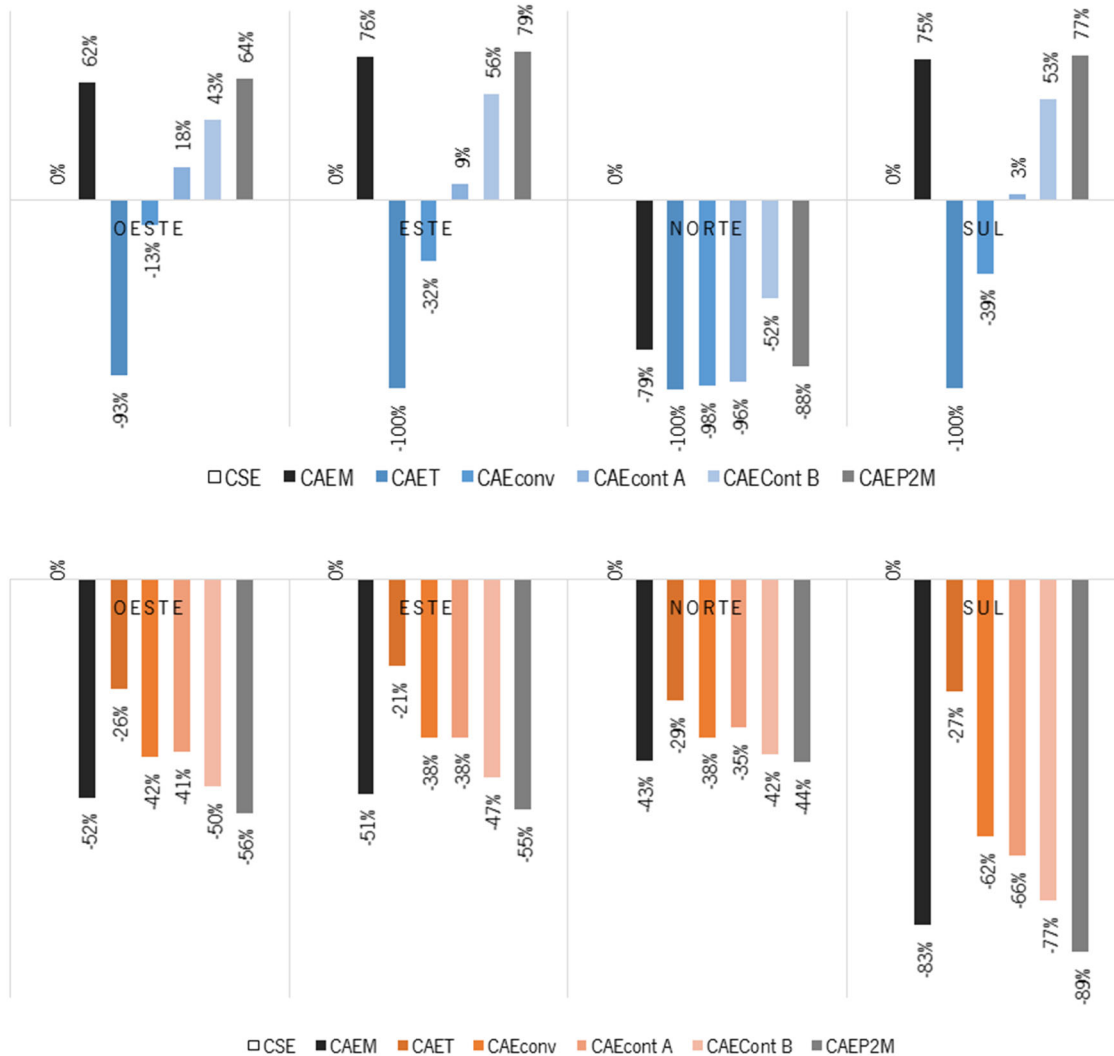


Figura 6.45. Percentagem de redução/aumento do consumo energético do compartimento adjacente às estufas, relativamente ao compartimento sem estufa - para arrefecimento (acima) e aquecimento (abaixo) – no Cenário 1 e segundo orientação solar.

Tabela 6.18. Consumo energético anual para um compartimento sem e adjacente às diferentes soluções de estufa – para o cenário 1 segundo diferentes orientações solares.

		Compartimento adjacente							
Cenário 1		CSE	CAEM	CAEP2M	CAET	CAEConv	CAECont A	CAECont B	Média*
OESTE	Consumo energético p/arrefecimento (kWh/ano)	350	931	983	25	304	425	611	
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	2552	1221	1127	1883	1470	1502	1289	
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m <sup>2</sup> )	109	81	79	72	67	72	71	
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>2902</b>	<b>2152</b>	<b>2110</b>	<b>1908</b>	<b>1774</b>	<b>1927</b>	<b>1900</b>	
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-26%</b>	<b>-27%</b>	<b>-34%</b>	<b>-39%</b>	<b>-34%</b>	<b>-35%</b>	<b>-32%</b>
ESTE	Consumo energético p/arrefecimento (kWh/ano)	106	440	492	0	71	116	242	
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	2338	1140	1050	1857	1453	1457	1230	
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m <sup>2</sup> )	92	59	58	70	57	59	55	
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>2444</b>	<b>1580</b>	<b>1542</b>	<b>1857</b>	<b>1524</b>	<b>1572</b>	<b>1472</b>	
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-35%</b>	<b>37%</b>	<b>-24%</b>	<b>-38%</b>	<b>-36%</b>	<b>-40%</b>	<b>-35%</b>
NORTE	Consumo energético p/arrefecimento (kWh/ano)	4	1	2	0	0	0	0	
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	2842	1612	1599	2017	1769	1837	1651	
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m <sup>2</sup> )	60	60	60	60	60	60	62	
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>2845</b>	<b>1613</b>	<b>1601</b>	<b>2017</b>	<b>1769</b>	<b>1837</b>	<b>1652</b>	
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-43%</b>	<b>-44%</b>	<b>-29%</b>	<b>-38%</b>	<b>35%</b>	<b>-42%</b>	<b>-39%</b>
SUL	Consumo energético p/arrefecimento (kWh/ano)	56	220	241	0	34	57	119	
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	1974	341	213	1448	760	670	455	
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m <sup>2</sup> )	76	21	17	54	30	27	22	
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>2030</b>	<b>562</b>	<b>454</b>	<b>1448</b>	<b>794</b>	<b>727</b>	<b>574</b>	
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-72%</b>	<b>-78%</b>	<b>-29%</b>	<b>-61%</b>	<b>-64%</b>	<b>-72%</b>	<b>-63%</b>
	<b>MÉDIA de redução do consumo*</b>		<b>-44%</b>	<b>-46%</b>	<b>-29%</b>	<b>-44%</b>	<b>-42%</b>	<b>-47%</b>	

Nota: \* em relação ao edifício s/ estufas.

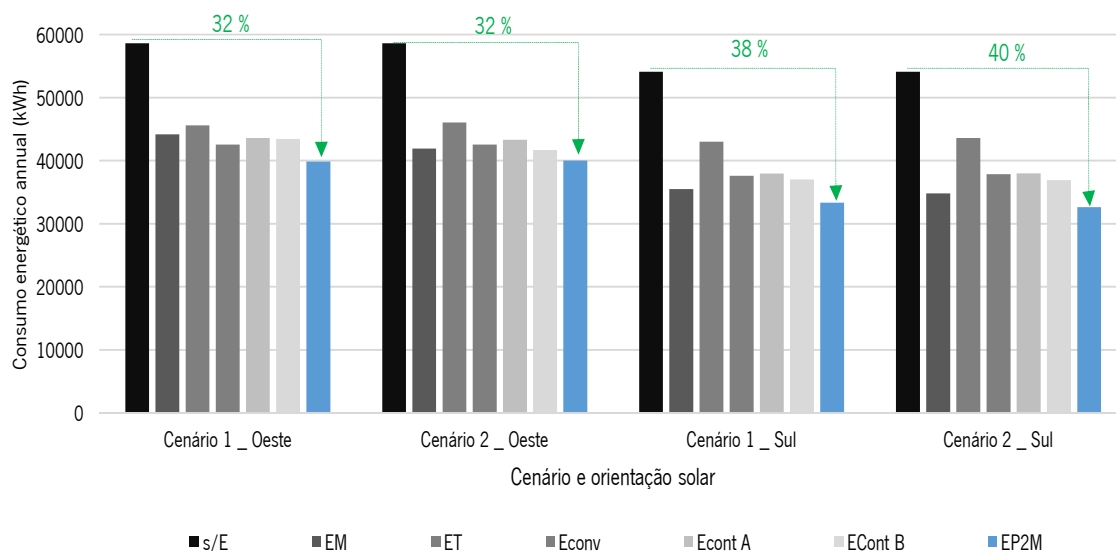


Figura 6.46. Comparação do consumo energético anual entre Cenário 1 e o Cenário 2 (com adoção de medidas passivas de arrefecimento e aquecimento) – p/o edifício sem e com estufas.

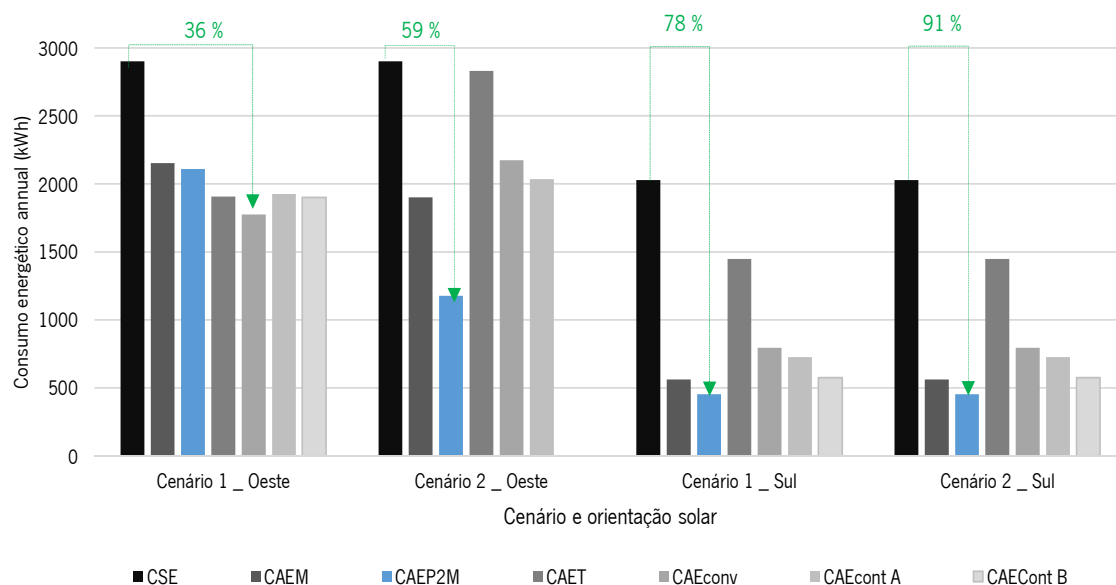


Figura 6.47. Comparação do consumo energético anual entre Cenário 1 e o Cenário 2 (com adoção de medidas passivas de arrefecimento e aquecimento) – p/o compartimento sem e adjacente às estufas.

Tabela 6.19. Consumo energético anual, para o edifício existente sem e com as diferentes soluções de estufa – para o cenário 2 segundo a orientação solar menos (Oeste) e mais (Sul) favorável (segundo os resultados do cenário 1).

		Edifício existente						
Cenário 2		s/E	c/EM	c/EP2M	c/ET	c/EConv	c/ECont A	c/ECont B
OESTE	Consumo energético p/arrefecimento (kWh/ano)	1746	1462	1886	1057	1391	1571	1043
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	56875	40449	38133	44993	41178	41738	40975
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m²)	112	78	75	86	80	81	79
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>58621</b>	<b>41911</b>	<b>40019</b>	<b>46050</b>	<b>42569</b>	<b>43309</b>	<b>42018</b>
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-29%</b>	<b>-32%</b>	<b>-21%</b>	<b>-27%</b>	<b>-26%</b>	<b>-28%</b>
SUL	Consumo energético p/arrefecimento (kWh/ano)	970	637	56	752	730	661	623
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	53139	34168	32598	42842	37117	37359	36274
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m²)	105	65	61	81	71	71	69
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>54109</b>	<b>34805</b>	<b>32654</b>	<b>43594</b>	<b>37847</b>	<b>38020</b>	<b>36897</b>
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-36%</b>	<b>-40%</b>	<b>-19%</b>	<b>-30%</b>	<b>-30%</b>	<b>-32%</b>

Nota: \* em relação ao edifício sem estufas.

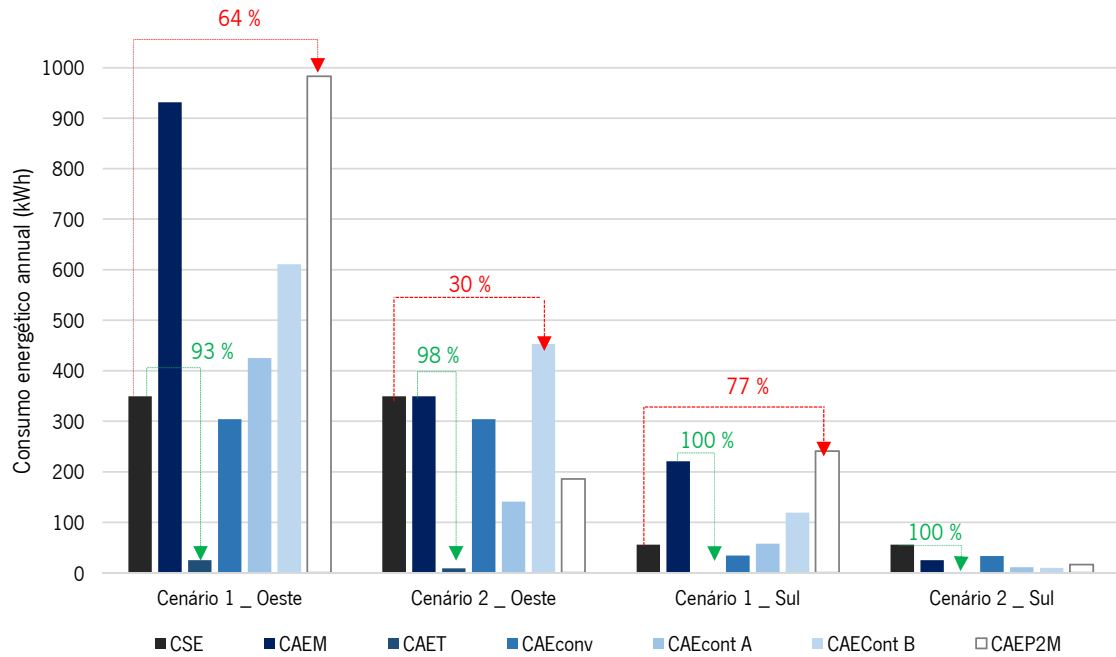


Figura 6.48. Consumo energético para arrefecimento do compartimento adjacente cenário 1 e 2.

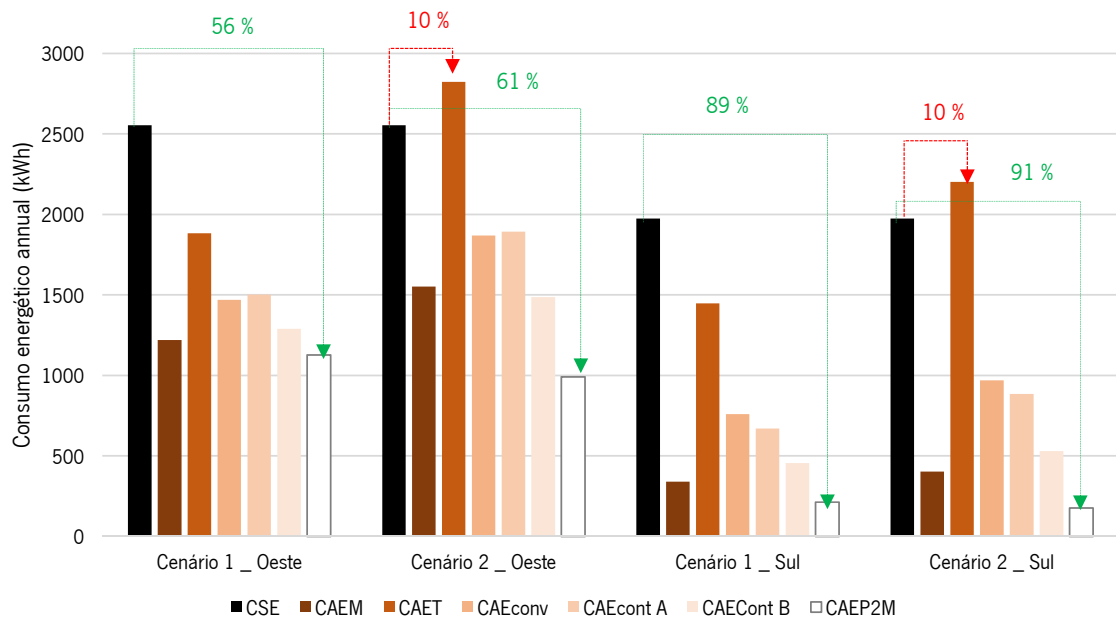


Figura 6.49. Consumo energético com aquecimento do Compartimento adjacente nos cenários 1 e 2.

Tabela 6.20. Necessidades energéticas anuais, para um compartimento útil sem estufa e adjacente às diferentes soluções de estufa – para o cenário 2, segundo a orientação solar mais e menos favorável (segundo os resultados do cenário 1).

		Compartimento adjacente						
Cenário 2		CSE	CAEM	CAEP2M	CAET	CAEConv	CAEcont A	CAEcont B
OESTE	Consumo energético p/ arrefecimento (kWh/ano)	448	414	186	104	378	210	518
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	2552	1551	991	2823	1869	1893	1485
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m²)	109	64	40	96	73	69	65
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>2902</b>	<b>1901</b>	<b>1177</b>	<b>2831</b>	<b>2173</b>	<b>2034</b>	<b>1938</b>
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-35%</b>	<b>-59%</b>	<b>-2%</b>	<b>-25%</b>	<b>-30%</b>	<b>-33%</b>
SUL	Consumo energético p/ arrefecimento (kWh/ano)	56	25	16	0	33	11	10
	Consumo energético p/ aquecimento (kWh/ano)	1974	403	176	2201	969	885	530
	Consumo energético por área climatizada (kWh/m²)	76	14	6	74	34	30	18
	<b>TOTAL (kWh/ano)</b>	<b>2030</b>	<b>428</b>	<b>192</b>	<b>2201</b>	<b>1002</b>	<b>896</b>	<b>540</b>
	<b>Redução do consumo*</b>	<b>0%</b>	<b>-79%</b>	<b>-91%</b>	<b>+8%</b>	<b>-51%</b>	<b>-56%</b>	<b>-73%</b>

Nota: \* em relação ao edifício sem estufas.

Numa visão global e comparada das várias soluções de estufa em análise, a EP2M é a melhor em termos energéticos, a par da EM que constituem as soluções alternativas propostas (Figura 6.50 e Tabela 6.21). Entre as soluções de referência, a ECont B é a que apresenta o maior benefício para o edifício SE. Posto isto, demonstra-se que as soluções de estufa com membranas arquitetónicas, juntamente com a adoção das medidas passivas propostas no Cenário 2 beneficiam um edifício com estas características. Contudo, salvaguarda-se que, para além da orientação solar, o desempenho destas soluções também varia consoante o clima e posição geográfica, como foi concluído em vários estudos (Osterle *et al.*, 2001; Mendonça, 2005; Aelenei *et al.*, 2014; Panagiotis, 2014).

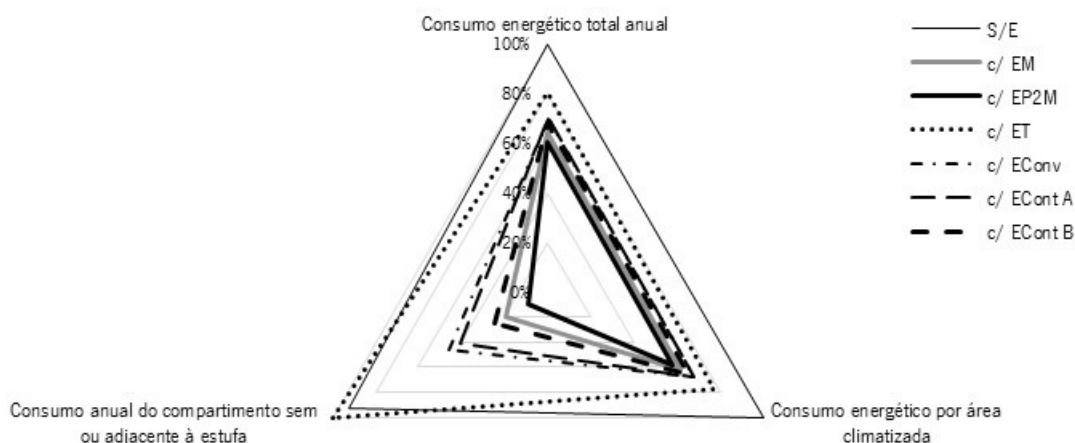


Figura 6.50. Comparação dos aspetos de termo energéticos (valores em percentagem) entre o edifício sem e com intervenção de reabilitação, através da integração de diferentes soluções de estufas: tradicionais, convencionais, contemporâneas e alternativas com membranas arquitetónicas. Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área.

Tabela 6.21. Síntese dos resultados da simulação do consumo energético operacional do edifício sem e com integração das várias soluções de estufa em análise, segundo o cenário 2 e para a orientação solar mais favorável (Sul) da fachada com varanda-Oeste.

Edifício existente:	Parâmetro (Unidade)					Ranking (1º melhor)
	Orientação solar mais favorável – Sul					
	Consumo energético anual (kWh.ano)	Consumo energético por Área climatizada (kWh/m².ano)	Consumo anual do compartimento sem ou adjacente à estufa (kWh/m².ano)	Consumo energético operacional (kWh) (60anos)		
s/E	54109	105	2030	3 246 540		7ª
c/ET	43594	81	2201	2 615 640		6ª
c/EConv	37847	71	1002	2 270 820		5ª
c/ECont A	38020	71	896	2 281 200		4ª
c/ECont B	36897	69	540	2 213 820		3ª
c/EM	34805	65	428	1 968 300		2ª
c/EP2M	32654	61	192	1 959 240		1ª

#### 6.5.4. Avaliação do impacto ambiental no ciclo de vida

O ambiente construído é o que mais contribui para a emissão de gases que provocam efeito de estufa, resultantes de processos de construção, manutenção e utilização do edifício. A energia utilizada durante a vida útil do edifício pode ser classificada de duas formas: (1) Energia Incorporada (EI) - associada à fase de construção e manutenção do edifício; e (2) Energia Operacional (EO) – associada à fase de utilização do edifício.

A avaliação e certificação do desempenho ambiental centram-se, a nível europeu, nos materiais ou soluções construtivas. Quando disponível, é através de uma declaração ambiental do Tipo III – Declaração Ambiental de Produto – DAP, (*Environmental Product Declaration – EPD*) que é possível avaliar a utilização sustentável de recursos e o impacto das obras de construção no ambiente. Segundo a Agência Europeia do Ambiente, em qualquer estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV) (extensível a intervenções de reabilitação de edifícios existentes) deverão desenvolver-se os seguintes passos (norma ISO 14040 (ISO, 2006)): 1) definição de objetivo e enquadramento; 2) inventário do ciclo de vida; 3) avaliação de impactos; 4) interpretação de resultados. A presente avaliação do impacto ambiental no ciclo de vida do edifício intervencionado com as várias soluções de

estufa integradas realiza-se de acordo com a Norma Europeia EN 15804/15978. O programa/ferramenta informática selecionado para calcular o impacto ambiental foi o *One Click LCA (2015)*<sup>15</sup>. Este programa de ACV cobre todas as etapas do ciclo de vida numa lógica de *cradle to grave* (do berço ao túmulo) com resultados diferenciados segundo as etapas de produção, construção, utilização, energia operacional e fim de vida. Para além disso, este programa e as bases de dados associadas estão de acordo com a norma ISO 14040/14044 ou EN 15804.

• **Definição do objetivo e enquadramento**

Esta análise tem como objetivo comparar o impacto ambiental de soluções de reabilitação com 6 tipos de estufas integradas quando aplicadas num edifício existente e com vida útil estimada de 60 anos. A unidade funcional utilizada é o kg. O sistema de fronteira da avaliação é do “berço ao portão” (*Cradle-to-gate*, em inglês) (Tabela 6.22) até à disposição final do produto no fim de vida ou “grave”, túmulo em inglês). Na Tabela 6.23 apresentam-se os pressupostos e limitações consideradas na presente avaliação.

Tabela 6.22. Módulos considerados no sistema de avaliação do ciclo de vida - fronteira do sistema de avaliação (EN 15804).

**Tipo de fronteira do Sistema: “do berço ao portão, com opções”**

	Obrigatório			Opcional		Opcional						Opcional				Benefícios e cargas ambientais para além da fronteira do sistema	
	A1-A3 Etapa de produção			A4-A5 Etapa de construção		B1-B6 Etapa de utilização						C1-C4 Etapa de fim de vida					
Estágios do ciclo de vida	Extracção e processamento de matérias-primas	Transporte	Produção	Transporte	Processo de construção	Utilização	Manutenção	Reparação	Substituição	Reabilitação	Uso de energia (operacional)	Uso de água (operacional)	Desconstrução e demolição	Transporte	Processamento de resíduos	Eliminação final	Potencial de reutilização, reciclagem e valorização
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	X	V	V	V	V	V

V = incluído; X= módulo não declarado (por não se conhecerem todos os impactos ambientais associados).

Tabela 6.23. Síntese da definição do enquadramento da análise ACV em estudo.

<b>Unidade funcional</b>	1 kg de material
<b>Fronteira do Sistema:</b>	“Do berço ao túmulo”
<b>Período de cálculo:</b>	60 anos
<b>Pressupostos e limitações</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os impactos ambientais associados ao transporte foram obtidos com base no peso dos materiais, negligenciando o seu volume.</li> <li>Considera-se que a membrana de PVC será substituída ao fim de 30 anos, os restantes materiais apresentam a durabilidade de 60 anos mas requerem manutenção periódica decenal. As operações de manutenção foram definidas com base nas indicações dos instaladores de cada solução. A reciclagem da membrana de ETFE foi documentada por Peters -plastic GmbH (Texlon, 2011).</li> <li>A membrana ETFE apresenta propriedades anti adesivas, de auto limpeza através da chuva (Monticelli &amp; Zanelli, 2016); requer inspeções periódicas para: (a) verificar se existe deposição de sujidade nas extremidades;(b) detetar possíveis danos de modo a serem reparados o mais rápido possível (Texlon, 2011).</li> <li>As soluções EM, EP2M, ECont A e ECont B apresentam materiais homogéneos, sistema de construção seco, fácil desconstrução e separação de componentes: reciclagem tipo <i>down cycling</i>.</li> <li>As soluções ET, EConv, EContA e EContB requerem manutenção periódica dos elementos de calafetagem (borrachas) de 10 em 10 anos e limpeza dos vidros pelo mesmo período (EPD, 2012).</li> </ul>

• **Inventário**

A Tabela 6.24 apresenta o inventário de materiais (com o respectivo peso) de cada solução construtiva de modo a proceder à avaliação do perfil ambiental de cada solução de estufa em estudo.

Tabela 6.24. Inventário ACV. Para todos os componentes, a massa inicial baseia-se na quantidade de material usada para construir uma estufa com superfície de fachada de 100m<sup>2</sup>.

<sup>15</sup> One Click LCA © copyright Bionova Ltd |Version: 20.12.2017, database version: 7.3; licença de estudante, gentilmente cedida pela Bionova, no âmbito do presente estudo.

<sup>16</sup> *downcycling* ocorre quando o material residual se converte em algo com menor valor (<https://www.looptworks.com/blogs/looptworks-blog/34391171-upcycling-downcycling-and-recycling-explained>).

	Peso [kg]		Peso [kg]
Materiais utilizados nas soluções de estufa:		Materiais utilizados nas soluções de estufa:	
<b>ET</b>		<b>EConv</b>	
Vidro simples (3mm)	198	Vidro simples (6mm)	813
Madeira de pinho local	1508	Alumínio (comercial 30% reciclado)	220
Chapa ondulada de zinco	698	Tijolo cerâmico furado (15cm) + argamassa cimento	6882
Argamassa tradicional (cal e areia)	1842	Reboco cimento e areia	1551
Gesso	267	Pintura sintética	15
Pintura e verniz sintéticos	38		
<b>Total</b>	<b>4550</b>	<b>Total</b>	<b>9481</b>
<b>Total para 1 m²</b>	<b>46</b>	<b>Total para 1 m²</b>	<b>95</b>
<b>ECont A</b>		<b>ECont B</b>	
Vidro duplo (4mm (16mm) 4mm)	1631	Vidro simples (10mm)	2038
Alumínio (comercial 30% reciclado)	294	Alumínio (comercial 30% reciclado)	113
<b>Total</b>	<b>1925</b>	<b>Total</b>	<b>2152</b>
<b>Total para 1 m²</b>	<b>19</b>	<b>Total para 1 m²</b>	<b>22</b>
<b>EM</b>		<b>EP2M</b>	
Alumínio (comercial 30% reciclado)	75	Alumínio (comercial 30% reciclado) (perfil secção30x30mm)	90
Membrana de PVC cristal calandrada (0.8mm)	116	Membrana dupla de ETFE (0.25mm + 0.25mm)	86
<b>Total</b>	<b>191</b>	<b>Total</b>	<b>176</b>
<b>Total para 1 m²</b>	<b>1.9</b>	<b>Total para 1 m²</b>	<b>1.8</b>

Biblioteca/fonte de ICV (Inventário do Ciclo de Vida): One Click LCA (2015)

• **Resultados**

Os resultados, da avaliação do impacto ambiental de cada solução de estufa encontram-se na Tabela 6.25. A Figura 6.51 apresenta uma análise comparativa entre as várias soluções, onde globalmente, a solução EM é a que apresenta menores impactos ambientais no seu ciclo de vida.

Tabela 6.25. Resultados da avaliação ACV, considerando uma vida útil de 60 anos, para cada solução de estufa.

Nota: inclui o uso de energia operacional para a área útil climatizada do edifício com cada tipo de estufa. Resultados gerados com a ferramenta informática One Click LCA © (2015).

Solução	Etapa	Descrição	Indicadores EN 15978 (unidade)				EI (MJ)
			PAG (kgCO2e)	PA (kgSO2e)	PE (kgPO4e)	PDCO/PCOF (kgEthenee)	
ET	A1-A3	Materiais de construção	5190	24.1	13.7	2.3	46265
	A4	Transporte para o local da obra	60	0.2	0.1	-0.1	876
	A5	Processo de construção	2207	7.7	4.6	0.3	40659
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	1107	2.3	0.3	2.1	16881
	B6	Uso de energia operacional*	1235074	6714.0	912.1	328.0	21220995
	C1-C4	Desconstrução	26	0.4	0.5	0.0	451
	D	Potencial de reutilização/reciclagem e valorização	-2720	-4.5	-1.2	-0.4	-61484
		<b>Total s/uso de energia operacional</b>	<b>8590</b>	<b>34.7</b>	<b>19.0</b>	<b>4.6</b>	<b>105132</b>
	<b>Total</b>	<b>1240944</b>	<b>6744</b>	<b>930</b>	<b>332</b>	<b>21264644</b>	
EConv	A1-A3	Materiais de construção	6145	24.9	3.5	2.0	97230
	A4	Transporte para o local da obra	92	0.3	0.1	-0.1	1355
	A5	Processo de construção	2207	7.7	4.6	0.3	40659
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	758	6.1	0.5	0.6	8464
	B6	Uso de energia operacional*	1072254	5828.9	791.8	284.8	18423430
	C1-C4	Desconstrução	63	0.2	0.1	0.0	1521
	D	Potencial de reutilização/reciclagem e valorização	-1989	-8.8	-0.6	-0.5	-35342
		<b>Total s/uso de energia operacional</b>	<b>9266</b>	<b>39.1</b>	<b>8.7</b>	<b>2.7</b>	<b>149229</b>
	<b>Total</b>	<b>1079530</b>	<b>5859</b>	<b>800</b>	<b>287</b>	<b>18537317</b>	
ECont A	A1-A3	Materiais de construção	4801	22.5	3.8	1.4	69120
	A4	Transporte para o local da obra	36	0.1	0.0	0.0	823
	A5	Processo de construção	2207	7.7	4.6	0.3	40659
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	0	0.0	0.0	0.0	0
	B6	Uso de energia operacional*	1077155	5855.5	795.5	286.1	18507644
	C1-C4	Desconstrução	4	0.0	0.0	0.0	88
	D	Potencial de reutilização/reciclagem e valorização	-1699	-7.5	-0.5	-0.5	-30187
		<b>Total s/uso de energia operacional</b>	<b>7049</b>	<b>30.3</b>	<b>8.4</b>	<b>1.6</b>	<b>110689</b>
	<b>Total</b>	<b>1082505</b>	<b>5878</b>	<b>803</b>	<b>287</b>	<b>18588146</b>	
ECont B	A1-A3	Materiais de construção	4415	21.7	5.2	1.4	55812
	A4	Transporte para o local da obra	35	0.1	0.0	0.0	509
	A5	Processo de construção	2207	7.7	4.6	0.3	40659
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	0	0.0	0.0	0.0	0
	B6	Uso de energia operacional*	1045339	5682.6	772.0	277.6	17960982
	C1-C4	Desconstrução	7	0.1	0.0	0.0	143
	D	Potencial de reutilização/reciclagem e valorização	-656	-2.9	-0.2	-0.2	-11648
		<b>Total s/uso de energia operacional</b>	<b>6664</b>	<b>29.6</b>	<b>9.8</b>	<b>1.6</b>	<b>97123</b>
	<b>Total</b>	<b>1051348</b>	<b>5709</b>	<b>782</b>	<b>279</b>	<b>18046458</b>	



Solução	Etapa	Descrição	Indicadores EN 15978 (unidade)				EI
			PAG (kgCO2e)	PA (kgSO2e)	PE (kgPO4e)	PDCO/PCOF (kgEthenee)	
EM	A1-A3	Materiais de construção	1675	7.5	0.7	0.5	36376
	A4	Transporte para o local da obra	42	0.2	0.0	-0.1	618
	A5	Processo de construção	2207	7.7	4.6	0.3	40659
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	393	2.0	0.3	0.1	13069
	B6	Uso de energia operacional*	986070	5360.4	728.2	261.9	16942624
	C1-C4	Desconstrução	5	0.0	0.0	0.0	39
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-854	-3.8	-0.2	-0.2	-15173
		<b>Total s/ uso de energia operacional</b>	<b>4323</b>	<b>17.4</b>	<b>5.6</b>	<b>0.8</b>	<b>90762</b>
	<b>Total</b>	<b>989539</b>	<b>5374</b>	<b>734</b>	<b>262</b>	<b>17018212</b>	
EP2M	A1-A3	Materiais de construção	4909	20.4	1.2	1.5	86825
	A4	Transporte para o local da obra	33	0.1	0.0	0.0	492
	A5	Processo de construção	2207	7.7	4.6	0.3	40659
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	0	0.0	0.0	0.0	0
	B6	Uso de energia operacional*	925130	5029.1	683.2	245.7	15895545
	C1-C4	Desconstrução	0	0.0	0.0	0.0	2
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-775	-3.3	-0.2	-0.2	-13746
		<b>Total s/ uso de energia operacional</b>	<b>7150</b>	<b>28.2</b>	<b>5.8</b>	<b>1.7</b>	<b>127977</b>
	<b>Total</b>	<b>931504</b>	<b>5054</b>	<b>689</b>	<b>247</b>	<b>16009777</b>	

Notas:

EI (Energia Incorporada); PAG (Potencial de Aquecimento Global); PA (Potencial de Acidificação); PE (Potencial de Eutrofização); PDCO/ PCOF (Potencial de Depleção de Camada de Ozono). Considera-se que todos os componentes em alumínio são produzidos a partir de alumínio reciclado. De acordo com EAA (2013), mais de 90 % do alumínio utilizado na construção de edifícios na Europa é reciclado.

\* Energia operacional durante 60 anos para aquecimento e arrefecimento do edifício todo com a solução de reabilitação indicada.

### • Discussão dos resultados

Da análise da Tabela 6.26, verifica-se que os indicadores PAG e EI são os que apresentam maiores valores e com base nisso elaborou-se o gráfico da Figura 6.52, onde se comparam todas as etapas de ACV considerando apenas estes indicadores para cada solução de reabilitação. Assim, verifica-se o seguinte:

- (1) as soluções EP2M e EM – ambas soluções alternativas em membrana – são as que apresentam menores impactos ambientais e a solução ET o oposto;
- (2) globalmente, com as soluções alternativas de membrana (EM e EP2M) consegue-se alcançar uma redução dos indicadores de impacto ambiental na ACV entre 6 a 25%, relativamente às restantes (Tabela 6.26);
- (3) na fase A1-A4 Materiais de construção, verifica-se que, apesar da quantidade de materiais ser reduzida, no caso EM e EP2M, a EI (Energia Incorporada) e o PAG (Potencial de Aquecimento Global) são elevados, sobretudo devido ao processo de produção químico de polimerização do PVC e do ETFE (Figura 6.52);
- (4) a estrutura de suporte das estufas ECont A, EContB, EM e EP2M é feita de alumínio, cuja produção envolve grandes quantidades de energia incorporada; como a membrana de PVC ou de ETFE é muito mais leve do que o vidro, necessita de uma estrutura de suporte mais reduzida; deste modo, com a utilização de membrana, a quantidade de alumínio é reduzida em 30 a 60% (Tabela 6.26), com a consequente redução da energia incorporada (Figura 6.52);
- (5) as membranas de PVC ou ETFE são produzidas em Londres, 2000 km de distância da cidade do Porto, mas, por outro lado, o vidro é produzido em Portugal, a 200 km de distância da cidade do Porto; percorrendo estas distâncias com um veículo a motor a gasóleo, com capacidade de 3.5-20.0t, as emissões de CO<sub>2</sub> para transportar a solução EM e EP2M (com membrana de PVC ou ETFE e alumínio) são praticamente as mesmas para transportar as soluções EContA ou EContB que são constituídas apenas por vidro e alumínio) (Figura 6.52), apesar da solução EP2M pesar apenas 2% do peso da solução de referência mais pesada (EConv) e 9% do peso da solução de referência mais leve (ECont A).

Para além dos aspetos referidos, existem outros que influenciam a ACV como a durabilidade e a manutenção. Considera-se que: (1) as características óticas da membrana de ETFE, ou de PVC cristal são equivalentes às do vidro; contudo, no caso da membrana de PVC, por ser aplicada verticalmente e estar recolhida da estação de verão, considera-se que o grau de transparência é afetado após 30 anos de exposição solar e, por isso, a sua substituição acontece a cada 30 anos; (2) apesar da necessidade de substituição da membrana, a EM continua a apresentar menor impacto ambiental ACV, sobretudo devido ao facto de apresentar os menores impactos na fase de utilização (Módulo B6 - uso de energia operacional), de fim de vida (modulo C1-C4 - desconstrução) e no potencial de reutilização/reciclagem (módulo D); (3) a membrana ETFE é Auto lavável (se existir chuva), contudo, os outros materiais requerem mais água, energia e produtos de limpeza para a sua manutenção; (4) as soluções em vidro requerem mais manutenção, ao fim de 10–15 anos, quando comparadas com a de

membrana, sobretudo devido ao envelhecimento das juntas de estanquidade que são superiores às das soluções com membranas que apresentam uma superfície contínua e homogénea.

Em relação à etapa de desconstrução verifica-se que as soluções com membrana<sup>17</sup> (EM e EP2M) são as que apresentam menores impactos ambientais, em oposição à solução convencional (EConv) e tradicional (ET). Relativamente ao potencial de reutilização/reciclagem (módulo D<sup>18</sup>) a solução ECont B é a que requer menor consumo de energia e produz menos CO<sub>2</sub>, em oposição às soluções EConv e ET.

Refere-se ainda que a poupança de energia através da reciclagem, em vez da produção de novos materiais, é muito mais elevada nos plásticos (88%) do que no vidro (apenas 5%) (Mumma, 1995). O baixo ponto de fusão do PVC torna o processo de reciclagem económico e com baixo impacto ambiental, enquanto a reciclagem de vidro de construção consome mais energia e não permite a reintrodução do material com a mesma qualidade (processo downcycling) (Mendonça, 2005).

Tabela 6.26. Comparação dos resultados ACV de cada solução de reabilitação segundo os indicadores de impacto.

Solução	Indicadores EN 15978 (unidade)										Ranking (1º é melhor)
	PAG (kgCO <sub>2</sub> e)	%*	PA (kgSO <sub>2</sub> e)	%*	PE (kgPO <sub>4</sub> e)	%*	PDCO/PCOF (kgEthenee)	%*	EI (MJ)	%*	
ET	1240944	25	6744	25	930	25	332	25	21264644	25	6º
EConv	1079530	14	5859	14	800	14	287	14	18537317	14	4º
ECont A	1082505	14	5878	14	803	14	287	14	18588146	14	5º
ECont B	1051348	11	5709	11	782	11	279	11	18046458	11	3º
EM	989539	6	5374	6	734	6	262	6	17018212	6	2º
EP2M	931504	0	5054	0	689	0	247	0	16009777	0	1º

Nota: a) PAG (Potencial de Aquecimento Global); b) EI (Energia Incorporada); c) EO (Energia Operacional – para aquecimento e arrefecimento apenas da área útil do piso recuado). \* Redução/ aumento da EP2M relativamente a ...

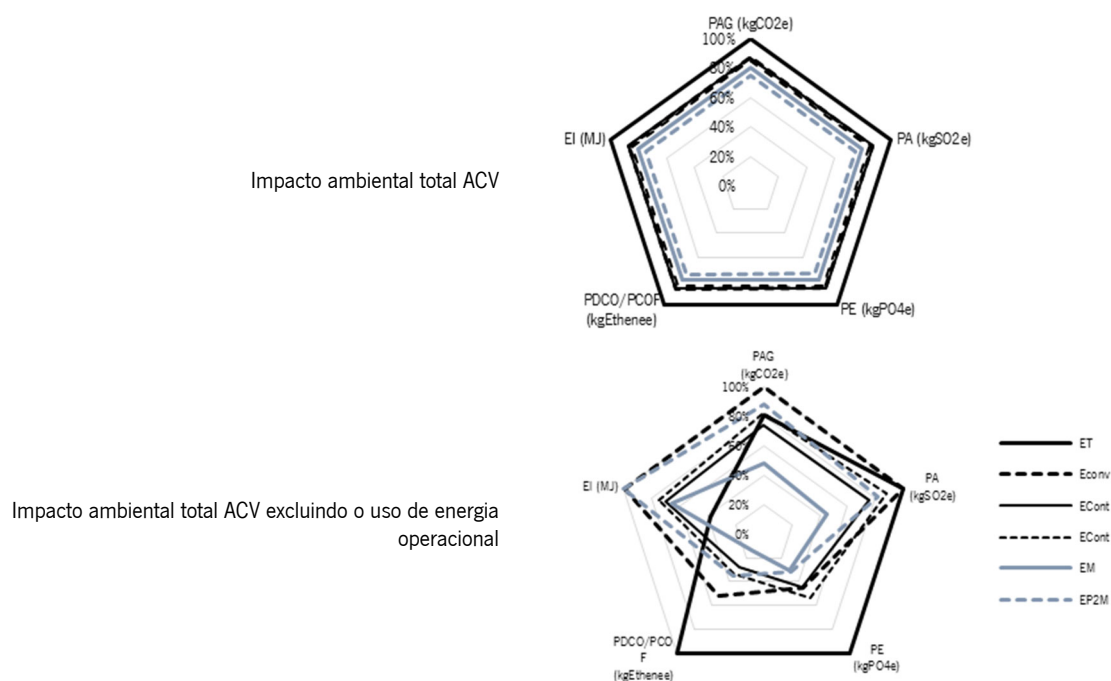


Figura 6.51. Comparação entre as soluções de reabilitação segundo os resultados ACV (valores em percentagem). Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área.

<sup>17</sup> A conceção das soluções alternativas teve como requisitos: (1) que todos os seus componentes possam ser separados e reciclados no fim da sua vida útil, o que não se sucede com as soluções tradicionais e convencionais e (2) que todos os seus componentes possam ser produzidos a partir de materiais reciclados.

<sup>18</sup> O método de cálculo para a etapa de fim de vida (C3-C4) e do potencial de reutilização/ reciclagem (modulo D) do programa One Click LCA (2015) segue a norma EN 15 978 / EN 15804 e baseia-se na informação das fichas DAP quando disponíveis ou segue a categorização dos cenários de fim de vida DGNB (2014) apud One Click LCA (2015) - ver Anexo 1

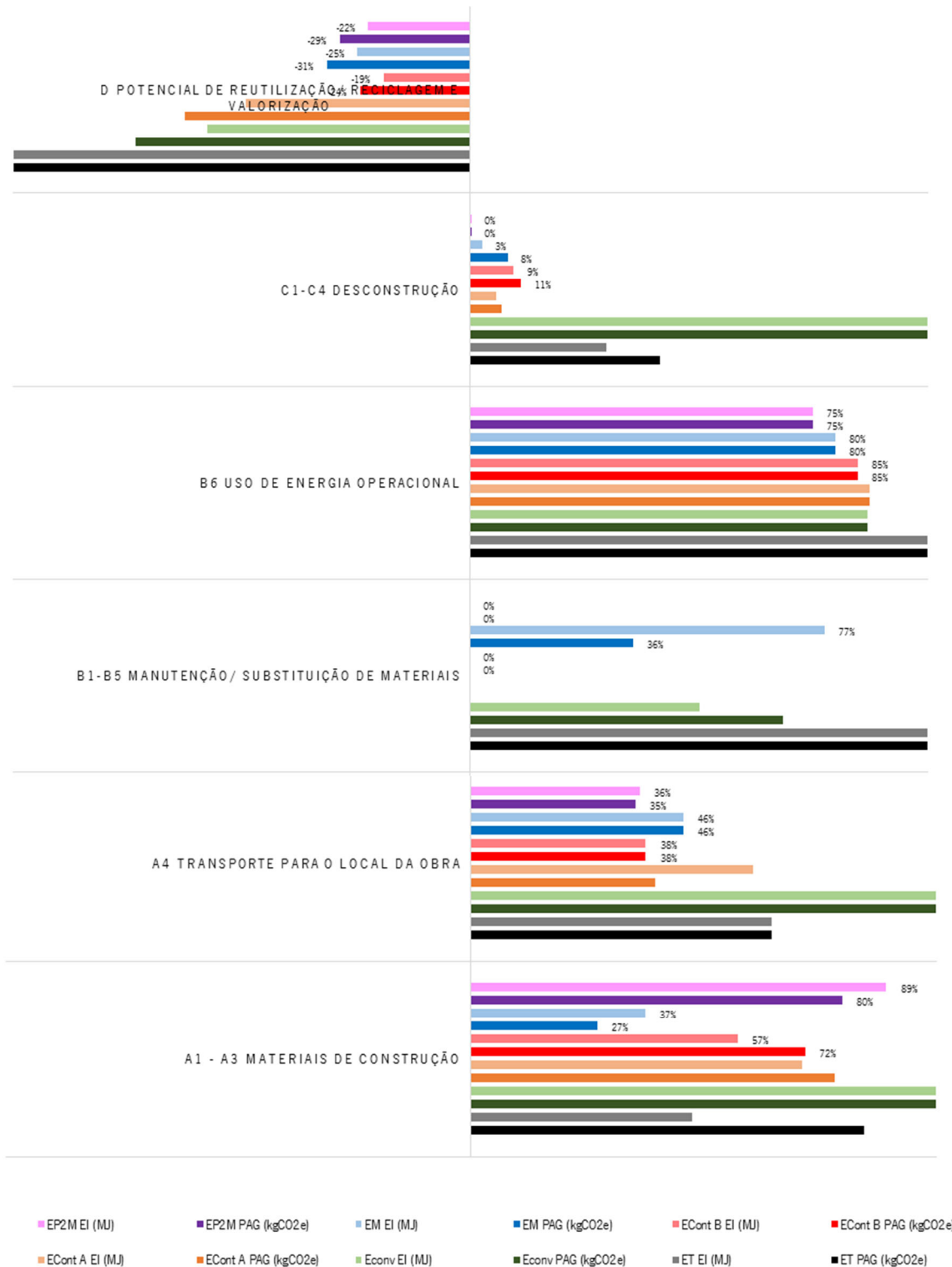


Figura 6.52. Comparação do impacto ambiental entre todas as etapas da ACV segundo os indicadores com maior impacto (PAG e EI).

### 6.5.5. Avaliação de aspetos económicos no ciclo de vida

Na Tabela 6.27 apresentam-se os resultados da avaliação dos custos associados ao ciclo de vida das intervenções com estufas integradas no edifício em estudo durante o período de 60 anos. Apenas o custo associado ao fim de vida (reciclagem, aterro, etc.) não foi considerado neste estudo por duas razões: (1) enorme incerteza no seu cálculo (pois só irá ocorrer no fim devida, após 60 a 80 anos) e (2) devido à sua reduzida influência no custo total. Por isso, a sua inclusão na avaliação não iria fornecer resultados mais precisos.

Verifica-se que o edifício com a solução EM é o que tem menor impacto económico global durante o ciclo de vida considerado, ou seja, é a solução mais económica (Tabela 6.27). O único parâmetro em que a solução EM não é mais económica prende-se com o custo energético operacional – neste parâmetro a melhor solução é a EP2M, que também é uma solução em membrana. Os custos operacionais foram obtidos com base nos resultados da avaliação do consumo energético do edifício, apenas para aquecimento e arrefecimento do ambiente interior. Contudo, numa avaliação global do impacto económico, a solução EM figura-se como a melhor, seguindo-se a solução EConv e como pior a solução ET.

Refere-se ainda que (Tabela 6.27): (1) os custos de manutenção incluem andaimes para limpeza apenas para as soluções ET, EConv e ECont A; (2) a manutenção/limpeza periódica é decenal para cada solução e a substituição da membrana de PVC na solução EM realiza-se ao fim de 30 anos (por ser recolhida durante o verão/primavera/outono e ser instalada verticalmente, a aderência de poeiras é minimizada, diminuindo a necessidade de manutenção e a consequente substituição da membrana - num período de 60 anos pode ser substituída uma vez mas, caso fosse aplicada horizontalmente, seria necessário substituí-la duas vezes); (3) o custo de construção e o de manutenção já incluem o custo de material e de mão-de-obra, valores obtidos através de consulta a fornecedores e instaladores existentes no mercado, Manso *et al.* (2004) e Cype (2016), para 100m<sup>2</sup> de fachada; (4) obteve-se o custo energético operacional com base no custo de eletricidade de 0.16€/kWh segundo EDP (2016).

Em conclusão, as poupanças de energia para climatização através da integração das soluções de estufas neste tipo de edifícios são evidentes, com um período de retorno máximo de 14 anos para a solução ET e mínimo com a solução EM (Tabela 6.27).

Tabela 6.27. Custos económicos durante 60 anos de vida útil para o edifício com as diferentes soluções de estufas.

Soluções	Custo de construção (€)	Custo energético operacional (€)	Custo de Manutenção (€)	Custo Total (€)	Período de retorno (anos)*	Ranking
<b>SE</b>	—	<b>519446</b>	—	<b>519446</b>	—	—
ET	19 500	418 502	3 800	441 802	14	6°
EConv	11 500	363 331	2 800	377 631	5	<b>2°</b>
ECont A	20 800	364 992	2 500	388 292	9	4°
ECont B	22 593	354 211	3 000	379 804	9	5°
EM	7 000	314 928	3 500	325 428	3	<b>1°</b>
EP2M	21 800	313 478	2 180	337 458	7	3°

\* do investimento na solução de reabilitação (custo de construção + custo de manutenção) relativamente à poupança obtida com o custo energético operacional do edifício sem intervenção com estufa (SE).

Tabela 6.28. Aspectos construtivos para a instalação de 100m<sup>2</sup> de área de fachada com as soluções de encerramento das varandas (com base nos resultados da montagem do modelo experimental executado e na informação disponível em Cype (2016)).

Soluções	Tempo de construção estimado	Numero de trabalhadores	Equipamentos auxiliares
ET	52h	4	Nao
EConv	52h	4	Nao
ECont A	24h	4	Elevação mecânica dos panos de vidro
ECont B	24h	4	Elevação mecânica dos panos de vidro
EM	6h	2	Nao
EP2M	12h	2	nao

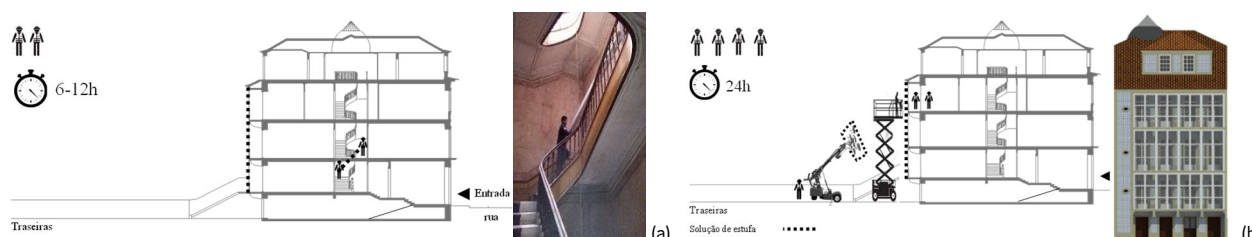


Figura 6.53. Comparativo do processo de instalação entre as soluções de membrana (a) e de vidro (b) para encerrar as varandas do edifício tomado como caso de estudo.

## 6.6. Aplicação de modelo multicritério para avaliar a eficiência relativa das soluções construtivas de membrana

Neste capítulo procede-se à aplicação do modelo multicritério, apresentado no capítulo 5, proposto para avaliar a eficiência relativa das soluções de reabilitação com membranas numa abordagem arquitetónica de integração – considerando critérios quantitativos e qualitativos. A implementação do modelo segue o esquema hierárquico apresentado na secção 5.2 do Capítulo 5 (apenas se alterou a ordem de apresentação das alternativas (que no capítulo 5 corresponde à etapa V e neste capítulo corresponde à etapa 3. Nos pontos que se seguem, cada etapa do referido modelo é apresentada em detalhe.

### 6.6.1. Etapa 1: definição do problema

O problema a resolver consiste na seleção da melhor alternativa - solução construtiva – segundo os critérios selecionados (Figura 6.54) para a intervenção de reabilitação funcional, com a integração de estufas/encerramento de varandas na fachada posterior de um edifício antigo, localizado no centro urbano da cidade do Porto (Portugal).

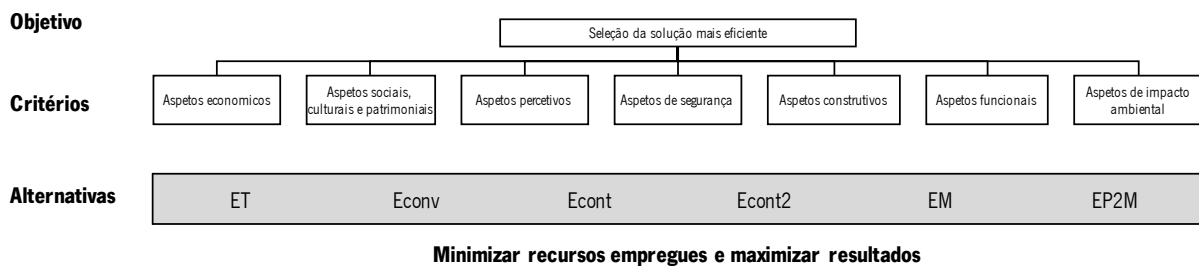


Figura 6.54. Conceito de eficiência aplicado à avaliação multicritério. Estrutura hierárquica para a seleção da solução construtiva mais eficiente para a intervenção de reabilitação com abordagem de integração.

### 6.6.2. Etapa 2: identificação dos decisores

O grupo de decisores é constituído por: 1 especialista em física das construções; 1 especialista em estruturas; 1 técnico de arquitetura. Considerou-se que seria melhor restringir a dimensão do grupo de decisores, neste caso a 3 elementos, pelo motivo exposto na secção 5.4 do Capítulo 5.

### 6.6.3. Etapa 3: definição das alternativas

As alternativas em análise correspondem às seguintes soluções construtivas:

ET	Econv	EcontA	EcontB	EM	EP2M
<b>Estufa tradicional</b>	<b>Estufa convencional</b>	<b>Estufa contemporânea A</b>	<b>Estufa contemporânea B</b>	<b>Estufa em membrana</b>	<b>Estufa em painel de membrana dupla</b>
(com vidro simples, caixilho em madeira e paramento vertical em tabique revestido pelo exterior com chapa metálica ondulada - 30% abertura)	(vidro simples, caixilho em alumínio sem corte térmico e paramento vertical em alvenaria de tijolo rebocada pelo interior e exterior - 50% abertura)	(vidro duplo e caixilho em alumínio com corte térmico - 50% abertura)	(vidro simples com sistema de abertura em harmónio - 75% abertura)	(cortina vertical em rolo, membrana de PVC - 95% abertura)	(painel em membrana dupla de ETFE, abertura em harmónio - 85% abertura)

### 6.6.4. Etapa 4: definição dos critérios e estruturação hierárquica

Para aplicar o método AHP é necessário definir os níveis de prioridade. Estes encontram-se definidos na Tabela 6.29.

Tabela 6.29. Estruturação hierárquica a adotar no método AHP.

NÍVEL 1 - objetivo							
Seleção da melhor solução construtiva para a intervenção de reabilitação, com a integração de estufas/ encerramento de varandas, na fachada posterior de um edifício antigo, localizado no centro urbano da cidade do Porto (Portugal).							
NÍVEL 2 – critérios e subcritérios							
N.	Critérios	N.	Código	Subcritérios	Tipo	Objetivo	Indicador
C1	Aspetos económicos	1	SC1.1	Custo de construção	QN	min.	€
		2	SC1.2	Custo energético operacional para aquecimento e arrefecimento (60 anos)	QN	min.	€
		3	SC1.3	Custo de manutenção (60 anos)	QN	min.	€
		4	SC1.4	Período de retorno do investimento na intervenção de reabilitação com a integração de estufas/ encerramento das varandas	QN	min.	anos
C2	Aspetos sociais, culturais e patrimoniais	5	SC2.1	Uso de técnicas e materiais de construção tradicionais	QL	MAX.	0 a 5
		6	SC2.2	Capacidade de instalação em sítios ocupados	QL	MAX.	0 a 5
		7	SC2.3	Grau de intrusividade	QL	min.	0 a 5
		8	SC2.4	Impacto do processo construtivo para a vizinhança	QL	min.	0 a 5

N.	Critérios	N. Código	Subcritérios	Tipo	Objetivo	Indicador
C3	Aspetos percetivos	9	SC3.1	Qualidade estética da intervenção pelo exterior	QL	MAX. 0 a 5
		10	SC3.2	Qualidade estética da intervenção pelo interior	QL	MAX. 0 a 5
C4	Aspetos de segurança	11	SC4.1	Risco para os ocupantes perante incêndio	QL	min. 0 a 5
		12	SC4.2	Risco para os ocupantes perante furacões/tempestades	QL	min. 0 a 5
		13	SC4.3	Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos	QL	min. 0 a 5
		14	SC4.4	Risco para os ocupantes em caso no caso da ativação de engenhos explosivos.	QL	min. 0 a 5
C5	Aspetos construtivos	15	SC5.1	Peso total	QN	min. kg
		16	SC5.2	Facilidade de montagem	QL	MAX. 0 a 5
		17	SC5.3	Tempo de execução estimado	QN	min. dias
		18	SC5.4	Durabilidade dos materiais de revestimento	QN	MAX. anos
C6	Aspetos Funcionais	19	SC6.1	Grau de controlo dos sistemas de regulação pelos ocupantes	QN	MAX. %
		20	SC6.2	Grau de adaptabilidade para futuras alterações	QL	MAX. 0 a 5
		21	SC6.3	Grau de repetibilidade	QL	MAX. 0 a 5
		22	SC6.4	Grau de reversibilidade	QL	MAX. 0 a 5
		23	SC6.5	Isolamento acústico (Rw)	QN	MAX. dB
		24	SC6.6	Consumo energético operacional total do edifício c/ intervenção (em 60 anos)	QN	min. kWh
C7	Aspetos de impacto ambiental	25	SC7.1	Energia incorporada total (EE) em todo o ciclo de vida - 60 anos	QN	min. MJ
		26	SC7.2	Potencial de aquecimento Global total (PAG) em todo o ciclo de vida - 60 anos	QN	min. kgCO2e
<b>NIVEL 3 -Alternativas</b>						
ET (Estufa tradicional); Econv (Estufa convencional); Econt A (Estufa contemporânea A); Econt B (Estufa contemporânea B); EM (Estufa em membrana); EP2M (Estufa em painel de membrana dupla).						

Nota: QN – quantitativo; QL – qualitativo

Nota: para além dos critérios quantitativos, avaliados na secção 6.5, uma vez que nos futuros quadros comunitários de apoio ao desenvolvimento será dado relevo aos seguintes aspetos: promoção da adaptação às mudanças climáticas, gestão de prevenção de riscos, proteção do ambiente e uso eficiente de recursos, optou-se por incluir alguns critérios qualitativos, associados aos referidos aspetos, na avaliação da eficiência das soluções de reabilitação em estudo. Para os subcritérios qualitativos, a pontuação é determinada com base nos julgamentos do grupo de decisores, segundo a descrição e a escala de avaliação apresentadas na Tabela 6.1 do Anexo 6.

#### 6.6.5. Etapa 5: obtenção do vetor de prioridades (atribuição de pesos aos critérios e subcritérios)

Numa primeira fase, optou-se por realizar uma avaliação da eficiência<sup>19</sup> apenas para os critérios quantitativos e sem atribuição de pesos aos critérios. Contudo, conforme se preconiza no modelo exposto no Capítulo 5, considera-se conveniente adotar um sistema de ponderação capaz de considerar a importância relativa dos critérios, pois caso contrário todos os critérios terão a mesma importância, o que não corresponde à realidade. Por conseguinte, executou-se uma 2ª fase da etapa 5 conforme descrito na secção 5.6 do Capítulo 5.

#### • 1ª fase: avaliação multicritério sem atribuição de pesos e apenas com critérios quantitativos

A Tabela 6.31 e a Figura 6.55 apresentam os resultados da 1ª fase de avaliação. O gráfico radar<sup>20</sup> com percentagens, Figura 6.55, elaborado com base nos resultados presentes na Tabela 6.30, mostra como os 11 parâmetros em análise se confrontam entre si, permitindo uma avaliação holística da eficiência de cada solução de reabilitação funcional com integração de estufas num edifício antigo, com as características do edifício em estudo.

Tabela 6.30. Resultados dos indicadores selecionados para avaliar a eficiência das soluções de reabilitação com abordagem integrada. Percentagem de melhoria da solução EM relativamente às restantes soluções em análise.

Recursos empregues	Etapas do ciclo de vida de vida	Indicadores	Unidades	Soluções de reabilitação funcional					
				ET	Econv	Econt A	Econt B	EM	EP2M
A1-A5 Produção matérias-primas, transporte e Construção	Construção	<b>Peso total</b>	kg	4550	9481	1925	2152	191	176
		% de melhoria		96%	98%	90%	91%	0%	-8%
		<b>EI</b>	MJ	87800	139244	110602	96980	77654	127975
		% de melhoria		12%	44%	30%	20%	0%	39%
		<b>PAG</b>	kgCO2e	7457	8445	7045	6657	3924	7149
		% de melhoria		47%	54%	44%	41%	0%	45%
		<b>Custo de construção</b>	€	19500	11500	20800	22593	7000	21800
		% de melhoria		64%	39%	66%	69%	0%	68%

<sup>19</sup> Relação entre os recursos empregues e os resultados obtidos.

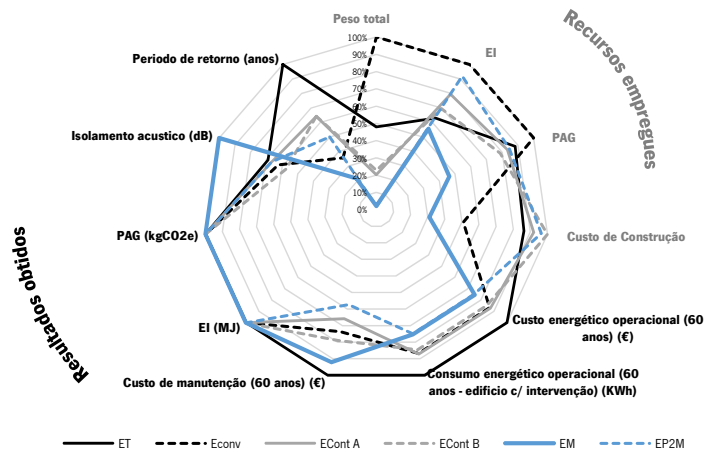
<sup>20</sup> Este modelo gráfico permite apoiar análises multicritério, nomeadamente identificar lacunas, comparar dados com diferentes origens e comparar desempenhos, como se pretende, de modo a simplificar o entendimento das relações que os diferentes indicadores estabelecem entre si.

Resultados obtidos	B1-D Utilização, manutenção e fim de vida (60 anos)	Custo energético operacional		€	418502	363331	364992	354211	314928	313478
		% de melhoria				25%	13%	14%	11%	0%
		Consumo energético operacional (edifício c/intervenção)		KWh	2615640	2270820	2281200	2213820	1968300	1959240
				% de melhoria	25%	13%	14%	11%	0%	-0.5%
		Custo de manutenção		€	3800	2800	2500	3000	3500	2180
				% de melhoria	8%	-20%	-29%	-14%	0%	-38%
		EI		MJ	21176844	21204056	21207777	21226371	21222742	21224133
				% de melhoria	-0.2%	-0.1%	-0.1%	0%	0%	0%
		PAG		kgCO2e	1233487	1234254	1234486	1235532	1235332	1235406
				% de melhoria	-0.1%	-0.1%	-0.1%	0%	0%	0%
		Isolamento acústico		dB	29	32	30	35	20	30
				% de melhoria	-45%	-60%	-50%	-75%	0%	-50%
		Período de retorno		anos	14	5	9	9	3	7
				% de melhoria	79%	40%	67%	67%	0%	57%
		Ranking			6º	5º	4º	3º	1º	2º
		% de melhoria em relação à pior solução			0%	6%	6%	12%	27%	16%

Observações: Os valores negativos e assinalados a vermelho correspondem aos parâmetros em que a solução EM é pior do que as restantes.

Numa visão global e comparada das várias soluções de estufa em estudo, observa-se (Tabela 6.30 e Figura 6.55) que as soluções alternativas com membrana (EM e EP2M) são as mais eficientes, ou seja, são aquelas em que se conseguem obter os melhores resultados com uma quantidade mínima de recursos empregues, destacando-se a solução EM. Em oposição, a solução ET é a menos eficiente. Comparando os indicadores em que a solução EM é pior, ou melhor do que as restantes soluções em estudo, incluiu-se uma coluna na Tabela 6.30 que mostra que, globalmente, a solução EM é melhor do que as restantes em todos os indicadores, com exceção para o custo de manutenção (pior entre 14 e 38%) e o isolamento acústico (pior entre 45 a 75%).

Em síntese, as soluções construtivas com membrana apresentam-se como uma alternativa eficiente às tradicionais/convencionais/contemporâneas para realizar intervenções de reabilitação funcional de edifícios através de abordagens de integração. Isto deve-se, sobretudo, ao facto de apresentarem um peso e custo de construção inferiores aos das restantes soluções (Tabela 6.30). Para além disso, também se conclui que é preferível uma solução menos duradoura, mas com menor impacto económico e ambiental ao longo do ciclo de vida.



Avaliação da eficiência supondo que todos os aspetos têm peso igual no resultado final: Melhor =0%; Pior =100%.

Figura 6.55. Comparação entre as diversas soluções de ampliação inseridas no edifício (edifício como um todo).

• **2ª fase: atribuição de pesos para avaliação multicritério - com critérios quantitativos e qualitativos - a realizar na etapa 6- cenário base**

Os resultados finais da atribuição de pesos aos critérios e subcritérios são apresentados na Tabela 6.31. Estes mostram que o grupo de decisores atribuiu maior importância aos aspetos funcionais (C6), cujo peso é de 30%, entre os quais se destaca o consumo energético operacional do edifício (em 60 anos). O critério C1 (aspetos económicos) é ponderado com 20%, e os critérios C5 (aspetos construtivos) e C4 (aspetos de segurança) com 15%. Para o critério C6, a ordenação mais elevada foi dada ao subcritério SC6.6 (consumo energético operacional) (15%) seguida pelo subcritério SC5.1 (peso total) (8%) do critério C5; a menor pontuação neste nível é atribuída ao subcritério SC6.1 (impacto do processo construtivo para a vizinhança) (0%). Isto significa que, quando se trata de uma intervenção com abordagem de integração, os intervenientes no processo de



reabilitação, como os arquitetos, devem prestar especial atenção aos aspetos funcionais, económicos, de segurança e construtivos, pois esses critérios receberam os mais elevados níveis de prioridade na avaliação da eficiência. Apesar dos aspetos culturais/patrimoniais e percetivos apresentarem menor peso, isto não significa que os subcritérios do mesmo sejam menos importantes.

Tabela 6.31. Resultados da atribuição de pesos a cada critério e subcritério – cenário base.

N.	Peso	Critérios	N.	Código	Peso Local	Peso Global	Subcritérios	Objetivo
C1	20%	Aspetos económicos	1	SC1.1	30%	6%	Custo de construção	min.
			2	SC1.2	30%	6%	Custo energético operacional para aquecimento e arrefecimento (60 anos)	min.
			3	SC1.3	30%	6%	Custo de manutenção (60 anos)	min.
			4	SC1.4	10%	2%	Período de retorno do investimento na intervenção de reabilitação com a integração de estufas/ encerramento das varandas	min.
C2	6%	Aspetos sociais, culturais e patrimoniais	5	SC2.1	30%	2%	Uso de técnicas e materiais de construção tradicionais	MAX.
			6	SC2.2	15%	1%	Capacidade de instalação em sítios ocupados	MAX.
			7	SC2.3	47%	3%	Grau de intrusividade	min.
			8	SC2.4	8%	0%	Impacto do processo construtivo para a vizinhança	min.
C3	5%	Aspetos percetivos	9	SC3.1	50%	3%	Qualidade estética da intervenção pelo exterior	MAX.
			10	SC3.2	50%	3%	Qualidade estética da intervenção pelo interior	MAX.
C4	15%	Aspetos de segurança	11	SC4.1	25%	4%	Risco para os ocupantes perante incêndio	min.
			12	SC4.2	25%	4%	Risco para os ocupantes perante furacões/ tempestades	min.
			13	SC4.3	25%	4%	Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos	min.
			14	SC4.4	25%	4%	Risco para os ocupantes em caso no caso da ativação de engenhos explosivos.	min.
C5	15%	Aspetos construtivos	15	SC5.1	50%	8%	Peso total	min.
			16	SC5.2	17%	3%	Facilidade de montagem	MAX.
			17	SC5.3	23%	3%	Tempo de execução estimado	min.
			18	SC5.4	10%	2%	Durabilidade dos materiais de revestimento	MAX.
C6	30%	Aspetos Funcionais	19	SC6.1	19%	6%	Grau de controlo dos sistemas de regulação pelos ocupantes	MAX.
			20	SC6.2	4%	1%	Grau de adaptabilidade para futuras alterações	MAX.
			21	SC6.3	3%	1%	Grau de repetibilidade	MAX.
			22	SC6.4	11%	3%	Grau de reversibilidade	MAX.
			23	SC6.5	12%	4%	Isolamento acústico (Rw)	MAX.
			24	SC6.6	51%	15%	Consumo energético operacional total do edifício c/ intervenção (em 60 anos)	min.
C7	9%	Aspetos de impacto ambiental	25	SC7.1	50%	5%	Energia incorporada total (EE) em todo o ciclo de vida - 60 anos	min.
			26	SC7.2	50%	5%	Potencial de aquecimento Global total (PAG) em todo o ciclo de vida - 60 anos	min.

#### 6.6.6. Etapa 6: normalização dos valores e avaliação global de cada alternativa – cenário base

Nesta etapa, perante o cenário base de decisão (resultante da atribuição de pesos aos critérios pelo grupo de decisores) adotou-se o procedimento descrito na secção 5.8 do Capítulo 5, resultando na elaboração da Tabela 6.32. Como resultado final, verifica-se que a alternativa EM é a mais relevante (pois obteve maior pontuação global) para atingir o objetivo enunciado (Figura 6.56); enquanto a alternativa ET é a que apresenta menor relevância.

Tabela 6.32. Resultados da avaliação global de cada alternativa para o cenário base.

C.	Peso	SC	Peso Local	Peso Global	Objetivo	Min.	Máx.	Decisão normalizada e ponderada					
								ET	EconV	ECont A	ECont B	EM	EP2M
C1	20%	SC1.1	30%	6%	min.	7000	22593	0,01	0,04	0,01	0,00	0,06	0,00
		SC1.2	30%	6%	min.	313478	418502	0,00	0,03	0,03	0,04	0,06	0,06
		SC1.3	30%	6%	min.	2180	3800	0,00	0,04	0,05	0,03	0,01	0,06
		SC1.4	10%	2%	min.	3	14	0,00	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
C2	6%	SC2.1	30%	2%	MAX.	1	5	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
		SC2.2	15%	1%	MAX.	2	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
		SC2.3	47%	3%	min.	1	4	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03	0,02
		SC2.4	8%	0%	min.	1	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C3	5%	SC3.1	50%	3%	MAX.	3	5	0,03	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01
		SC3.2	50%	3%	MAX.	3	5	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
C4	15%	SC4.1	25%	4%	min.	1	2	0,00	0,04	0,04	0,04	0,01	0,01
		SC4.2	25%	4%	min.	1	3	0,02	0,04	0,03	0,00	0,02	0,00
		SC4.3	25%	4%	min.	1	3	0,01	0,00	0,01	0,01	0,04	0,04
		SC4.4	25%	4%	min.	1	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03
C5	15%	SC5.1	50%	8%	min.	176	9481	0,04	0,00	0,06	0,06	0,07	0,08
		SC5.2	17%	3%	MAX.	2	5	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,02
		SC5.3	23%	3%	min.	6	52	0,00	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03
		SC5.4	10%	2%	MAX.	30	1000	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00
C6	30%	SC6.1	19%	6%	MAX.	30	95	0,00	0,02	0,02	0,04	0,06	0,05
		SC6.2	4%	1%	MAX.	1	5	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
		SC6.3	3%	1%	MAX.	2	5	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
		SC6.4	11%	3%	MAX.	2	5	0,00	0,00	0,02	0,03	0,03	0,03
		SC6.5	12%	4%	MAX.	20	35	0,02	0,03	0,02	0,04	0,00	0,02
		SC6.6	51%	15%	min.	1959240	2615640	0,00	0,08	0,08	0,09	0,15	0,15
C7	9%	SC7.1	50%	5%	min.	21264644	21352108	0,05	0,00	0,02	0,01	0,03	0,00
		SC7.2	50%	5%	min.	1239256	1242699	0,02	0,00	0,02	0,01	0,05	0,00
<b>Soma/Classificação final ponderada (%)/Pontuação global</b>								<b>27</b>	<b>36</b>	<b>49</b>	<b>51</b>	<b>80</b>	<b>66</b>
<b>Ordenação final</b>								<b>6º</b>	<b>5º</b>	<b>4º</b>	<b>3º</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>

**Notas:** <sup>2</sup> Formulas aplicadas para normalizar os valores dos subcritérios: MAXIMIZAR  $y = (X - \text{Min}) / (\text{MAX} - \text{min})$  Minimizar  $y = (\text{MAX} - X) / (\text{MAX} - \text{min})$ ; Normalização dos valores dos subcritérios - Escala final: (0=pior; 1=melhor); C = critérios; SB = subcritérios

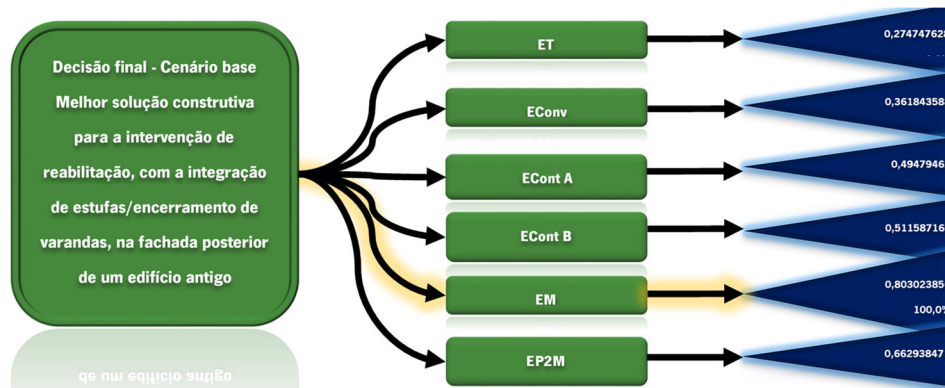


Figura 6.56. Árvore de decisão 'Melhor solução de integração'. Gráfico obtido com a utilização da aplicação "Precision Tree" da ferramenta informática Decision Tools Suite (DTS) Industrial student version 7.6 (2018).

### 6.6.7. Etapa 7: análise de sensibilidade

A presente análise de sensibilidade segue o procedimento descrito na secção 5.9 do Capítulo 5. A Tabela 6.33 apresenta o resultado final de acordo com esse procedimento e no gráfico da Figura 6.57, encontramos a variação do peso de cada alternativa, ao longo de todos os valores possíveis para cada critério.

Na Tabela 6.33 verifica-se que a alternativa A5 - EM (Estufa em Membrana) é a mais eficiente, por ser a dominante em todos os cenários; enquanto a alternativa A2 – Econv (Estufa convencional) é a que apresenta menor eficiência<sup>21</sup>. Em 77 iterações, a alternativa A5 - EM é a que apresenta maior eficiência (99%); por ordem decrescente de importância (da melhor para a pior) A5>A6>A4>A3>A1>A2. A solução alternativa A5 - EM, em média, considerando todas as variações de peso para todos os critérios avaliados, é 30% a 64% melhor do que as restantes soluções.

Tabela 6.33. Resultados da análise de sensibilidade.

Ordenação da eficiência para o cenário base							
Max.	A1 ET	A2 EConv	A3 EContA	A4 EContB	A5 EM	A6 EP2M	Min.
EM	34%	45%	62%	64%	100%	83%	ET

		Eficiência relativa para todos os cenários segundo vários ciclos							
		Max.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.
Ciclo C1 Variação de peso para os aspetos económicos	Cenário 1	0,79	61,8%	26,2%	57,5%	61,4%	100,0%	66,4%	26,2%
	Cenário 2	0,79	56,6%	31,9%	58,0%	60,4%	100,0%	68,7%	31,9%
	Cenário 3	0,78	51,4%	37,5%	58,6%	59,3%	100,0%	71,0%	37,5%
	Cenário 4	0,78	46,2%	43,2%	59,1%	58,2%	100,0%	73,3%	43,2%
	Cenário 5	0,77	40,9%	49,0%	59,7%	57,1%	100,0%	75,7%	40,9%
	Cenário 6	0,77	35,5%	54,9%	60,2%	56,0%	100,0%	78,1%	35,5%
	Cenário 7	0,77	30,1%	60,7%	60,8%	54,8%	100,0%	80,5%	30,1%
	Cenário 8	0,76	24,6%	66,7%	61,3%	53,7%	100,0%	82,9%	24,6%
	Cenário 9	0,76	19,1%	72,7%	61,9%	52,5%	100,0%	85,4%	19,1%
	Cenário 10	0,76	13,5%	78,8%	62,4%	51,4%	100,0%	87,8%	13,5%
	Cenário 11	0,75	7,9%	84,9%	63,0%	50,2%	100,0%	90,3%	7,9%
	Max.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.	
Ciclo C2 Variação de peso para os aspetos sociais, culturais e patrimoniais	Cenário 1	0,79	52,8%	36,9%	59,9%	60,4%	100,0%	69,2%	36,9%
	Cenário 2	0,78	53,9%	35,1%	58,8%	60,0%	100,0%	69,5%	35,1%
	Cenário 3	0,78	55,0%	33,2%	57,6%	59,7%	100,0%	69,9%	33,2%
	Cenário 4	0,78	56,2%	31,3%	56,5%	59,4%	100,0%	70,2%	31,3%
	Cenário 5	0,78	57,3%	29,5%	55,4%	59,0%	100,0%	70,5%	29,5%
	Cenário 6	0,78	58,4%	27,6%	54,2%	58,7%	100,0%	70,9%	27,6%
	Cenário 7	0,78	59,5%	25,7%	53,1%	58,4%	100,0%	71,2%	25,7%
	Cenário 8	0,77	60,7%	23,8%	51,9%	58,0%	100,0%	71,5%	23,8%
	Cenário 9	0,77	61,8%	21,9%	50,8%	57,7%	100,0%	71,9%	21,9%
	Cenário 10	0,77	63,0%	19,9%	49,6%	57,3%	100,0%	72,2%	19,9%
	Cenário 11	0,77	64,1%	18,0%	48,5%	57,0%	100,0%	72,5%	18,0%

<sup>21</sup> Relembra-se que o nível de eficiência de cada alternativa é estabelecido neste modelo quando se define para cada critério e subcritério se o objetivo é maximizar ou minimizar.

		Max.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.
Ciclo C3 Variação de peso para os aspetos estéticos	Cenário 1	0,80	41,6%	39,4%	61,0%	58,4%	100,0%	74,1%	39,4%
	Cenário 2	0,79	50,5%	35,8%	59,1%	59,4%	100,0%	71,0%	35,8%
	Cenário 3	0,78	59,6%	32,2%	57,2%	60,5%	100,0%	67,9%	32,2%
	Cenário 4	0,77	69,0%	28,5%	55,2%	61,6%	100,0%	64,6%	28,5%
	Cenário 5	0,76	78,5%	24,6%	53,1%	62,7%	100,0%	61,3%	24,6%
	Cenário 6	0,75	88,2%	20,8%	51,1%	63,9%	100,0%	58,0%	20,8%
	Cenário 7	0,75	98,1%	16,8%	49,0%	65,0%	100,0%	54,5%	16,8%
	Cenário 8	0,80	100,0%	11,8%	43,2%	61,2%	92,4%	47,1%	11,8%
	Cenário 9	0,87	100,0%	7,2%	37,6%	56,9%	84,3%	40,0%	7,2%
	Cenário 10	0,93	100,0%	3,4%	32,8%	53,2%	77,4%	33,9%	3,4%
	Cenário 11	1,00	100,0%	0,0%	28,6%	50,0%	71,4%	28,6%	0,0%
	Max.		A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.
Ciclo C4 Variação de peso para os aspetos de segurança	Cenário 1	0,80	57,5%	28,1%	56,5%	61,7%	100,0%	68,1%	28,1%
	Cenário 2	0,79	55,4%	32,4%	57,7%	60,4%	100,0%	69,2%	32,4%
	Cenário 3	0,78	53,1%	36,8%	59,0%	59,1%	100,0%	70,3%	36,8%
	Cenário 4	0,77	50,8%	41,4%	60,4%	57,8%	100,0%	71,5%	41,4%
	Cenário 5	0,75	48,4%	46,1%	61,8%	56,4%	100,0%	72,7%	46,1%
	Cenário 6	0,74	46,0%	51,0%	63,2%	55,0%	100,0%	73,9%	46,0%
	Cenário 7	0,73	43,4%	56,0%	64,7%	53,5%	100,0%	75,2%	43,4%
	Cenário 8	0,72	40,8%	61,1%	66,2%	51,9%	100,0%	76,5%	40,8%
	Cenário 9	0,71	38,1%	66,5%	67,8%	50,4%	100,0%	77,9%	38,1%
	Cenário 10	0,70	35,3%	72,0%	69,4%	48,7%	100,0%	79,3%	35,3%
	Cenário 11	0,68	32,4%	77,7%	71,1%	47,0%	100,0%	80,8%	32,4%
	Max.		A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.
Ciclo C5 Variação de peso para os aspetos construtivos	Cenário 1	0,76	57,1%	38,8%	54,1%	56,0%	100,0%	65,4%	38,8%
	Cenário 2	0,78	55,2%	35,6%	57,1%	58,7%	100,0%	68,4%	35,6%
	Cenário 3	0,79	53,4%	32,5%	59,9%	61,4%	100,0%	71,3%	32,5%
	Cenário 4	0,80	51,6%	29,5%	62,6%	64,0%	100,0%	74,1%	29,5%
	Cenário 5	0,82	49,9%	26,6%	65,2%	66,5%	100,0%	76,8%	26,6%
	Cenário 6	0,83	48,2%	23,8%	67,8%	68,9%	100,0%	79,5%	23,8%
	Cenário 7	0,85	46,6%	21,1%	70,3%	71,3%	100,0%	82,0%	21,1%
	Cenário 8	0,86	45,0%	18,5%	72,7%	73,5%	100,0%	84,5%	18,5%
	Cenário 9	0,87	43,5%	16,0%	75,0%	75,7%	100,0%	86,9%	16,0%
	Cenário 10	0,89	42,0%	13,5%	77,2%	77,9%	100,0%	89,2%	13,5%
	Cenário 11	0,90	40,6%	11,1%	79,4%	79,9%	100,0%	91,4%	11,1%
	Max.		A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.
Ciclo C6 Variação de peso para os aspetos funcionais	Cenário 1	0,77	62,7%	31,6%	58,4%	56,2%	100,0%	63,2%	31,6%
	Cenário 2	0,78	56,9%	33,5%	58,3%	58,8%	100,0%	67,8%	33,5%
	Cenário 3	0,79	51,2%	35,3%	58,2%	61,3%	100,0%	72,2%	35,3%
	Cenário 4	0,80	45,6%	37,1%	58,1%	63,7%	100,0%	76,5%	37,1%
	Cenário 5	0,81	40,2%	38,8%	58,1%	66,1%	100,0%	80,6%	38,8%
	Cenário 6	0,82	34,9%	40,5%	58,0%	68,4%	100,0%	84,7%	34,9%
	Cenário 7	0,83	29,8%	42,2%	57,9%	70,7%	100,0%	88,7%	29,8%
	Cenário 8	0,84	24,8%	43,8%	57,8%	72,9%	100,0%	92,6%	24,8%
	Cenário 9	0,85	19,9%	45,4%	57,7%	75,0%	100,0%	96,3%	19,9%
	Cenário 10	0,86	15,1%	46,9%	57,7%	77,1%	100,0%	100,0%	15,1%
	Cenário 11	0,90	10,1%	46,7%	55,6%	76,4%	96,5%	100,0%	10,1%
	Max.		A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.
Ciclo C7 Variação de peso para os aspetos de impacto ambiental	Cenário 1	47,5%	39,0%	60,4%	65,0%	100,0%	81,0%	47,5%	39,0%
	Cenário 2	52,4%	35,7%	58,9%	61,4%	100,0%	73,1%	52,4%	35,7%
	Cenário 3	57,1%	32,4%	57,4%	57,9%	100,0%	65,1%	57,1%	32,4%
	Cenário 4	61,9%	29,1%	55,9%	54,3%	100,0%	57,2%	61,9%	29,1%
	Cenário 5	66,7%	25,8%	54,4%	50,8%	100,0%	49,3%	66,7%	25,8%
	Cenário 6	71,4%	22,5%	52,9%	47,3%	100,0%	41,5%	71,4%	22,5%
	Cenário 7	76,1%	19,3%	51,4%	43,8%	100,0%	33,7%	76,1%	19,3%
	Cenário 8	80,9%	16,0%	50,0%	40,3%	100,0%	25,9%	80,9%	16,0%
	Cenário 9	85,5%	12,8%	48,5%	36,9%	100,0%	18,1%	85,5%	12,8%
	Cenário 10	90,2%	9,5%	47,0%	33,4%	100,0%	10,3%	90,2%	9,5%
	Cenário 11	94,9%	6,3%	45,6%	30,0%	100,0%	2,6%	94,9%	6,3%

	Ordenação das alternativas					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
	ET	EConv	EContA	EContB	EM	EP2M
Eficiencia relativa (média)	54%	34%	58%	59%	99%	69%
Eficiencia relativa de cada alternativa relativamente à melhor (do conjunto de cenários acima indicados)	-45%	-64%	-41%	-40%	0%	-30%
Ordenação da eficiencia (1º =melhor)	5º	6º	4º	3º	1º	2º

Legenda:  1º (melhor)  6º (pior)

Na Figura 6.57 apresentam-se os resultados da análise de sensibilidade para cada um dos critérios. Observa-se que a solução Estufa em Membrana (A5) é a alternativa dominante, na maioria dos cenários de variação do peso de cada critério. Contudo, quando o critério C3 – aspetos percetivos – apresenta um peso de 70%, a alternativa A5 deixa de ser a escolhida, passando a ser a A1 (Estufa tradicional) a preferida. Por outro lado, quando o critério C6 – aspetos funcionais – apresenta um peso de 90%, a alternativa EP2M passa ser a preferida.

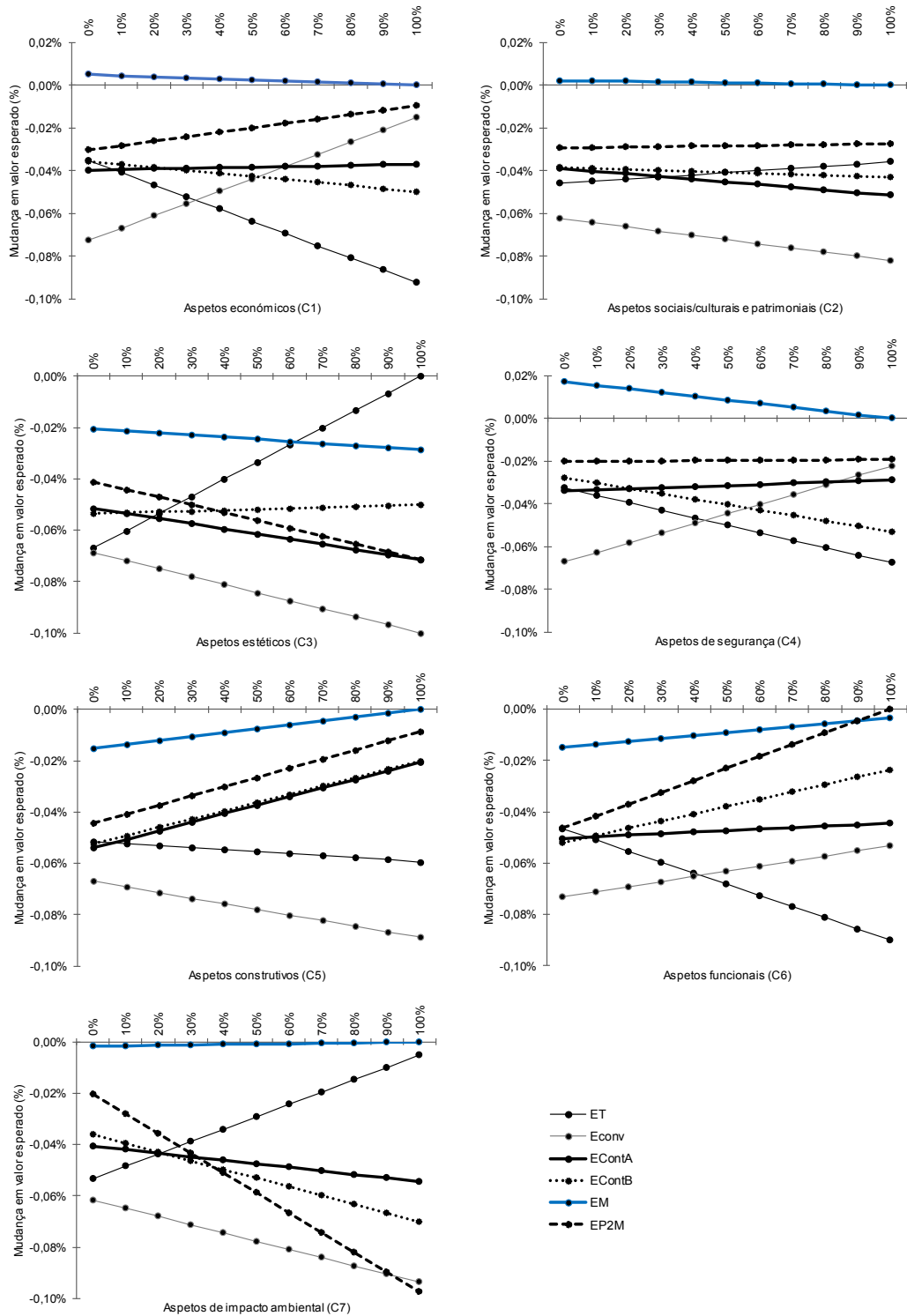


Figura 6.57. Valores de eficiência esperados para cada alternativa em análise, de acordo com a variação individual de cada critério. Gráficos obtidos com a utilização da aplicação Precision Tree da ferramenta informática Decision Tools Suite<sup>22</sup> v. 7.6 (2018)

### 6.6.8. Etapa 8: discussão dos resultados e recomendações

Esta última etapa prende-se com a identificação de oportunidades que possam melhorar o desempenho da alternativa selecionada. Para tal, são recomendadas e analisadas alternativas que permitam alcançar tais resultados.

<sup>22</sup> Conjunto de aplicações para análise estatística e tomada de decisão.

Analisando os resultados obtidos na aplicação da metodologia às soluções para reabilitação com abordagem de reposição, verifica-se que, dentro desta amostra e de acordo com os critérios analisados, a solução de reabilitação mais eficiente é a alternativa A5 - EM– Estufa em Membrana (cortina vertical em rolo, membrana de PVC - 95% abertura) com uma eficiência média de 99%. A EM apresenta, em relação à maioria dos critérios analisados, melhor desempenho do que as soluções de referência em análise, ou seja, as alternativas (por ordem crescente) A2 (EConv) < A1(ET) < A3/EContA < A4 (EContB). A utilização mais racional de materiais é determinante para que esta tecnologia construtiva obtenha este resultado.

A alternativas A1 (ET) e A2 revelaram-se as menos eficientes entre todas as alternativas avaliadas. A alternativa A1 revelou-se a menos eficiente para todos os critérios, exceto nos critérios C2, C3, C5 e C7. Contudo, a solução de reabilitação menos eficiente de todas é a A2 (EConv) – Estufa Convencional (com vidro simples, caixilho em alumínio sem corte térmico e paramento vertical em alvenaria de tijolo rebocada pelo interior e exterior- 50% abertura) com uma eficiência relativa média de 54%. Esta alternativa revelou-se a menos eficiente em todos os critérios analisados.

Quando se trata de uma intervenção com abordagem de integração, os intervenientes no processo de reabilitação, como os arquitetos, devem prestar especial atenção aos aspetos funcionais, económicos, de segurança e construtivos, pois esses critérios receberam os mais elevados níveis de prioridade na avaliação da eficiência. Apesar dos aspetos culturais/patrimoniais e percetivos apresentarem menor peso, isto não significa que os subcritérios do mesmo sejam menos importantes.

Em futuros trabalhos, a atribuição de pesos pode ser atualizada, relativamente a necessidades específicas do decisor. Caso contrário, esta listagem de pesos pode ser utilizada em todos os casos de estudo, mesmo que um ou mais parâmetros sejam excluídos da avaliação, sem a necessidade de voltar a fazer uma comparação por pares.

### **6.7. Dificuldades/limitações**

As maiores dificuldades sentidas ao longo do presente trabalho estão sobretudo relacionadas com a simulação numérica. Foi difícil lidar com algumas limitações do programa DesignBuilder, pelo que tiveram de se considerar algumas simplificações. Neste sentido, a modelação dos envidraçados foi um dos parâmetros mais problemáticos, pois nenhum dos dispositivos de oclusão disponíveis no programa correspondiam aos que existem na realidade. Contudo, foi possível simular o efeito da abertura e fecho de portadas (o dispositivo de estore existente no programa foi modificado para ter as características das portadas) com um horário de operação, juntamente com os envidraçados; e verificou-se que este cenário operacional não influencia significativamente o consumo energético e o comportamento higratérmico do edifício. A ventilação também foi um aspeto bastante crítico, uma vez que se sabia, à partida, que esta iria influenciar fortemente o comportamento térmico do edifício e não se dispunha de valores característicos relativos aos caudais de ventilação no edifício; desta forma, considerou-se um caudal constante ao longo de todo o dia. Esta pode ter sido uma aproximação problemática, dado que o caudal de ventilação não é na realidade constante, dependendo dos diferenciais de temperatura e da velocidade do ar. A dificuldade na interpretação e crítica dos resultados obtidos também foi sentida. Contudo, como o objetivo era realizar uma análise comparativa, o facto de se ter feito uma validação com medições experimentais, bem como terem-se adotado as mesmas condições na simulação numérica em todos os modelos (das distintas soluções em análise), permite considerar que as margens de erro na comparação dos resultados serão muito reduzidas.

### **6.8. Conclusões**

Este exercício focou um importante tópico de discussão na área de aplicação dos materiais em membrana na arquitetura: a reabilitação energética de edifícios. Foi investigada a utilização de membranas arquitetónicas transparentes para encerrar varandas existentes, configurando estufas/espacos solares que, quando integrados em edifícios existentes, servem as seguintes funções: (1) ampliar a sua área útil para articulação funcional a outros compartimentos e (2) reduzir as necessidades energéticas para aquecimento/ perdas de calor pela

envolvente exterior, sobretudo nos compartimentos adjacentes das varandas do alçado de tardoz. A primeira função destina-se a harmonizar as ligações funcionais entre compartimentos existentes como, por exemplo, entre os quartos/salas e os sanitários, que em muitos casos, possuem acesso pelo exterior. A segunda função foi alcançada através do desempenho dos materiais que integram a envolvente exterior da estufa integrada criada pelo encerramento das varandas.

Verifica-se que o vidro é aplicado em todos os tipos de estufas integradas de referência e, por isso, deduz-se que os arquitetos e engenheiros assumem o seu uso como a única solução possível. O presente estudo explorou o uso de soluções em membrana para encerramento de varandas enquanto substituto do vidro, de modo a ultrapassar os pontos fracos do último: o peso e custo, associado sobretudo aos acessórios e sistemas de caixilharias. Numa solução contemporânea, como a ECont A, considerando uma fachada de 100m<sup>2</sup>, são necessários 294kg de alumínio e 1631kg de vidro. Enquanto na alternativa em membrana, na EP2M por exemplo, apenas são necessários 90kg de alumínio e 86kg de membrana ETFE. O facto da opção com membrana requerer menos subestrutura, altera a abordagem arquitetónica, permitindo uma maior liberdade nas opções de desenho, com reduzido impacto ambiental.

Salienta-se que as soluções construtivas com membranas não estão capacitadas para substituir as soluções de vidro em todos os cenários de intervenção/construção, apresentando-se como alternativas interessantes nos casos onde o uso do vidro é limitado, sobretudo pelas suas dimensões, peso e custo. Adicionalmente, as soluções em membrana também podem fornecer proteção aos ocupantes, ou transeuntes contra a projeção de material decorrente da ocorrência de eventos sísmicos, por exemplo, ao contrário das soluções de vidro.

Por si só, as membranas não conseguem fornecer as condições para alcançar um conforto térmico constante no interior de um espaço, devido à sua reduzida massa térmica. Contudo, com este exercício, verifica-se que numa abordagem de complementaridade/mistura de pesos (*mixed weight strategy*) os edifícios existentes, que convencionalmente possuem massa térmica elevada, complementam as soluções com membranas, e vice-versa, para o alcance de outras melhorias funcionais, por exemplo: acústicas, higrotérmicas, proteção contra a projeção de material para fora do plano em caso de eventos sísmicos, por exemplo.

Verificou-se, de um modo geral, que a adoção de intervenções de reabilitação funcional com a criação de espaços solares integrados em edifícios antigos, localizados num clima onde as necessidades de aquecimento são muito superiores às necessidades de arrefecimento, beneficia positivamente a redução de consumo energético para aquecimento. O encerramento da varanda existente permitiu criar um espaço “tampão” que favorece a regulação térmica e a ventilação do edifício. Deste modo não existe a necessidade de reabilitar termicamente as paredes que fazem meação entre o espaço criado e os compartimentos adjacentes a este, mantendo-se assim inalterada a inércia térmica destas paredes.

Os ensaios experimentais realizados - com registo de dados de humidade relativa e temperatura do ar, num edifício existente com uma solução ET e um protótipo da solução EM – serviram para calibrar/validar os modelos de simulação numérica que permitiram simular diferentes espaços solares com um esforço reduzido, a fim de obter uma estimativa aceitável do desempenho térmico/energético do edifício, sem e com encerramento das varandas existentes.

A monitorização da temperatura mostrou que a temperatura do ar, em ambas as varandas encerradas (solução em membrana e solução em vidro tradicional), na cavidade entre o elemento transparente e a parede de granito existente no caso de estudo, permaneceram, quase sem exceção, acima da temperatura do ar exterior. As análises também mostraram que o comportamento higrotérmico no espaço interior da varanda fechada e o possível potencial de poupança energética para o compartimento adjacente são específicos para cada caso e são influenciados por uma variedade de fatores, como a localização do edifício, o tipo e a orientação da própria varanda, a estanquidade e a resistência térmica das soluções de encerramento. Estes tipos de espaços devem ser ventilados para evitar a ocorrência de condensações. No caso da solução EM, a ventilação ocorre passivamente através de um espaço de ar entre o perfil de montagem superior e o teto (Figura 6.26).

Globalmente, num cenário de ciclo de vida a 60 anos, a solução EM apresenta-se como a mais eficiente segundo aspetos funcionais, ambientais e económicos, ou seja, constitui uma alternativa eficiente às tradicionais/convencionais/contemporâneas em intervenções com abordagens de integração. Isto deve-se, sobretudo, ao facto de apresentarem um peso e custo de construção inferiores aos das restantes soluções<sup>23</sup>.

Numa avaliação da eficiência relativa da soluções alternativas em membrana EP2M e EM verifica-se uma melhoria da eficiência, entre 35% e 64%, respetivamente, relativamente à solução convencional com menor eficiência registada (EConv), e entre 10% a 40%, respetivamente, relativamente à melhor solução de referência (EContB). Contudo a solução EM apresenta limitações relativamente à sua durabilidade e ao isolamento acústico. No entanto, a solução EP2M (classificada com a 2ª posição de eficiência) supera essas limitações e mantém-se como uma alternativa eficiente relativamente às restantes (ET, EConv e ECont). A redução do consumo energético com a solução EM atinge uma média entre 25% a 45% (mínimo e máximo), sem e com medidas de melhoria, respetivamente, e para as orientações solares menos e mais favoráveis.

As soluções alternativas com membranas apresentam um período de retorno económico reduzido (3 a 7 anos), sobretudo devido à facilidade com que podem ser integradas na estrutura existente. Para além disso, conclui-se que, neste caso em particular, é mais eficiente uma solução menos duradoura mas com menor impacto económico e ambiental ao longo do ciclo de vida.

Por fim, adverte-se que a reabilitação com integração de uma estufa com as soluções alternativas propostas deve atender a princípios de sustentabilidade e não ser uma ferramenta universal, pois as condições climáticas, a paisagem urbana, a envolvente edificada e os hábitos dos ocupantes não podem ser negligenciados. Contudo, conclui-se com o presente exercício que as soluções alternativas propostas apresentam-se com interesse para serem aplicadas em edifícios antigos, localizados no norte de Portugal e, especialmente, em fachadas orientadas a sul.

Para além da redução das perdas de calor durante o inverno, o conhecimento das temperaturas que ocorrem no verão também é importante para uma configuração otimizada da solução em membrana com sombreamento, onde a membrana vertical se transforma num sombreador com inclinação/altura regulável. Neste exercício não foi possível executar uma avaliação de eficiência de algumas medidas de melhoria do desempenho funcional com recurso a membranas, nomeadamente com membranas para incremento do isolamento das portadas existentes (com membrana aerogel), para sombreamento (com membrana compósita) e para retenção/isolamento térmico das superfícies transparentes, sobretudo no período noturno, com membranas tipo *Cortfee*. Contudo, uma vez que estas soluções com membrana podem aplicar-se transversalmente a todas as soluções de estufas, recomenda-se que se avaliem estas medidas em trabalhos futuros.

---

<sup>23</sup> Os resultados da avaliação da eficiência das soluções alternativas em membrana derivam da avaliação das várias etapas do ciclo de vida da solução construtiva – etapas de produção, construção e manutenção – e mesmo considerando a substituição periódica da membrana, devido à reduzida durabilidade (estimada), a solução com membrana mantém os menores resultados nos indicadores de impacto ambiental e económicos do que as restantes soluções analisadas.



## Capítulo

# 07

### *Teste n° 02 – abordagem de sobreposição:*

*Solução construtiva em membrana para ampliação vertical de edifícios antigos.*



*Figura 7.1. Ilustração da intervenção de ampliação vertical com solução alternativa em membrana sobre edifício antigo.*

*As intervenções de reabilitação de edifícios podem resultar em ampliações, renovações ou alterações. No capítulo 4 verificou-se que 49% dos projetos de reabilitação com membranas arquitetónicas correspondem a ampliações e que, quando inseridas em sistemas construtivos leves, as membranas têm potencial para promover este tipo de intervenções, sobretudo em edifícios com limitações estruturais. Uma das motivações para ampliar um edifício pode advir de uma estratégia para reconfigurar o espaço interior e/ou otimizar a utilização e desempenho funcional dos espaços adjacentes. A adição de funções a um edifício, que requeira espaço adicional, leva a uma revisão de toda a estrutura de modo a encontrar um diálogo entre os elementos de construção novos e antigos. Esta abordagem de sobreposição torna-se um trabalho meticuloso, com o objetivo de encontrar o equilíbrio entre: (a) como diferenciar os novos elementos dos antigos; (b) como minimizar o impacto visual da nova intervenção para permitir a percepção dos elementos antigos – conjugando simultaneamente a coerência linguística, a compatibilidade estrutural e a ligação viável entre diferentes materiais e técnicas. Neste tipo de abordagem, a reversibilidade da nova intervenção é o aspeto mais importante, e que deve atingir o grau máximo, na fase de conceção. Com base no caso de estudo selecionado para o presente exercício, algumas orientações devem ser deduzidas para uma aplicação mais ampla das membranas arquitetónicas no setor da reabilitação de edifícios.*

*Este tipo de intervenções no edificado também deve ser cuidadosamente concebido de modo a evitar dificuldades acrescidas na fase de construção e de gestão de obra (transporte, armazenamento de materiais/equipamentos), bem como garantir compatibilidade estrutural e harmonização estética entre a parte ampliada e o edifício existente. Estes aspetos são considerados na conceção e avaliação da solução construtiva proposta neste exercício: uma solução leve que integra membranas arquitetónicas complementadas com materiais isolantes e flexíveis e subestruturas (em madeira e metal). Pretende-se avaliar em que medida a solução proposta com membrana pode beneficiar um edifício existente e constituir uma alternativa eficiente às soluções convencionais de referência, sobretudo em edifícios que possuem particulares limitações estruturais (quando as estruturas de ampliação se encontram desalinhadas dos principais elementos de suporte dos pisos inferiores – implicando acréscimos de carga significativos). Para tal, foi selecionado um caso de estudo – o projeto de reabilitação de um edifício antigo que contempla uma ampliação vertical com solução construtiva leve convencional. A partir deste caso de estudo também será avaliado o desempenho energético das várias soluções construtivas em análise, variando o contexto geográfico e climático.*

*Em síntese, os principais objetivos deste estudo são: (1) conceber uma ampliação vertical com recurso a membranas arquitetónicas; (2) avaliar esta solução construtiva segundo aspetos funcionais, económicos e ambientais; (3) comparar esta solução com outras soluções construtivas convencionalmente utilizadas para este fim, de modo a determinar em que medida esta solução constitui uma alternativa eficiente às convencionais (na relação entre os recursos empregues e os resultados obtidos). A comparação será feita para o ciclo de vida do edifício considerando: o impacto do peso próprio das soluções de ampliação vertical sobre o conjunto estrutural do edifício existente; aspetos funcionais (desempenho térmico/energético, higrotérmico e acústico), económicos (custo energético, de construção e manutenção) e ambientais.*

## 7.1. Enquadramento geral

### 7.1.1. Operações de ampliação de edifícios na Europa

De acordo com Usanov *et al.* (2013) a reabilitação de edifícios (onde se incluem as operações de ampliação) é influenciada maioritariamente pelos seguintes fatores: desgaste; obsolescência; danos causados por acidentes; catástrofes naturais/de origem humana; mudanças na legislação; melhoria funcional dos edifícios (eficiência energética, qualidade do ar, aumento da área útil, *etc.*); mudanças de uso (novos ocupantes, conversão para um novo uso, incluindo reutilização adaptativa, *etc.*). Na Europa, este tipo de operações corresponde entre 10 a 15% do total de intervenções de reabilitação em edifícios (Tabela 7.1).

Tabela 7.1. Estimativa da percentagem de ocorrência dos diferentes tipos de operações e motivações para a reabilitação de edifícios no ano de 2010 na Europa (Euroconstruct, 2010 apud Usanov *et al.*, 2013).

Tipo de operação de reabilitação	% do total
Manutenção	20-35
Modernização	25-30
Ampliação	10-15
Reforços	5-8
Tipo de motivação	% do total
Melhoria energética	10-15
Mudança de ocupação	10
Melhoria de acessibilidades	5

### 7.1.2. Operações de ampliação de edifícios em Portugal

Em Portugal, segundo dados do INE (2016), no período entre 2010 a 2015 as obras de construção nova perderam importância relativa. Em 2010 o peso deste tipo de obras representou 76,2% do total das obras concluídas, tendo vindo a registar sucessivos decréscimos até se observar 66,6% em 2015. Em oposição, as obras de ampliação aumentaram o seu peso relativo nesse período. Em 2010, as obras de ampliação representaram 16,7% do total das obras de edificação concluídas, enquanto em 2015 corresponderam a 22,8% (Figura 7.2).

Entre 2010 e 2015, considerando os diferentes tipos de obras que integram o grupo de ações de reabilitação, as obras de ampliação mantiveram a predominância, concentrando 68,4% do total de obras de reabilitação em 2015 (INE, 2016).

Em termos regionais, as obras de reabilitação revelaram uma maior expressão no Algarve, representando 52,7% do total de obras concluídas naquela região em 2015 (+23,3 p.p. face a 2010) (Figura 7.3).

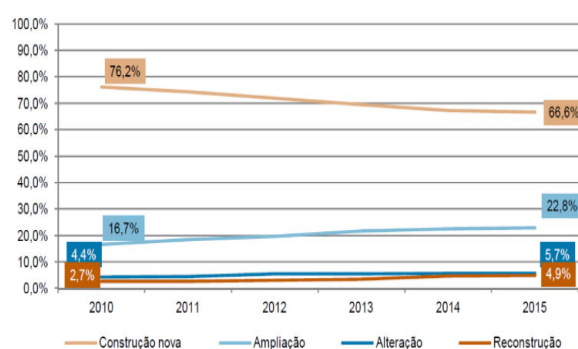


Figura 7.2. Proporção de edifícios concluídos por tipo de obra (2010 - 2015) (INE, 2016).

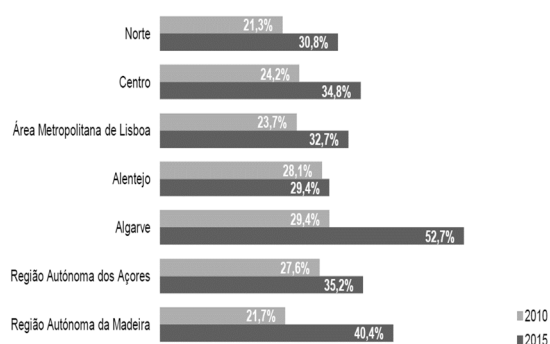


Figura 7.3. Peso das obras de reabilitação no total de obras concluídas por NUTS II (2010 e 2015) (INE, 2016).

Entre as diferentes regiões NUTS II, em 2015, os maiores pesos de obras de ampliação registaram-se na Região Autónoma da Madeira (95,8%), na Região Autónoma dos Açores (75,0%) e no Algarve (71,7%). Não obstante, os maiores valores absolutos de obras de reabilitação registaram-se nas regiões Norte e Centro (INE, 2016) (Tabela 7.2) (Figura 7.4). Mais à frente inclui-se uma avaliação do consumo energético das soluções em estudo para estas diferentes regiões.

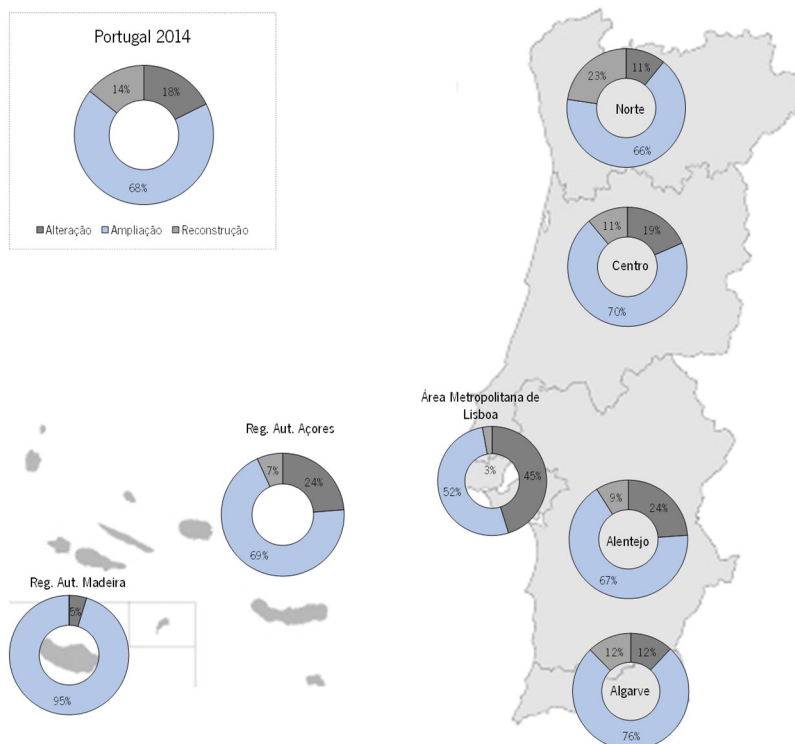


Figura 7.4. Peso das obras de alteração, de ampliação e reconstrução relativamente ao total de obras de reabilitação concluídas por NUTS II (2015) (adaptado de INE, 2016).

Tabela 7.2. Obras de reabilitação segundo tipo de obra e distribuição geográfica (NUTS II) (INE, 2015).

		Alteração	Ampliação			Reconstrução	Total
			Total	Habitação familiar	% <sup>(1)</sup>		
<b>Portugal</b>	2014*	769	3 046	1 694	55,60	632	4 447
	2015*	623	2 506	1 392	55,50	535	3 664
<b>Continente</b>		590	2 311	1 264	54,69	523	3 424
Norte		150	887	544	61,33	281	1 318
Centro		211	897	392	43,70	171	1 279
Área Metropolitana de Lisboa		119	151	97	64,24	8	278
Alentejo		82	209	109	52,15	25	316
Algarve		28	167	122	73,05	38	233
<b>R. A. Açores</b>		31	126	79	62,70	11	168
<b>R. A. Madeira</b>		2	69	49	71,01	1	72

Nota: \* Informação com base nas Estimativas de Obras Concluídas; (1) Peso da Habitação Familiar no total de obras do tipo ampliação.

• **Aspetos programáticos – tipo de uso**

No seguimento do pedido de informação ao Instituto Nacional de estatística Português, com a referência “PED-261177192\_160527”, foram fornecidos ao autor (a 27/05/2016) dados relativos às “Caraterísticas das Obras de Ampliação segundo o destino da obra (tipo de uso)” (Fonte: Estatísticas da Construção e Habitação; Obras Concluídas e Obras Estimadas Concluídas; no período de 2000 a 2015). Com base nessa informação, verificou-se que, ao nível nacional, as obras de ampliação destinam-se maioritariamente para *Habitação Familiar* (Tabela 7.2). Os edifícios sobre os quais se realizam intervenções de ampliação apresentam em média 3 pisos, com uma área total de 141m<sup>2</sup>, e o número médio de pisos adicionados é dois. Também se verifica que a Habitação Familiar é o tipo de uso maioritário nas intervenções realizadas, sobretudo, nos seguintes locais: R. A. da Madeira, R. A. dos Açores e cidade do Porto, (Figura 7.5(a), 7.6(a) e 7.7(a)).

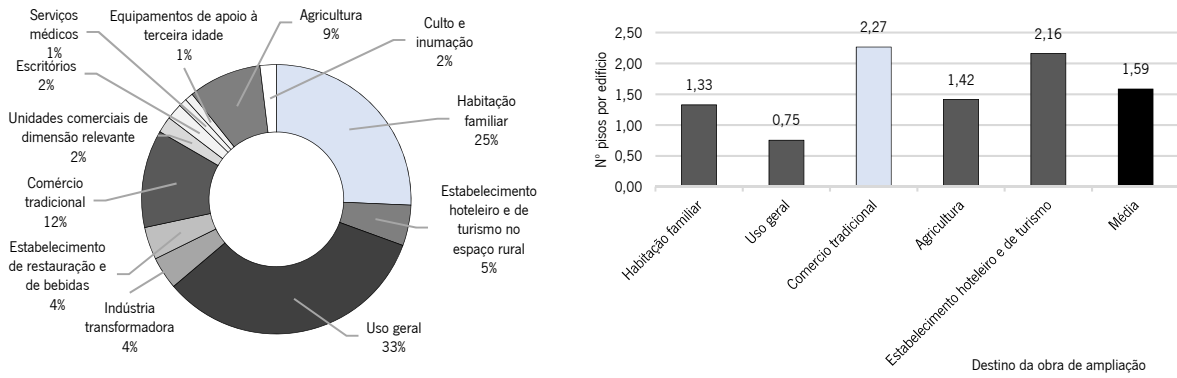


Figura 7.5. Obras de ampliação na Região Autónoma da Madeira: (a) estimadas para 2013 e 2015 em função do tipo de uso; (b) número médio de pisos por edifício com obras de ampliação concluídas entre 2000 e 2012.

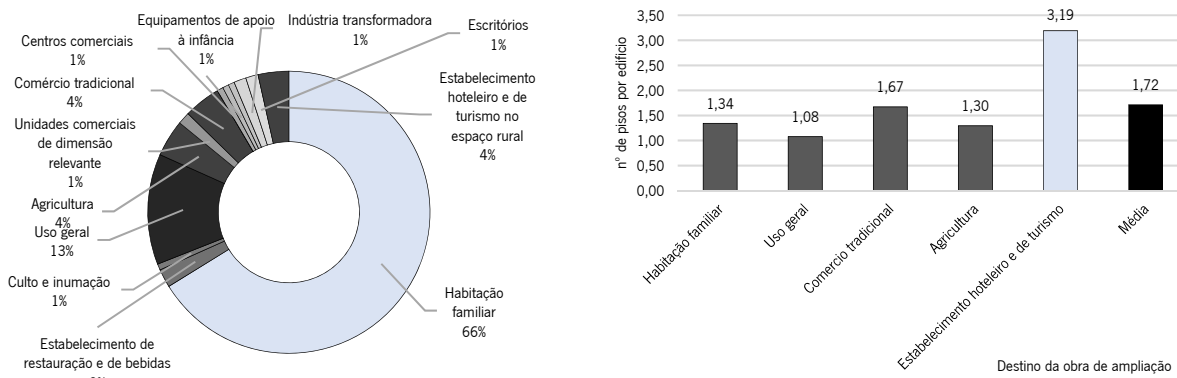


Figura 7.6. Obras de ampliação na Região Autónoma dos Açores: (a) estimadas para 2013 e 2015 em função do tipo de uso; (b) número médio de pisos por edifício com obras de ampliação concluídas entre 2000 e 2012.

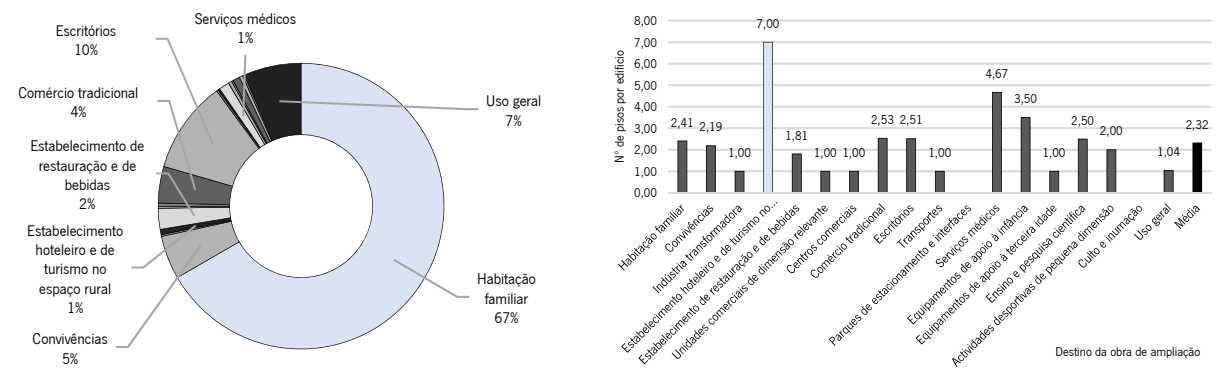


Figura 7.7. Obras de ampliação na cidade do Porto: (a) estimadas para 2013 e 2015 em função do tipo de uso; (b) número médio de pisos por edifício com obras de ampliação concluídas entre 2000 e 2012.

## 7.2. Reflexões sobre ampliações verticais

### 7.2.1. Reflexão 1: motivação para ampliar um edifício

Nos últimos 20 anos a construção de edifícios esteve irreversivelmente ligada à ocupação de solo virgem, estendendo horizontalmente as cidades e implicando uma grande necessidade de construção de infraestruturas complementares. Uma das formas de reverter este modelo passa pela reabilitação do parque edificado construído. Neste âmbito, as ampliações verticais, sempre que respeitem a envolvente edificada existente e as limitações estruturais do edifício a intervir, apresentam algumas vantagens ambientais, como por exemplo: não

umentam o consumo de solo natural; não reduzem a biodiversidade; otimizam as infraestruturas existentes (serviços e abastecimento); diminuem a pegada ecológica (estimada em menos 50% (LCT, 2012)) e a pegada de carbono (estimada em menos 30% (LCT, 2012)), relativamente a construir em solo virgem.

Atualmente, a procura de habitação nos centros urbanos é elevada e com tendência crescente. Uma das consequências deste interesse é a criação de áreas populacionais mais densas, onde qualquer espaço disponível para habitar é considerado. De facto, muitos dos edifícios nos centros históricos das cidades Europeias têm sido ampliados ao longo dos séculos, como se exemplifica na Figura 7.8 (alertando para o facto de que as edificações podiam ser construídas de raiz assim, ou podiam sofrer intervenções de ampliação vertical com o mesmo tipo de configuração (pisos recuados, pisos sobrepostos, com mirantes, *etc.*).

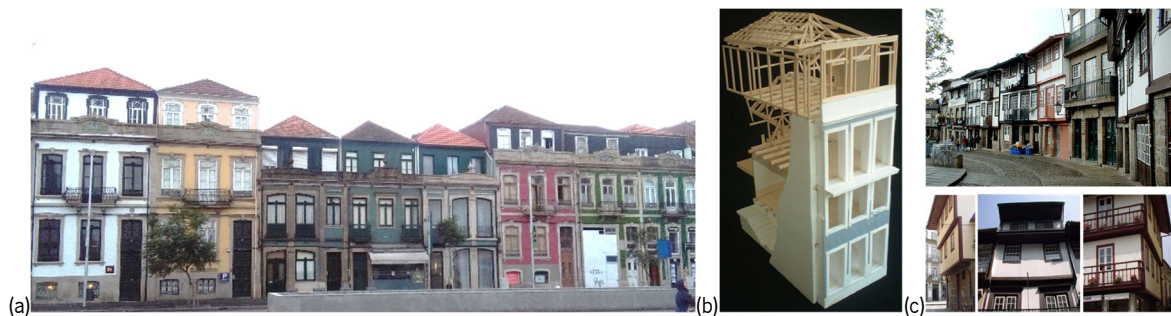


Figura 7.8. Ampliações verticais: (a) edifícios com pisos recuados (Avenida Boavista, Porto); (b) ampliações verticais em edifícios na cidade do Porto – maquete de uma casa antiga do Porto (Teixeira, 2013); (c) ampliações verticais na cidade de Guimarães (Casas de Ressalto na Praça Santiago e na Rua Gravador Molarinho).

A tendência de construção de coberturas planas nos anos 60 e 70 deixou a sua marca na paisagem urbana. Em muitas cidades existem grandes áreas com coberturas planas com capacidade para suportar cargas extras com a adição de pisos. Contudo, para fazer uso destas áreas, é essencial desenvolver métodos e soluções construtivas adequados que apresentem uma boa relação custo-eficiência, como se propõe este estudo.

O tipo de cobertura em terraço (ou plana) é o que favorece a opção por intervenções de ampliação vertical, por facilitar o processo construtivo, implicando menos transformações na construção existente. Contudo, em Portugal, a maioria dos edifícios possui cobertura inclinada, verificando-se que a percentagem de coberturas em terraço é muito reduzida (1%) (Tabela 3) (INE, 2012). A maioria das coberturas em terraço estão presentes em edifícios recentes (construídos entre 2006-2011) com estrutura em betão armado e 2 pisos. Contudo, salienta-se que a Região do Algarve é a que possui a maior percentagem de edifícios com cobertura em terraço (14%) seguindo-se a Região Autónoma da Madeira (9%) INE (2012).

Tabela 7.3. Tipo de coberturas dos edifícios em Portugal (INE, 2012).

	% Terraço	% Inclinada e revestida a telhas de cerâmica ou de betão	% Mistas (inclinada e terraço)
<b>Portugal</b>	<b>1</b>	<b>98</b>	<b>1</b>
Norte	3	96	1
Centro	1	98	1
Lisboa	4	94	2
Alentejo	1	97	2
Algarve	14	72	14
R.A. Açores	1	98	1
R.A. Madeira	9	82	9

Segundo os Censos de 2011 (INE, 2012), na área da Grande Lisboa existiam 280000 edifícios com necessidades de intervenção na cobertura e com base nestes dados surgiu, em contexto nacional, a iniciativa *Lisbon Skyline Operations* em 2014 (Figura 7.9(a)). No contexto internacional também se registam iniciativas que partilham do mesmo conceito de intervenção, como é exemplo a empresa La Casa por el Tejado (LCT) (com



início de atividade em 2012) e o concurso de ideias “Terrats – o uso de coberturas” (promovido em 2015 pela Fundação Sabadell e ARQUIN-FAD, Barcelona) (Figura 7.9(b)).



Figura 7.9. Imagens alusivas às iniciativas de reabilitação de edifícios a partir das suas coberturas: (a) Lisboa; (b) Barcelona.

Em Londres, a dimensão do problema de habitação é grande; um relatório produzido pela London School of Economics, em 2015, revelou que são necessárias 59000 habitações extra por ano para reduzir o fosso entre procura e oferta de habitação (CTI Timber, 2016). No entanto, em média, apenas 25000 unidades adicionais têm sido concluídas por ano desde 2008. Destas unidades habitacionais, menos de 2% resultaram de projetos de ampliação vertical sobre edifícios existentes (CTI Timber, 2016). Segundo Zac Goldsmith (Evening Standard, 2016), poderiam ser construídos milhares de novos fogos em Londres, acrescentando dois pisos às coberturas dos edifícios públicos existentes<sup>1</sup>. Se todos os edifícios possuírem as condições adequadas para tal, seria possível alcançar cerca de 140000 novos fogos (Ooshuizen *et al.*, 2016).

Outra das motivações para ampliar um edifício, enquanto intervenção de reabilitação funcional, pode advir de uma estratégia para reconfigurar um espaço interior e otimizar a utilização dos espaços adjacentes; a distribuição de um edifício pode necessitar de ser reorganizada para o adequar a mudanças programáticas, do estilo de vida/padrões de utilização dos seus ocupantes. Segundo Douglas (2006) a decisão de ampliar um edifício é influenciada pela necessidade de torná-lo mais eficaz (satisfazendo necessidades de curto-médio prazo dos ocupantes) e sustentável (atendendo às necessidades dos ocupantes e da sociedade como um todo).

As vantagens de ampliar versus mudança de edifício podem ser as seguintes: (1) redução de custos e poupança de tempo e (2) preservação da ligação emocional ao edifício existente - em alguns casos, os proprietários são incentivados a ampliar os imóveis que possuem, em vez de efetuarem uma mudança. Contudo, as ampliações verticais apresentam problemas específicos, comparativamente aos restantes tipos de construção (Tabela 7.4).

Tabela 7.4. Comparação entre os problemas comuns às construções em geral e específicos das ampliações verticais.

<b>Problemas comuns às construções em geral:</b>
(1) restrições específicas de execução como: o local e a geometria;
(2) a gestão logística de, para e no local de intervenção e consequente redução de custos associados ao processo de construção.
<b>Problemas específicos das ampliações verticais:</b>
(1) Restrições específicas de execução como: o acesso, a restrição de movimentos e outras limitações físicas impostas pelo edifício existente. Essas restrições devam ser cuidadosamente consideradas durante a fase de projeto. É importante minimizar interrupções e eliminar perigos para as propriedades vizinhas; devendo, na fase de projeto, colocar-se as seguintes questões: que influência terá a ampliação sobre o edifício existente? Qual a influência das atividades de execução nas atividades quotidianas do edifício existente, nas propriedades confrontantes e restante envolvente próxima?
(2) Atendendo às especificidades do edifício a reabilitar, as ampliações podem apresentar as seguintes implicações/consequências:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• impacto na capacidade de produção, no caso da ampliação de uma unidade empresarial;</li> <li>• impacto no valor da propriedade - o valor da propriedade pode aumentar mas não necessariamente em função da quantia dispensada nas obras de ampliação (podem ser aplicados impostos adicionais);</li> <li>• impacto na linguagem arquitetónica do edifício existente;</li> <li>• impacto na estrutura - os elementos estruturais do edifício existente podem não acomodar as novas cargas;</li> <li>• impacto para os ocupantes.</li> </ul>
(4) O estudo realizado por Bergsten & Wall (2001) sobre ampliações verticais em Estocolmo revela que apesar de não se utilizarem métodos especiais no processo de construção, os custos das mesmas foram muito elevados devido à gestão logística da obra. Por esse motivo, Bergsten & Wall (2001) consideram que a redução de custos de uma intervenção de ampliação vertical depende de medidas positivas de gestão logística, em que o uso de sistemas construtivos leves constitui uma solução eficiente para resolver os problemas associados. O impacto no tráfego local, especialmente no centro da cidade, tem de ser considerado; inevitavelmente, muitos dos edifícios onde são realizadas intervenções de ampliação vertical estarão localizados em áreas com restrições de acesso e outros constrangimentos físicos para a movimentação de materiais, componentes, sistemas operativos e equipamentos. Ao mesmo tempo, a escassez de espaço no local de intervenção pode limitar o armazenamento de materiais.

<sup>1</sup> A estratégia de intervenção passaria por realizar intervenções de ampliação vertical sobre edifícios existentes até à altura dos edifícios adjacentes; não seria permitida a construção de ampliações com mais de dois pisos e seriam tomadas medidas para evitar a criação de torres ou arranha-céus.

### 7.2.2. Reflexão 2: peso da estrutura a adicionar

Os edifícios construídos com sistemas convencionais possuem muitos materiais pesados que pressupõem grandes quantidades de energia, água e resíduos. Contudo, atualmente existem soluções leves que permitem conceber edifícios reduzindo esses efeitos, sendo especialmente enquadráveis nas intervenções de ampliação vertical.

Quando se tem de construir sobre o construído, o peso é uma questão vital. Mas o que significa baixo peso quando se fala de sistemas construtivos? Segundo Mendonça (2005), os sistemas construtivos pesados apresentam, aproximadamente, mais de 500 kg/m<sup>2</sup> e os sistemas leves entre 100 e 500 kg/m<sup>2</sup>.

As ampliações verticais implicam, inevitavelmente, novas cargas sobre a construção existente, podendo exigir o reforço dos elementos estruturais, como paredes, pisos e fundações, sobretudo em edifícios antigos. Em contrapartida, a estrutura da maioria dos edifícios existentes mais recentes encontra-se sobredimensionada, podendo facilmente acomodar um andar extra sem obras de reforço substanciais. Se no passado foram realizadas muitas ampliações verticais sem cálculos precisos nem normas detalhadas que permitissem justificar quanto é que se podia aumentar, ou como se deveria fazê-lo, nas últimas décadas, com o aumento de exigências e de fiscalidade, essa situação mudou radicalmente. Efetivamente, grande parte das ampliações realizadas no passado, atualmente não seriam autorizadas.

Como é possível aumentar a altura de um edifício? Um estudo levado a cabo pela LCT (2013) apresenta, em traços gerais, dois grandes grupos de intervenções possíveis para realizar ampliações verticais: (1) retirar parte da carga/peso do edifício existente no topo onde serão adicionadas as novas construções, equilibrando a carga retirada com a incorporada (peso próprio + sobrecarga de uso); (2) reforçar com uma estrutura adicional e independente que receba a carga adicional e a transporte paralelamente às paredes existentes (com fundações próprias). O primeiro caso (equilíbrio de pesos) é habitual em operações nas quais existem elementos pesados na cobertura (Figura 7.10(d)) que podem ser removidos, estimando-se que a ampliação terá um ou dois pisos no máximo. O segundo caso corresponde normalmente a situações em que a construção existente possui poucos pisos e se pretende adicionar mais do que dois pisos. Em qualquer um dos casos, o primeiro passo será sempre avaliar se o peso próprio da ampliação mais sobrecargas de pessoas e bens a adicionar podem ser comportados pelo edifício existente, sendo muito importante recorrer a sistemas construtivos de baixo peso para execução nos novos pisos.

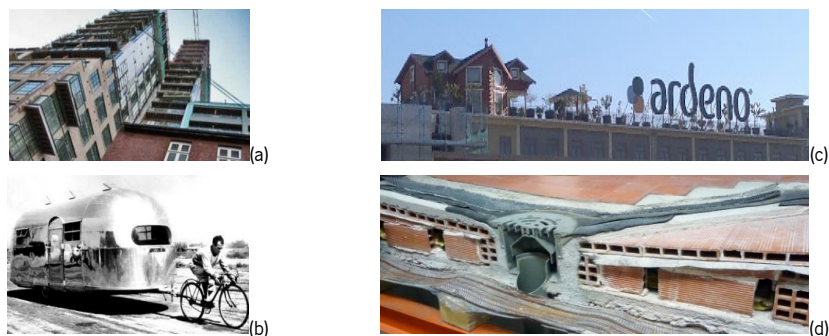


Figura 7.10. (a) Reabilitação com ampliação, Torre Pall Mall e Coliseum, construída em 1920 em Manchester (<http://manchesterhistory.net>). (b) Uma construção pode ser extremamente leveira, como esta caravana da Airstream, criada em 1936, que pode ser puxada por uma bicicleta ([www.fuelyourcreativity.com](http://www.fuelyourcreativity.com) apud LCT, 2013). (c) Ampliação vertical com sistema construtivo em madeira –cobertura com espaço de exposição da fábrica ARDENO (Tirana, Albânia); (d) Cobertura plana acessível, com camara de ar, cuja camada superior pode ser removida para aligeirar o edifício existente (LCT, 2016).

### 7.2.3. Reflexão 3: benefícios de uma ampliação vertical para redução do impacto ambiental/consumo energético

Uma análise de ciclo de vida permite auxiliar a tomada de decisão em projetos de reabilitação de edifícios, para determinar se se deve manter o existente, reabilitar, ou demolir e construir de novo. Baseando-se na metodologia de análise de ciclo de vida, Wald *et al.* (2015) compararam diferentes alternativas de reabilitação energética para edifícios antigos existentes na Alemanha, que necessitam de isolamento térmico na sua



envolvente e de equipamentos de climatização eficientes. A análise incluiu os seguintes cenários: (1) não intervir (deixar o edifício no estado atual); (2) reabilitar ligeiramente (isolar termicamente a cobertura e pavimentos); (3) reabilitar profundamente (opção anterior + fachadas e janelas); (4) reabilitar ligeiramente + ampliação vertical (incorporando energias renováveis) e (5) demolir para reconstruir (seguindo as normas atuais para atingir maior eficiência energética) (Figura 7.11). Da análise destes cenários, segundo Wald et al (2015), conclui-se que a melhor opção é a combinação de reabilitação ligeira com ampliação vertical, por apresentar o menor consumo de energia renovável e menor emissão de gases efeito estufa a médio e longo prazo.

O estudo considerou apenas as duas fases de ciclo de vida que consomem mais energia e emitem mais emissões poluentes: a fase de produção das soluções construtivas e a fase de utilização do edifício (durante 50 anos). Além disso, como mostram os gráficos presentes na Figura 7.12(a) e (b), o estudo teve em conta os custos ambientais energéticos e emissões poluentes que penalizam, particularmente, a opção de substituir o antigo edifício por construção nova.

Os resultados destacam que a variante (4) - reabilitação ligeira + ampliação vertical (com energia renovável) - envolve um elevado consumo de energia uma vez que consome mais materiais. Contudo, esse consumo é menor do que o da opção com demolição e reconstrução. Além disso, a eficiência energética alcançada com a variante 4 é superior (devido à melhoria da envolvente exterior e aquisição de energia renovável) fazendo com que, após ultrapassar o período de amortização do investimento, esta seja a melhor opção. A amortização calculada não se refere a termos económicos mas energéticos; é o resultado da soma de energia primária (na extração, antes da sua transformação e transporte) e das emissões que provocam alterações climáticas (como CO<sub>2</sub> e outros gases que provocam efeito de estufa) resultantes da intervenção no edifício existente (materiais e processos) em contraste com os ganhos produzidos. Em 3 anos, a variante 4 entra na fase positiva, isto é, compensa a energia dispensada e as emissões produzidas, passando, desde esse momento, a diminuir o impacto ambiental que o edifício existente tinha (Figura 7.12(b)).

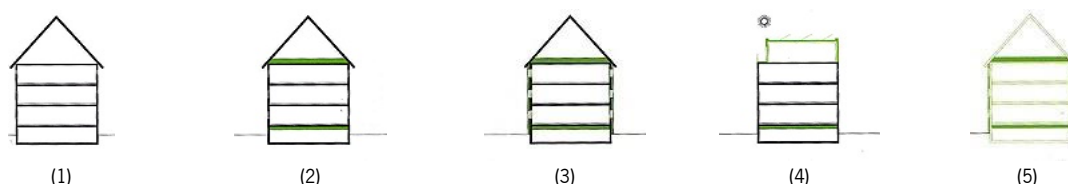
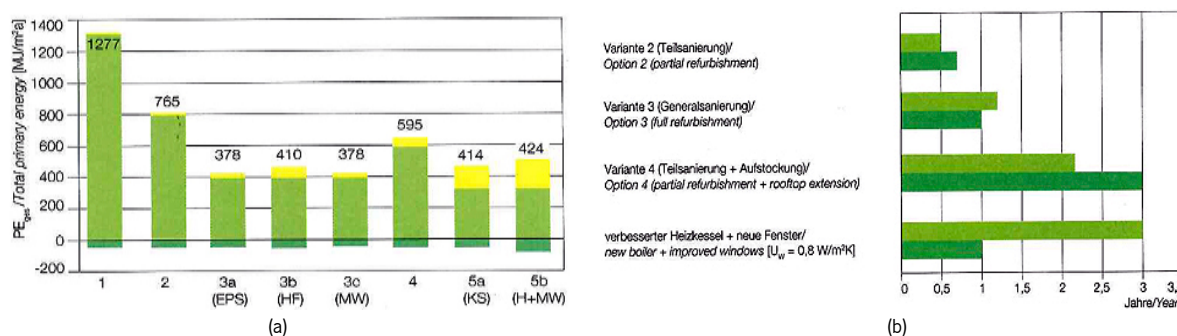


Figura 7.11. Casos avaliados em análise de ciclo de vida para as seguintes alternativas de reabilitação energética de um edifício (da esquerda para a direita): 1) manter o edifício existente; 2) reabilitação ligeira; 3) reabilitação profunda; 4) reabilitação ligeira + ampliação vertical com adição de energias renováveis e 5) demolição e reconstrução (WALD et al, 2015).



Legenda: (a) fases do ciclo de vida: construção (amarelo), utilização (verde claro) e demolição (verde escuro). (b) energia primária incorporada (cor verde claro) e potencial de aquecimento global (cor verde escuro).

Soluções em análise: Variante 2 (reabilitação ligeira/parcial); Variante 3 (reabilitação profunda/total); Variante 4 (reabilitação ligeira/parcial + ampliação vertical com energia renovável); edifício existente com novo sistema de aquecimento de AQS e janelas com o melhor desempenho térmico ( $U_w=0,8W/m^2K$ ).

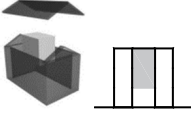
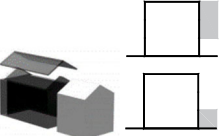
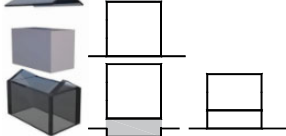
Figura 7.12. Resultados do estudo de Wald et al. (2015): (a) energia incorporada nas diferentes fases do ciclo de vida para todos os cenários analisados; (b) tempo de amortização (em anos) de energia primária incorporada (cor verde claro) e potencial de aquecimento global (cor verde escuro) com as respetivas emissões ao longo do ciclo de vida para as variantes analisadas.

### 7.3. Tipos de ampliação

Como se verificou anteriormente, a ampliação de edifícios tem-se tornando cada vez mais frequente. Não obstante, a sua ocorrência contrasta com a discussão sobre as mesmas, pois a bibliografia voltada

especificamente para este tema é extremamente escassa a nível nacional e internacional. Contudo, com base nos estudos de Douglas (2006), Andrade Júnior (2009) e Garcia (1992), foi possível identificar dois tipos de ampliação: ampliação interna e ampliação externa (Tabela 7.5).

Tabela 7.5. Tipos de ampliações sobre edifícios existentes.

	Tipos de ampliação		
	Interna	Horizontal Laterais	Externa Vertical
	Pisos intermédios, Volumes internos, Cobertura de pátios 		Ascendentes Descendentes (subterrânea) 
<b>Limitações</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iluminação natural;</li> <li>• Geométricas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incompatibilidade tipológica;</li> <li>• Legibilidade do involucro existente;</li> <li>• Iluminação natural.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas de caráter estrutural e sísmico;</li> <li>• Compatibilidade tipológica;</li> <li>• Considerar aumento de profundidade (p.e. p/ reforçar fundações);</li> <li>• Alcance de altura útil necessária.</li> </ul>

### 7.3.1. Ampliação interna

A ampliação interna corresponde ao aumento da área útil coberta do edifício, sem que isto represente a construção de novos volumes anexos ao edifício existente. Basicamente, esta modificação pode ocorrer de duas formas: 1<sup>a</sup>) através da subdivisão dos espaços internos; 2<sup>a</sup>) através do encerramento superior de espaços internos anteriormente descobertos, tais como pátios, através da criação de coberturas. A primeira forma pode ocorrer através da criação de pavimentos intermédios (mezanines), ou mesmo de pequenas estruturas autónomas com pé-direito reduzido no interior de espaços com pés-direitos elevados. Em casos mais extremos, é realizada a substituição total das lajes preexistentes por outras, em maior quantidade e com um pé-direito menor que o anteriormente existente. Neste último caso, trata-se de intervenções mais controversas, na medida em que modificam radicalmente a espacialidade interna do edifício preexistente, destruindo a correspondência tipológica entre as fachadas preservadas e os espaços internos radicalmente alterados.

### 7.3.2. Ampliação externa

A ampliação externa corresponde a situações em que ampliação e a preexistência são entendidas como uma unidade arquitetónica, tanto do ponto de vista de quem as observa externamente, como de quem circula pelo seu interior, pois há quase sempre uma continuidade entre os diversos espaços do edifício original e os da ampliação. Contudo, existem exemplos de ampliações externas que possuem uma ligação temporária ao preexistente, em função da vontade dos seus ocupantes – ampliações externas móveis - como é exemplo o projeto *Fahrt ins Grüne* projetado por Karlhofer & Korshildgen em 1996.

Um exemplo que já se tornou clássico é o edifício da Câmara Municipal de Gotemburgo, obra de Erik Gunnar Asplund (arquiteto situado entre o classicismo e o Movimento Moderno) e que representa, segundo Garcia (1992) e Byard (2005), uma das mais razoáveis intervenções de ampliação de um edifício histórico na primeira metade do século XX. Ainda que o volume da ampliação tenha claramente uma linguagem arquitetónica moderna, o diálogo com o edifício original está assegurado pela repetição de valores como ritmo da fenestração, alturas dos pisos e cêrcea.

No entanto, no cenário da arquitetura moderna e contemporânea, não encontramos apenas ampliações que buscam uma dialética entre linguagem moderna e referências históricas. Podemos encontrar, entre as ampliações realizadas nos últimos vinte anos, exemplos com diversas abordagens de intervenção, desde a repetição, de maneira estilizada, das principais características do edifício original até à inserção de elementos e materiais radicalmente distintos daqueles que o caracterizam, visando obter um contraste explícito entre nova arquitetura e preexistente, passando ainda, evidentemente, pela recriação de maneira crítica e em linguagem contemporânea dos seus aspetos mais significativos.

Em Viena, por exemplo, a partir de 2000, os novos regulamento urbanísticos passaram a permitir que as modificações realizadas nas coberturas dos edifícios anteriores ao século XX pudessem ser feitas com a utilização de novas formas, cores e materiais distintos daqueles preexistentes (Campos, 2005). Desta forma, nas

zonas consolidadas e valorizadas da cidade, diversos edifícios construídos no século XIX e na primeira metade do século XX receberam ampliações verticais com uma linguagem contemporânea. Este processo teve origem no projeto de Remodelação da cobertura de um Edifício na Falkestrasse (Figura 7.13), intervenção realizada por Coop Himmelblau ainda nos anos 80 com o intuito de criar um espaço no sótão do edifício para uma sala de reuniões e alguns escritórios da firma de advogados que já ocupava outros pisos do edifício e que, após inúmeras rejeições, foi finalmente aprovado pelos órgãos municipais graças a uma manobra que a caracterizou como obra de arte e não como arquitetura (Campos, 2005): *“A intervenção faz explodir, como fulgurada por um raio, a cobertura preexistente do sótão, para estruturar no seu lugar uma ‘tenda’ vítrea e tecnológica. Uma espécie de arco metálico tecnicamente articulado [...] que se projeta em direção ao canto do edifício balançando sobre a rua, anunciando à cidade as roturas linguísticas do gesto lírico e criativo. Uma tenda, símbolo desde sempre da condição de nomadismo, dinamismo, de consciência temporalizada, aqui reinterpretada à luz de uma visão moderna e de uma capacidade de prefigurar espaços fora de qualquer malha geométrica ou controlo cartesiano”.* (De Sessa, 1998) É esta *“rotura linguística”* que está presente em muitas das ampliações verticais realizadas em Viena na última década, em que formas, materiais e cores das intervenções de ampliação procuram romper com a linguagem das preexistências sobre as quais surgem.

Há ainda exemplos de ampliações verticais em que a intervenção pode ter um valor mais simbólico do que propriamente representar um acréscimo substantivo de área útil. São intervenções que pretendem re-semantizar as preexistências, como observa Byard: *“Às vezes, o novo surge com a clara intenção de modificar o significado do antigo, não necessariamente de alterá-lo, mas sim de imprimir-lhe uma nova ordem de força”.* (Byard, 2005). Exemplos disso são: a já referida remodelação da cobertura de Coop Himmelbau; o volume construído (em 1997) na cobertura do pátio de um edifício construído em 1882 para uma sala de reuniões da empresa NNH & ING Bank em Budapeste (Figura 7.14(a)); ou ainda, a sala de conferências (Figura 7.14(b)) em forma de bolha erguida na pista de testes da cobertura da antiga Fábrica da FIAT-Lingotto, em Turim, uma requalificação concebida por Renzo Piano (1983-2003).

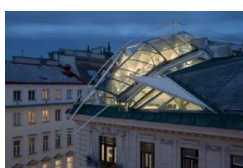


Figura 7.13. Falkestrasse, Viena, 1988 (Coop Himmelblau, 2016).

Figura 7.14. (a) Seção transversal da ampliação dos escritórios Centrais do NNH & ING Bank em Budapeste, projetado por Erick van Egeraat associated architects (EEA) e (b) ampliação efetuada na Fábrica Fiat Lingotto, em Turim, projetada por Renzo Piano.

Em meados do século XVIII, as correntes construtivas dos meios urbanos substituíram progressivamente o sistema construtivo de coberturas inclinadas pelo sistema de cobertura plana e acessível (terraço), muito mais rápido e económico. Esta mudança implicou a formação de um novo espaço urbano: o terraço. Estes novos espaços, que até então não existiam, foram transformados em espaços comuns de âmbito privado, de microcomunidades: para estender roupa, como espaço de lazer, para armazenamento, oficina, pombal, etc. No entanto, as grandes transformações sociais da última metade do século XX assumiram uma mudança nestes espaços que os tornou marginais, semiabandonados e subutilizados.

Ao longo da História contemporânea, a recuperação de coberturas terraço têm sido objeto de numerosos estudos e análises formuladas por diferentes correntes arquitetónicas; desde a proposta racional de Le Corbusier na sua obra da Unidade Habitacional de Marselha, passando pela volumetria das coberturas terraço de Gaudí, ou às visões particulares dos arquitetos Georg Reinberg, Herzog & de Meuron, Julien de Smedt, Luderwaldt Verhoff, MRDV e LCT.

Atualmente, para além da procura de redução do peso, também existe uma preocupação com a redução dos custos neste tipo de intervenções. As intervenções ilustradas na Figura 7.15 mostram soluções que conciliam estas duas preocupações.

O projeto de ampliação vertical *Neo leo vertical living* (Figura 7.15(a)) consiste na adição de uma área multifuncional através da inserção de uma “caixa de madeira”, através de uma grua, dentro de um edifício do estilo *Wilhelminian* localizado em Ehrenfeld, Colônia. A inserção vertical deste volume conecta funcionalmente três pisos, tornando o edifício numa habitação unifamiliar. A solução é composta por painéis de aglomerado de madeira com 56mm de espessura e funciona em três níveis com escadas com armários integrados. Esta intervenção representa uma solução arquitetônica economicamente acessível.

O projeto de reabilitação do edifício da antiga fábrica de tecelagem industrial *Lister Mills de Bradford* (construído em 1873) (Figura 7.15(b)) apresenta uma conversão de uso para acomodar espaços habitacionais e comerciais. Neste projeto realizou-se uma intervenção de ampliação vertical na cobertura, com recurso a uma solução construtiva modular e leve (composta por madeira) inspirada nos carretéis de linha usados na tecelagem de seda (David Morley, 2008).

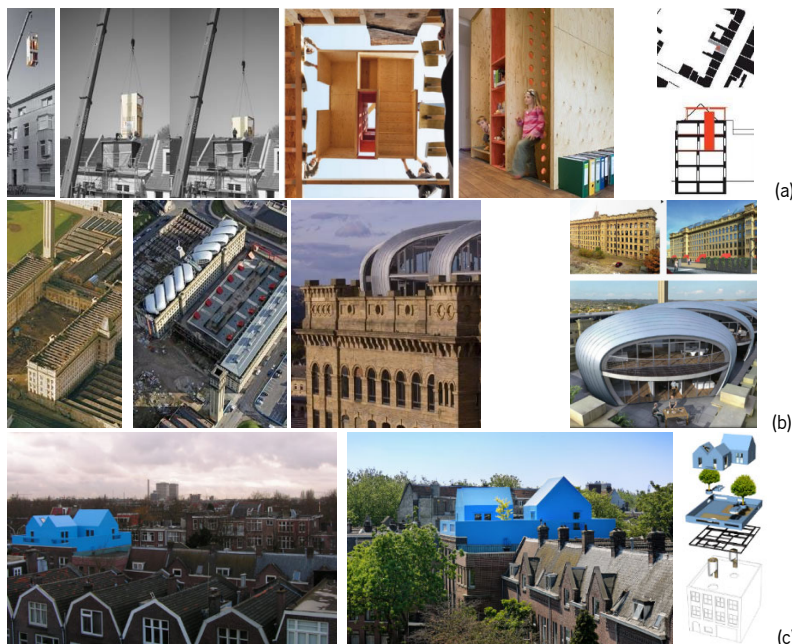


Figura 7.15. Exemplos contemporâneos de intervenções de reabilitação com ampliações verticais: (a) *Neo leo vertical living*, projetado por Luderwaldt Verhoff (2005, Alemanha); (b) *Lister Mills Bradford*, projetado por Urban Splash (2013, Reino Unido); (c) *Didden village*, projetado por MRDV (2006, Holanda).

De acordo com a visão dos arquitetos MVRDV sobre densificação (construída ao longo dos últimos 20 anos), estes conceberam, por exemplo, o projeto *Diden Vila* (Figura 7.15(c)), uma intervenção de ampliação vertical para um edifício antigo. No topo do edifício existente criaram-se quartos que correspondem a volumes separados com o intuito de oferecer privacidade a cada membro da família. O modo de distribuição dos volumes permite criar uma série de praças, uma alusão à imagem de uma aldeia, mas no topo de um edifício. Com este intuito adicionaram árvores, mesas, chuveiros ao ar livre e bancos, otimizando o estilo de vida no último piso. Através do revestimento em poliuretano azul criou-se um novo "céu" e uma coroa na parte superior do edifício. Esta ampliação pode ser vista como um protótipo de densificação da cidade existente – “Adição de uma “cobertura viva” para a cidade” (MRDV, 2016). Segundo os MRDV (2016), do ponto de vista económico, a solução construtiva leve adotada – composta por painéis de aglomerado de madeira revestidos a poliuretano - ficou mais económica do que uma construção nova.

#### 7.4. Tipologias de ampliação vertical em casos nacionais: antecedentes

Na descrição feita por Oliveira & Galhano (1959) sobre os *Telhados do Porto* é referido que, onde e quando possível, executavam-se variadas formas de “andares sobrepostos” (Figura 7.16) que “na sua imensa variedade ainda mais acentuam a irregularidade e diversidade estrutural das fachadas, que de resto coexistem sob diversos tipos no mesmo telhado, e que constituem uma nota profundamente característica da casa do Porto”. Nestes telhados, aparecem, como elemento fundamental, largos beirais salientes que prolongam a água frontal. Desde os finais do século XIX vulgariza-se o telhado de duas águas, no sentido frente-fundo, com as empenas por vezes muito elevadas. Nestas casas, o vão do telhado é sempre aproveitado para sótão, com empenas para os lados, como solução para adicionar mais um andar sem implicar o aumento da altura das paredes principais.



Pode dizer-se que, com raras exceções, todas as casas antigas do Porto apresentam, de uma maneira ou de outra, vários tipos de ampliação vertical, na maioria das vezes em tabique, que se enxertam no telhado com aproveitamento do vão (como as trapeiras), ou se elevam acima do telhado (como os mirantes) e os andares sobrepostos que podem ser recuados (cercados por um varandim), ou à face do prédio (Oliveira & Galhano, 2003). As trapeiras (Figura 7.16(b)) são pequenas construções de uma, duas e geralmente três águas; na maioria das vezes são muito pequenas, do tamanho apenas de uma janela, virada para a frente; mas também aparecem algumas com duas e mais janelas em várias faces, que se confundem com mirantes. Os mirantes (Figura 7.16(c)) são construções que se elevam acima do telhado, num setor qualquer da sua linha longitudinal, muitas vezes a meio, por vezes à frente ou atrás. Nas casas estreitas, geralmente ocupam toda a largura do edifício existente mas nas mais largas ficam isolados no meio do telhado. Os mirantes têm quase sempre janelas para vários lados, e um telhado pequeno de quatro águas, independente do telhado da casa.

Os andares sobrepostos (recuados, à face ou salientes) “(...) são andares que se vieram acrescentar ao prédio originalmente previsto, impondo-se à sua estrutura, e alterando-lhe mesmo a linha arquitetónica” (Oliveira & Galhano, 2003). De construção habitualmente “menos cuidada e mais pobre” do que o edifício preexistente, este tipo de ampliações verticais podem continuar a fachada frontal, configurando assim prédios de cantaria com um último andar de tabique, liso e tosco, com as molduras das janelas em madeira, acima da cornija, ou entablamento de granito do beiral original, ou ficarem recuadas desta.

Designa-se de andar sobreposto tipo *varandim*, quando o último andar do prédio fica recuado da fachada (para o qual abre uma ou mais portadas daquele andar) e esse recuo forma um varandim que constitui um remate estrutural que completa a linha do edifício (Figura 7.16(d)). Estes *varandins*, que podem ser descobertos ou cobertos (abertos ou envidraçados), têm, como guarda, uma grade de ferro corrida, ou uma platibanda ou balaustrada. Em prédios de esquina é frequente verem-se destes tipos de varandins, total ou parcialmente cobertos ou descobertos (Figura 7.16(d)). Os telhados dos *varandins* cobertos apresentam-se por vezes como um acréscimo à pendente frontal do telhado (Figura 7.16(d)). Em certos casos, estes *varandins* parecem constituir ampliações posteriores sobre o edifício existente (Oliveira & Galhano, 2003).



Figura 7.16. (a) Exemplo nacional de intervenções de ampliação vertical, cidade do Porto. (b) Exemplo de trapeira e (c) de mirante.

A propósito das soluções leves para a construção de ampliações verticais, Albino Belino (segundo Oliveira & Galhano, 2003) refere: “o progressivo aumento da população (em Braga e Guimarães) trouxe consigo a necessidade de se construir, sobre o primeiro andar de alvenaria, outro ou outros de tabique”. De facto, estes acréscimos de tabique constituem um género corrente nas construções do Minho, Douro e Trás-os-Montes. Nas construções mais antigas, estas ampliações de tabique ficam à vista, ou revestidas exteriormente de telhas postas a prumo; nas mais recentes incorporam lousas ou chapa metálica.

As três categorias fundamentais de ampliações – trapeiras, mirantes e andares sobrepostos – distinguem-se, não só sob o ponto de vista morfológico, mas também pela sua função específica: as trapeiras destinam-se a iluminar e altear principalmente um setor (ou mesmo a totalidade) de um sótão; o mirante consiste num compartimento construído acima do telhado para ampliação do edifício; os andares sobrepostos “(...) são mais um piso que a casa adquire, que pesa pouco, não exige grande resistência e é barato” (Oliveira & Galhano, 2003). Oliveira e Galhano (2003) referem também que, no Porto, o aproveitamento do vão do telhado se pode considerar de uso absolutamente corrente e normal, sendo extremamente raros os casos em que ele não tem lugar, e muito frequentes aqueles em que ele se faz na mesma casa, por mais do que uma forma.

#### 7.4.1. Trapeiras e mirantes

As trapeiras e mirantes constituem-se por janelas verticais projetadas total, ou parcialmente desde a pendente da cobertura existente e possuem telhado próprio. Uma vantagem destas soluções é que promovem o aumento

de área/pé direito útil necessários para ampliar a cobertura existente e convertê-la num compartimento útil. Existe uma grande variedade de trapeiras e mirantes (Figura 7.17). A seleção do tipo depende de vários fatores, como: área; constrangimentos regulamentares; inclinação da cobertura existente; morfologia da estrutura da cobertura existente; especificações funcionais; amplitude e qualidade da luz natural necessária.

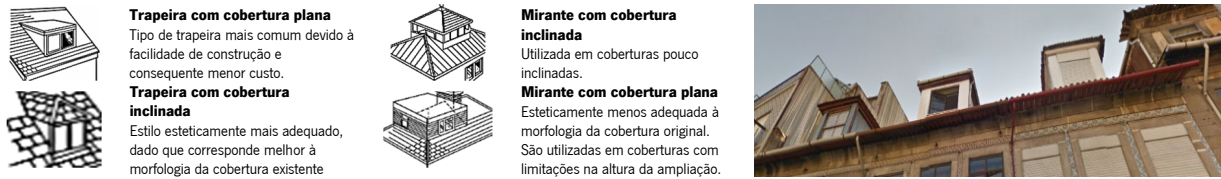


Figura 7.17. Edifícios com trapeiras, Porto. Tipos de trapeiras e mirantes (adaptado de Clark, 1989 apud Douglas, 2006).

#### 7.4.2. Andares recuados

A construção de andares recuados terá suscitado a supressão de parte da cobertura para a instalação de terraços, destinados a lazer (Figura 7.18 e Figura 7.19). Estas transformações impuseram a necessidade de alteração dos pisos, tornando-os impermeáveis nas zonas correspondentes aos pavimentos expostos entre a fachada e o recuado, ou seja o terraço. A construção dos terraços efetuava-se diretamente sobre o soalho existente (Figura 7.20, Pormenores P3 e P4) e só se tornou possível com o surgimento de membranas betuminosas, cuja aplicação nestes casos era obrigatória (Teixeira & Povoas, 2009). Adicionalmente, havia o cuidado de garantir uma pendente da superfície da fina camada de betonilha aplicada, destinada a facilitar o escoamento das águas pluviais junto à platibanda. Todos os remates de transições eram resolvidos através da aplicação de betumes. Tratando-se de soluções tecnicamente muito rudimentares, estes pavimentos exteriores constituem uma fonte de patologias, sendo por isso, frequentemente, sujeitos a intervenções de manutenção, seja para a substituição de membranas impermeabilizantes, ou reparação dos remates.

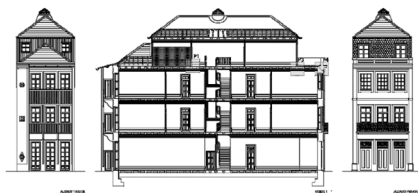


Figura 7.18. Modelo construtivo das casas burguesas do Porto – planta do piso recuado, corte longitudinal e alçados da rua e de tardoz (Teixeira & Povoas, 2009).



Figura 7.19. Exemplo de piso recuado em edifícios localizados na cidade do Porto.

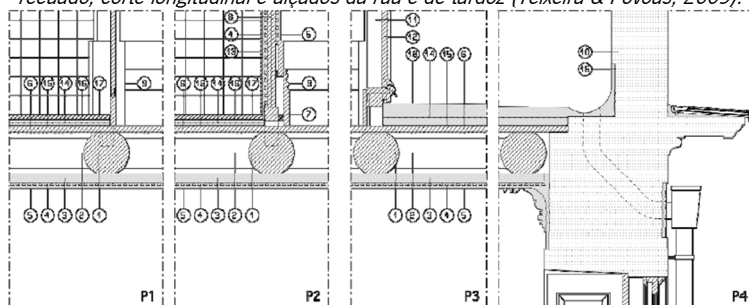


Figura 7.20. Modelo construtivo das casas burguesas do Porto – Pormenores tipo (Teixeira & Povoas, 2009).

Legenda:

- 1- Viga do sobrado; 2 – Tarugo; 3- Barrote; 4- Fasquio;
- 5- Reboco com acabamento estucado; 6 – Soalho;
- 7- Travessanho; 8- Duplo tabuado; 9- Rodapé;
- 10-Platibanda; 11- Pared exterior de tabique;
- 12- Caixilho exterior; 13-Azulejo; 14- Betonilha armada;
- 15- Membrana de impermeabilização (cartão asfáltico, tela betuminosa, polietileno); 16- Argamassa de assentamento; 17-mosaico hidráulico; 18- Acabamento afagado e queimado à colher.

#### 7.4.3. Andares de ressalto

Os edifícios com andares de ressalto (século XVI) foram sistematicamente modificados com a introdução de adaptações. O ressalto surge como recurso para obter mais espaço nos andares superiores. A presença deste tipo de habitação é ainda visível, por exemplo, na cidade de Guimarães (Figura 7.21(a) e 7.21(b)). Referindo-se aos andares de ressalto, Oliveira e Galhano (2003), citando Belino<sup>2</sup>, referem que “*Os beirais das casas da Rua do Souto (Braga) conservaram-se até meados do século findo (XIX) com uma saliência de tal ordem que as águas dos telhados, quando a chuva era abundante, batiam nas portas dos prédios fronteiros*”.

Na região do Douro também se encontram ampliações verticais de ressalto (Figura 7.21(b) e 7.21(c)). A leveza da construção em tabique, o prolongamento para o exterior dos barrote do soalho, uma ou outra escora

<sup>2</sup> “Habitação Urbana, Braga e Guimarães”, *Portugália*, 1, págs. 613-618.

metálica permitiram a realização de intervenções de ampliação vertical. O andar de ressalto era normalmente sustentado nos próprios caibros do soalho (Figura 7.21(d)), em cachorros, ou em socos de pedra (para ressaltos mais salientes). Nestas casas, a pedra só era aplicada nas fundações e no rés-do-chão. Os primeiros andares, em ressalto, eram construídos utilizando a técnica de rodízio, com enchimento de tijolo ou palha e barro entre barrotes.

No caso dos territórios de ilhas, devido à limitada disponibilidade de recursos e de solo para construção de edifícios, este tema torna-se particularmente relevante. Conforme referido na secção 7.2.2., verifica-se uma elevada predominância de obras de ampliação nos territórios de ilhas nacionais. Segundo Vitor Mestre (1997) as ampliações na Região Autónoma da Madeira não revelam uma abordagem, ou preocupação global com o faseamento; a integração da unidade ampliada apenas constitui uma resposta exclusivamente funcional às necessidades desse momento. Daí que seja comum surgirem anexos, por vezes mais destacados e de maior dimensão que a construção existente. Segundo Mestre (1997), as características dominantes das obras de ampliação são as seguintes: (1) apresentam solução construtiva com recurso à laje/terraço; (2) apresentam estrutura de betão (pilar-viga-laje) e paredes em blocos de cimento; (3) depois de rebocadas permanecem anos por pintar e possuem um espaço de terraço com acesso através de escada exterior, varandim metálico ou balaustres em cimento (Figura 7.22).

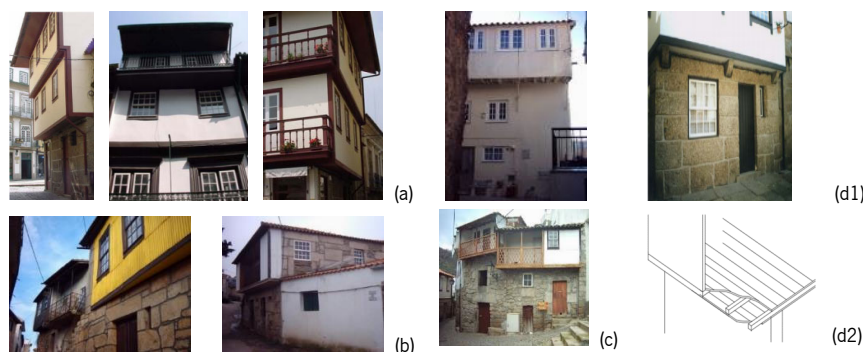


Figura 7.21. Edifícios com andares de ressalto: (a) na Rua Gravador Molarinho, Guimarães; na região do Douro - (b) Santa Cruz, Armamar e (c) Granja do Têdo, Tabuaço; (d) exemplos de apoio do ressalto: (d1) cachorros (d2) Caibros de soalho (Martins, 2000).



Figura 7.22. Exemplos de ampliação vertical e horizontal (da esquerda para a direita) na ilha da Madeira.

## 7.5. Caso de estudo: ampliação vertical sobre edifício antigo

Com o intuito de realizar o exercício projetual para conceber uma ampliação vertical constituída por uma solução construtiva que integre membranas arquitetónicas e proceder a uma análise comparativa com soluções construtivas convencionalmente utilizadas, selecionou-se um caso de estudo que corresponde a um edifício antigo, localizado na cidade do Porto. No caso das intervenções de reabilitação com ampliação vertical, as implicações construtivas e estruturais podem ser maiores do que noutros tipos de reabilitação e existem situações, decorrentes da natureza construtiva do edifício existente, em que a questão do peso é fundamental para o sucesso da ampliação. Quando os custos e o peso da solução construtiva para realizar uma ampliação vertical sejam fatores inibidores para proprietários, projetistas, investidores e diferentes partes envolvidas, devem ser estudadas soluções alternativas, propósito deste estudo.

### 7.5.1. Caracterização do edifício

O edifício adotado como caso de estudo foi construído no século XIX e possui uso habitacional nas frações do rés-do-chão, 1º, 2º e 3ºpisos (sendo este recuado). Localiza-se no cruzamento entre duas ruas (Figura 7.23): a fachada principal encontra-se voltada para a Rua do Pinheiro e a fachada lateral para a Rua dos Mártires da Liberdade, na cidade do Porto, ruas que apresentam largura variável entre 4 a 5m.

Este edifício apresenta um sistema construtivo e características idênticas às da grande maioria das casas construídas na cidade do Porto no século XIX destinadas a uso misto (habitacional e comercial), estando confinado por edifícios com características análogas. Na Tabela 7.6 e Figura 7.24 apresentam-se sumariamente os aspetos arquitetónicos associados ao edifício.



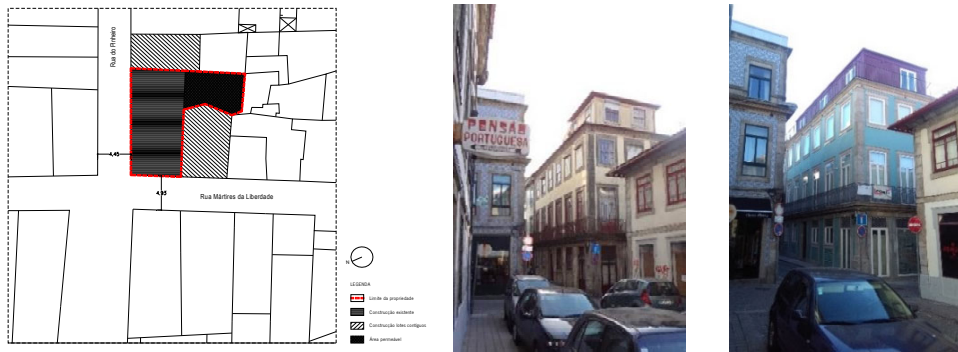


Figura 7.23. Planta de implantação da autoria, e gentilmente cedida, pelo gabinete de arquitetura Anarchlab (2017); foto do edifício no cruzamento das duas ruas (antes e após a intervenção).

Tabela 7.6. Aspetos arquitetónicos associados ao edifício existente.

Informação sobre o edifício existente			
Localização:	Porto, Portugal	Idade (anos):	+ de 100
Nº de pisos acima da cota de soleira:	4	Cércea: Fachada principal	11.00m
Nº de frações comerciais:	1	Piso recuado	14.50m
Área do lote de terreno [AT]:	150m <sup>2</sup>	Número de frações habitacionais:	1
Área construída [AC]:	367m <sup>2</sup>	Pé direito:	3,00-3,50m
Profundidade:	15m	Área de implantação [AI]:	109m <sup>2</sup>
		Largura:	6m
Informação sobre o planeamento urbano municipal			
Uso dominante:	Habitacional (permitido outro uso desde que compatível com o habitacional)	Nº de pisos permitido:	5
Património classificado:	Não	Altura permitida (cércea dominante):	15m
Características do local			
Contexto:	Área de frente urbana contínua consolidada	Distância ao centro urbano:	3km
Largura das ruas adjacentes:	4.50 a 5.00 m	Largura do passeio:	1m
Altura do edifício adjacente à esquerda:	15m	Altura do edifício adjacente à direita:	14.50m



Figura 7.24. Foto do piso recuado, plantas e cortes do edifício em estudo no seu estado original, da autoria, e gentilmente cedidos, pelo gabinete de arquitetura Anarchlab (2017).

### 7.5.2. Aspetos construtivos

O edifício em estudo apresenta: fachadas em granito, a norte (alçado principal) e a poente (alçado lateral), revestidas com reboco de saibro e cal; paredes de meação (a sul e nascente, consideradas parcialmente adiabáticas) de folha simples em granito; estrutura e pavimentos em madeira; caixilharias em madeira, com

vidro simples (3mm); paredes divisórias em tabique<sup>3</sup> e tetos de gesso. Ambas as fachadas, norte e poente, possuem janelas e portas operáveis, portadas interiores de madeira e varandim no 1º piso. A cobertura possui quatro pendentes e estrutura em madeira coberta com telhas cerâmicas. A laje de piso que servirá de base para a ampliação vertical é composta por vigamentos e soalho de madeira. Segundo informação disponibilizada por Anarchlab (2017), nos últimos 10 anos, o edifício sofreu um grande processo de degradação; a falta de manutenção provocou a entrada de água para o interior do edifício, causando a deterioração da estrutura de madeira do andar superior e da cobertura.

• **Caracterização dos elementos estruturais do edifício principal em alvenaria**

Descreve-se de forma sucinta e pontuada as características construtivas do edifício em estudo, que são as mesmas das edificações antigas tradicionais construídas entre o século XVII e XIX em Portugal, em especial na cidade do Porto, nomeadamente pelo uso de elementos portantes de alvenaria de pedra e madeira (Figura 7.25). Os elementos estruturais primários e secundários são os seguintes:

- a) Fundações: diretas através da simples continuação das próprias paredes mestras até ao terreno, com largura igual ou ligeiramente superior.
- b) Paredes-mestras/exteriores/meação: em alvenaria de pedra de granito com argamassa de cal, areia e saibro e largura entre os 30 e os 70 cm (60cm no caso das paredes de meação, ou seja, comuns ao edifício em estudo e aos edifícios a ele adjacentes). As paredes de pedra partem das fundações onde estão assentes e seguem até à cobertura. Trata-se de um material sem resistência significativa à tração, mas com boa resistência à compressão e alguma resistência a esforços de corte; a força de compressão, quando não exagerada, opera como força equilibrante de forças horizontais no plano e fora do plano das paredes (p.e. impulsos de terra, sismos, choques acidentais, etc.).
- c) Pavimentos: o pavimento térreo apresenta uma área em terra batida e outra em enrocamento de pedra com camada de revestimento de desgaste em lajedo de pedra; os pavimentos dos pisos elevados apresentam vigamento em madeira com soalho e tetos estucados. Os sobrados são compostos por vigamentos principais, dispostos paralelamente entre si, com afastamentos que em geral variam, em média, entre os 30 e os 60 cm, dependendo dos vãos e das espessuras das vigas (Figura 7.26). No presente caso, os pavimentos apoiam-se nas paredes sobre a Rua do Pinheiro e na parede correspondente paralela.
- d) Cobertura: apresenta quatro águas, estrutura em madeira e revestimento exterior com telha cerâmica; as asnas de cobertura apoiam diretamente nas quatro paredes portantes do contorno do edifício. Tradicionalmente, segundo Teixeira (2004), as características mecânicas das ligações de apoio são asseguradas pelo uso de peças metálicas aparafusadas à linha da asna e chumbadas na parede.
- e) Escadas: em pedra no piso 0 e em madeira nos restantes pisos.
- f) Paredes interiores/paredes de caixa de escadas: em tabique, ou seja, com pregagem de um fasquiado sobre as tábuas colocadas ao alto (nas mais espessas, sobrepostas com um tabuado inclinado); posteriormente todo este conjunto é emboçado e regularizado com argamassa de cal, areia e saibro, com acabamento a estuque, caiado ou pintado posteriormente. Têm um papel relevante no travamento global das estruturas, é através destes elementos que é feita a ligação interior entre paredes, pavimentos e coberturas.



Figura 7.25. Maqueta de uma casa antiga do Porto. Pormenor dos lancis da parede da fachada, da estrutura das paredes de tabique do piso ampliado (integralmente em madeira) e da cobertura. (Teixeira, 2004).

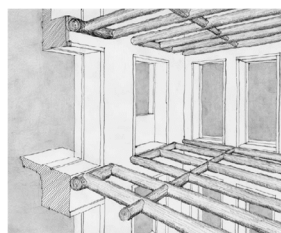
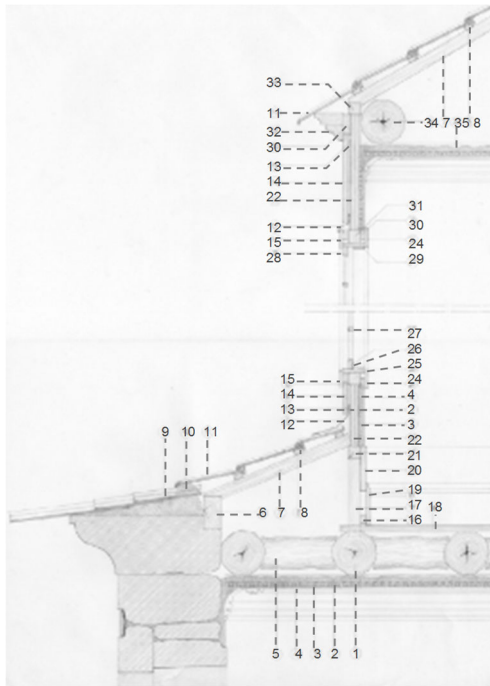


Figura 7.26. Pormenor tipo da estrutura dos sobrados de uma casa com três frentes. Neste exemplo, o apoio das vigas principais do sobrado em frente a cada abertura é feito através de cadeias, assentes nas vigas, as quais se apoiam nos panos de parede sem aberturas (Teixeira, 2004).

• **Caracterização dos elementos estruturais do piso recuado – solução construtiva tradicional de referência**

<sup>3</sup> Constitui "(...) uma técnica de construção anterior ao século XVII, com largas raízes ou manifestações provinciais, mas que, certamente por constituir um processo barato e fácil, continuou a utilizar-se revestido de telhas, lousas ou chapa, para acréscimos, trapeiras e outras formas de andares suplementares, (...) "(Oliveira & Galhano, 2003).

O edifício apresenta um piso recuado em relação ao alinhamento das fachadas em alvenaria de pedra (resultado de uma possível intervenção de ampliação vertical para aproveitamento do desvão do telhado inclinado existente) (Figura 7.24). Possui cobertura em estrutura de madeira revestida a telha cerâmica; as paredes exteriores são de tabique, solução construtiva leve, com revestimento a chapa zincada ondulada fixa a um ripado; as paredes interiores também são em tabique, mas com acabamento a estuque. Por questões arquitetônicas, as ampliações verticais podiam ser recuadas e isso requeria soluções construtivas leves (como a adotada no presente caso), que não se apoiam diretamente nas paredes estruturais de contorno do edifício, mas em vigas de madeira (ver Figura 7.27). A Figura 7.28 mostra a estrutura da parede exterior de tabique simples e a solução tipicamente adotada para resolver a cobertura entre esta parede e os beirados.



Legenda:

1- Viga (pau rolado) da estrutura do sobrado; 2- Argamassa de saibro; 3- Fasquio; 4- Estuque; 5- Tarugo; 6- Contrafrechal; 7- Vara; 8- Ripa; 9- Telha vã; 10- Argamassa de assentamento; 11- Telha Marselha; 12- Rufo em chapa de zinco; 13- Ripa de fixação da chapa ondulada; 14- Chapa ondulada; 15- Guarnição (mata juntas) exterior; 16- Ripa de fixação do rodapé; 17- Prumo; 18- Soalho; 19- Tábua inferior do rodapé; 20- Tábua superior do rodapé; 21- Travessanho; 22- Duplo tabuado; 24- Guarnição (mata juntas) interior; 25- Tábua de peito; 26- Travessa inferior do caixilho da janela; 27- Pinázio; 28- Travessa superior do caixilho da janela; 29- Aro do caixilho da janela; 30- Calço; 31- Verga; 32- Cimilha em madeira; 33- Frechal; 34- Barrote para apoio dos fasquios do teto.

Figura 7.27. Pormenor de uma parede exterior do piso recuado em tabique simples reforçado (adaptado de Teixeira (2004)).

## 7.6. Soluções leves convencionais para ampliações verticais

Em qualquer projeto onde seja necessário realizar uma ampliação vertical, sobretudo nos casos em que por razões arquitetônicas é necessário desalinhá-la da parede estrutural de fachada, é muito importante concebê-la com estruturas ligeiras e, neste caso, torna-se particularmente importante devido às características estruturais/construtivas do edifício em questão. Em síntese, a necessidade de adicionar pisos leves acontece, não apenas mas sobretudo, quando os novos pisos estão desalinhados das paredes exteriores.

### 7.6.1. Conceção de ampliações verticais

Segundo alguns autores, como Douglas (2006), LCT (2012), Bergsten (2005), a conceção de intervenções de ampliação deve considerar os seguintes aspetos:

- Económicos: custos de adaptação; custos de manutenção; impacto sobre o valor do imóvel e rentabilidade;
- Tempo: duração da intervenção; estratégia de faseamento das operações;
- Construtivos: verificação do estado de conservação dos elementos construtivos do edifício existente, incluindo fundações; condições de acesso ao local da obra; correta integração da parte ampliada no edifício existente, optando por soluções de conexão que permitam a desconstrução da parte ampliada;
- Proteção: durante a construção de ampliações verticais, algumas partes do edifício existente ficarão expostas e, por conseguinte, vulneráveis às condições climáticas. Por isso, deve prever-se a proteção temporária do edifício para controlo da humidade. Drenagem e estanquidade das águas pluviais, requisitos essenciais para reduzir o risco de problemas associados à humidade durante a construção e, posteriormente, na fase de utilização do edifício;
- Perturbação: minimização de ruídos e de libertação de resíduos decorrentes das operações de ampliação; gestão de resíduos; realojamento dos ocupantes no caso da reabilitação de edifícios ocupados.

Por outro lado, as implicações estruturais deste tipo de intervenções são inevitáveis. Para evitar problemas, tais como deformação excessiva, ou mesmo colapso, deve considerar-se o reforço dos principais elementos estruturais afetados pelo aumento de carga resultante da adição de pisos. Deste modo, Douglas (2006) enunciou alguns dos aspetos a considerar na fase de conceção: (1) avaliação das características resistentes da cobertura que irá receber a nova estrutura; (2) realização de um levantamento detalhado da cobertura existente para definição dos pormenores de ligação aos elementos estruturais existentes; (3) no caso de um edifício com cobertura inclinada, pode ser necessário considerar a remoção da cobertura existente; (4) deve assegurar-se a estanquidade das ligações entre qualquer novo elemento e o substrato existente; (5) devem ser tomados cuidados para evitar aumentos de cargas localizadas na estrutura que possam provocar assentamentos diferenciais. Estes assentamentos podem ocorrer, segundo Douglas (2006) particularmente nos seguintes casos: fundações com diferentes níveis; construção de novas fundações para a parte ampliada, próxima de fundações existentes; adição de pisos extra apenas numa parte do edifício existente; realização de trabalhos de drenagem de águas para baixar o nível freático. A par dos referidos aspetos, as soluções construtivas a adotar deverão procurar cumprir as premissas da reabilitação de edifícios, nomeadamente: a baixa intrusividade, a reversibilidade, a compatibilidade, a inspeccionabilidade e a durabilidade.

Apresentam-se de seguida as soluções convencionais leves de referência (SCMad e SCMet) que serão comparadas com as soluções alternativas propostas em membrana (SAMb, SAMv1, SAMv2 e SAMv3 – apresentadas no ponto 7.7.2.

#### 7.6.2. Solução convencional leve em madeira (SCMad)

O edifício tomado como caso de estudo foi reabilitado e contemplou a execução de uma ampliação vertical com solução construtiva em madeira, doravante designada por *SCMad*. O projeto de arquitetura foi concebido pelo gabinete de arquitetura Anarchlab (2017) que forneceu informação acerca do edifício existente e da ampliação vertical realizada com esta solução construtiva (Figura 7.28). A laje de piso que serviu de base para a ampliação vertical era composta por vigamentos e soalho de madeira. Contudo, devido ao estado de conservação dos mesmos e às características da ampliação com solução construtiva em madeira, foi necessário demolir a laje de piso existente e substituir por uma nova com vigas de madeira lamelada e pavimento em painéis OSB.



Figura 7.28. Plantas e cortes do projeto de reabilitação, com ampliação vertical em madeira, da autoria de Anarchlab (2015) (desenhos gentilmente cedidos por Anarchlab).

#### • Esquema estrutural/medidas de reforço

O edifício existente apresentava elementos danificados na cobertura e no piso 1 e 2, pelo que a concretização do projeto de estruturas para a reabilitação do edifício (Figura 7.29) envolveu as seguintes ações:

- a) Conservar: paredes exteriores existentes em alvenaria de pedra; pavimentos no piso 1; escadas do piso 0 e piso 1; paredes de caixa de escada em tabique no piso 0 e piso 1 (Figura 7.30);



- b) Reforçar: pavimento do piso 1 e do piso 2 com colocação de vigas de madeira intercaladas entre as existentes (Figura 7.30);
- c) Demolir: escadas e paredes de tabique do piso 2; cobertura, estrutura e pavimento do piso recuado existente que se encontrava danificado e não apresentava características arquitetônicas adequadas para as necessidades dos novos utilizadores;
- d) Construir: piso recuado com viga de coroamento em betão armado e vigamentos em madeira lamelada com secção de 12 x 26cm e altura de 45cm no pavimento; paredes de frontal em madeira e com isolamento térmico, revestidas pelo exterior a chapa metálica lacada e ondulada e painel OSB, e gesso cartonado pelo interior; e cobertura com estrutura em madeira, isolamento térmico, forro em painel OSB, quatro águas e revestimento exterior com telhas cerâmicas e uma escada metálica interior que dá acesso do piso 2 ao piso recuado.

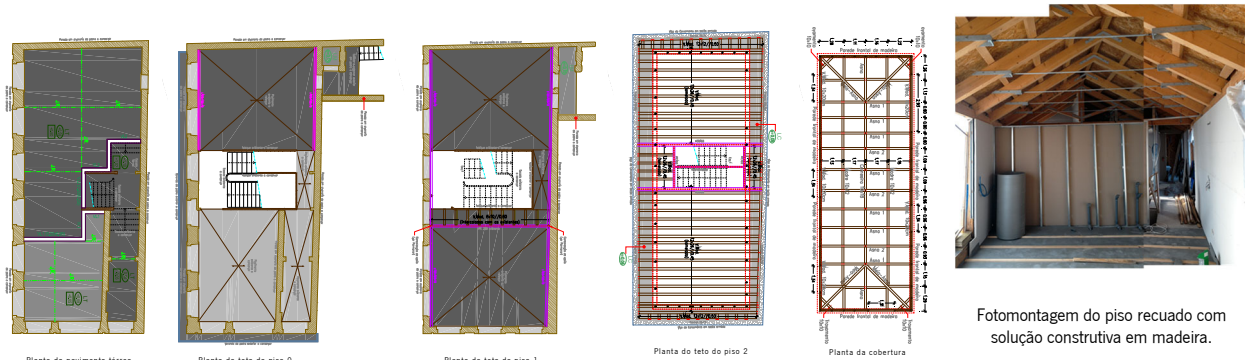


Figura 7.29. Esquema estrutural do projeto de reabilitação do edifício com solução em madeira para a ampliação vertical, projetado pelo Engenheiro civil Jerónimo Botelho (fontes: foto da autora e desenhos gentilmente cedidos por Anarchlab (2017)).



Figura 7.30. Fotos dos elementos a manter, reforçar e construir (créditos: autora).

A vantagem de utilizar madeira neste sistema construtivo centra-se nas características deste material como: leveza; baixo impacto ambiental; facilidade de transformação e ausência de toxicidade. Atualmente a madeira é trabalhada com métodos industriais para: proteção contra insetos e fungos; serragem, colagem, formação de peças, realização de encaixes e entalhes; adição de outros materiais e instalações, proteção ao fogo, etc., com

precisão construtiva e níveis de acabamentos de alta qualidade que oferecem rapidez de montagem e durabilidade, graças também ao desenvolvimento de técnicas de *design*, produção e prática construtiva.

### 7.6.3. Solução convencional leve com estrutura metálica (**SCMet**)

Outra solução leve convencional de referencia para este estudo, distingue-se da solução SCMad por apresentar estrutura metálica leve e, doravante, será designada por *SCMet*. O estudo realizado por Bergsten (2005) refere que o sistema de perfis de aço galvanizado (em inglês: Light Steel Framing - LSF) (Figura 7.31) constitui uma alternativa custo-eficiente para edifícios com pisos múltiplos. O principal componente estrutural deste sistema é o perfil de aço galvanizado moldado a frio. Os edifícios construídos com este sistema, devido ao seu reduzido peso quando comparado com o de edifícios construídos com sistemas tradicionais, têm sido reconhecidos como adequados para ampliações verticais de edifícios existentes (Tomá, 1999; Bergsten, 2005). Outra característica importante, à semelhança do que foi mencionado na solução construtiva com madeira, é o método de produção industrializado associado a esta solução. A conceção e produção de perfis de aço galvanizado a frio recorre à pré engenharia para a montagem de elementos em fábrica, com tolerâncias mínimas e montagem simples dos elementos no local da obra (Maccarthy, 1998; Grogolwski *et al.*, 2001 *apud* Bergsten, 2005).

A adição de pisos sobre edifícios existentes tem sido amplamente realizada usando estruturas de aço; o sistema tem sido testado e adequa-se à construção de edifícios até cinco pisos (Uwimana, 2011). A investigação e a experiencia de aplicação confirmaram os seguintes benefícios da utilização deste sistema em edifícios: leveza; bom desempenho estrutural; facilidade e rapidez de construção e desconstrução; permite associar-se à prefabricação; permite a reutilização e reciclagem do material; envolve processo de construção a seco (Burstrand, 2000; Bergsten, 2005); tem bom desempenho à vibração (Song Feng *et al.* 2002 *apud* Uwimana, 2011).



Figura 7.31. Exemplos de ampliação vertical envolvendo uma estrutura em LSF sobre edifício existente.

## 7.7. Soluções alternativas em membrana para ampliações verticais

### 7.7.1. Enquadramento geral sobre aspetos estruturais e funcionais

No capítulo 4 foram identificados projetos de reabilitação com recurso a membranas arquitetónicas. Verificou-se que, entre as 70 obras identificadas, 49% correspondem a intervenções de ampliação (Figura 7.32). Destas, 48% correspondem a ampliações externas (onde se incluem as ampliações verticais) (Figura 7.33). Nas Figuras 7.34 e 7.35 identificam-se alguns exemplos de reabilitação com ampliações verticais executadas com membranas arquitetónicas. No exemplo da Figura 7.34(a), observa-se que a ampliação vertical executada com um piso recuado com cobertura em membrana, apesar da coloração branca, distinta das demais coberturas, acaba por se camuflar ao nível da rua e fachada principal. Para além permitir acolher vários programas (residenciais, de serviços, etc.), as ampliações verticais também podem assumir funções de proteção temporária, como sucede no exemplo da Figura 7.34(c).

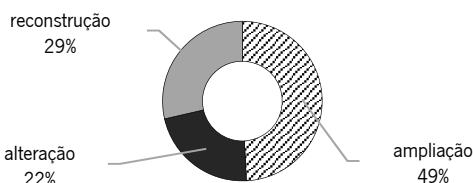


Figura 7.32. Tipos de intervenções nos projetos em análise, reabilitados com membranas.

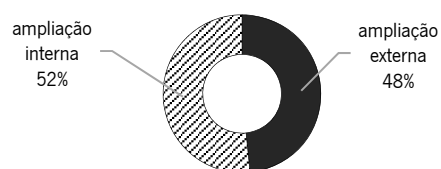


Figura 7.33. Tipo de ampliação verificada nos projetos em análise, reabilitados com membranas.

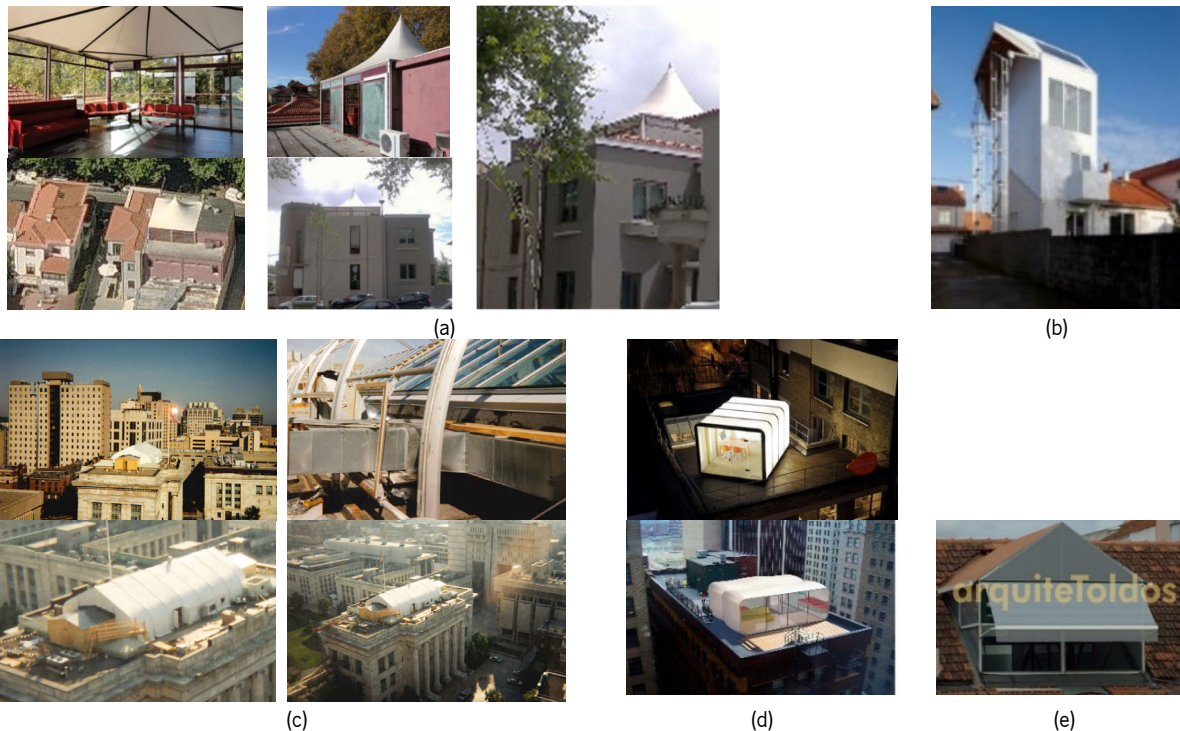


Figura 7.34. Ampliações verticais com membranas: (a) piso recuado com cobertura em membrana (Portugal); (b) Shishiodoshi house - dois pisos sobrepostos ao edifício original com revestimento da envolvente exterior em membrana (França); (c) substituição total de uma claraboia sob a proteção de uma estrutura com membrana para assegurar a proteção do interior deste edifício histórico (Sprung, 2017); (d) escritório da empresa Airclad com módulo prefabricado e pneumático (Airclad, 2016); (e) mirante com estrutura metálica e revestimento em membrana (© arquitetoldos).

Quando não é possível dispor de grandes e pesados elementos estruturais (por existirem limitações nos acessos para elevar cargas), para se executarem ampliações verticais, é necessário equacionar soluções construtivas em que os seus elementos não ultrapassem determinadas dimensões e peso. Nestes cenários, a soluções construtivas com elementos pneumáticos em membrana apresenta aptidões ímpares, relativamente às solução construtiva convencional; só é necessário desenrolá-la, insuflá-la, e ela ergue-se por si só. No caso da intervenção apresentada na Figura 7.35(a), existia uma limitação: não era possível utilizar elementos construtivos com mais de 6 metros de altura, por isso, uma estrutura convencional de tendas (com vigas de alumínio) estava fora de questão; a solução com vigas insufladas de membrana (com uma pressão de 1.24 bar), fácil de transportar e de instalar, sem a necessidade de ocupar vias com guindastes, constitui a solução adotada. Em caso de tempestades, esta última solução é mais segura do que a estrutura metálica; as vigas pneumáticas apenas curvam e voltam à forma inicial.

Este tipo de ampliação vertical incorpora uma tecnologia originalmente desenvolvida para aplicações militares (Figura 7.35(b)): vigas pneumáticas em membrana<sup>4</sup>, designadas por *Airbeams*<sup>5</sup>, resistentes e ao mesmo tempo muito leves. A intervenção no edifício Carnegie Hall (Figura 7.35(a)) representa a primeira aplicação da tecnologia de vigas pneumáticas (com 23m de comprimento) de alta pressão (Benson, 2015) em construções civis, exigindo uma grande coordenação entre diversos aspetos arquitetónicos, de resistência ao vento, segurança dos ocupantes, fundações, etc. (Wright, 2017).

<sup>4</sup> Sem costura e em poliéster de elevada densidade estável, denominado por DPS (Density-Stable Polyester) revestido com uretano.

<sup>5</sup> Consiste numa tecnologia de vigas pneumáticas, em arco e com alta pressão (Benson, 2015), armazenadas em embalagens pequenas e leves. A sua instalação requer menos mão de obra e tempo do que as vigas metálicas (Benson, 2015). O Centro de engenharia, investigação e desenvolvimento militar da Natick (NSRDEC) e a empresa Federal-Fabrics-Fibers são pioneiros no desenvolvimento desta tecnologia. Esta tecnologia veio resolver o problema que atormentou o setor militar durante anos: encontrar a tecnologia certa para evitar que as estruturas insufladas entrassem em colapso. Nos anos 60 era necessário utilizar equipamentos que fornecessem ar constante para manter a pressão nestas estruturas. Nos anos 80 utilizou-se a tecnologia de soldagem a quente nas costuras da membrana das vigas, mas estas não resistiam a climas com temperaturas elevadas. Com a tecnologia Airbeam, as costuras da membrana são eliminadas e aguentam pressões mais elevadas (Benson, 2015).



A combinação de vigas pneumáticas e uma envolvente exterior em membrana resulta numa construção ultra leve e ampla (com aprox. 16m x 28m e 9m de altura), que se pode colocar no topo de um edifício antigo sem sobrecarregar a estrutura, como se exemplifica na Figura 7.35(a). A ampliação vertical referida cobre toda a cobertura sem danificar os elementos perimetrais e as claraboias do edifício intervencionado (classificado como património). A ancoragem da ampliação vertical foi feita com placas de aço permanentemente conectadas à estrutura da cobertura do edifício intervencionado. Este tipo de ampliação é reversível; quando não é necessária pode ser desinsuflada e armazenada; os pontos de ancoragem são escondidos por tampas acessíveis, montadas e niveladas pelo pavimento de madeira existente na cobertura.

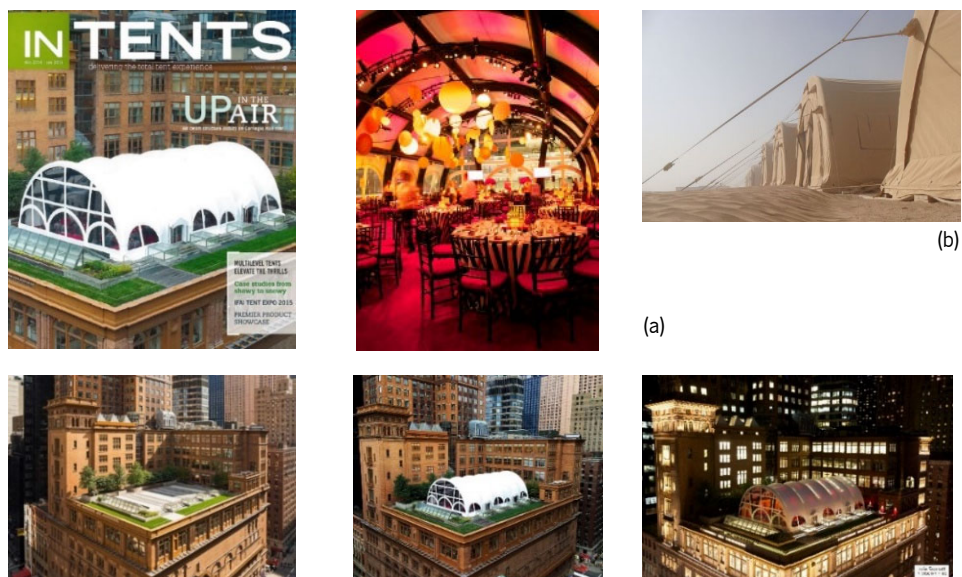


Figura 7.35. (a) Vista exterior e interior de ampliação vertical temporária em membrana, instalada na cobertura de um edifício antigo, Carnegie Hall, em Nova Iorque (Wright, 2017) e (b) abrigos militares com vigas pneumáticas em membrana (Federal Fabrics, 2017).

Relativamente aos aspetos funcionais, para garantir isolamento térmico e acústico é necessária massa. No entanto, as construções leves são sistemas que, por definição, têm massa reduzida. Em relação ao conforto térmico, para uma conceção eficiente deve considerar-se a utilização de sistemas passivos para arrefecimento e aquecimento, por exemplo através da ventilação natural; utilização de massa térmica não convencional (com materiais com mudança de fase) e regulação da humidade no ar. O edifício experimental Mème (Figura 7.36) mostra que é possível combinar uma estrutura convencional em madeira com um revestimento exterior e interior totalmente em membrana, com inclusão de material isolante entre estas.

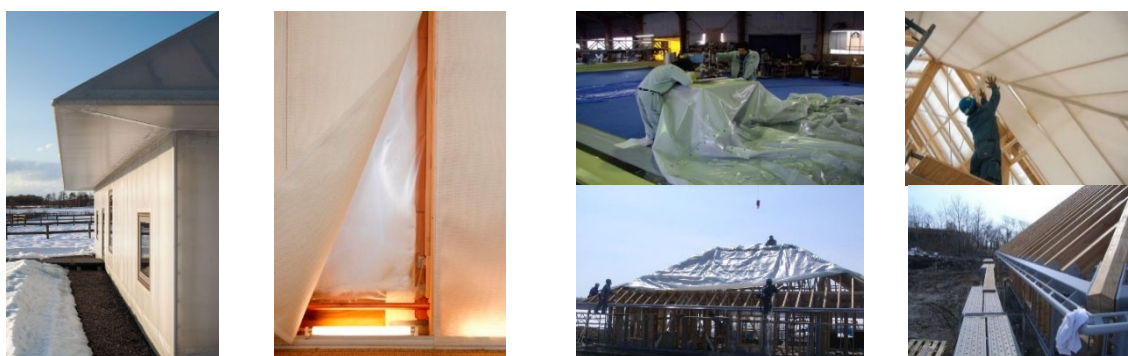


Figura 7.36. Edifício experimental Mème House, concebido pelo arquiteto Kengo Kuma em 2013 (Archello, 2018). A superfície em membrana é produzida em estaleiro e instalada de forma rápida em obra, com recurso a meios de elevação mecânicos.

### 7.7.2. Proposta – solução alternativa com membrana (SAM)

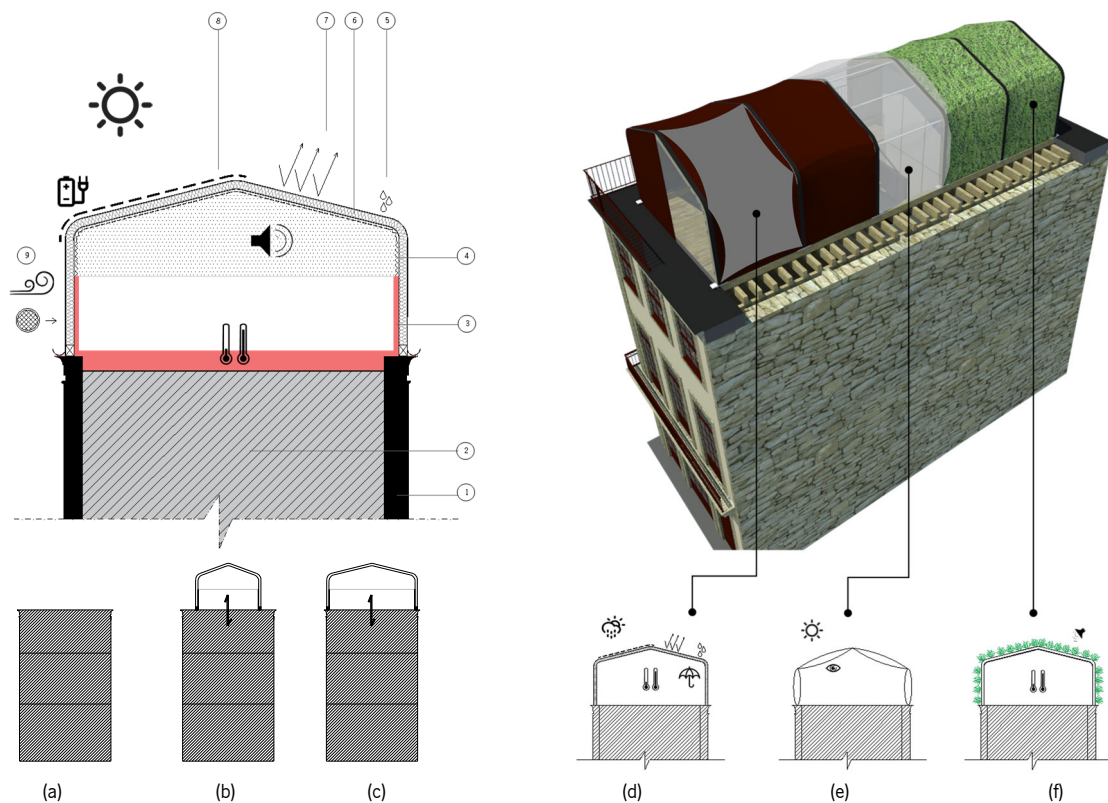
O presente estudo centra-se na conceção de uma solução alternativa às soluções leves convencionais anteriormente identificadas (SCMat e SCMet) – com recurso à integração de membranas arquitetónicas no seu sistema construtivo (SAM base – SAMb - e as suas variantes - SAMv1, SAMv2 e SAMv3).

• **Conceito**

A conceção da solução proposta - SAM (Figura 7.37) parte do princípio que a ampliação vertical e o edifício existente servem a mesma função e por isso, no que toca ao desempenho funcional da nova estrutura, a ampliação vertical deve tirar partido da massa térmica existente no edifício base (Figura 7.37(b) e (c)). Tratando-se a SAM de uma solução construtiva leve, a sua massa térmica é reduzida, propondo-se variantes (SAMv1, SAMv2 e SAMv3) para que esta seja incrementada através de materiais com mudança de fase e tirando partido da existência da massa térmica forte do edifício base. Por outro lado, propõe-se (Figura 7.37(d)) na SAM de modo a que esta possa gerar energia.

Propõe-se uma solução construtiva modular e prefabricada. Cada módulo pode assumir um papel funcional diferenciado, de acordo com os requisitos funcionais do espaço arquitetónico: luminosidade (Figura 7.37(e)), acondicionamento acústico, regulação térmica (Figura 7.37(d) e (f)).e geração de energia (a inclusão de soluções fotovoltaicas flexíveis Figura 7.37(d)).

A combinação de uma membrana com revestimento de baixa emissividade e auto lavável, com material isolante térmico/acústico e a utilização de dispositivos de proteção solar constitui a solução construtiva proposta para alcançar conforto térmico e acústico. Atualmente, existem no mercado revestimentos específicos que asseguram baixa emissividade<sup>6</sup> em membranas, de modo a regular os ganhos térmicos associados à radiação visível (BINE, 2009). O aeroporto de Banguécoque constitui um caso de sucesso de aplicação deste tipo de membrana, com uma cobertura com 3 camadas de membrana com baixa emissividade (de 0,4<sup>7</sup> em cor prata) para reduzir a radiação térmica indesejada.



Legenda:

- (1) Edifício existente (paredes exteriores em alvenaria de granito);
- (2) Inércia térmica existente (forte);
- (3) Regulação térmica: adoção de materiais leves e com mudança de fase para aumentar a inércia térmica da solução proposta;
- (4) Revestimento interior: membrana microporada e membrana textil tridimensional para condicionamento acústico;
- (5) Proteção contra variações climáticas: membrana exterior com propriedades de autolimpeza e impermeabilização;
- (6) Solução de envolvente exterior com dupla membrana e material de isolamento térmico;
- (7) Membrana com propriedades de proteção da radiação UV;

<sup>6</sup> Refere-se à condição de uma superfície em emitir níveis baixos de energia térmica radiante (calor).

<sup>7</sup> A emissividade ( $\epsilon$ ) de um material varia de 0 a 1. A emissividade de um material diz respeito à capacidade de emissão de energia por radiação da sua superfície. Quanto maior o valor de  $\epsilon$  de um material, maior a sua capacidade de emissão de energia.

- (8) Captação de energia solar: membrana com painéis fotovoltaicos flexíveis integrados;
- (9) Ventilação.

Estratégias:

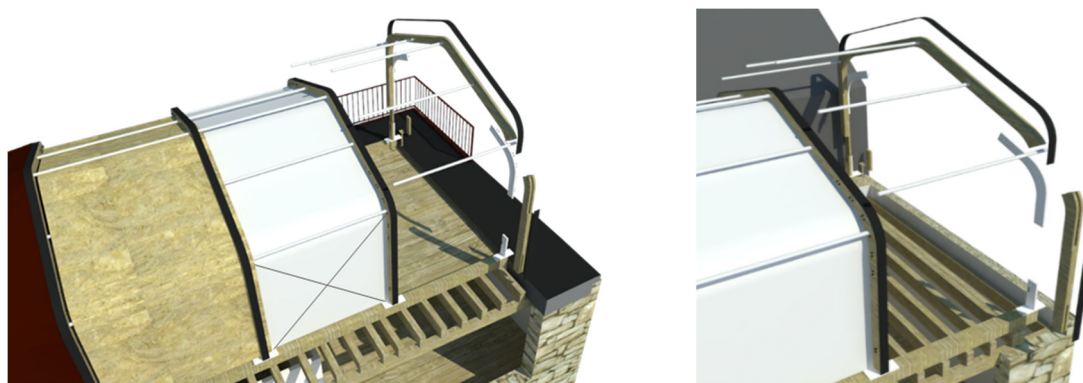
- (a) Aproveitamento da massa térmica do edifício existente;
- (b) Redução de peso para executar ampliações verticais recuadas do alinhamento exterior do edifício existente;
- (c) Ampliação vertical pelo alinhamento exterior do edifício existente (c) – solução proposta - aproveitamento máximo da massa térmica existente;
- (d) Proteção contra as variações climáticas e geração de energia através da integração de elementos fotovoltaicos flexíveis e leves;
- (e) Solução de claraboia pneumática – solução construtiva com membrana transparente dupla ou tripla insuflada com ar/gás;
- (f) Membrana com substrato orgânico para fachada/ cobertura vegetal.

*Figura 7.37. Esquema conceitual da solução proposta - SAM.*

#### • **Aspetos construtivos**

O sistema construtivo compõe-se por um esqueleto estrutural (pórticos em madeira com vão até 6m) revestido por duplas ou triplas camadas de membrana tensadas entre os pórticos formando assim uma unidade. A distância máxima entre pórticos é de 2.4m. Esta dimensão foi adotada para se evitar desperdício de material - corresponde à largura normalizada da produção das membranas e já inclui a respetiva transformação para aplicar os keders. Contudo, todas as dimensões podem ser ajustadas de acordo com a especificidade de cada projeto. A tripla camada de membrana<sup>8</sup> possui um núcleo com isolamento térmico e acústico e oferece acabamento final e propriedades estruturais ao edifício.

A membrana é fixa ao perfil estrutural de madeira lamelada através de um perfil em alumínio para keder (onde a membrana desliza interiormente). O perfil é fixo ao pórtico de madeira e entre eles é aplicada uma membrana de EPDM que garante estanquidade à passagem de água, selando as juntas entre si. Para além da membrana que funciona como espaçador entre pórticos, também são aplicados outros espaçadores de reforço - perfis metálicos tubulares (50mm Ø) espaçados a cada 2m e com capacidade de suporte de 80kg cada (Figura 7.38).



*Figura 7.38. Pormenor da estrutura proposta – ligação ao existente.*

Os pórticos de madeira lamelada e os perfis de alumínio adjacentes a estes apresentam curvas nas mudanças de direção para facilitar o deslize das membranas (Figura 7.39(c)). Essa transição entre as superfícies verticais das paredes e as inclinadas da cobertura ajudam a melhorar as qualidades aerodinâmicas do edifício, ao mesmo tempo que eliminam os pontos de tensão e as pontes térmicas, comuns numa estrutura convencional. A forma anticlástica das superfícies em membrana, para além de conferir tensão à superfície também permite (em conjunto com o desenho dos pórticos) o escoamento das águas pluviais e de neve.

#### • **Processo construtivo**

A conceção de construções leves é crucial para o seu sucesso. Normalmente, as estruturas destas construções são pré-fabricadas e montadas no local da intervenção. Por este motivo, poucas mudanças podem ser feitas na fase de montagem e esta é a razão pela qual tudo deve ser cuidadosamente verificado antes de ser transportado para o local. Contudo, verifica-se que o conhecimento sobre o comportamento estrutural de estruturas

<sup>8</sup> As membranas utilizadas podem ser transparentes, translúcidas ou opacas, conforme o nível de luminosidade desejável. Em situações onde seja necessário ter uma grande luminosidade, como em zonas de escadas, são aplicados módulos “claraboias” compostos por membranas duplas ou triplas tensionadas através de geometria anticlástica, ou por insuflação de ar ou outro gás (sistema pneumático) que também oferecem isolamento e propriedades estruturais (Figura 7.38(d)).

tensionadas não é amplamente difundido entre arquitetos e engenheiros (Maffei, 2012) e que são necessárias ferramentas informáticas específicas para determinar a forma da membrana e a respetiva análise estrutural.

A instalação de uma estrutura tensada requer mão-de-obra especializada e experiente. No entanto, as ferramentas e outros equipamentos utilizados são os correntemente utilizados na construção convencional. Para além disso, requiere condições climatéricas razoáveis. A leveza das membranas, conjugada com grandes superfícies expostas, significa que o trabalho só pode prosseguir com uma velocidade do vento inferior a 5 m/s. Com velocidades do vento mais elevadas, as operações de elevação devem ser interrompidas, bem como com temperaturas inferiores a 10°C.

*a) Requisitos para a execução de uma ampliação vertical:*



Rapidez



Leveza



Reversibilidade



Facilidade de montagem



Facilidade de transporte/armazenamento de materiais e equipamentos em obra

*b) Materiais e componentes:*



Perfil em alumínio para keder duplo (corda semi rígida) e perfil de fecho e tensionamento perimetral inferior da membrana: o perfil para keder permite o deslizamento da membrana durante a montagem e o perfil de fecho o seu tensionamento final



keder



Membrana



Lã de rocha



Massa térmica – material com mudança de fase



Membrana retardante da difusão do vapor

A membrana exterior deve possuir propriedades ignífugas e por isso selecionou-se uma membrana composta por tecido de fibra de vidro. Para além disso, também deve possuir uma superfície com reduzida fricção e para tal, o revestimento adequado para esta membrana ter esse efeito é o PTFE (politerafluoretileno), conhecido por Teflon, recomendado para aplicação em estruturas que estão expostas à neve, promovendo a sua auto remoção da superfície, por exemplo. Nos casos, em que a concentração de poluentes atmosféricos seja elevada, recomenda-se a adição de um sobre revestimento em dióxido de titânio que atua como agente de autolimpeza da membrana. Por fim, em detrimento do desempenho térmico requerido, é possível variar a coloração da membrana e reduzir a passagem dos raios infravermelhos através da mesma com a adição de pigmentos com baixa emissividade.

Em alternativa, numa versão mais económica, também se pode utilizar uma membrana com tecido de fibra de vidro, mas revestida a PVC e com sobre revestimento de PVDF (Fluoreto de polivinilideno). O PVDF, para além de conferir excecionais propriedades retardantes ao fogo, também confere maior durabilidade ao revestimento de PVC, protegendo-o contra os efeitos dos raios ultravioleta, para além de possuir propriedades antifúngicas.

*c) Etapas (Figura 7.39(c) - da direita para a esquerda):*

- 1ª) Ligação à estrutura existente e montagem de pórticos em madeira lamelada seccionados em peças (para facilitar o transporte) unidos através de peças metálicas e perfis metálicos tubulares no sentido transversal; os pórticos da estrutura proposta assentam num cerco perimetral de madeira sobre a cobertura existente. Idealmente, os pórticos devem assentar sobre as vigas existentes e deve realizar-se o contraventamento dos pórticos nas suas laterais. Estabeleceu-se que a distância máxima entre pórticos é de 1.20m (devido à correspondência com a largura dos rolos de membrana) e que esta dimensão pode ser ajustada (no intervalo 0 – 1.20m) para alinhar-se com as vigas de pavimento existentes no edifício intervencionado;
- 2ª) Colocação da membrana interior através de keders que correm entre os perfis de alumínio dispostos ao longo dos pórticos. A membrana, enquanto elemento estrutural secundário, é levantada e amarrada na posição pretendida e depois é puxada. Em seguida, o processo de tensionamento completo é garantido por grampos lineares, cabos de aço e outros dispositivos de fixação permanente aos elementos estruturais primários;
- 3ª) Colocação de membrana para o vapor e de isolamento térmico fixo através de cintas cruzadas pelo exterior;
- 4ª) Colocação da membrana exterior e tensionamento ao longo da viga de pavimento + grelhas de ventilação;



- 5º) Colocação do isolamento acústico entre pisos, da membrana com massa térmica (no pavimento) e até 1m de altura de rodapé + painel rígido de rodapé até 1m de altura (no paramento interior da parte ampliada) (Figura 7.40(c));  
 6º Colocação de membrana acústica microperfurada, pelo interior, através de perfis especiais.

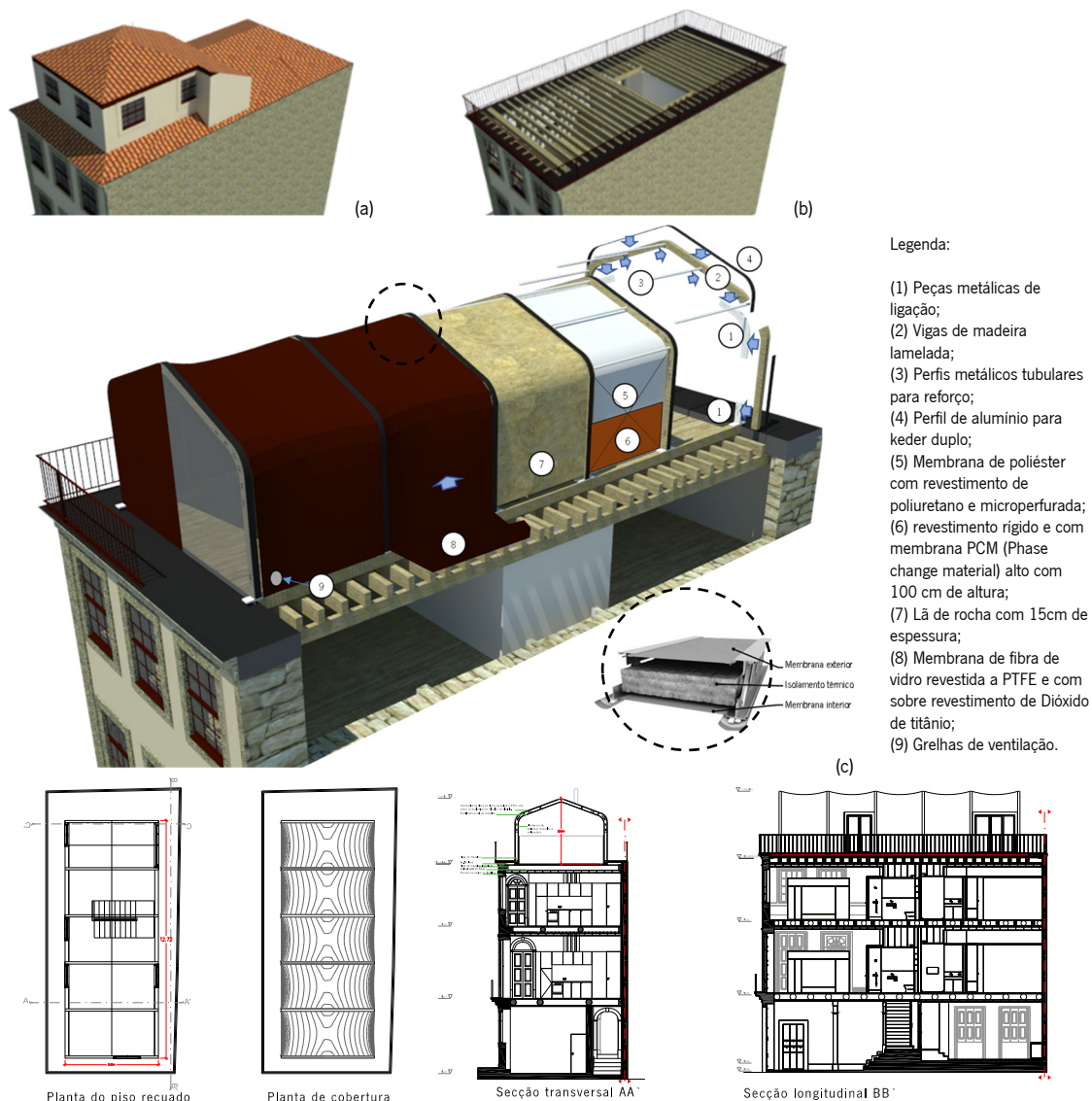


Figura 7.39. Esquema com sequência da intervenção de reabilitação: (a) edifício existente; (b) remoção da cobertura inclinada e das vigas de pavimento que estavam danificadas e execução de novas vigas em madeira lamelada; (c) sequência de montagem da ampliação vertical SAM.

O processo de montagem da estrutura de membrana é ilustrado na Figura 7.40.



Figura 7.40. Ilustração do processo de montagem de uma estrutura com membrana (adaptado de Sprung, 2017).

*d) Manutenção/desconstrução:*

Deve realizar-se uma inspeção regular à superfície de membrana, bem como aos elementos de ancoragem, pois esta pode apresentar sujidade, perfurações, rasgos ou esmagamento se for sujeita a elevadas cargas localizadas, causadas por erros de projeto, instalação ou acidentes. Se a membrana se encontrar danificada, a redistribuição das cargas pode resultar numa concentração de forças que pode causar a propagação de rasgos na membrana. As incisões nas membranas podem ser voluntárias (decorrentes de atos de vandalismo), ou acidentais, aparecendo com mais frequência nas partes acessíveis por pessoas a este tipo de construções. Segundo Monjo-Carrio (2016), uma das formas de contornar este problema é bloquear o acesso a este tipo de construções para evitar atos de vandalismo. Esta medida pode ser adotada de duas formas: bloquear o acesso horizontal ou vertical à membrana. No primeiro caso, podemos introduzir elementos de separação entre os utilizadores e a membrana, como vegetação, mobiliário urbano ou elementos decorativos. No segundo caso, a estrutura com membrana pode ser instalada acima do alcance das pessoas, por exemplo, no caso de configurarem ampliações verticais. Por outro lado, de modo a mitigar os efeitos de incisões acidentais nos pontos mais altos da estrutura com membrana, segundo Monjo-Carrio (2016), deve reforçar-se a membrana com membranas cujas fibras estejam dispostas de modo a acomodar esforço extra, como nas velas marítimas.

Contudo, a conceção e dimensionamento das construções tensadas com membranas também deve considerar os aspetos associados à manutenção e substituição da membrana. Nesse sentido, e relativamente ao potencial de desconstrução e reciclagem, a SAM foi desenhada para poder ser desconstruída e todos os seus componentes podem ser separados para reciclagem individual, alterados e substituídos com facilidade. O uso de ligações reversíveis permite reabilitar, reutilizar total, ou parcialmente a ampliação vertical em membrana e instalá-la em coberturas de outros edifícios, por exemplo. Neste momento, existem no mercado sistemas construtivos com membrana destinados a usos industriais e não residenciais – solução Airclad (2016) e solução Sprung (2017) - que provam que as soluções construtivas com membranas podem constituir uma resposta técnica e economicamente viável à estratégia dos 3Rs.

*e) Eliminação da tarefa de proteção temporária da obra e acabamento final das superfícies:*

A construção de uma ampliação vertical convencional requer a proteção temporária durante o trabalho de abertura para execução da estrutura, pois existe um risco elevado de entrada de águas pluviais durante esta fase. Neste aspeto, a solução proposta apresenta a vantagem de dispensar proteção temporária para a sua execução, devido à significativa redução do tempo estimado de montagem da estrutura. A solução proposta dispensa a tarefa de acabamento final pelo exterior e interior (pintura), uma vez que a própria membrana funciona como acabamento final. Estima-se que a estrutura proposta possa ser desenhada e produzida em seis semanas e a sua montagem demore dois a quatro dias.

*f) Mobilidade (transporte):*

Especialmente em zonas urbanas, algumas de difícil acesso, como nos centros histórico das cidades, a utilização de materiais mais leves reduz as dificuldades de transporte e de elevação, conforme se observa na Figura 7.41.



Figura 7.41. Exemplos de intervenções de reabilitação em que foi necessário adotar soluções leves para viabilizar a execução de operações de manutenção e ampliação vertical.

• **Aspetos estruturais**

As implicações estruturais de uma ampliação vertical são inevitáveis e para evitar problemas como deformação excessiva ou mesmo colapso deve-se considerar o reforço dos principais elementos estruturais afetados pela

adição de pisos. Reconhecida a limitação em executar uma ampliação vertical, sobretudo nos casos em que por razões arquitetônicas é necessário desalinhar a parede estrutural de fachada, a solução proposta pode ser especialmente vantajosa na execução deste tipo de intervenções (Figura 7.39). O baixo peso dos materiais empregues (cerca de 1/10 dos materiais convencionais) pode eliminar a necessidade de reforçar a estrutura do edifício. Em alguns casos, esta vantagem torna a solução proposta a única alternativa possível para acrescentar um novo piso a um edifício existente. A diminuição da carga a introduzir sobre a estrutura contribui ainda para não agravar o seu desempenho perante ações sísmicas.

Assumindo que o conceito estrutural da solução proposta contempla uma abordagem de integração da nova estrutura com a antiga, numa primeira fase deve-se fazer o levantamento e modelação estrutural do edifício existente e a modelação do projeto de ampliação de modo a verificar quais os elementos estruturais existentes que terão um aumento de carga, que eventualmente exija o seu reforço estrutural. Contudo, o presente estudo não contempla uma análise estrutural da solução proposta e por isso apenas se apresentam os aspetos estruturais considerados na conceção da mesma; indicam-se o seu peso próprio, os pontos de ligação entre a solução proposta e o edifício existente e as soluções de reforço para determinadas situações.

A ligação entre a ampliação proposta e o edifício existente é feita através de pórticos com conectores metálicos fixos na base às vigas de madeira, ou às paredes de alvenaria (que funcionam bem à compressão) e sobre as quais os pórticos são ancorados. Para além das cargas inerentes ao peso próprio da ampliação vertical e à sobrecarga da ocupação do espaço, o aumento de pisos também implica um aumento, por vezes substancial, das sobrecargas provocadas pela ação do vento (Uwimana, 2011). Atendendo a este e outros cenários, a SAM incorpora uma solução de contraventamento com cabos metálicos cruzados e dispostos entre pórticos (Figura 7.47(b)). Além disso, o travamento e afastamento entre pórticos realiza-se através de perfis tubulares e da membrana tensionada e fixa entre pórticos através de perfis de alumínio para keders perimetrais (Figura 7.47(b)) – alcançando-se assim uma unidade estrutural entre os pórticos e a membrana. Deste modo, a membrana obtém uma superfície anticlástica (com dupla curvatura) (Figura 7.42) na qual cada nó é estabilizado pela força em direções opostas e em equilíbrio, o que impede a elevação da superfície na presença de vento.

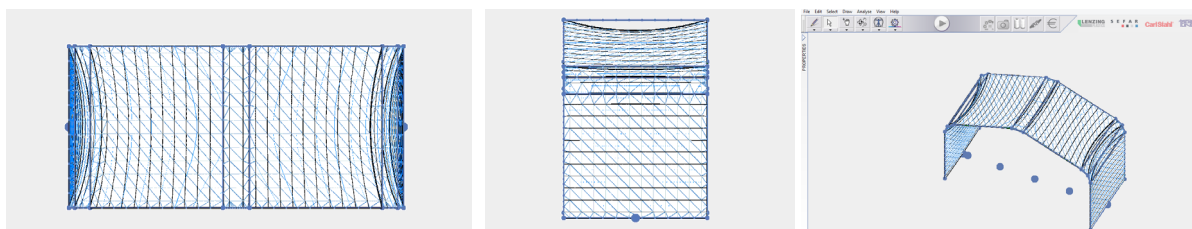


Figura 7.42. Geometria da membrana da solução em estudo, (tipo anticlástica) obtida através de ferramenta informática Formfinder (2016) que permite determinar a forma de equilíbrio da mesma – processo denominado de “form finding”.

Num processo posterior denominado de “Cut and patterning” (padronização e corte) a membrana é cortada e assemblada por padrões de modo a que se consiga obter a superfície curva de equilíbrio resultante das forças de tração aplicadas na fase de montagem.

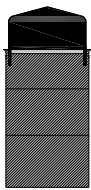
Em função do tipo de membrana, dimensões e tipo de ligações ao perímetro onde será fixa a membrana (neste caso rígidas e contínuas) é possível determinar a força de tensão a aplicar na fase de montagem da estrutura tensionada. Além disso, também é possível determinar a geometria da superfície em membrana para que esta fique em tensão. Para tal, existem ferramentas informáticas que auxiliam na procura da geometria da membrana, processo denominado “formfinder” (procura da forma), como exemplifica a Figura 7.42. As estruturas tensadas estão sujeitas a esforço de tração e requerem uma forma com curvatura dupla para estabilizar e distribuir corretamente a tensão e as cargas aplicadas na superfície em membrana. Uma regra básica de conceção é a de que a forma segue a função; a análise estrutural deve estar completamente integrada no desenho arquitetónico. A geometria da membrana é estabelecida através de uma técnica de *geração/procura da forma* (*form finding*, em inglês) de modo a assegurar um equilíbrio estático do sistema construtivo. O padrão de corte da membrana é calculado por uma ferramenta informática de análise de elementos finitos de deflexão. Durante o cálculo progressivo da deformação pela carga define-se uma consequente compensação, ou descompensação da geometria do padrão de corte da membrana. A compensação e aplicação adequada do material são fatores-chave que determinam os custos globais e o desempenho a longo prazo da construção.



• **Ligações aos elementos construtivos existentes**

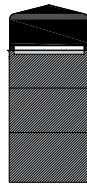
A ligação entre uma nova construção e um edifício existente centra-se sobretudo na estanquidade e segurança estrutural. No caso das ampliações verticais, deve-se assegurar: (1) a realização de um levantamento detalhado da cobertura existente para definição dos pormenores de ligação aos elementos estruturais existentes; (2) a estanquidade das ligações entre qualquer elemento novo e o substrato existente; (3) a ancoragem da nova unidade à parede mestre existente para minimizar o risco de elevação pela ação do vento.

As ligações entre estruturas tensionadas a estruturas que funcionam à compressão requerem tecnologias especiais para evitar danos. A solução proposta pode ser adaptada a vãos entre 3 a 6m de largura (sem apoio intermédio); o sistema construtivo proposto é totalmente desmontável e reutilizável. Os requisitos para as fundações variam consideravelmente; dependem da dimensão da construção, do período de permanência da mesma e das condições dos elementos estruturais existentes, aos quais serão conectados os novos elementos da parte ampliada. As construções mais pequenas podem ser montadas sobre uma estrutura de madeira, ou metálica que pode ser aparafusada de forma adequada à laje existente. Os edifícios de maiores dimensões podem ser aparafusados a uma viga de coroamento de betão (que encimará, por exemplo, uma parede de alvenaria de pedra existente), ou montado sobre uma viga metálica que pode ser aparafusada a uma laje de betão armado existente. As Figuras 7.43 a 7.48 mostram os seguintes tipos de soluções para conectar a SAM ao edifício existente:



**Ligação profunda\***

Este tipo de ligação é mais adequado para ligações permanentes em que a parte ampliada utiliza os elementos estruturais existentes, como as vigas.



**Ligação superficial\***

Este tipo de ligações é mais adequado para soluções de ampliação vertical temporária e em coberturas planas com soluções construtivas contemporâneas. Neste caso, propõem-se a adição de um pavimento independente da laje existente, conectado a balastros. Os balastros podem ser formados por placas de aço ou blocos de betão.

Nota: \* Deve-se garantir, em dimensionamento, que as forças ascensionais que possam ocorrer sejam anuladas. A conceção de estruturas leves em membrana com elevada capacidade resistente resulta em tensões excessivamente elevadas (ou pressão mais elevada no caso de estruturas pneumáticas) que conduzem a uma maior secção dos materiais e/ou maior massa (p.e. no caso de fundações) (Maffei, 2012).

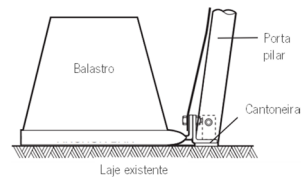
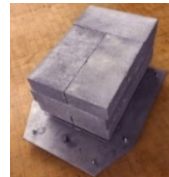
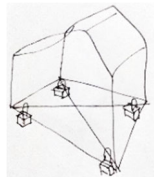


Figura 7.43. Placas de apoio em neopreno (Rothblaas, 2018). Ideal para a realização de apoios estruturais e vínculos estáticos com dois graus de folga.



Figura 7.44. Porta-pilar (da esquerda para a direita): em "T" com lâmina interna (Rothblaas, 2018) com ligação superior à viga; duplo – com ligação lateral a viga de madeira.



(a)



Junções de corte madeira-betão e madeira-madeira para vigas de madeira.  
Resolve pontualmente situações em que se requer uma transferência de forças de tração da madeira para o betão.

(b)

Figura 7.45. Exemplos de ligações para forças de tração, da estrutura da SAM ao edifício existente: (a) cantoneira para forças de tração – chapa tridimensional em aço com zincagem galvânica; (b) chapa para forças de tração - chapa bidimensional furada de aço com zincagem galvânica (Rothoblaas, 2018).

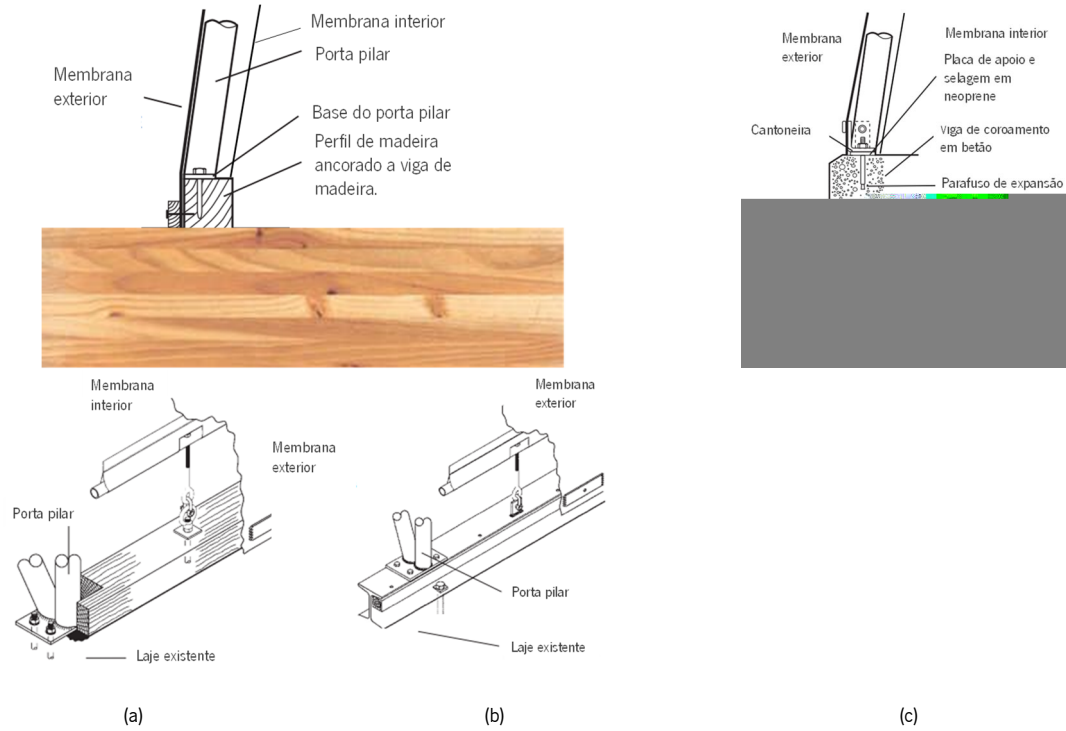


Figura 7.46. Exemplos de ligações da estrutura da SAM ao existente: (a) (b) laje ou vigas, (c) paredes.

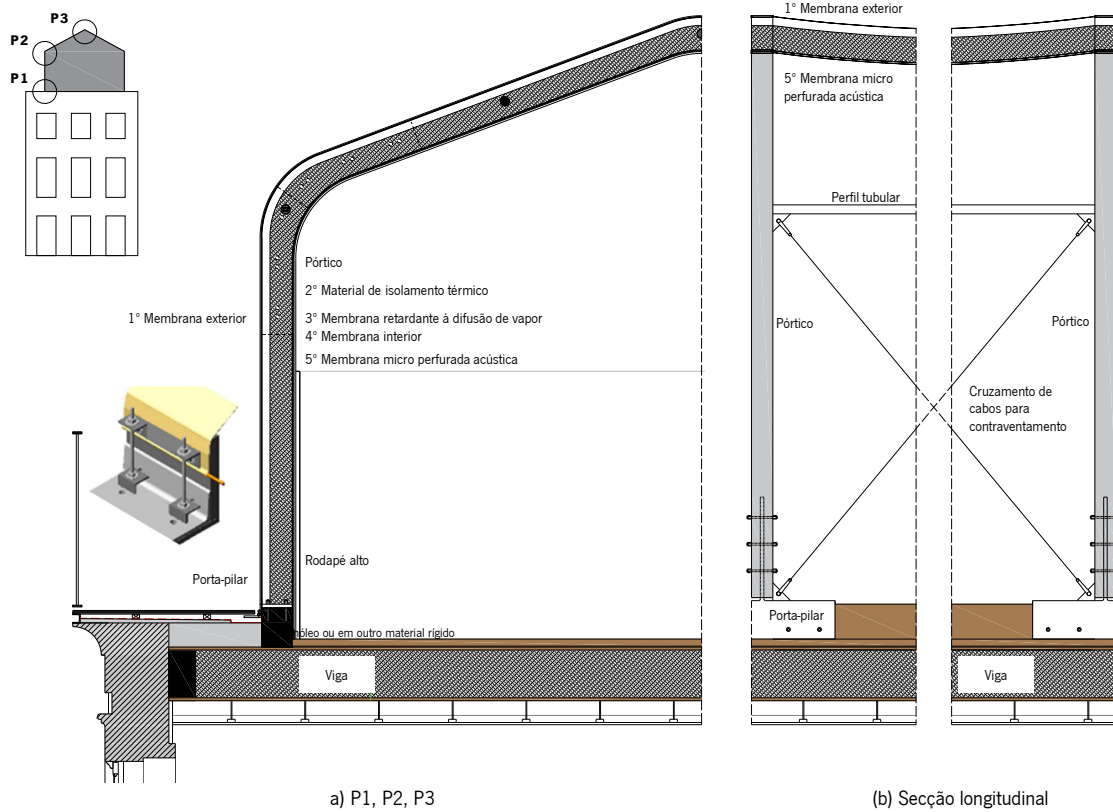


Figura 7.47. Pormenor construtivos: (a) SAM recuada do alinhamento da fachada; (b) contraventamento dos pórticos.

\* A viabilidade de utilizar as ligações indicadas fica sujeita a validação/ dimensionamento estrutural.

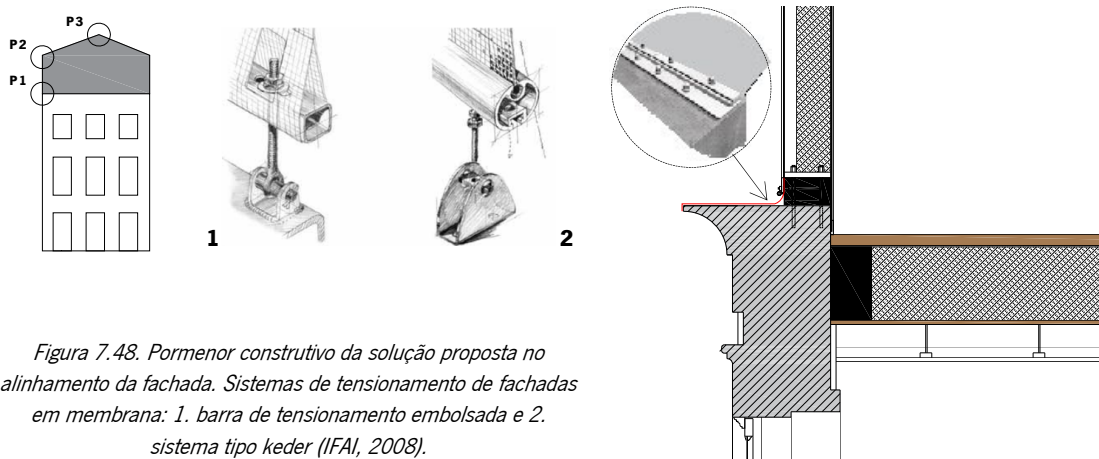


Figura 7.48. Pormenor construtivo da solução proposta no alinhamento da fachada. Sistemas de tensãoção de fachadas em membrana: 1. barra de tensãoção embolsada e 2. sistema tipo keder (IFAI, 2008).

### 7.7.3. Aspectos estéticos da envolvente exterior

- **Coloração e impressão gráfica**

As membranas arquitetônicas podem apresentar várias colorações e até servir de suporte para impressões gráficas de padrões que promovam uma melhor integração estética no contexto em que se inserem (Figura 7.49(a)). Por outro lado, devido à crescente procura por membranas com melhor desempenho térmico, desenvolveram-se revestimentos para membranas com baixa emissividade<sup>10</sup>. O resultado é uma redução considerável das perdas de calor através da membrana, contribuindo para aumentar a eficiência energética do edifício. Até à data, tornou-se possível combinar o revestimento de baixa emissividade com qualquer cor, aumentando as possibilidades de integração estética/arquitetônica destes materiais com a envolvente construída existente.

- **Integração de portas e janelas**

A SAM pode acomodar qualquer tipo de porta e janela, como se exemplifica na Figura 7.49(b), com recurso a soluções existentes no mercado.

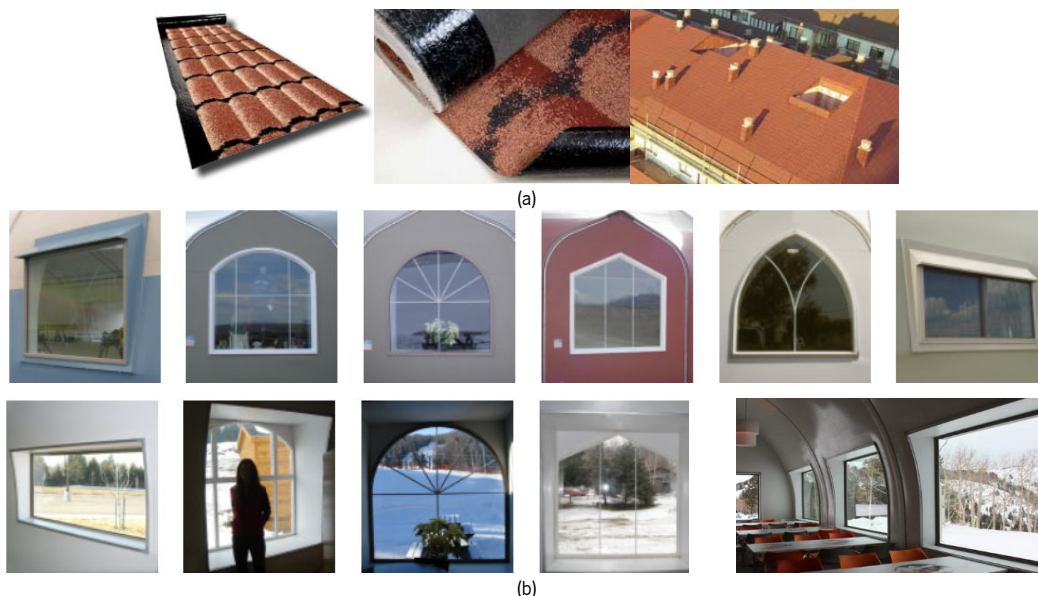


Figura 7.49. (a) Exemplo de impressão gráfica em membranas - membrana betuminosa com efeito 3D (4.2mm e), por impressão gráfica, que reproduz a imagem de telhas. (b) Tipos de janelas especificamente desenhadas para integrarem soluções de envolvente exterior com membrana (Sprung, 2016).

<sup>10</sup> Estes revestimentos baseiam-se essencialmente na mesma tecnologia utilizada para criar isolamento no vidro – constituem-se por uma camada ultra fina de óxido de estanho ou prata.

• **Integração de chaminés**

As chaminés de cozinha ou de aparelhos de aquecimento, condutas de fumo e tubos de ventilação que atravessem a área ampliada devem ser selados e protegidos com uma base em torno destes elementos para garantir estanquidade (Figura 7.50). Segundo o Artigo 30º do Decreto-Lei n.º 38 382, de 7 de Agosto de 1951, todas as paredes em elevação, quando não sejam construídas com material preparado para ficar à vista, serão guarnecidas, tanto interior como exteriormente, com revestimentos apropriados, de natureza, qualidade e espessura tais que, pela sua resistência à ação do tempo, garantam a manutenção das condições iniciais de salubridade e bom aspeto da edificação: (1) os revestimentos exteriores serão impermeáveis, sempre que as paredes estejam expostas à ação frequente de ventos chuvosos; (2) o revestimento exterior das paredes das mansardas, ou das janelas de trapeira será de material impermeável, com reduzida condutibilidade calorífera e resistente a ação dos agentes atmosféricos e ao fogo. As chaminés serão construídas com materiais incombustíveis e ficarão afastadas, pelo menos, 0.20 m de qualquer material combustível.

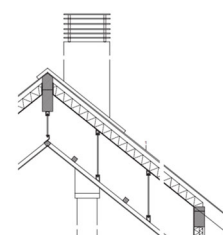
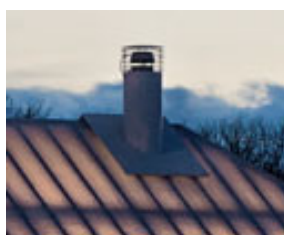
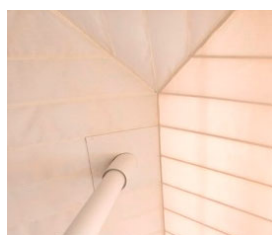


Figura 7.50. Pormenor de integração de chaminé na casa experimental “Même” revestida a membrana de poliéster com PVDF (arquiteto Kengo Kuma & Associates) (Archello, 2018).

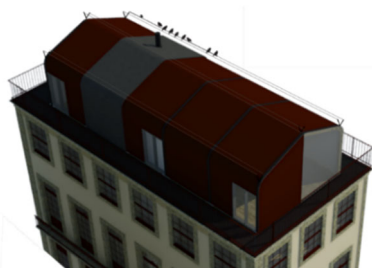


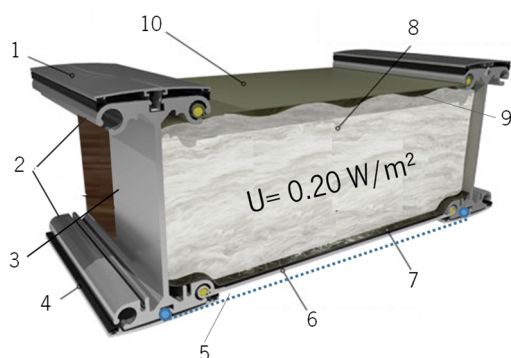
Figura 7.51. Deve-se prever a colocação de linhas que afastem os pássaros das superfícies em membrana para evitar danos e manter as superfícies limpas durante mais tempo.

7.7.4. *Aspetos funcionais da SAM*

Neste item, irão tratar-se de forma sectária os diferentes desempenhos da SAM. Para cada análise serão consideradas variantes à SAMb que possam melhorar a sua resposta às diferentes exigências.

• **Aspetos higrotérmicos**

Solução de membrana dupla com isolamento e ventilada: ao adicionar um material isolante entre as duas membranas é possível alcançar um isolamento térmico adequado à construção da parte ampliada. A SAM contempla a inclusão de materiais isolantes flexíveis, como as mantas de lã de rocha, mas podem ser integrados outros tipos de materiais flexíveis e isolantes. A solução da envolvente exterior (vertical e horizontal) é composta por 2 membranas (uma exterior e outra interior) e um núcleo com material isolante. A camada exterior proporciona sombra e proteção contra as intempéries e na interior estão duas camadas que formam uma cavidade selada que fornece isolamento térmico e acústico. A Figura 7.52 apresenta as camadas que compõem a envolvente exterior da SAMb.



Legenda:

- 1) Capa exterior em alumínio c/ vedantes em neopreno (corte térmico);
- 2) Perfil para keder fixado ao pórtico/perfil estrutural em madeira ou alumínio;
- 3) Pórtico/ perfil estrutural em alumínio ou madeira;
- 4) Capa térmica rígida com vedantes em neopreno (corte térmico);
- 5) Membrana acústica microperfurada e revestida a poliuretano
- 6) Membrana retardante da difusão de vapor e membrana arquitetónica interior;
- 7) Membrana refletora no substrato inferior da manta de lã de rocha;
- 8) Manta de lã de rocha com 150mm de espessura (resistência térmica equivalente à da SCMad e SCMet);
- 9) Lâmina de ar;
- 10) Membrana arquitetónica exterior (em fibra de vidro revestida a PTFE).



Notas: (a) As membranas exterior e interior são tensadas através de uma barra de afastamento entre pórticos por máquinas hidráulicas, com uma força de 7324 kgf/m<sup>2</sup> (SPRUNG, 2016), considerando um fator de alongamento predeterminado. Deste modo, as membranas também fazem parte do sistema estrutural. Para além disso, no final são adicionadas capas vedantes nas nervuras dos perfis para keder (onde deslizam as membranas) para corte térmico. (b) Segundo o Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto, o valor mínimo de U para uma cobertura é de 0.35 W/m<sup>2</sup> e para paredes exteriores é de 0,50.

Figura 7.52. Constituição da cobertura e parede exterior da SAMb (desenho adaptado de Sprung, 2016).

a) Método de cálculo:

A ferramenta informática CYPETHERM HYGRO (v2018g) permite calcular o fator de resistência superficial interior tendo em conta a humidade superficial crítica e a condensação intersticial em elementos construtivos, com base no comportamento higrotérmico dos materiais e produtos de construção, e conforme a metodologia de cálculo da norma ISO 13788:2012.

b) Condições higrotérmicas de cálculo:

As condições higrotérmicas consideradas para realizar o cálculo de condensações são as seguintes:

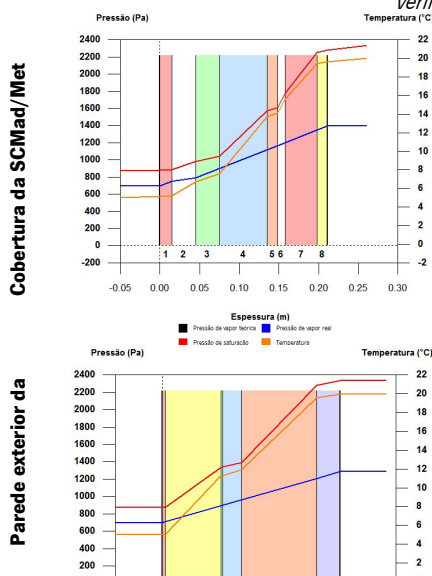
	Condições exteriores	Condições interiores
Temperatura, $\theta$	5 °C	20 °C
Humidade relativa, $\varphi$	80 %	55 %

c) Resultados

Na Tabela 7.7 e Figura 7.53 é possível observar os resultados dos cálculos relativos às verificações sobre a formação de condensações superficiais e intersticiais, segundo a EN ISO 13788:2012. Analisando os elementos construtivos da envolvente exterior das soluções SCMad/Met e da SAMb, verifica-se que ocorre condensação intersticial apenas nas paredes, em uma ou mais interfaces, mas estima-se que toda a condensação evapore durante os meses de verão; o risco de degradação dos materiais de construção e a afetação do desempenho térmico em consequência da quantidade máxima de humidade calculada devem ser considerados de acordo com os requisitos regulamentares e outras orientações nas normas do produto.

De acordo com os resultados presentes na Tabela 7.7 é necessário adotar medidas para escoamento da água que provém das condensações que possam ocorrer, conforme indicado nos pormenores construtivos da Figura 7.54, bem como introduzir aberturas de ventilação no elemento construtivo parede/ cobertura alternativa. Tanto os elementos construtivos convencionais, como os alternativos, apresentam uma membrana para regular o vapor de água produzido no interior da construção. Esta membrana em não tecido de poliamida e polipropileno (tipo “Isover Vario KM®”) encontra-se sobre a manta/placa de isolamento e atua como uma camada de bloqueio do ar, mas permeável ao vapor de água.

Tabela 7.7. Representação gráfica das condensações intersticiais previstas para o mês mais crítico e resultados dos cálculos de verificação de condensações superficiais.



**Verificação de condensação superficial**

O mês crítico é janeiro, com o valor de  $fR_{si}$ , min requerido mais alto, pelo que  $fR_{si}$ , min = 0.689. Dado que  $fR_{si} = 0.937 > fR_{si}$ , min = 0.689, o elemento construtivo não apresenta condensações superficiais, onde:

$fR_{si}$ : Fator de resistência superficial interior, calculado como  $(1 - U \cdot R_{si})$ , em que  $U = 0.253 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e  $R_{si} = 0.25 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ .

$fR_{si}$ , min: Fator de resistência superficial interior mínimo, necessário para evitar a humidade superficial crítica, calculado considerando um valor de  $\varphi_{si}$ ,  $cr \leq 0.8$ .

**Legenda/ composição do elemento:**

1 Rev. Telhas cerâmicas; 2 Caixa-de-ar; 3 Paineis OSB; 4 XPS; 5 Paineis OSB; 6 Caixa-de-ar; 7 Lã de rocha (MW); 8 Gesso cartonado.

**Verificação de condensação superficial**

O mês crítico é janeiro, com o valor de  $f_{R_{si}, min}$  requerido mais alto, pelo que  $f_{R_{si}, min} = 1.781$ . Dado que  $f_{R_{si}} = 0.997 < f_{R_{si}, min} = 1.781$ , não se cumpre a condição de dimensionamento e consequentemente podem ser produzidas condensações superficiais no elemento construtivo, onde:

$fR_{si}$ : Fator de resistência superficial interior, calculado como  $(1 - U \cdot R_{si})$ , em que  $U = 0.256 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e  $R_{si} = 0.01 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ .

$fR_{si}$ , min: Fator de resistência superficial interior mínimo, necessário para evitar a humidade superficial crítica, calculado considerando um valor de  $\varphi_{si}$ ,  $cr \leq 0.3$ .

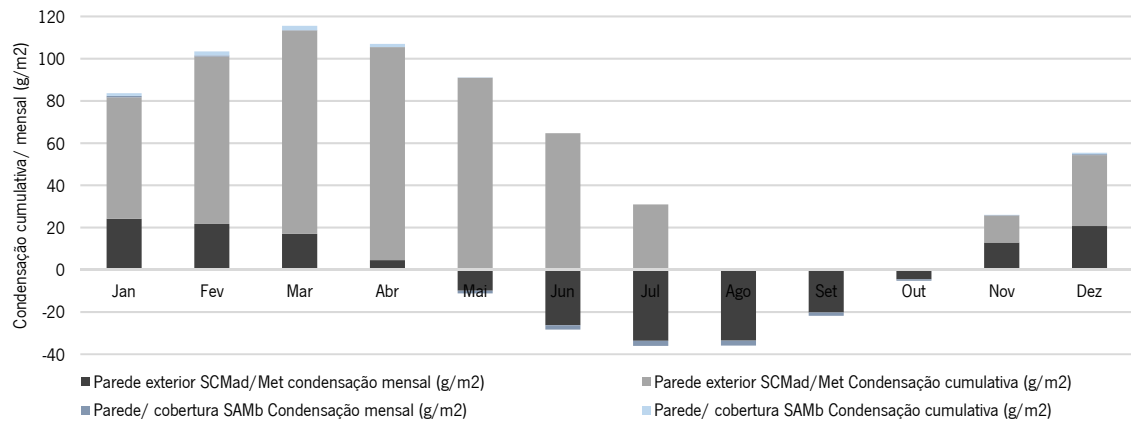
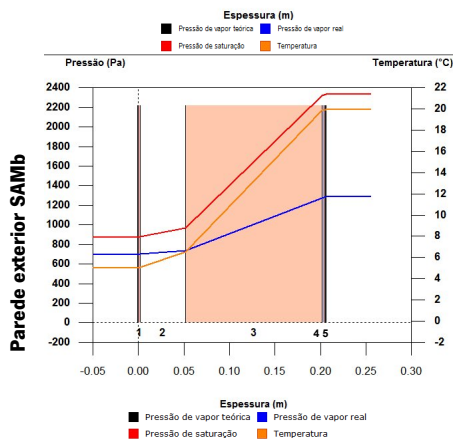
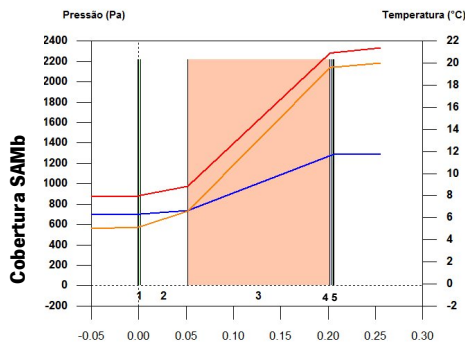


Figura 7.53. Resultados detalhados: condensação intersticial cumulativa mensal; quando os valores são negativos ocorre evaporação.

• **Ventilação e desumidificação**

Uma vez que a membrana de fibra de vidro revestida a PTFE é impermeável à água e ao vapor, a ventilação entre as duas membranas é indispensável para evitar a acumulação de condensações, para além de manter a qualidade do ar e evitar o sobreaquecimento do espaço interior. Por isso devem prever-se dispositivos de admissão de ar, para evitar o surgimento de bolores e fungos, normalizadas para 1/500m<sup>2</sup> de superfície de membrana. Para além disso, a manta de isolamento em lã de rocha também tem de ser protegida da condensação, com a adição de uma membrana retardante da difusão do vapor, ajustada de uma forma impermeável. De modo a evitar que a condensação cause danos, prevê-se a colocação de um “coletor de água” no ponto mais baixo da camada de isolamento (Figura 7.54(c)). A SAM permite que se adicionem algumas grelhas de ventilação na sua envolvente exterior (como os da Figura 7.54(b)) bem como nos caixilhos de portas/janelas (Figura 7.54(a)) para permitir que exista ventilação natural do espaço que encerram. Estas aberturas podem ser equipadas com ventiladores mecânicos para fornecer o número recomendado de renovações de ar por hora para o espaço interior da SAM.

**Legenda/ composição do elemento:**

- 1 Chapa metálica ondulada; 2 XPS; 3 Membrana de barreira pára o vapor (PP)
- 4 OSB; 5 Lã de rocha (MW); 6 Gesso cartonado.

**Verificação de condensação superficial**

O mês crítico é janeiro, com o valor de fRsi, mín requerido mais alto, pelo que fRsi, mín = 0.696. Dado que fRsi = 0.942 > fRsi, mín = 0.696, não são produzidas condensações superficiais no elemento construtivo, onde:

fRsi: Fator de resistência superficial interior, calculado como (1 - U·Rsi), em que U = 0.231 W/m<sup>2</sup>·K e Rsi = 0.25 m<sup>2</sup>·K/W.

fRsi, mín: Fator de resistência superficial interior mínimo, necessário para evitar a humidade superficial crítica, calculado considerando um valor de φsi, cr ≤ 0.8.

**Legenda/ composição do elemento:**

- 1 Membrana de fibra de vidro rev. a PTFE; 2 Caixa-de-ar; 3 Membrana de poliamida e polipropileno retardadora da difusão do vapor de água; 4 Lã de rocha (MW); 5. Membrana de fibra de vidro rev. a PTFE.

**Verificação de condensação superficial**

O mês crítico é janeiro, com o valor de fRsi, mín requerido mais alto, pelo que fRsi, mín = 1.781. Dado que fRsi = 0.997 < fRsi, mín = 1.781, não se cumpre a condição de dimensionamento e consequentemente podem ser produzidas condensações superficiais no elemento construtivo, onde:

fRsi: Fator de resistência superficial interior, calculado como (1 - U·Rsi), em que U = 0.238 W/m<sup>2</sup>·K e Rsi = 0.01 m<sup>2</sup>·K/W.

fRsi, mín: Fator de resistência superficial interior mínimo, necessário para evitar a humidade superficial crítica, calculado considerando um valor de φsi, cr ≤ 0.3.

**Legenda/composição do elemento:**

- 1 Membrana de fibra de vidro rev. a PTFE; 2 Caixa-de-ar; 3 Membrana de poliamida e polipropileno retardadora da difusão do vapor de água; 4 Lã de rocha (MW); 5. Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE.

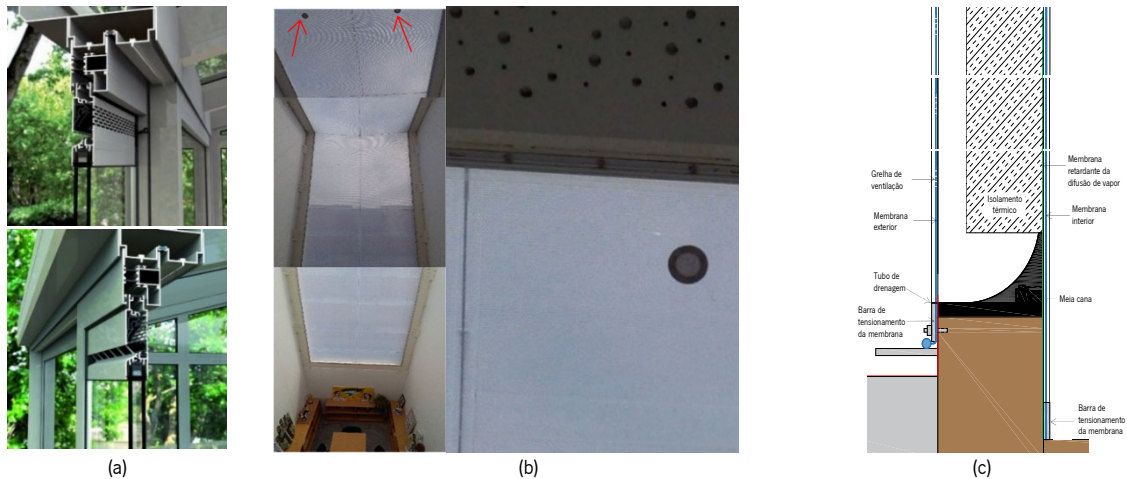


Figura 7.54. Grelhas de ventilação: (a) autorregulável num caixilho<sup>11</sup> (ARALCO FlatAir); (b) na cavidade de solução construtiva de claraboia composta com membrana dupla de ETFE tensionada e com caixa-de-ar entre si (foto da biblioteca da Escola Superior de Saúde da Universidade de Aveiro). (c) Pormenor de coletor de água de condensação na envolvente exterior da SAM.

Neste capítulo não será avaliada a variante da SAM para ampliações verticais destinadas a um tipo de uso que exija o máximo de aproveitamento da luz solar, como por exemplo escritórios ou salas de formação, etc. Contudo refere-se que a membrana dupla de fibra de vidro revestida a PTFE com manta intermédia de aerogel (*Tensotherm lumira nanogel*) pode constituir o revestimento da envolvente exterior. Esteticamente, este tipo de membrana multicamada possui a mesma aparência de uma membrana de fibra de vidro, enquanto funcionalmente e com uma espessura máxima de 8mm, fornece quatro vezes mais isolamento térmico, promove a passagem de luz natural (ao contrário de outros materiais de isolamento térmico) e reduz o risco de condensações.

- **SAMv1, SAMv2 e SAMv3 (soluções alternativas variantes): membrana com materiais de mudança de fase incorporados**

Uma das desvantagens das construções leves é que estas tendem a sobreaquecer e apresentam elevadas oscilações de temperatura do ar interior. Estudos anteriores com resultados numéricos de Berardia *et al.* (2017) e resultados experimentais de Mendonça (2005) e Nghna *et al.* (2016), ambos em climas temperados, sugerem que o uso de Materiais de Mudança de Fase<sup>12</sup> (Phase Change Materials em inglês e com a sigla PCM doravante utilizada neste estudo), conjugado com estratégias passivas de arrefecimento, podem reduzir o número de horas de sobreaquecimento e melhorar o conforto térmico.

Os PCMs são muitas vezes impregnados em placas de gesso, argamassas, ou em outros materiais de modo a incrementar a capacidade de armazenamento térmico nos tetos, paredes e pavimentos. Existem soluções em membrana disponíveis no mercado com PCM (óleo vegetal à base de soja, em estado puro) inserido em pequenas “bolsas”, como é o caso do BIOPCM™M51/Q29 (Figura 7.55) que, devido às suas propriedades e à sua flexibilidade construtiva, foi selecionado para incluir a proposta alternativa com massa térmica não convencional. A localização escolhida para colocar a membrana com PCMs foi o teto, porque quando comparado com as paredes e o pavimento, termicamente apresenta a superfície com mais influência na sensação térmica de um edifício durante a estação de arrefecimento<sup>13</sup>. Para determinar a quantidade de PCM necessária considerou-se duas situações: (a) com 1kg de PCM por metro cúbico de espaço interior útil e (b) com 2kg de PCM. Para determinar a quantidade de PCM necessária por metro quadrado tem que se dividir o total de kilos por metro cubico determinados inicialmente por 2,7kg (que corresponde à quantidade de PCM por m<sup>2</sup> de

<sup>11</sup> Graças à tecnologia utilizada nas grelhas de ventilação autorreguláveis é assegurado o máximo conforto ao manter um caudal sensivelmente constante independentemente da velocidade do vento. O caudal é mantido através de uma alheta autorregulável, garantindo um fluxo de ar permanente e evitando correntes de ar indesejáveis. Por outro lado, é sempre possível regular manualmente a quantidade de ar através de uma alheta interior em função da utilização do espaço. Por fim, a forma da alheta interior faz com que o ar novo seja orientado para cima, otimizando a distribuição do mesmo e evitando qualquer desconforto por parte dos ocupantes. Em Portugal, contrariamente aos países do Centro e Norte da Europa onde são usuais os sistemas mecânicos de duplo fluxo (admissão e extração de ar recorrendo à ventilação mecânica), devido às suas condições climáticas específicas, um sistema adequado é aquele onde a admissão de ar novo é realizada através de grelhas de ventilação autorreguláveis.

<sup>12</sup> Armazenam calor latente à medida que fundem, e libertam calor latente à medida que solidificam.

<sup>13</sup> Por exemplo, à medida que a temperatura desce, durante a noite, a membrana com PCMs aplicada no teto torna-o uma fonte de calor radiante.



BIOPCM™M51/Q29). A quantidade de PCM necessária por metro quadrado foi determinada de acordo com as indicações de cálculo descritas em PhaseChange (2017).

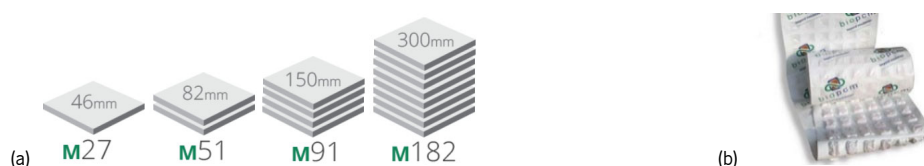


Figura 7.55. (a) Comparação entre BioPCM™ Q24 (com as várias temperaturas de fusão (M – melting) e espessuras de paredes de alvenaria de tijolo; (b) Membrana com “bolsas” de PCM incorporado (PhaseChange, 2017).

### • SAMv3: Membrana vegetal não convencional

Para a solução SAMv3 selecionou-se uma membrana vegetal com características equivalentes às da membrana VGTEX™ (2017) (Figura 7.56) devido à sua natureza flexível que se adapta facilmente à solução alternativa proposta. Para além disso, o seu peso reduzido (apenas 23kg/m<sup>2</sup>) permite adicionar uma envolvente exterior vegetal à solução alternativa proposta sem ultrapassar o peso total das soluções construtivas convencionais de referência. Para além disso, a envolvente exterior vegetal apresenta os seguintes benefícios: redução das necessidades energéticas através do isolamento térmico do edifício e da mitigação de ilhas de calor urbanas (sendo possível alcançar, segundo Getter *et al.* (2009) uma redução de 3°C na temperatura do ar exterior num meio urbano); substituição parcial da vegetação eventualmente destruída para construir o edifício existente, pelo crescimento de vegetação na cobertura; proteção da membrana de substrato base, aumentando a longevidade dos materiais em membrana aplicados. Sublinha-se que as plantas absorvem 50% da luz solar e refletem 30% (Getter *et al.*, 2009), ajudando assim a diminuir os consumos de climatização para arrefecimento.

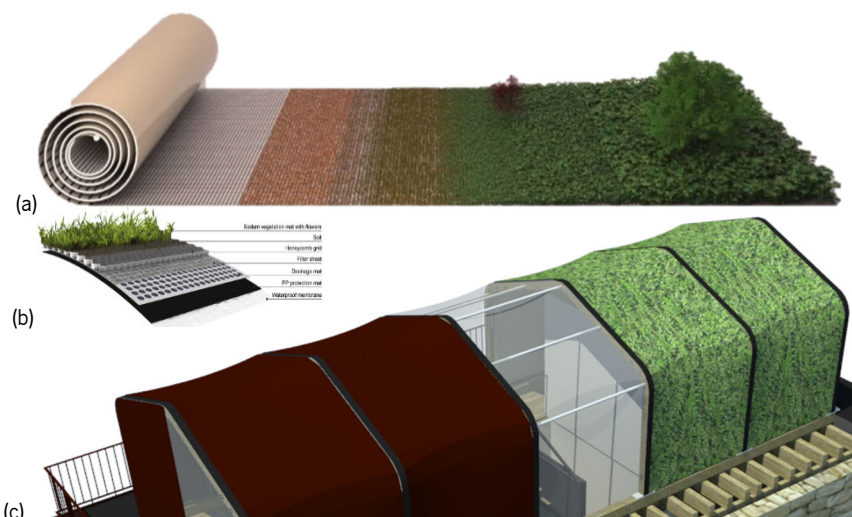


Figura 7.56. Cobertura em membrana vegetal - conceito de promoção da biodiversidade através de soluções leves para integrar em edifícios existentes: (a) membrana vegetal VGTEX (2017); (b) membrana vegetal com substrato orgânico de Heinzelmann *et al.*, (2015); (c) aplicação da membrana vegetal ao caso de estudo.

Uma cobertura executada com uma membrana vegetal têxtil pode trazer todos os benefícios de uma cobertura verde e de uma cobertura leve tensada, promovendo a redução do impacto ambiental da construção em que está integrada. Pretende-se integrar este conceito, desenvolvido por Heinzelmann *et al.* (2015), na solução proposta, uma vez que o edifício existente pode beneficiar da redução de peso ao mesmo tempo que o volume ampliado beneficia de um complemento para a sua regulação térmica, e o ambiente circundante pode beneficiar com a melhoria da qualidade do ar.

Um dos problemas que pode facilmente resultar da combinação de membranas com esteiras de vegetação em coberturas é a adição de peso excessivo, que faça com que a estrutura ceda. Contudo, o sistema desenvolvido por Heinzelmann *et al.* (2015) consegue ultrapassar esse problema através da utilização de materiais leves que permitem o desenvolvimento de vegetação em substratos com reduzida espessura. Este sistema é composto por 30mm de substrato vegetal aplicado sobre uma membrana de polipropileno, uma esteira de drenagem com

25mm, 5mm de membrana de impermeabilização resistente à penetração de raízes em polipropileno. Para manter a camada de substrato numa posição fixa, pode utilizar-se uma rede/malha polimérica com padrão hexagonal (utilizada na estabilização de solos). Todas estas camadas podem ser unidas à membrana arquitetônica através colagem ou de fixações reversíveis do tipo Velcro® (Velcro, 2014 apud Heinzlmann *et al.*, 2015).

Atualmente, especialmente em termos de regulação térmica do espaço interior, as construções com membranas exibem valores de transferência de calor elevados (a menos que isoladas) e reduzida massa térmica, aumentando assim os custos de aquecimento e arrefecimento do edifício. Uma camada de membrana vegetal pode servir como uma zona “*tampão*” que impede a perda de calor no inverno e mantém o edifício frio durante o tempo quente (esta solução será avaliada na secção 7.8.3). Tais soluções de membrana são aplicadas em estruturas tensionadas, frequentemente utilizadas para coberturas de grandes extensões, exibindo assim uma grande superfície que, se fosse coberta com vegetação, poderia promover uma significativa melhoria da qualidade do ar e do microclima do ambiente circundante (Peng & Jim, 2013 apud Heinzlmann *et al.*, 2015).

Deste modo, configuram-se as seguintes variantes à solução alternativa em membrana base (Figura 7.57): SAMv1 – adição de 185kg de PCM no teto; SAMv2 – adição de 259kg no teto e paramento interior das paredes exteriores; SAMv3 – adição de 185kg de PCM no teto e de membrana vegetal no revestimento exterior da cobertura. Todas as variantes combinam isolamento e membrana com PCM. Esta combinação funciona de forma semelhante a um resistor e um capacitor num circuito elétrico. O resistor (isolamento) reduz a passagem de energia (calor) através das paredes/ tetos; o capacitor (membrana com PCM) absorve o excesso de energia (calor) e faz com que ele seja liberado quando o nível de energia (temperatura) descer abaixo do nível desejado (temperatura de fusão do PCM).

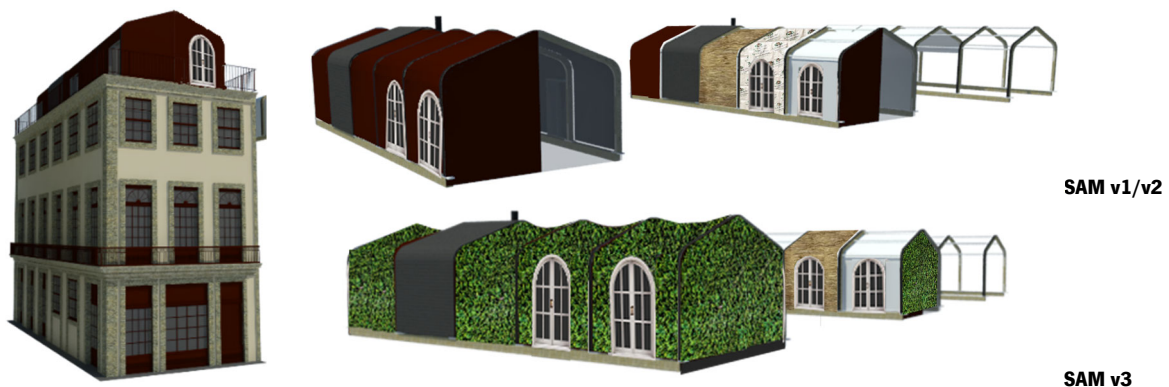


Figura 7.57. Ilustração das soluções alternativas variantes.

• **Avaliação de aspetos acústicos**

Quando as membranas constituem as superfícies que encerram um espaço interior, a ausência de massa também tem implicações no desempenho acústico. No entanto, a natureza dupla da cobertura/parede exterior das SAMb, v1 a v3, permite oferecer um bom nível de isolamento acústico, dada a possibilidade de incluir alguma porosidade na membrana através de microperfurações e de adição de materiais<sup>14</sup> de isolamento acústico. Comparativamente à solução convencional, a solução alternativa em membrana base apresenta um pior comportamento acústico, apresentando um isolamento reduzido. A solução alternativa apenas se aproxima dos valores de isolamento acústico da SCMad/Met quando se introduz uma membrana vegetal na envolvente exterior (Tabela 7.8 e Figura 7.58).

Tabela 7.8. Resultados da avaliação do desempenho acústico dos elementos construtivos que constituem as soluções de ampliação vertical em estudo. Simulação numérica realizada com a ferramenta informática Olive Tree Lab 4.0 (OTL) (Pemard, 2017).

Elementos construtivos das soluções de ampliação vertical	Índice de redução/ isolamento acústico
Cobertura convencional	RW (C. Ctr) dB, 50-5000 (Hz) = 53
Parede convencional	RW (C. Ctr) dB, 50-5000 (Hz) = 76
Parede exterior/ cobertura alternativa sem membrana acústica interior	RW (C. Ctr) dB, 50-5000 (Hz) = 41

<sup>14</sup> Maffei (2012) sugere que pode obter-se um bom desempenho através da aplicação de mantas de não-tecido em combinação com folhas de alumínio ou chumbo, resultando em materiais de acabamento flexíveis, mas mais pesados e espessos (que reduzem parte das vantagens das construções leves).

Parede exterior / cobertura com membrana acústica interior em fibra de vidro (2.5% perfuração) tipo Farbsorb.	RW (C. Ctr) dB, 50-5000 (Hz) = 42
Parede exterior / cobertura com membrana vegetal pelo exterior e membrana acústica interior em fibra de vidro (2.5% perfuração) tipo Farbsorb.	RW (C. Ctr) dB, 50-5000 (Hz) = 51

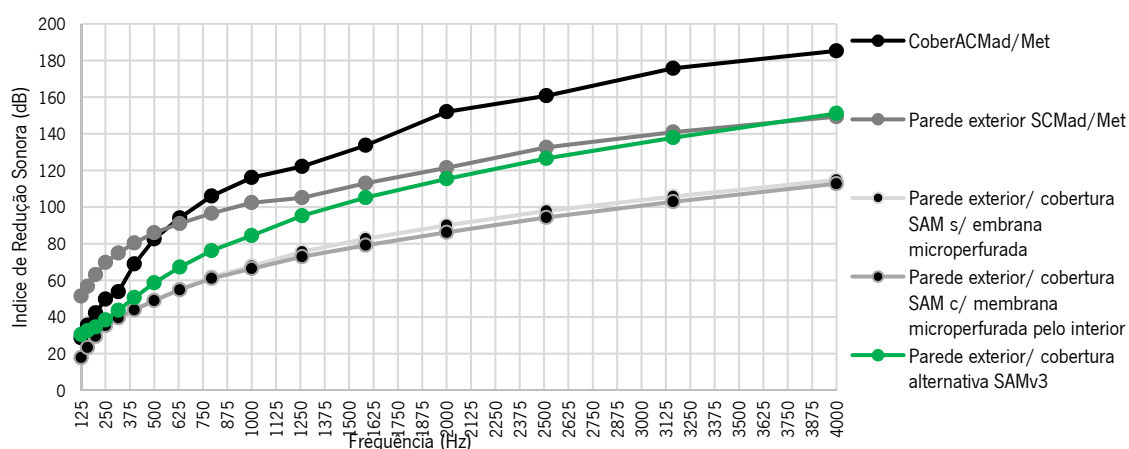


Figura 7.58. Índice de redução sonora de acordo com a norma ISO 717-1 dos elementos construtivos da envolvente exterior das soluções em estudo. Resultados obtidos com a ferramenta informática Olive Tree Lab 4.0 (OTL) (Pemard, 2017).

Quando as superfícies exteriores da envolvente de um edifício são constituídas por membranas, o ruído provocado pelo impacto da queda de chuva sobre essas superfícies tensadas constitui um fator de desconforto sonoro, sendo necessário incluir uma membrana de supressão de ruído da chuva (membrana de malha aberta) no desenho da solução construtiva com membrana para evitar esse efeito. Deste modo, a SAM contempla a inclusão de lã de rocha com 15cm de espessura, uma membrana microperfurada em fibra de vidro na superfície interior e uma membrana de supressão acústica exterior (membrana de malha aberta), distanciada 10cm acima da superfície exterior para minimizar o ruído de impacto provocado pela chuva.

• **Inclusão de sistemas ativos de produção e armazenamento de energia renovável**

À semelhança das soluções convencionais, as tecnologias de construção com membranas arquitetónicas também podem contribuir para alcançar edifícios com balanço positivo de energia, através da integração de elementos fotovoltaicos. Atualmente já existem soluções de membrana com fotovoltaicos integrados que se encontram disponíveis no mercado e vão surgindo em número crescente (Cremers, 2007).

Neste capítulo não será avaliada a inclusão de sistemas ativos de produção de energia através do sol. Contudo refere-se que existem no mercado painéis fotovoltaicos flexíveis, como o modelo SP1 (Solo Power, 2018), que pesa apenas 2.4kg/m<sup>2</sup>, muito menos do que os painéis rígidos convencionais que, para as mesmas características técnicas, apresentam um peso de aprox. de 10.0kg/m<sup>2</sup>.

Refere-se, a título de exemplo, um projeto onde se explora a aplicação de membranas com painéis fotovoltaicos flexíveis, o projeto de investigação Soft Cities (Kvarch, 2009) que aporta à cidade do Porto (Figura 7.59(a)). O projeto *Soft Cities* propõe um sistema têxtil (em membrana) de armazenamento de energia adaptável/flexível que opera entre a grande escala urbana e a pequena escala de habitações particulares. O urbanismo, a arquitetura, a engenharia e a ciência dos materiais cruzam-se à medida que o projeto explora o desempenho técnico e estético de uma infraestrutura têxtil e um modelo de fornecimento de energia com custos competitivos, relativamente à instalação de sistemas convencionais de energia fotovoltaica. A realização de protótipos para este sistema têxtil foi financiada pelo MIT Energy Initiative (MITEI) para redução do impacto ambiental e promover a reocupação de 25000 edifícios residenciais antigos, tipo Casa Burguesa (Figura 7.59(b)), na cidade do Porto. Segundo Kvarch (2009) estima-se que a redução do consumo energético de um agregado familiar médio pode atingir 60% com 15m<sup>2</sup> deste sistema têxtil, que corresponde a cerca de 10% da área média das coberturas existentes (Figura 7.59(c)).

O projeto de investigação *Polar Bear Pavillion*, auto-suficiente na geração e consumo de energia, constitui um exemplo para a aplicação de têxteis no setor da construção de edifícios *NZeb*. Até ao momento, as estruturas

com membranas, por si só, apresentam um fraco desempenho na regulação térmica. No entanto, em parceria com a indústria, este projeto de investigação conseguiu demonstrar que é possível controlar as propriedades de regulação térmica/isolamento com membranas. Conceptualmente, este projeto adotou o princípio/propriedades funcionais da pele do urso polar (Engelhart & Sarsour, 2015): uma membrana têxtil revestida a preto, uma membrana porosa e uma camada de transferência de calor entre estas membranas, constituem a envolvente do protótipo construído (Figura 7.60). Quando a luz solar incide na membrana exterior da envolvente do edifício, esta camada de transferência de calor assume a tarefa de aquecer o ar que flui no espaço entre membranas. O ar quente produzido é transportado através da cobertura para um sistema inovador de armazenamento de energia. Este sistema de armazenamento converte a energia térmica em energia química sem perdas (Menke, 2013). Em parceria com o grupo TAO e o Instituto de Tecnologia Têxtil e Engenharia de Processos de Denkendorf (ITV), este sistema foi patenteado e é capaz de armazenar calor suficiente no verão para aquecer o edifício no inverno.

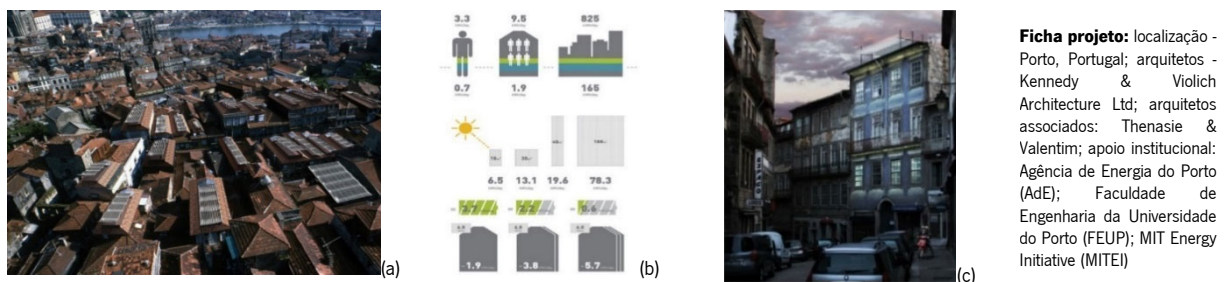


Figura 7.59. Imagens do projeto *Soft Cities* (Kvarch, 2009) - conceito aplicado aos edifícios antigos da cidade do Porto.

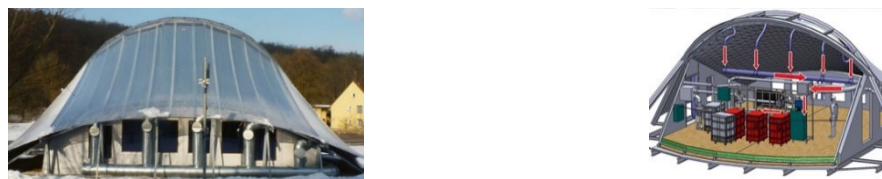


Figura 7.60. Protótipo "Polar Bear Pavillion", uma estrutura em membrana energeticamente suficiente. Fonte: ITV/TAO GmbH.

## 7.8. Avaliação dos critérios quantitativos

No seguimento das considerações feitas sobre os aspetos funcionais das soluções alternativas, apresenta-se uma síntese de todas as soluções construtivas em estudo. Estas são as soluções para a qual se apresenta a seguinte avaliação e comparação da eficiência: **REFc/ST** - edifício sem intervenção, no estado original, com uma pequena ampliação vertical existente (um mirante) constituída por uma solução tradicional; **SCMat** - solução de ampliação vertical convencional com estrutura em madeira; **SCMet** - solução convencional com estrutura metálica; **SAMb** - solução alternativa base com membranas arquitetónicas integradas numa estrutura em madeira; **SAMv1** - solução alternativa variante 1 com membranas arquitetónicas integradas numa estrutura em madeira e adição de materiais com mudança de fase (apenas no teto); **SAMv2** - solução alternativa variante 2 com membranas arquitetónicas integradas numa estrutura em madeira e adição de materiais com mudança de fase (no teto e paramento interior das paredes exteriores) e **SAMv3** - solução alternativa variante 3 com membranas arquitetónicas integradas numa estrutura em madeira e adição de materiais com mudança de fase (no teto) e membrana vegetal na envolvente exterior (cobertura e paredes).

### 7.8.1. Objetivos e metodologia

Os principais objetivos deste estudo são: (1) conceber uma solução de ampliação vertical com recurso a membranas arquitetónicas; (2) avaliar essa solução/variantes segundo aspetos funcionais, construtivos, económicos e ambientais; (3) comparar essa solução/variantes com soluções construtivas leves convencionalmente utilizadas para este fim, de modo a determinar em que medida a solução/variantes propostas constituem uma alternativa eficiente a estas. A Figura 7.61 apresenta um esquema da metodologia adotada na avaliação da eficiência das soluções de ampliação vertical em estudo. Entende-se que a eficiência de cada solução está na relação entre os recursos empregues e os resultados obtidos; esta relação determina que o



bom desempenho obtido por cada solução deve ser alcançado com o emprego da menor quantidade possível de recursos.

O presente estudo serve para determinar e comparar a eficiência de soluções construtivas de ampliação vertical assentes sobre um edifício antigo, tomando como referência REF c/ST que possui um tipo de ampliação vertical tradicional, um mirante.

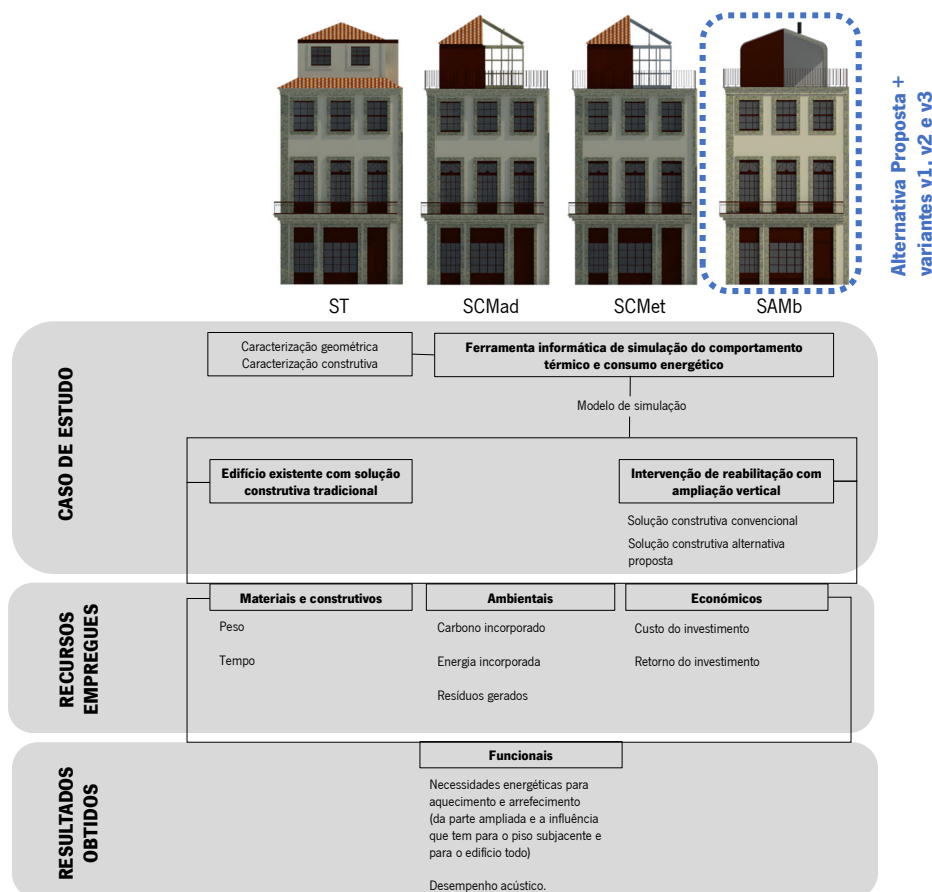


Figura 7.61. Esquema da metodologia geral adotada para avaliação da eficiência de cada solução em estudo.

### 7.8.2. Análise de aspetos construtivos

A ampliação vertical de edifícios pode ser pertinente do ponto de vista funcional/arquitetónico, mas é necessário assegurar que o acréscimo de cargas associado a este tipo de intervenção possa ser suportado pelas fundações e elementos estruturais não transformados da edificação existente (Artigo 129º do Decreto-Lei n.º 38 382, de 7 de agosto de 1951). A mudança de uso associada a uma ampliação vertical pode implicar um aumento significativo de sobrecargas para o edifício existente; por exemplo, a passagem da área de cobertura ordinária, com sobrecarga regulamentar de 0,3kN/m<sup>2</sup>, para cobertura terraço acessível, ou pavimento de uso privado residencial (2,0 kN/m<sup>2</sup>) terá um acréscimo de 1,7kN/m<sup>2</sup>. No presente caso de estudo, por se tratar de uma ampliação vertical com piso recuado, a laje de pavimento da parte ampliada teve que ser redimensionada, o que implicou a remoção do pavimento existente, substituído por vigas de madeira lamelada, de acordo com o descrito na secção 7.6.2, ou seja, um aumento de cargas no edifício existente (Tabela 7.9).

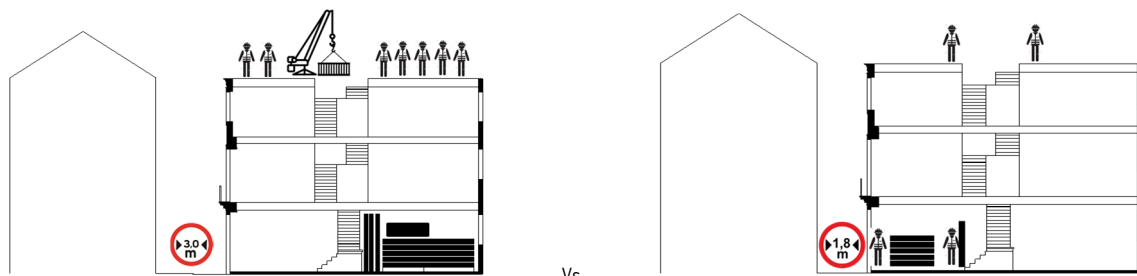
O peso de cada solução, presente na Tabela 7.9, obteve-se através da recolha de quantidades e densidades de cada material constituinte. Todas as soluções de ampliação em estudo apresentam um peso superior ao do piso recuado removido (presente no edifício REF antes da intervenção de reabilitação), sobretudo devido à intervenção de reforço decorrente da mudança de uso referida e da construção de uma nova laje de separação de pisos. Contudo, a SAMb é a que apresenta o menor acréscimo de peso total, 25% inferior (aproximadamente) ao da SAMad e SAMet. Atendendo ao peso dos elementos construtivos da envolvente exterior de um edifício (neste caso, cobertura e paredes), convencionalmente, considera-se que são elementos pesados aqueles com mais de 500kg/m<sup>2</sup> e leves os que apresentam entre 100<500 kg/m<sup>2</sup>. Posto isto, pode considerar-se que os

elementos com tecnologias construtivas em membrana, como os que são propostos neste estudo, que pesam menos de 100kg/m<sup>2</sup> (Tabela 7.9), constituem soluções ultra leves. Neste sentido, a avaliação da eficiência relativa realizada neste capítulo, compara soluções construtivas convencionais leves com alternativas ultra leves (Tabela 7.9). Considerando o peso total da ampliação vertical SAMb e SAMv3 verifica-se que estas pesam menos 85% e 38%, respetivamente, do que SAMet (atendendo que todas as soluções apresentam o mesmo valor de U na envolvente exterior).

O baixo peso dos materiais empregues nas soluções alternativas facilita o seu transporte (reduz os meios de transporte necessários e o conseqüente consumo de combustível) e elevação de cargas. Para além disso, em trabalhos de reabilitação, evita, frequentemente, a necessidade de reforço da estrutura portante vertical do edifício. Por outro lado, a utilização de sistemas de fixação mecânica, a facilidade de colocação de tubagens e condutores elétricos, entre outros aspetos, diminuem consideravelmente o volume de mão-de-obra e o tempo necessário para a execução dos trabalhos, assim como o impacto na vizinhança (p.e. menor ruído e movimento de veículos resultantes da obra).

Relativamente ao tempo de execução, as soluções alternativas (considerando a execução da envolvente vertical e da nova laje de piso e excluindo a execução das paredes interiores) são as que apresentam o tempo mais reduzido, estimado em 30 dias em oposição aos 90 a 120 dias das restantes soluções<sup>15</sup> (Tabela 7.9). Entre outras vantagens, a adoção de soluções com menor tempo de execução em intervenções de ampliação vertical é relevante para a redução do impacto negativo das condições climáticas na obra. Segundo aspetos logísticos, as obras de ampliação tendem a apresentar as seguintes limitações: transporte/acessibilidade (devido às limitações existentes no espaço urbano, largura de vias, etc.); colocação em obra (devido ao espaço disponível no edifício para armazenamento de materiais ser limitado ou inexistente). Comparativamente, as soluções alternativas propostas requerem menor espaço de armazenamento de materiais em obra e maior facilidade de transporte do que as soluções convencionais (Figura 7.62).

Aspetos logísticos das soluções convencionais versus soluções alternativas propostas:



Maiores dificuldades no acesso ao local da obra devido à dimensão dos materiais de construção; ocupam maior volume no espaço disponível para armazenamento de materiais (que neste tipo de intervenções é muito limitado ou inexistente) e geram mais resíduos; requerem mais mão-de-obra e equipamentos auxiliares.

Redução significativa das dificuldades no acesso ao local da obra e no transporte de materiais de e para o local da obra; ocupam menor volume no espaço disponível para armazenamento de materiais e geram menos resíduos; requerem menos mão-de-obra, mas mais especializada.

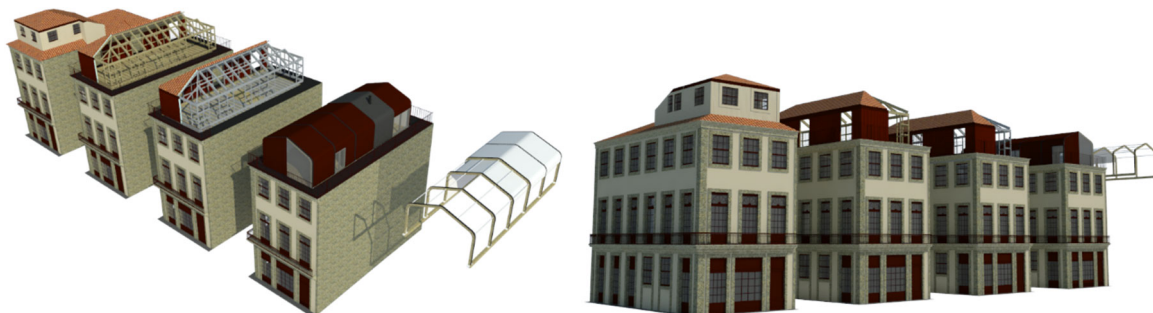
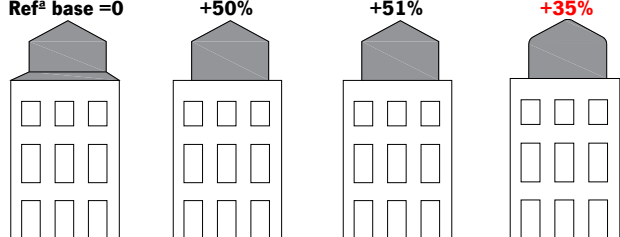


Figura 7.62. Visão geral das soluções em estudo.

<sup>15</sup> Segundo o INE (2014) indica que no ano 2013, as obras de ampliação registaram uma duração média de 450 dias (15 meses).

Tabela 7.9. Quadro geral comparativo das soluções construtivas em estudo segundo aspetos construtivos.



Aspetos construtivos	REF c/ST*	SCMad	SCMet	SAMb	SAMv1	SAMv2	SAMv3
<b>Peso parte ampliada</b> (cobertura + paredes ext. da ampliação)	17615 kg	13787 kg	15137 kg	2242 kg	2425 kg	2759 kg	5785 kg
<b>Peso total/m²</b> (cobertura + paredes ext. da ampliação)	196 kg/m²	206 kg/m²	226 kg/m²	33 kg/m²	36 kg/m²	41 kg/m²	86 kg/m²
<b>Peso total</b> (cobertura + paredes ext. da ampliação + nova laje de pavimento + bordadura de reforço***)	25650 kg*	51283 kg	52633 kg	39737 kg	39921kg	40255kg	43281kg
<b>Tempo de execução**</b>	-	120 dias	90 dias	30 dias	30 dias	30 dias	30 dias
<b>Volume dos resíduos gerados em obra ****</b>	-	760 m³	526 m³	28 m³	28 m³	28 m³	28 m³
<b>Resíduos gerados em obra *****</b>	-	17615 + 800 kg	17615 +560 kg	17615 + 23 kg	= SAMb	=SAMb	=SAMb

**Notas:** O peso total foi determinado com recurso às quantidades e densidades dos materiais constituintes de cada solução. Não se consideraram os componentes das soluções de envidraçados. \* Corresponde ao peso do piso recuado existente + cobertura inclinada que foram removidos e substituídos por um piso recuado com cobertura terraço acessível. \*\* Tempo estimado apenas para a execução da envolvente exterior (cobertura e paredes exteriores) e laje de pavimento, excluindo paredes interiores. \*\*\* A informação acerca das alterações efetuadas na laje do piso encontra-se no item 7.6.2 do presente capítulo. \*\*\*\* Não inclui a remoção da cobertura, laje de pavimento e mirante existente no edifício intervenionado. \*\*\*\*\* Inclui a remoção da cobertura + mirante + laje de pavimento existente.

### 7.8.3. Avaliação do desempenho térmico e do consumo energético

Pretende-se determinar em que medida a SAMb e as respetivas variantes (SAMv1, SAMv2 eSAMv3), comparativamente às SCMad e SCMet, poderão (1) beneficiar do aproveitamento da inércia térmica do edifício existente (devido à falta de massa térmica das membranas) e (2) complementar e beneficiar o edifício existente. Para tal construiu-se o seguinte modelo de cálculo.

#### • Programa de simulação selecionado

De acordo com a justificação realizada no Capítulo 6, optou-se por selecionar o programa de interface de acesso ao EnergyPlus – Design Builder (2016) versão 5.0.1.03 para realizar as simulações do desempenho termo energético das soluções em análise. Com o *Design Builder* é possível aceder a uma extensa base de dados de materiais do *Energy Plus*, sendo, contudo, possível o próprio utilizador especificar novos materiais e as respetivas características, como materiais com mudança de fase e coberturas vegetais utilizados neste estudo.

#### • Construção do modelo de cálculo - caracterização do edifício em estudo

O objetivo da modelação baseada em programas de cálculo automático é a representação, necessariamente simplificada, da realidade. A construção do modelo será sempre uma cópia adaptada e simplificada da realidade, não só pela impossibilidade de representar fielmente a realidade, como também pelo maior peso (tempo, esforço, dificuldade, etc.) que uma melhor aproximação à realidade poderá ter na simulação a efetuar; as simplificações exigem que tanto o objeto como a metodologia de cálculo do programa tenham sido entendidos antes da modelação. O edifício em estudo foi modelado de acordo com as características geométricas e construtivas apresentadas em 7.5, bem como com a localização do edifício e caracterização do meio urbano onde este se insere (Figura 7.64). No que diz respeito às paredes interiores, foram apenas modeladas as paredes do piso 1 e 2. A Figura 7.63 apresenta as zonas do edifício objeto de análise. As paredes interiores do piso subjacente à parte ampliada e da parte ampliada não foram modeladas de modo a simplificar a análise dos resultados obtidos. No entanto, a sua massa térmica foi considerada para efeitos de cálculo. A



existência das escadas que ligam os três andares foi representada através de uma abertura. A cobertura inclinada foi desenhada com a geometria existente (inclinação de cerca de 30°).

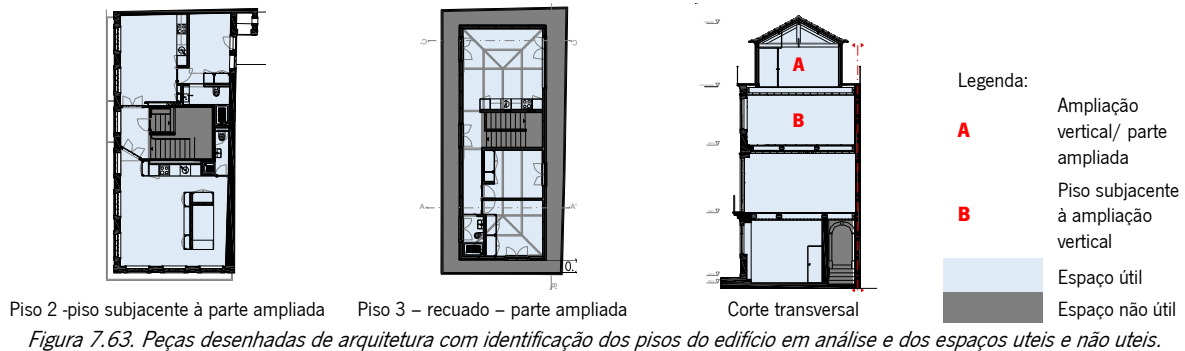


Figura 7.63. Peças desenhadas de arquitetura com identificação dos pisos do edifício em análise e dos espaços uteis e não uteis.

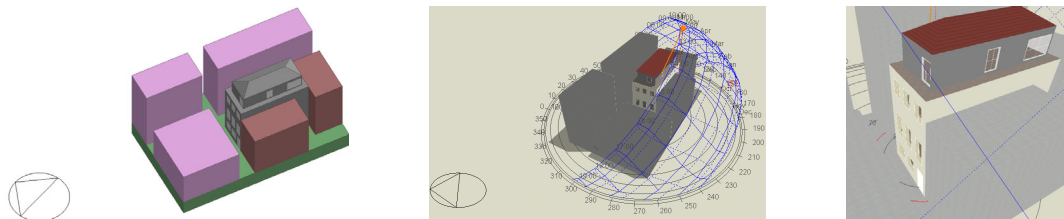


Figura 7.64. Modelo executado em Design Builder.

A Tabela 7.10 apresenta uma síntese das características climáticas da cidade do Porto, bem como dos sistemas de aquecimento, arrefecimento e ventilação previstos para avaliar o desempenho energético do edifício. A Tabela 7.11 apresenta as características técnicas da envolvente do edifício antes da intervenção de reabilitação.

Tabela 7.10. Informação geral sobre o edifício em estudo. Principais características climáticas da cidade do Porto (REH, 2013).

<b>Características gerais</b>	
Localização	Porto
Latitude	41°09'02.35'N
Longitude	8°36'51.23'O
Altitude	103
Tipologia	Habitacional
Inércia térmica do edifício	Média
Área bruta de construção/parte ampliada	367 m <sup>2</sup> / 60m <sup>2</sup>
<b>Parâmetros climáticos</b>	
Zona climática de inverno	I2
Dias de aquecimento (°C dias)	1610
Período de aquecimento convencional (meses)	6,7
Zona climática de verão	V1
Radiação incidente numa superfície transparente orientada a sul (kWh/m <sup>2</sup> . mês)	93
Temperatura do ar exterior no projeto (°C)	30
Amplitude térmica diária média (°C)*	9

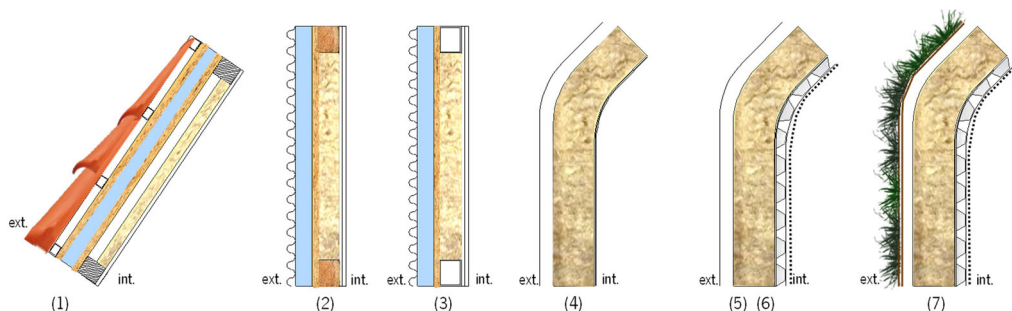
\* Diferença entre a temperatura mínima e máxima média diária para o mês mais quente da estação de arrefecimento.

Tabela 7.11. Características técnicas dos elementos construtivos do edifício existente (sem parte ampliada) e do sistema de climatização considerado tanto para o edifício com e sem parte ampliada.

Elementos	Solução existente
Paredes exteriores e adiabáticas	U= 2.50 W/(m <sup>2</sup> .°C)
Paredes e tetos interiores em tabique	U= 1.70 W/(m <sup>2</sup> .°C)
Pavimento térreo	U= 1.13 W/(m <sup>2</sup> .°C)
Inércia térmica	Média
<b>Notas sobre os sistemas de climatização, iluminação e AQS considerados para cálculo do consumo energético:</b>	Sistema de climatização do ar interior: terminal de ar condicionado com expansão direta com COP 3 (ligado apenas para garantir que a temperatura do ar interior não ultrapassando 25°C e não desça abaixo de 18°C). Não se consideraram os consumos para AQS nem iluminação

As Tabelas 7.12 e 7.13 apresentam as características térmico-físicas mais relevantes dos elementos de construção adotados no modelo de simulação, tendo por base a informação recolhida sobre o edifício existente e os materiais em estudo.

Tabela 7.12. Constituição e propriedades térmico-físicas dos elementos construtivos da envolvente exterior da parte ampliada.



Legenda/elemento construtivo	Constituição (do exterior para o interior)	e (m)	$\rho^1$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda^2$ (W/m.°C)	$c^3$ (J kg . °C)	Valor de U (W/m <sup>2</sup> °C)
<b>(2)/ (3)</b> <b>SCMad/ SCMet</b> PAREDES EXTERIORES	Chapa em aço galvanizado, ondulada e lacada	0,03	7800	50,000	443	0,23
	Placas de poliestireno extrudido (XPS)	0,06	30	0,037	1550	
	Membrana de barreira para o vapor (polipropileno)	0,002	75	0,220	1920	
	Painel de aglomerado de partículas de madeira (OSB)	0,02	650	0,130	1700	
	Manta de lã de rocha	0,08	70	0,040	670	
	Placa de gesso cartonado	0,025	875	0,250	625	
<b>(1)</b> <b>SCMad/ SCMet</b> COBERTURA	Telha cerâmica	0,015	1700	1,000	800	0,20
	Caixa-de-ar formada por perfis	0,03	-	-	-	
	Membrana de barreira para o vapor (polipropileno)	0,002	75	0,220	1920	
	Placa de aglomerado de partículas de madeira (OSB)	0,02	650	0,130	1700	
	Placas de poliestireno extrudido (XPS)	0,06	30	0,037	1550	
	Painel de aglomerado de partículas de madeira (OSB)	0,01	650	0,130	1700	
	Caixa-de-ar	0,04	-	-	-	
	Manta de lã de rocha	0,04	70	0,040	670	
Placa de gesso cartonado	0,013	875	0,250	625		
<b>(4) SAMb</b> PAREDES EXTERIORES E COBERTURA	Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE	0,002	650	0,040	840	0,21
	Caixa-de-ar	0,05	-	-	-	
	Manta de lã de rocha	0,15	70	0,040	670	
	Membrana de poliamida e polipropileno retardadora da difusão do vapor de água (estanqueidade e controlo de condensações)	0,002	910	0,250	1920	
<b>(5) (6)</b> <b>SAMv1/ SAMv2</b>	SAMb + Bio PCM (posicionado abaixo da manta de lã de rocha (do ext. p/ o int.) na cobertura = SAMv1	0,04	235	0,200	1970*	0,22
	SAMb + Bio PCM (posicionado abaixo da manta de lã de rocha (do ext. p/ o int.) na cobertura e nas paredes exteriores = SAMv2					
<b>(7)</b> <b>SAMv3</b>	SAMv1+ Membrana vegetal VGTEX™ (acima da membrana PTFE (do ext. p/ o int.))	0,03	1770	1,100	1840	0,18
<b>REF c/ ST</b> ENVOLVENTE VERTICAL	Chapa em aço galvanizado, ondulada e lacada	0,03	7800	50,000	443	3,70
	Fasquiado de madeira de pinho	0,02	550	0,150	1200	
	Argamassa de cal e areia	0,02	1600	1,300	1046	
	Estuque tradicional de gesso	0,02	1000	0,400	1090	
<b>REF c/ ST</b> COBERTURA	Telha cerâmica	0,015	1700	1,000	800	3,70
	Desvão (caixa de ar)	-	-	-	-	
	Tabuado de madeira de pinho	0,030	550	0,150	1200	
<b>REF c/ ST</b> LAJE DE PAVIMENTO	Soalho em madeira de pinho	0,03	550	0,150	1200	1,09
	Caixa-de-ar	0,30	-	-	-	
	Fasquiado de madeira de pinho	0,02	550	0,150	1200	
	Argamassa de cal e areia	0,02	1600	1,300	1046	
	Estuque tradicional de gesso	0,02	1000	0,400	1090	
<b>NOVA</b> LAJE DE PAVIMENTO para SCMat, SCMet, SAMb, SAMv1, SAMv2e SAMv3	Soalho de madeira de pinho maciça	0,025	550	0,150	1200	0,16
	Granulado de cortiça	0,015	100	0,065	170	
	Membrana de polietileno para redução do ruído de impacto	0,005	920	0,330	2300	
	Painel OSB	0,016	650	0,130	1700	
	Caixa-de-ar (formada pelas vigas de madeira)	0,26	1,23	0,025	1000	
	Painel OSB	0,016	650	0,130	1700	
	Caixa-de-ar	0,08	-	-	-	
	Manta de lã de rocha	0,04	70	0,040	670	
	Placa de gesso cartonado	0,013	875	0,250	625	
<b>NOVA</b> BORDADURA BETAO para SCMat, SCMet, SAMb, SAMv1, SAMv2e SAMv3	Viga de coroamento em betão armado (C=44m, L=0,8m)	0,23	2500	2,000	880	0,16
	Pavimento exterior em madeira de pinho	0,02	550	0,150	1200	
	Caixa-de-ar	0,03	-	-	-	
	Membrana betuminosa impermeabilizante	0,004	1050	0,230	-	
	Camada de formação de pendente em betão leve	0,03	1600	1,050	1040	
	Betão leve	0,14	1600	2,100	972	
	Painel OSB	0,016	650	0,130	1700	
	Caixa-de-ar (formada por vigas de madeira)	0,26	1,23	0,025	1000	
	Painel OSB	0,016	650	0,130	1700	
	Caixa-de-ar	0,08	-	-	-	
	Manta de lã de rocha	0,04	70	0,040	670	
	Painel de gesso cartonado	0,013	875	0,250	625	
	<b>Paredes interiores</b>	Painel de gesso cartonado	0,015	875	0,250	
Manta de lã de rocha		0,06	70	0,040	670	
Painel de gesso cartonado		0,015	875	0,250	625	

**Fontes:** 1) ITE 50 e Design Builder (2016); 2) e 3) – calor específico - Sastre (2000), Mendonça (2005); DesignBuilder (2016) e [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d\\_391.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html); \* Clifford (2012). **Nota:** relativamente às propriedades da membrana utilizada para revestimento exterior e interior, recorreu-se à ficha técnica de membranas equivalentes existentes no mercado, como por exemplo a membrana Sheerfill II™, e aos dados existentes em Knipper *et al.* (2011).

Tabela 7.13. Constituição e propriedades termofísicas e óticas dos elementos envidraçados (DesignBuilder,2016).

Elementos envidraçados	U (W/(m². °C))	g (adimensional)	Transmissão luminosa
Vidro duplo 6mm com lâmina de ar de espaçamento 16mm e com caixilho de madeira	2,5	0,63 (inverno); 0,25 (verão)	0,90

• **Desempenho térmico e consumo de energia – influência da parte ampliada no edifício existente**

Simulou-se o comportamento térmico dos modelos criados no *Design Builder* para uma semana típica de verão e uma semana típica de inverno; os resultados apresentam-se nas Figuras 7.65 a 7.72. Comparando a solução de ampliação convencional, com a ampliação alternativa base, verifica-se que tanto na semana de inverno (Figura 7.65) como na semana de verão (Figura 7.66) a solução alternativa em membrana base (SAMB) apresenta maiores oscilações térmicas devido ao facto desta ter menor massa térmica e, conseqüentemente o edifício apresentar menos horas de conforto dentro do intervalo considerado (18°C e 25°C). Por isso, procedeu-se à análise da eficiência de três variantes à solução alternativa base com membrana – ver análise detalhada a partir da secção 7.8.3.(a) - onde a massa térmica é incrementada, de modo a aferir qual destas variantes apresenta um comportamento térmico, entre outros aspetos, melhor, ou equivalente ao da solução convencional e, conseqüentemente, uma alternativa eficiente.

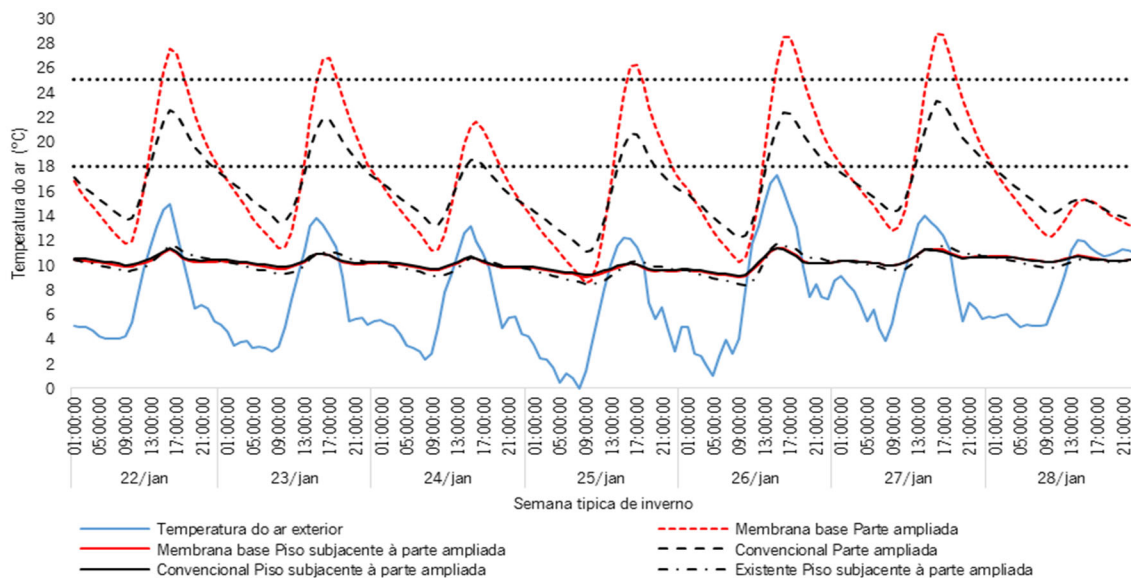


Figura 7.65. Variação da temperatura do ar interior na parte ampliada e no piso subjacente a esta numa semana típica de inverno.

Verifica-se que na semana de verão existe a necessidade de recorrer a estratégias passivas de arrefecimento, como a ventilação natural, para evitar o sobreaquecimento do espaço interior da parte ampliada e reduzir a necessidade de recurso a sistemas de climatização ativos. Pois, como se observa na Figura 7.66 a temperatura do ar exterior, apresenta um elevado número de horas dentro da temperatura de conforto (entre 18°C e 25°C). Tanto na semana de verão como de inverno, verifica-se que a temperatura do ar interior no piso subjacente é ligeiramente mais estável após a intervenção de reabilitação com a adição de um piso (com solução convencional ou alternativa) ao edifício existente, já que apresenta menos oscilações de temperatura, situação que é benéfica para o edifício no seu todo.

As Figuras 7.67 e 7.68 apresentam os resultados da variação de conforto térmico numa semana típica de inverno e de verão. A sensação de conforto segundo Fanger reúne os parâmetros de temperatura do ar, humidade relativa, temperatura média radiante e temperatura superficial, velocidade do ar interior, resistência térmica do vestuário e atividade metabólica num índice (PMV – Predicted Mean Vote) com uma escala de 7 ou 9

pontos de sensação térmica. A escala de sensação térmica com 9 pontos é a seguinte: 4 = muito quente; 3 = quente; 2= temperado; 1= ligeiramente temperado; 0=neutro; -1=ligeiramente fresco; -2= fresco; -3= frio e -4=muito frio. Verifica-se que em média a sensação de conforto térmico, na semana de inverno analisada na Figura 7.68, é melhor na parte ampliada com a SAMb (média de 0= neutra) do que na SCMat ou SCMet (média de -4= muito fria). Por outro lado, o piso subjacente REF e SAMb apresentam uma sensação média de conforto térmico igual (média de -1= ligeiramente fresca), que contrasta positivamente com a sensação térmica no piso subjacente SCMat ou SCMet (média de -5 > -4= muito fria). Concluindo-se assim que, numa semana típica de inverno, a sensação de conforto numa ampliação vertical SAMb é melhor do que numa SCMat/Met.

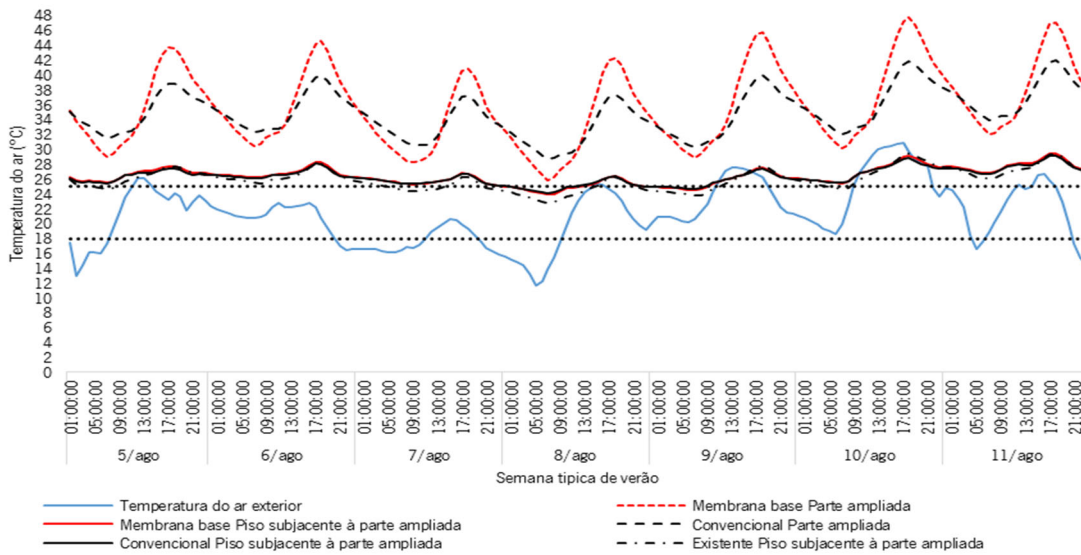


Figura 7.66. Variação da temperatura do ar interior na parte ampliada e no piso subjacente a esta numa semana típica de verão.

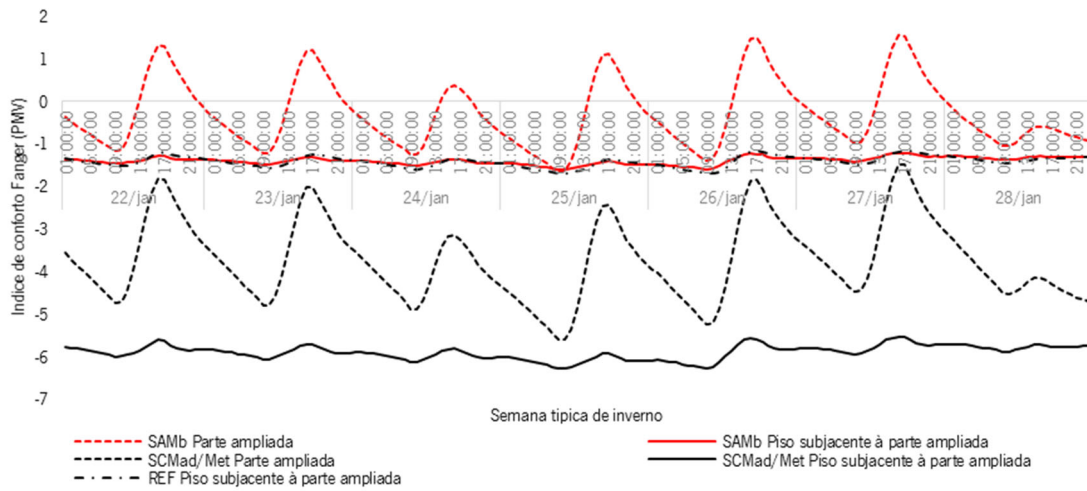


Figura 7.67. Variação da sensação de conforto térmico segundo o índice de Fanger (Predicted Mean Vote – PMV) – semana de inverno.

Contudo, numa semana típica de verão, verifica-se que a sensação média de conforto térmico no piso subjacente REF melhora com a introdução de uma ampliação vertical SCMat/Met, na medida em que passa de 1= ligeiramente temperado (REF) para -1=ligeiramente fresco (SCMat/Met) Figura 7.68. Por outro lado, a sensação média de conforto da parte ampliada SAMb e SCMat/Met é 3= quente. Concluindo-se assim que, numa semana típica de verão, a sensação de conforto numa ampliação vertical SAMb ou SCMat/Met não é de ligeiro sobreaquecimento, mas a SCMat/Met beneficia mais a sensação de conforto térmico no piso subjacente a esta.

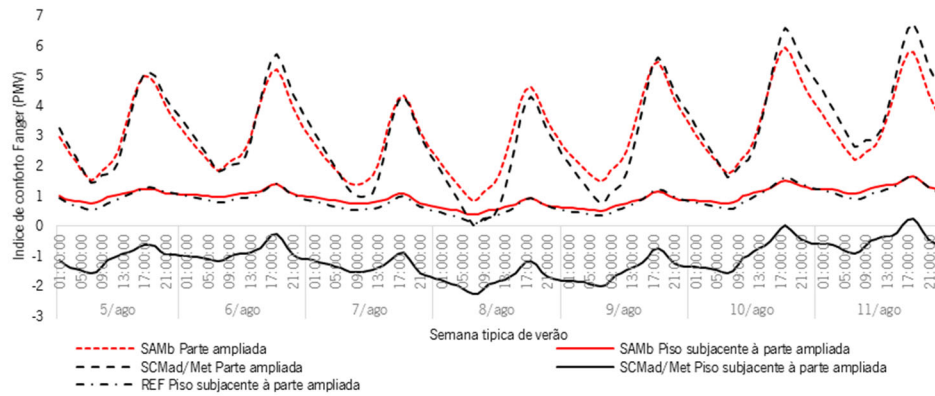


Figura 7.68. Variação da sensação de conforto térmico segundo o índice de Fanger (Predicted Mean Vote – PMV) – semana de verão.

(a) *Análise comparativa entre as soluções convencionais, a solução alternativa base e variantes a esta - com adição de massa térmica não convencional*

A ferramenta informática *Design Builder* fornece na sua base de dados alguns materiais com mudança de fase, inclusive o PCM selecionado para este estudo (BIOPCM™ M51/Q29); para incluir o efeito das propriedades de mudança de fase nas simulações numéricas é utilizado um método avançado com recurso a um algoritmo de diferença finita. Relativamente à simulação da solução com envolvente exterior vegetal, adota-se o método de cálculo da difusão da humidade avançado que também utiliza algoritmos de diferença finita para dividir o substrato/solo em nodes, de acordo com o modelo descrito em Schaap & Gebuchten (2006). As características da membrana vegetal consideradas no modelo simulado são as seguintes: altura máxima das plantas de 0,10m; índice de área de folhagem (LAI) de 2.7 (valor adimensional - intervalo ente 0.001 a 5.0 segundo YU (2006)); refletividade das folhas de 0.22 (num intervalo entre 0.1 a 0.4); emissividade das folhas de 0.95 (num intervalo entre 0.8 e 1.0 (1.0 = condições de um corpo negro)); resistência estomática mínima de 180 (num intervalo entre 50.0 a 300.0 e/m – transpiração das plantas); volume mínimo residual de humidade no solo de 0.01; volume máximo de humidade no solo de 0.5; volume de humidade inicial presente no solo de 0.15.

Em seguida, as Figuras 7.69 a 7.70 apresentam os resultados da simulação numérica do comportamento térmico dos modelos, para uma semana típica de inverno e de verão, adicionando a esta comparação as soluções SAMv1 (com adição de membrana PCM no teto), SAMv2 (com adição de membrana PCM no teto e paramento interior das paredes exteriores) e SAMv3 (com membrana PCM no teto e membrana vegetal na envolvente exterior) e considerando as mesmas condições da simulação anterior (para os modelos REF, SCMAAd/Met e SAMb).

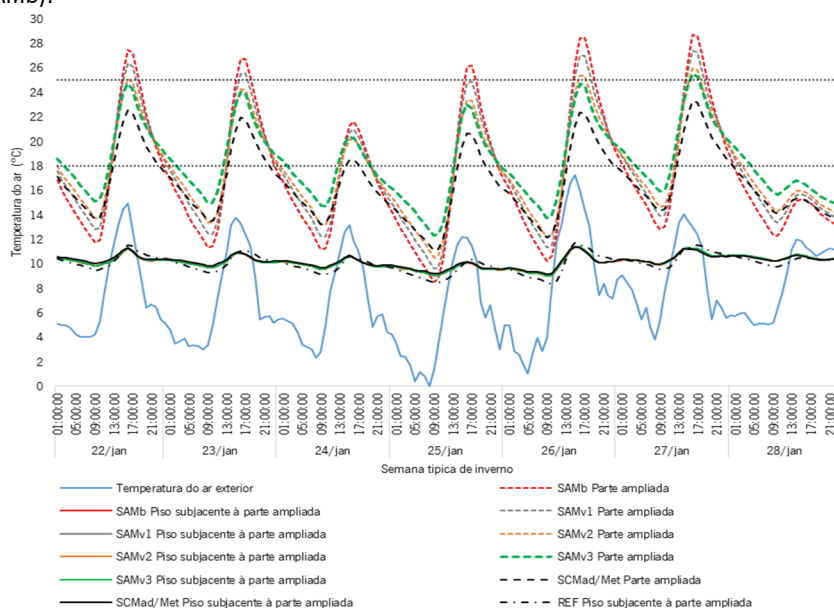


Figura 7.69. Variação da temperatura interior na parte ampliada e no piso subjacente numa semana típica de inverno.



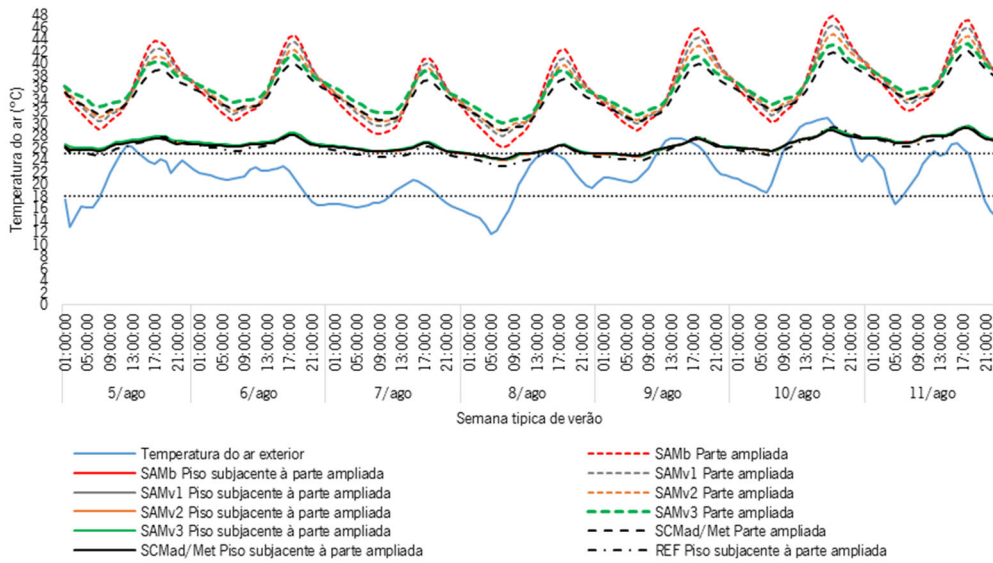


Figura 7.70. Variação da temperatura interior na parte ampliada e no piso subjacente numa semana típica de verão.

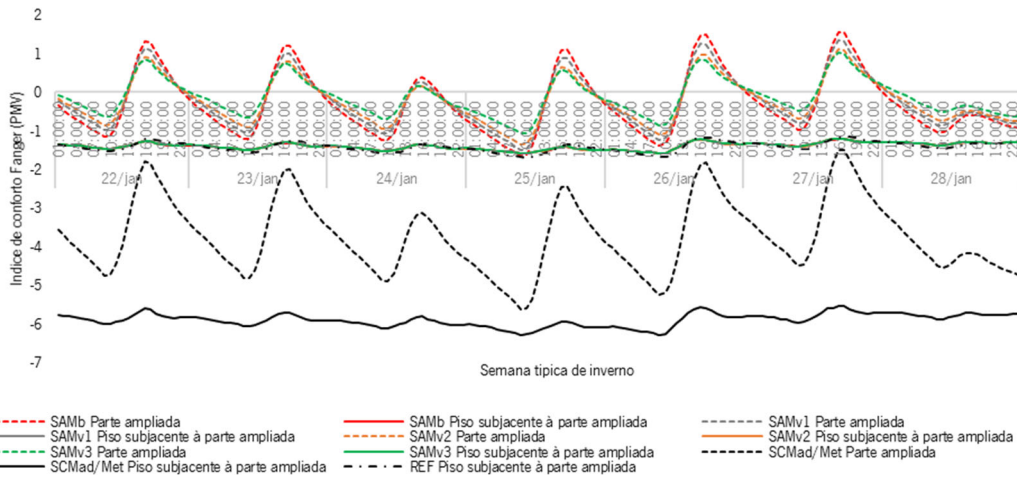


Figura 7.71. Variação da sensação de conforto térmico segundo o índice de Fanger (Predicted Mean Vote – PMV) – semana de inverno.

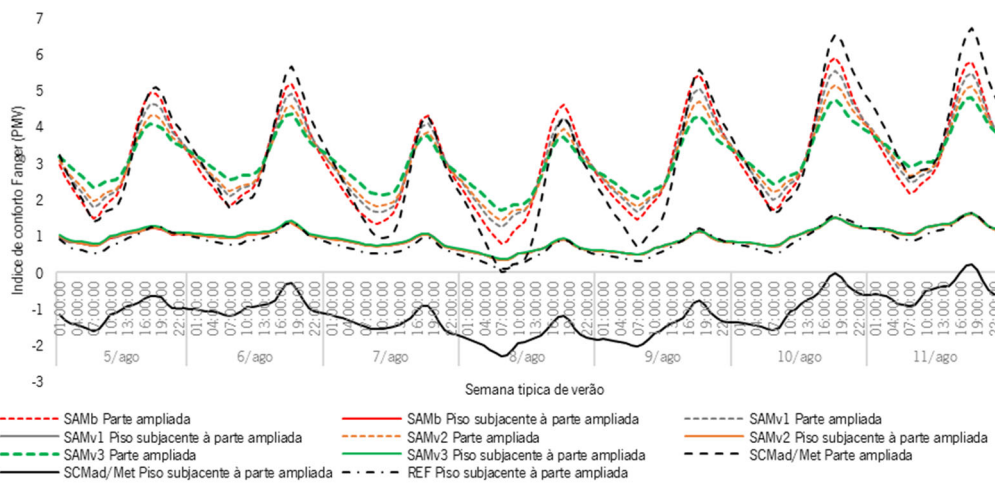


Figura 7.72. Variação da sensação de conforto térmico segundo o índice de Fanger (Predicted Mean Vote – PMV) – semana de verão.

As Tabelas 7.14 e 7.15 mostram a análise estatística do comportamento térmico e da sensação de conforto térmico dos modelos em estudo.

Tabela 7.14. Análise estatística da variação da temperatura durante uma semana típica de inverno e de verão.

Temperatura do ar exterior	Parte ampliada					Piso subjacente					REF base	
	SAMB	SAMv1	SAMv2	SAMv3	SCMad SCMet	SAMB	SAMv1	SAMv2	SAMv3	SCMad SCMet		
<b>Temperatura do ar</b>	<b>Semana típica de inverno (°C)</b>											
<b>Média diária</b>	<b>6.9</b>	<b>17.90</b>	<b>18.16</b>	<b>18.24</b>	<b>18.89</b>	<b>17.23</b>	<b>10.17</b>	<b>10.19</b>	<b>10.18</b>	<b>10.19</b>	<b>10.28</b>	<b>10.12</b>
Minima diária	3.00	11.31	12.41	13.34	14.96	13.46	9.67	9.70	9.67	9.68	9.81	9.24
Máxima diária	13.8	26.72	25.52	24.26	24.06	21.91	10.85	10.87	10.87	10.88	10.92	11.06
Dif. Max. e Min.	10.8	15.41	13.11	10.92	9.10	8.45	1.18	1.17	1.20	1.20	1.11	1.82
<b>n° horas 18 ≤ 25°C</b>	<b>0</b>	<b>43</b>	<b>53</b>	<b>62</b>	<b>75</b>	<b>48</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Ranking (1° melhor)</b>		<b>5ª</b>	<b>3ª</b>	<b>2ª</b>	<b>1ª</b>	<b>4ª</b>	*	*	*	*	*	*
<b>Temperatura do ar</b>	<b>Semana típica de verão (°C)</b>											
<b>Média diária</b>	<b>20.83</b>	<b>36.12</b>	<b>36.37</b>	<b>36.17</b>	<b>36.51</b>	<b>35.34</b>	<b>26.81</b>	<b>26.84</b>	<b>26.81</b>	<b>26.97</b>	<b>26.65</b>	<b>26.35</b>
Minima diária	16.46	30.37	31.54	32.09	33.43	32.25	26.17	26.19	26.17	26.34	26.07	25.38
Máxima diária	22.83	44.53	43.46	42.12	41.19	39.92	28.27	28.31	28.27	28.42	28.04	28.09
Dif. Max. e Min.	6.37	14.16	11.92	10.03	7.76	7.67	2.10	2.12	2.10	2.08	1.97	2.71
<b>n° horas 18 ≤ 25°C</b>	<b>95</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>24</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>50</b>
<b>Ranking (1° melhor)</b>		*	*	*	*	*	<b>3ª</b>	<b>3ª</b>	<b>3ª</b>	<b>3ª</b>	<b>2ª</b>	<b>1ª</b>

Nota: (\*) sem avaliação.

Tabela 7.15. Análise estatística da variação da sensação de conforto segundo Fanger (PMV) numa semana típica de inverno e de verão.

Índice de conforto	Parte ampliada					Piso subjacente					REF base
	SAMB	SAMv1	SAMv2	SAMv3	SCMad SCMet	SAMB	SAMv1	SAMv2	SAMv3	SCMad SCMet	
<b>Índice de conforto</b>	<b>Semana típica de inverno (Fanger PMV)</b>										
<b>Média diária</b>	-0.20	-0.16	-0.15	-0.05	-3.55	-1.42	-1.41	-1.41	-1.41	-5.90	-1.43
<b>n° horas &gt; 0 PMV</b>	53	55	53	59	0	0	0	0	0	0	0
<b>Ranking (1° melhor)</b>	<b>3ª</b>	<b>2ª</b>	<b>3ª</b>	<b>1ª</b>	<b>4ª</b>	<b>2ª</b>	<b>1ª</b>	<b>1ª</b>	<b>1ª</b>	<b>3ª</b>	<b>2ª</b>
<b>Índice de conforto</b>	<b>Semana típica de verão (Fanger PMV)</b>										
<b>Média diária</b>	3.18	3.23	3.19	3.26	3.34	1.07	1.07	1.07	1.11	-0.91	0.98
<b>n° horas 0 ≤ 2 PMV</b>	38	25	20	7	47	167	167	167	167	3	167
<b>Ranking (1° melhor)</b>	<b>2ª</b>	<b>3ª</b>	<b>4ª</b>	<b>5ª</b>	<b>1ª</b>	<b>2ª</b>	<b>3ª</b>	<b>3ª</b>	<b>3ª</b>	<b>1ª</b>	<b>2ª</b>

(b) Discussão dos resultados

Observa-se nas Figuras 7.69 e 7.71 e Tabelas 7.14 e 7.15 que, para uma semana típica de inverno, as variantes da solução alternativa com membrana base, são as que apresentam melhor comportamento térmico, destacando-se a SAMv3, mais regular, com menores variações de temperatura e uma maior sensação de conforto (apresentando o maior número de horas de conforto (18°C≤25°C)) na parte ampliada. Contudo, verifica-se que relativamente ao piso subjacente, todas as soluções apresentam comportamento térmico e sensação de conforto muito semelhante com exceção do piso subjacente à parte ampliada com SCMad/Met.

Observando as Figuras 7.70 e 7.72 e Tabelas 7.14 e 7.15 verifica-se que, numa semana típica de verão, todas as soluções em estudo se encontram em sobreaquecimento na parte ampliada, facto justificado por não se ter considerado a ventilação natural do espaço interior no modelo de simulação. No entanto, uma vez que, em média, a temperatura exterior máxima diária é de 23°C, pressupõem-se a adoção de uma estratégia passiva de arrefecimento – como a de ventilação natural – que na estação de verão ajudará a mitigar este problema para todas as soluções.

Comparando as soluções alternativas com a solução convencional, à luz dos resultados apresentados conclui-se o seguinte: (1) a solução SAMv3 apresenta melhor comportamento térmico na semana de inverno para a parte ampliada; (2) no verão, todas as soluções apresentam um comportamento muito semelhante, considerando que o problema de sobreaquecimento fica ultrapassado com a adoção de ventilação natural; (3) no geral, pode concluir-se que as soluções alternativas variantes com incremento da massa térmica apresentam um comportamento térmico mais estável, com menores oscilações do que a SAMb; (4) em síntese, todas as soluções de ampliação vertical em análise não prejudicam nem melhoram significativamente a sensação de conforto e o comportamento térmico do edifício em estudo, considerando a avaliação do comportamento no piso subjacente à parte ampliada, apresentando um desempenho semelhante. O gráfico da Figura 7.74 mostra o balanço térmico anual do edifício para as várias soluções em estudo através dos seus elementos construtivos. Em particular, permite concluir que as intervenções de ampliação vertical em estudo beneficiam o edifício REF, pois verificam-se ganhos térmicos nos pisos subjacentes através dos tetos. Para além disso, observa-se que as



maiores perdas de energia ocorrem pela envolvente exterior, sobretudo nas paredes. Verifica-se que existe um impacto positivo da incorporação de PCMs e membrana vegetal no consumo energético, que é maior na SAMv3 do que na SAMb; verifica-se que nas variantes SAMv1, SAMv2 e SAMv3, as temperaturas superficiais interiores das paredes são menores, conduzindo à redução de perdas de calor através das paredes exteriores (Figura 7.73).

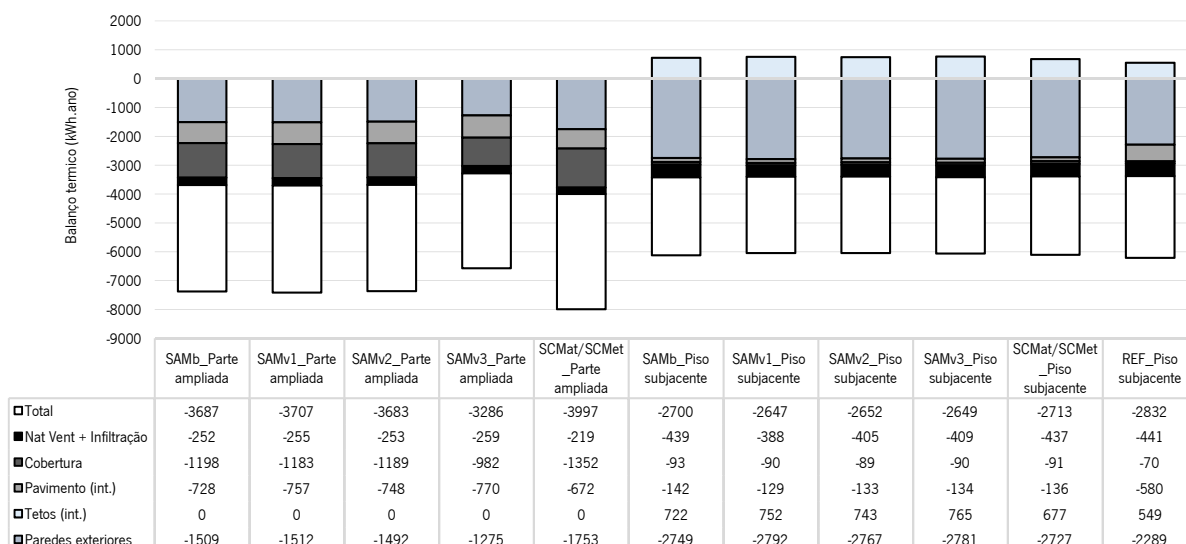


Figura 7.73. Balanço térmico anual das várias soluções de ampliação e do edifício no estado original através dos elementos construtivos e da infiltração de ar.

Efetou-se o cálculo da quantidade de energia necessária para arrefecimento (não ultrapassando 25°C) e aquecimento (não descendo abaixo de 18°C), com um sistema de climatização através de ar condicionado (especificado na Tabela 7.11), para o edifício no estado original e com as várias soluções de ampliação vertical em estudo. Observando os resultados do desempenho energético na Figura 7.75 e Tabela 7.16, verifica-se que: (1) o consumo anual do edifício SAMv1 é o que mais diminui, 65% face ao consumo do edifício REFc/ST, e 42% face ao edifício com SCMad/Met, sobretudo devido à diminuição do consumo para aquecimento em 96%; (2) entre todas as soluções em análise, as alternativas SAMv1, SAMv2 e SAMv3 são as que apresentam menor consumo na parte ampliada (-82% do que a REFc/ST e -26% do que a SAMb, SCMad/Met) e o menor consumo no piso subjacente (-11% comparativamente a REFc/ST e -53% do que a SAMb e SCMad/Met).

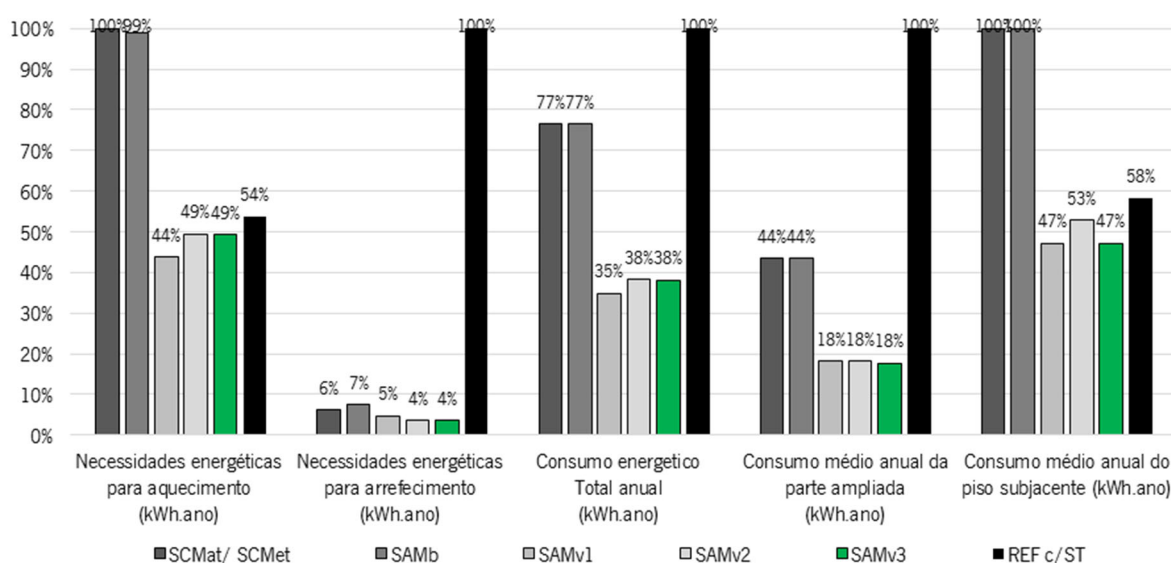


Figura 7.74. Consumo energético das soluções de ampliação vertical comparado entre si e com o consumo energético do edifício REFc/ST.

Numa visão global e comparada das várias soluções de ampliação em estudo, a SAMv1 (com adição de membrana PCM no teto) é a melhor em termos energéticos e de conforto térmico (Figura 7.74). Chama-se à atenção que no gráfico da Figura 7.74 e 7.75 não se incluem os resultados da parte ampliada com a solução REFbase por esta não apresentar a mesma área útil das restantes soluções, aparecendo apenas na Tabela 7.16 como referência para comparar o comportamento no piso subjacente antes da intervenção de ampliação vertical com SCMs ou SAMs. De qualquer forma, a área útil da parte ampliada REFc/ST é tão reduzida, comparativamente à área útil das soluções SCMs e SAMs, que se pode considerar como uma cobertura com desvão ocupado.

Tabela 7.16. Síntese dos resultados da simulação do consumo energético operacional do edifício com as soluções em estudo.

Ampliações verticais:	Parâmetro (Unidade)						Ranking (1º melhor)
	Necessidades energéticas para aquecimento (kWh.ano)	Necessidades energéticas para arrefecimento (kWh.ano)	Consumo energético Total anual (kWh.ano)	Consumo energético por Área total do edifício (kWh/m².ano)	Consumo médio anual da Área útil ampliada (kWh/m².ano)	Consumo médio anual da Área útil do piso subjacente (kWh/m².ano)	
REFbase	14480	22427	36907	145	-	93	-
REF c/ ST	17480	27227	44707	138	170	63	5º
SCMad/Met	32574	1662	34236	105	74	108	4º
SAMb	32200	2040	34240	105	74	108	4º
SAMv1	14279	1283	15561	48	31	51	1º
SAMv2	16106	1000	17107	53	31	57	3º
SAMv3	16070	959	17029	52	30	51	2º

Nota: \* Número de horas calculado segundo o índice da sensação de conforto de Fanger (PMV) para uma semana típica de inverno e de verão.

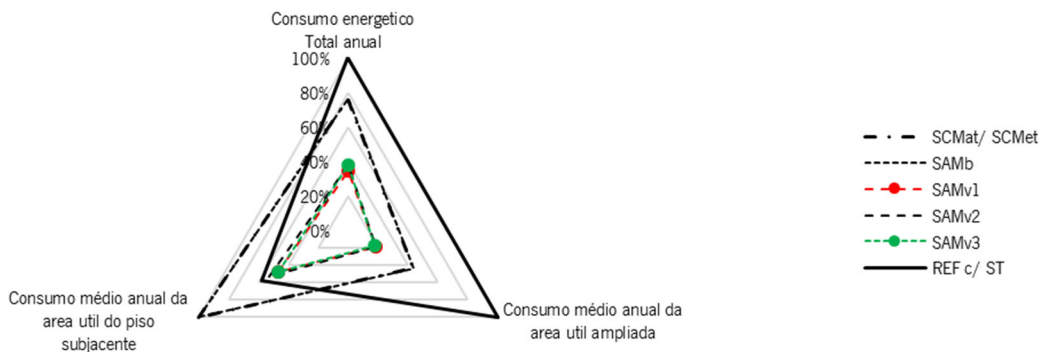


Figura 7.75. Comparação dos aspectos Termo energéticos entre as soluções convencionais e alternativas em análise para ampliação vertical (valores em percentagem). Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área.

#### • Avaliação do consumo energético em diferentes zonas climáticas

No sentido de promover edifícios cada vez mais eficientes, é importante conhecer o meio ambiente em que se inserem de forma a retirar o maior partido dele, nomeadamente diminuir o recurso aos sistemas ativos de climatização. O zonamento climático de Portugal baseia-se na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III, cuja composição é feita por municípios (Decreto n.º 15793-F/2013). Adicionalmente, são definidas três zonas climáticas de inverno (I1, I2, I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2, V3) para aplicação de requisitos de qualidade térmica da envolvente, como se pode observar na Figura 7.76. As zonas climáticas de inverno são definidas tendo em conta o número de graus-dias (GD) na base de 18°C, correspondente à estação de aquecimento, conforme a Tabela 7.17. O grau de severidade da estação de inverno é diretamente proporcional ao valor de graus-dias, ou seja locais com número de graus-dias superiores a 1800°C.dias, terão um inverno bastante mais rigoroso que locais com valores de graus-dias inferiores a 1300°C.dias. As zonas climáticas de verão são definidas a partir da temperatura média exterior correspondente à estação convencional de arrefecimento (T<sub>me, v</sub>), conforme a Tabela 7.18. Na estação de arrefecimento, o grau de severidade é diretamente proporcional à temperatura média exterior, correspondendo os locais com temperaturas superiores a 22°C a zonas com verões mais rigorosos, quando comparados com locais onde a temperatura exterior média é inferior a 20°C.

Através do *software DesignBuilder* (2016) foi possível utilizar um modelo de simulação paramétrico para o edifício em estudo, fazendo apenas variar a solução construtiva de reabilitação e a zona climática em que este se insere, recorrendo a sistemas de climatização ativos (ar condicionado), e não considerando os efeitos da ocupação, iluminação, ventilação e equipamentos nos ganhos internos. Para tal, realizaram-se simulações numéricas com as mesmas características do modelo descrito em 7.8.3, apenas alterando os dados climáticos para comparar o potencial de reabilitar edifícios com este tipo de soluções construtivas noutras zonas climáticas nacionais. Utilizaram-se os dados meteorológicos disponíveis em LNEG (2017) das seguintes cidades nacionais: Porto (caso de estudo); Funchal (cenário ilha - pertence à R.A. da Madeira onde se verifica a maior percentagem de intervenções de reabilitação com ampliação no território nacional (INE, 2016); Guimarães (cenário intermédio); Bragança, Faro e Montalegre (cenários extremos). A Tabela 7.19 apresenta em detalhe os parâmetros climáticos associados a estas cidades.

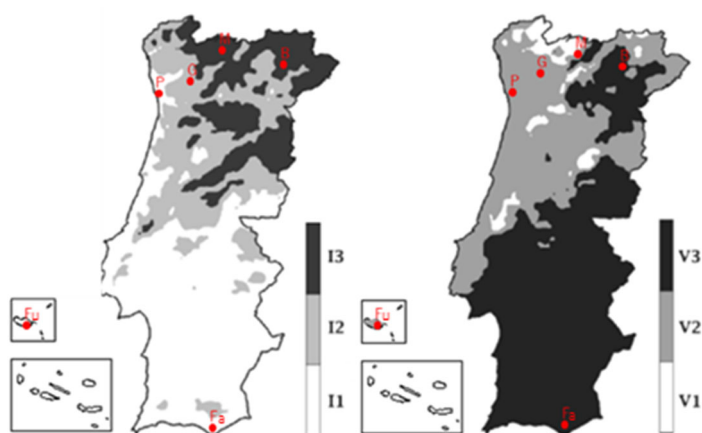


Tabela 7.17. Definição da zona climática de inverno.

Critério	GD ≤ 1300	1300 < GD ≤ 1800	GD > 1800
Zona	I1	I2	I3

Tabela 7.18. Definição da zona climática de verão

Critério	Tme, v ≤ 20°C	20°C < Tme, v ≤ 22°C	Tme, v > 22°C
Zona	V1	V2	V3

Figura 7.76. Zonas climáticas de Portugal para a estação de inverno e de verão (Despacho n.º 15793-F/2013) com cidades em estudo assinaladas.

Tabela 7.19. Parâmetros climáticos de referência para simulação dinâmica das cidades em estudo; informação disponível através de aplicação informática do LNEG (2017) de acordo com o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios (DI 118/2013 de 20 agosto).

Designação dos cenários	Caso de estudo	Cenário ilhas	Cenário intermédio	Cenários extremos		
	Porto	Funchal	Guimarães	Bragança	Montalegre	Faro
<b>Parâmetros climáticos</b>						
Altitude	86	35	196	900	948	145
Zona climática de inverno	I1	I1	I2	I3	I3	I1
Dias de aquecimento (°C dias)	1250	818	1653	2015	2015	987
Período de aquecimento convencional (meses)	7.3	3.2	7.2	7.3	7.3	4.8
Zona climática de verão	V2	V2	V2	V3	V2	V3
Temperatura média do ar exterior no inverno (°C)	9.9	14.8	7.8	5.5	5.5	11.3
Temperatura média do ar exterior no verão (°C)	20.9	20.2	20.8	21.5	21.5	23.1
Amplitude térmica diária média (°C)* verão	10.1	6.4	11.8	15.2	11.3	10.6
Amplitude térmica diária média (°C)** inverno	8.1	5.7	7.8	7.6	6.5	8.2

Notas: \* Diferença entre a temperatura mínima e máxima média diária para o mês mais quente da estação de arrefecimento. \*\* Diferença entre a temperatura mínima e máxima média diária para o mês mais quente da estação de aquecimento.

### (a) Resultados

Os principais objetivos do estudo realizado neste ponto são: (i) explorar a validade de adotar uma única solução alternativa em membrana que possa ser aplicada em todos os edifícios residenciais nacionais; (ii) avaliar o impacto das soluções alternativas na redução de consumo energético do edifício após a intervenção de reabilitação, comparativamente às soluções convencionais.

A Tabela 7.20 e Figura 7.77 apresenta os resultados de consumo energético do edifício para os seguintes cenários, doravante designados por: cenário extremo 1 (Bragança); cenário extremo 2 (Montalegre); cenário extremo 3 (Faro); cenário intermédio (Guimarães); cenário Ilhas (Funchal); caso de estudo (Porto).

Tabela 7.20. Necessidades energéticas anuais do edifício REF c/diferentes soluções de ampliação e em cenários climáticos distintos.

(Valores em kWh)		REF c/ST	SCMad/Met	SAMb	SAMv1	SAMv2	SAMv3
CENÁRIO EXTREMO 1 - BRAGANCA	Necessidade de aquecimento	31857	49863	28325	29135	29293	29228
	Necessidade de arrefecimento	41233	2571	4619	2074	2075	1953
	<b>Consumo energético Total</b>	<b>73090</b>	<b>52434</b>	<b>32944</b>	<b>31208</b>	<b>31367</b>	<b>31181</b>
CENÁRIO EXTREMO 2 - MONTALEGRE	Necessidade de aquecimento	27466	43705	24729	25453	25448	25390
	Necessidade de arrefecimento	34135	3244	3912	2141	2127	2091
	<b>Consumo energético Total</b>	<b>61600</b>	<b>46949</b>	<b>28641</b>	<b>27594</b>	<b>27575</b>	<b>27480</b>
CENÁRIO EXTREMO 3 - FARO	Necessidade de aquecimento	7692	16656	6977	7020	6975	6949
	Necessidade de arrefecimento	15670	4120	2572	2563	2556	2552
	<b>Consumo energético Total</b>	<b>23362</b>	<b>20776</b>	<b>9549</b>	<b>9583</b>	<b>9531</b>	<b>9501</b>
CENÁRIO INTERMEDIO - GUIMARAES	Necessidade de aquecimento	18744	32745	16927	17344	17309	17260
	Necessidade de arrefecimento	25359	3084	3021	1957	1946	1920
	<b>Consumo energético Total</b>	<b>44104</b>	<b>35828</b>	<b>19948</b>	<b>19301</b>	<b>19255</b>	<b>19180</b>
CASO DE ESTUDO - PORTO	Necessidade de aquecimento	17480	32574	32200	14279	16106	16070
	Necessidade de arrefecimento	27227	1662	2036	1282	1001	959
	<b>Consumo energético Total</b>	<b>44707</b>	<b>34236</b>	<b>34236</b>	<b>15561</b>	<b>17107</b>	<b>17029</b>
CENÁRIO ILHAS - FUNCHAL	<b>Necessidade de aquecimento</b>	4273	13160	3906	3981	3938	3925
	<b>Necessidade de arrefecimento</b>	11174	1573	1023	835	831	820
	<b>Consumo energético Total</b>	<b>15447</b>	<b>14733</b>	<b>4929</b>	<b>4815</b>	<b>4769</b>	<b>4745</b>

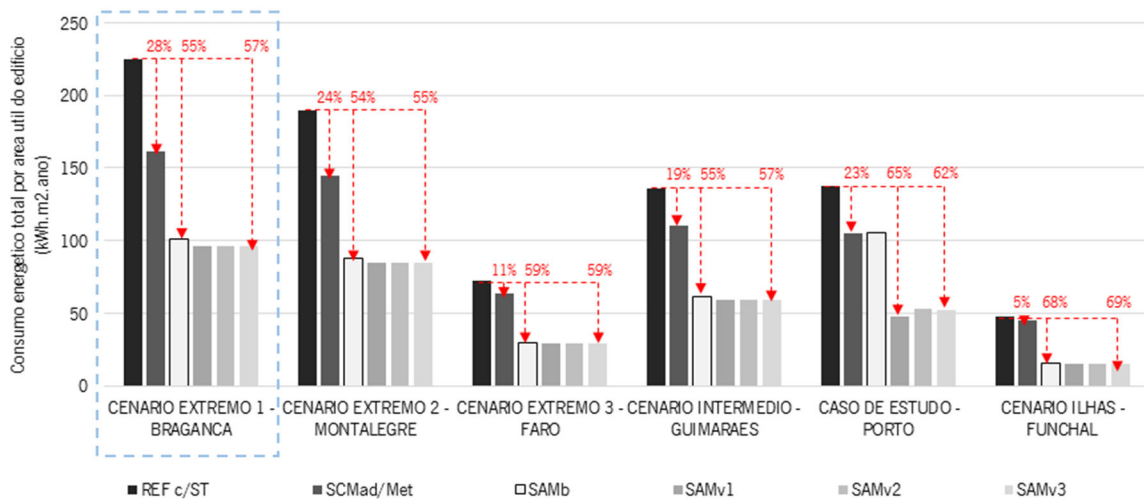


Figura 7.77. Consumo energético anual por área útil para o edifício com as diferentes soluções de ampliação vertical, localizado em diferentes zonas climáticas nacionais.

(b) Discussão de resultados

Verificou-se nos resultados anteriores que as soluções alternativas com massa térmica não convencional são sensíveis às variações climáticas e não é recomendado assumir pressupostos generalistas com base na zona climática onde se insere o edifício tomado como caso de estudo – a cidade do Porto. Por isso, cada caso deve ser estudado para avaliar a oportunidade de usar as diferentes soluções construtivas, em especial as alternativas propostas, de modo a avaliar a sua eficiência em termos de desempenho energético.

No geral, para além das soluções alternativas apresentarem os menores consumos energéticos, verifica-se ainda que o edifício REF, com e sem intervenção, apresenta menores consumos energéticos nas zonas climáticas representadas por Faro e Funchal e maiores consumos nas zonas climáticas representadas por Montalegre e Bragança (Figura 7.78). Observando a Figura 7.78, verifica-se no geral que, relativamente ao edifício REF, é nas zonas climáticas de maior consumo energético que existem maiores percentagens de redução de consumo energético após a intervenção de ampliação (entre 24% para a SCMad/Met e 57% para o edifício com SAMv3). Contudo, as soluções alternativas apresentam maiores reduções nos cenários com menores consumos energéticos. Em particular, verifica-se que, maioritariamente, é a SAMv3 que apresenta as maiores reduções de consumo energético para todas as zonas climáticas, em particular no caso de estudo (Porto) e no cenário ilhas. No geral, apesar de apresentar umas reduções muito próximas da SAMv3, no caso de estudo (Porto) a SAMv1 é a que apresenta maior redução de consumo (65%). Neste caso, em termos de poupança efetiva, em números absolutos, com a SAMv1 o consumo de energia é 18675kW/h e 1468kW/h menos do que com SCMad/Met e SAMv3 (pior entre as alternativas em membrana) respetivamente (ver Tabela 7.20).

O consumo de energia operacional (para aquecimento e arrefecimento) é mais elevado nas zonas climáticas extremas, seguido aproximadamente das zonas intermédias onde se insere o caso de estudo, sendo mais reduzido na zona climática do cenário ilhas (Figura 7.78) e cenário extremo 3. Numa zona climática extrema fria (cenários extremos 1 e 2), o consumo energético médio anual (para aquecimento e arrefecimento) é de 39340kWh, que corresponde a 26% da energia total comparativamente às restantes zonas climáticas em estudo (Figura 7.78).

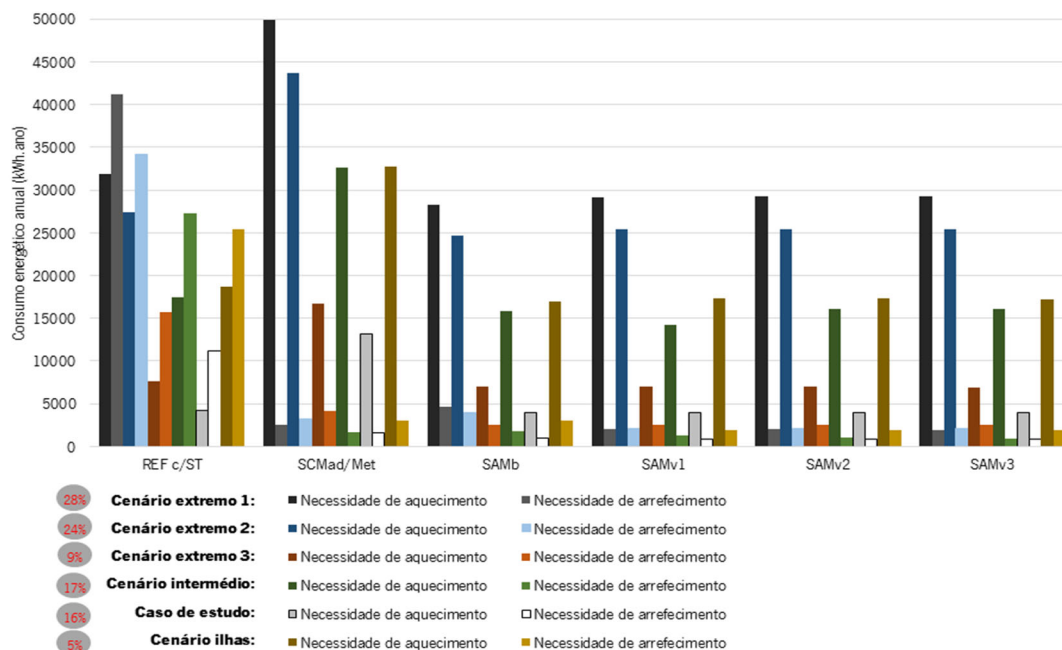


Figura 7.78. Necessidades de aquecimento e arrefecimento das soluções de ampliação vertical em diferentes zonas climáticas.

Para determinar o impacto de diferentes fontes de energia operacional, realizou-se uma análise detalhada incluindo o consumo energético para aquecimento e arrefecimento. Esta análise indica que em todas as zonas climáticas a maioria do consumo operacional, 73%, é produzido para aquecimento do edifício e só 27% para arrefecimento (Figura 7.79). Em detalhe, comparando o edifício, com e sem intervenção (Figura 7.79): (1) o edifício REFc/ST é o que apresenta a maior percentagem de consumo para arrefecimento (58% em média), sobretudo no cenário extremo 3, e as menores percentagens com energia para aquecimento e arrefecimento em todos os cenários climáticos; (2) o edifício com SCMad/Met é o que apresenta maiores percentagens de consumo para aquecimento (91% em média); (3) o edifício com qualquer solução alternativa variante de membrana é o que apresenta menor percentagem de consumo energético para arrefecimento e para aquecimento.

Atendendo ao facto do presente estudo se centrar em intervenções de ampliação vertical, esta análise torna-se particularmente relevante no caso da R.A. da Madeira, enquanto ilha, devido à limitada existência de recursos e de área de terreno disponível para construção de novos edifícios. Deste modo, focando a atenção no cenário ilhas, verifica-se que esta zona climática (mais quente) é favorável à adoção das soluções construtivas leves, em particular da SAMv3 (Figura 7.78 e 7.84). No geral, o consumo de energia operacional numa zona climática temperada/quente, como a de Faro e do Funchal, corresponde a 5 a 9% da energia total, comparativamente às restantes zonas climáticas em estudo (Figura 7.78). A maior parte deste consumo corresponde a necessidades de arrefecimento (64 a 67%) e o consumo de energia para arrefecimento (cerca de 18%) duplica relativamente às restantes zonas climáticas (Figura 7.79).

Analisando em detalhe, verifica-se que a realização das intervenções de reabilitação em estudo beneficia o edifício existente, observando-se a redução de consumo energético do piso subjacente e do consumo total do edifício (Figura 7.80). Em particular, a SAMb é a que apresenta maiores reduções de consumo para a maioria das zonas climáticas (entre 19 a 25%). Contudo, é a SAMv1 que apresenta a maior redução efetiva (83%) para o cenário extremo 1 (Bragança). De qualquer modo, as restantes soluções alternativas variantes apresentam

reduções muito próximas, tanto para o piso subjacente como da parte ampliada, mesmo quando comparadas com a solução convencional.

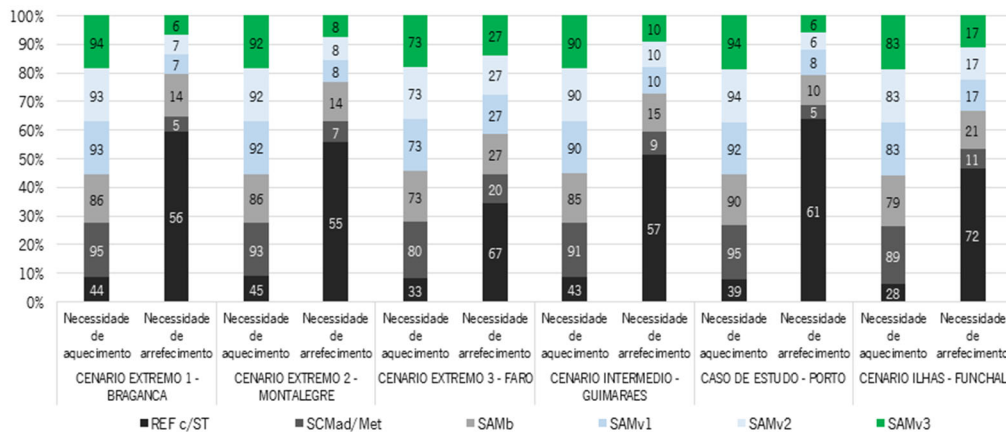


Figura 7.79. Percentagem de consumo energético para aquecimento e arrefecimento.

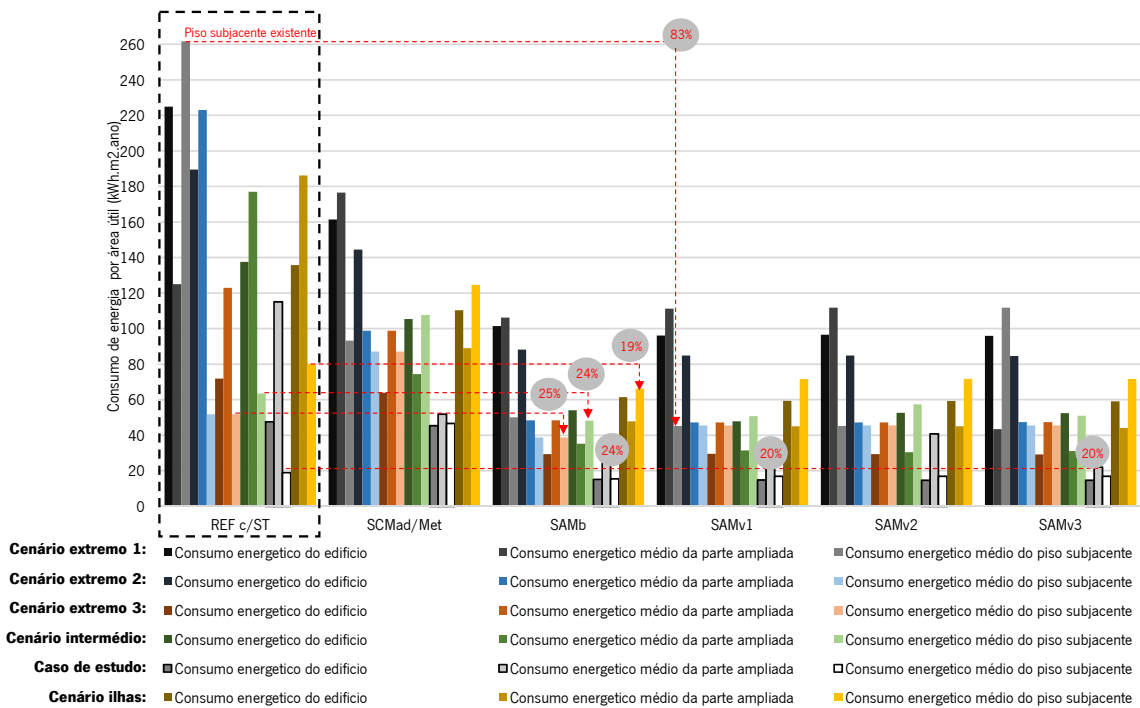


Figura 7.80. Consumo energético da parte ampliada e do piso subjacente com as várias soluções construtivas e em vários cenários climáticos.

Conclui-se assim que a implementação de soluções com massa térmica não convencional, em especial a SAMv3, favorece a redução do consumo energético entre 57% (cenário ilhas) a 69% (cenário ilhas), relativamente ao edifício REFc/ST e as necessidades de aquecimento entre 5% a 10% (em média e, comparativamente à SCMad/Met) de forma transversal a todos os cenários climáticos.

#### 7.8.4. Avaliação do impacto ambiental no ciclo de vida

##### • Definição do objetivo e enquadramento

O enquadramento para esta avaliação é o mesmo que se encontra presente na secção 6.5.4 do Capítulo 6 da presente tese. Esta análise tem como propósito comparar o perfil de impacto ambiental das várias soluções construtivas descritas anteriormente para uma intervenção de ampliação vertical: 3 soluções construtivas de referência (1 tradicional e 2 convencionais) com 3 soluções construtivas alternativas em membrana, quando aplicadas num edifício existente e com vida útil estimada de 60 anos. O sistema de fronteira da avaliação é do



berço ao portão até à disposição final do produto (fim de vida) (ver Tabela 6.22). A unidade funcional utilizada é o kg. Na Tabela 7.21 apresentam-se os pressupostos e limitações consideradas na presente avaliação.

Tabela 7.21. Síntese da definição do enquadramento da análise ACV em estudo.

<b>Unidade funcional</b>	1 kg de material
<b>Fronteira do sistema</b>	"Do berço ao portão com opções", de acordo com a Tabela 6.22 do capítulo 6
<b>Pressupostos e limitações</b>	Os impactos ambientais associados ao transporte foram obtidos com base no peso dos materiais, negligenciando o seu volume.
<b>Vida útil dos materiais de construção</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Telhas cerâmicas – 60 anos (com manutenção periódica decenal);</li> <li>• Gesso cartonado – 30 anos;</li> <li>• Pintura – 10 anos;</li> <li>• Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE – 30 anos (terá de ser substituída uma vez);</li> <li>• Membrana Vegetal – 30 anos (com manutenção anual).</li> </ul>

• **Inventário**

As Tabelas 7.22 a 7.25<sup>16</sup> apresentam o inventário de materiais, com os respetivos pesos e impacto ambiental, desde a etapa A1 à B6, para cada solução construtiva em análise.

Tabela 7.22. Inventário de materiais para ACV do piso recuado com solução construtiva tradicional (ST) - etapa de produção (A1 -A3) e etapa de utilização (B2, B4 e B6) (vida útil de 60 anos).

Descrição dos componentes (exterior para o interior)		Peso total (kg)	Peso próprio (kg/m²)	PAG total kgCO <sub>2</sub> e	EI total MJ	EO total durante 60 anos MJ
ENVOLVENTE VERTICAL (área de 75 m²)	Chapa em aço galvanizado, ondulada e lacada	422	5.63	857.17	12034.13	<b>2211486 MJ</b> (614302 kWh)
	Fasquiado de madeira de pinho	137	1.82	42.32	1365.00	
	Argamassa de cal e areia	2400	32.00	312.00	8400.00	
	Estuque tradicional de gesso	1500	20.00	195.00	2700.00	
	<b>Revestimento da parede exterior</b>	<b>4459</b>	<b>59.45</b>	<b>1406.48</b>	<b>24499.13</b>	
	<b>Estrutura em madeira de pinho</b>	<b>1238</b>	<b>16.51</b>	<b>383.74</b>	<b>12378.75</b>	
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>5697</b>	<b>75.96</b>	<b>1790.22</b>	<b>36877.88</b>		
COBERTURA (área de 150 m²)	Telha cerâmica	6938	46.25	3330.00	29831.25	
	30 Perfis de madeira de pinho com secção 0,05 x 0,05m (C=13m)	488	9.75	151.13	4875.00	
	Desvão (caixa de ar)	0.00	0.00	0.00	0.00	
	22 Perfis de madeira de pinho com secção de 0,05m x 0,05m (C=7m)	193	1.28	59.68	1925.00	
	Tabuado de madeira de pinho (30 m²)	2250	15.00	697.50	22500.00	
	<b>Revestimento da cobertura</b>	<b>9868</b>	<b>65.78</b>	<b>4238.30</b>	<b>59131.25</b>	
<b>Estrutura em madeira de pinho</b>	<b>2051</b>	<b>13.67</b>	<b>635.66</b>	<b>20505.00</b>		
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>11918</b>	<b>79.45</b>	<b>4873.96</b>	<b>79636.25</b>		
<b>TOTAL</b>	<b>Piso recuado + cobertura (área bruta de 90m²)</b>	<b>17615</b>	<b>195.72</b>	<b>6664.18</b>	<b>79636.25</b>	
LAJE DE PAVIMENTO/ ESTEIRA (90 m²)	Soalho em madeira de pinho	1350	15.00	418.50	13500.00	
	Caixa-de-ar	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Fasquiado de madeira de pinho	164	1.82	50.78	1638.00	
	Argamassa de cal e areia	2880	32.00	374.40	10080.00	
	Estuque tradicional de gesso	1800	20.00	234.00	3240.00	
	<b>Revestimento</b>	<b>6194</b>	<b>68.82</b>	<b>1077.68</b>	<b>28458.00</b>	
<b>Estrutura em madeira de pinho</b>	<b>7538</b>	<b>83.76</b>	<b>2336.89</b>	<b>75383.55</b>		
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>13732</b>	<b>152.58</b>	<b>3414.57</b>	<b>103841.55</b>		
<b>TOTAL</b>	<b>Piso recuado + cobertura+ laje pav.(área bruta de 90m²)</b>	<b>25650</b>	<b>285.00</b>	<b>10078.75</b>	<b>220355.68</b>	

Nota: a) PAG (Potencial de Aquecimento Global); b) EI (Energia Incorporada na fase de construção e manutenção); c) EO (Energia Operacional – para aquecimento e arrefecimento apenas da área útil do piso recuado).

Tabela 7.23. Inventário de materiais para ACV da ampliação vertical SCMad - etapa de produção (A1 -A3) e etapa de utilização (B2, B4 e B6) (tempo de vida útil de 60 anos).

Descrição dos componentes (exterior para o interior)		Peso Total (kg)	Peso Próprio (kg/m²)	PAG Total kgCO <sub>2</sub> e	EI Total MJ	EO total durante 60 anos MJ
ENVOLVENTE VERTICAL EXT. (área de 77 m²)	Chapa em aço galvanizado, ondulada e lacada	1811	23.55	3675.36	51599.93	<b>485322 MJ</b> (134812 kWh)
	Placas de poliestireno extrudido (XPS)	138	1.80	473.27	12094.76	
	Membrana impermeável à água mas permeável ao vapor de água (PP)	12	0.15	39.55	1143.97	
	Painel de aglomerado de partículas de madeira (OSB), hidrófugo	999	13.00	989.45	14991.60	
	Manta de lã de rocha	431	5.60	482.19	7232.87	
	Painel de gesso cartonado hidrófugo	1682	21.88	655.88	11351.81	
	Tinta à base de água para superfícies interiores vertical ext. e cobertura	228	0.50	578.66	13441.38	
	<b>Total do revestimento</b>	<b>5300</b>	<b>66.48</b>	<b>6894.37</b>	<b>111856.33</b>	
	<b>Estrutura em madeira de pinho</b>	<b>1269</b>	<b>16.51</b>	<b>393.38</b>	<b>12689.60</b>	
	<b>SUB-TOTAL (área de 77m²)</b>	<b>6569</b>	<b>85.44</b>	<b>7287.75</b>	<b>124545.93</b>	

<sup>16</sup> A Energia Incorporada (EI) e o Potencial de Aquecimento Global (PAG<sup>16</sup>) presentes nestas tabelas foram calculados com base no seguinte: base de dados da ferramenta informática One Click LCA © (2015) versão 7.3; DAPs de cada material; Berge (1999); Mendonça (2005), Hammond & Jones (2008) - Bath ICE; Monticelli & Zanelli (2016). Para determinar a Energia Operacional (EO) associada utilizou-se a ferramenta de simulação energética *Design Builder* (v.5.0.3), conforme descrito anteriormente; os resultados da EI operacional a 60 anos incluem apenas o consumo de energia dos equipamentos de climatização e excluem o consumo com a iluminação artificial.

COBERTURA (área de 75m²)	Telha cerâmica	3469	46.25	1665.00	22546.88
	16 Perfis PVC com seção 0,03 x 0,03m (C= 13m)	53	0.70	173.25	4992.75
	Membrana impermeável à água mas permeável ao vapor de água (PP)	11	0.15	38.59	1116.00
	Placa de aglomerado de partículas de madeira (OSB), hidrófugo	975	13.00	965.25	14625.00
	Placas de poliestireno extrudido (XPS)	135	1.80	461.70	11799.00
	Painel de aglomerado de partículas de madeira (OSB), hidrófugo	488	6.50	482.63	7312.50
	Caixa-de-ar	0	0.00	0.00	0.00
	Manta de lã de rocha	210	2.80	235.20	3528.00
	Placa de gesso cartonado hidrófugo	853	11.38	332.72	5758.59
	<b>Total do revestimento</b>	<b>6193</b>	<b>82.58</b>	<b>4354.33</b>	<b>71678.72</b>
<b>Estrutura em madeira de pinho</b>	<b>1025</b>	<b>13.67</b>	<b>738.14</b>	<b>10252.00</b>	
<b>SUB- TOTAL (área de 75m²)</b>	<b>7218</b>	<b>96.24</b>	<b>5092.48</b>	<b>81930.72</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>Piso recuado (área bruta de 67m²)</b>	<b>13787</b>	<b>205.78</b>	<b>12380.23</b>	<b>206476.65</b>
NOVA LAJE DE PAVIMENTO (94m²)	Soalho de madeira de pinho maciça	838	12.50	603.00	8375.00
	Granulado de cortiça	101	1.50	19.10	402.00
	Membrana de polietileno para redução do ruído de impacto	9	0.14	17.46	706.41.00
	Painel OSB	978	10.40	967.82	14664.00
	Caixa-de-ar (formada pelas vigas de madeira)	132	1.40	0.00	0.00
	Painel OSB	978	10.40	967.82	14664.00
	Caixa-de-ar	0	0.00	0.00	0.00
	Manta de lã de rocha	263	2.80	294.78	4421.76
	Placa de gesso cartonado	1069	11.38	417.01	7217.44
	<b>Total do revestimento</b>	<b>4366</b>	<b>50.51</b>	<b>3286.99</b>	<b>50450.61</b>
<b>Estrutura metálica</b>	<b>622</b>	<b>6.61</b>	<b>1883.87</b>	<b>19217.98</b>	
<b>Estrutura em madeira lamelada</b>	<b>9255</b>	<b>98.46</b>	<b>8052.00</b>	<b>111617.33</b>	
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>9877</b>	<b>105.07</b>	<b>9935.87</b>	<b>130835.31</b>	
BORDADURA BETÃO (área de 27m²)	Viga de coroamento em betão armado (C=44m, L=0,8m)	15525	575.00	3415.50	46575.00
	Pavimento exterior em madeira de pinho	270	10.00	194.40	2700.00
	Caixa-de-ar	0	0	0.00	0.00
	Membrana betuminosa impermeabilizante	113	4.20	51.03	5783.4
	Camada de formação de pendente em betão leve	1296	48.00	285.12	1684.8
	Betão leve	6048	224.00	1330.56	7862.4
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>23252</b>	<b>861.20</b>	<b>1861.11</b>	<b>64605.6</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>Nova laje + bordadura (67m²)</b>	<b>37496</b>	<b>559.64</b>	<b>15083.97</b>	<b>245891.52</b>
<b>TOTAL</b>	<b>Piso recuado + nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>51283</b>	<b>545.56</b>	<b>27464.20</b>	<b>452368.17</b>

Nota: a) PAG (Potencial de Aquecimento Global); b) EI (Energia Incorporada na fase de construção e manutenção); c) EO (Energia Operacional – para aquecimento e arrefecimento apenas da área útil do piso recuado).

Tabela 7.24. Inventário de materiais para ACV da ampliação vertical com solução construtiva convencional com estrutura metálica (SCMet) - etapa de produção (A1 -A3) e etapa de utilização (B2, B4 e B6).

Nota: esta solução apresenta os mesmos componentes que a solução anterior, exceto os que são apresentados na tabela.

Descrição dos componentes		Peso Total (kg)	Peso Próprio (kg/m²)	PAG Total (kgCO <sub>2</sub> e)	EI Total (MJ)	EO total durante 60 anos (MJ)
ENVOLVE NTE VERTICAL	<b>Total do revestimento</b>	5300	66.48	6894.37	111856.33	<b>485322 MJ</b> (134812 kWh)
	<b>Estrutura em aço leve classe S 280 GD zincagem Z275</b>	1556	20.24	3158.68	44346.00	
	<b>SUB- TOTAL (área de 77m²)</b>	<b>6856</b>	<b>89.18</b>	<b>10053.05</b>	<b>156202.33</b>	
COBERTURA A	<b>Total do revestimento</b>	6193	82.58	4354.33	71678.72	
	<b>Estrutura em aço leve- classe S 280 GD zincagem Z275</b>	2088	27.84	4238.64	59508.00	
	<b>SUB-TOTAL (área de 75m²)</b>	<b>8281</b>	<b>110.41</b>	<b>8592.97</b>	<b>123851.00</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>Piso recuado (67m²)</b>	<b>15137</b>	<b>225.93</b>	<b>280053.33</b>		
<b>TOTAL</b>	<b>Nova laje + bordadura (67m²)</b>	<b>37496</b>	<b>559.64</b>	<b>15083.97</b>	<b>245891.52</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>Piso recuado + nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>52633</b>	<b>559.92</b>	<b>33729.99</b>	<b>525944.85</b>	

Notas: \*O pré-dimensionamento da estrutura em aço leve foi gentilmente fornecido pela FUTURENG. a) PAG (Potencial de Aquecimento Global); b) EI (Energia Incorporada na fase de construção e manutenção); c) EO (Energia Operacional – para aquecimento e arrefecimento apenas da área útil do piso recuado).

Tabela 7.25. Inventário de matérias para ACV da ampliação vertical com SAMb, SAMv1, SAMv2 e SAMv3 todas com estrutura em madeira - etapa de produção (A1 -A3) e etapa de utilização (B2, B4 e B6) (vida útil de 60 anos).

Descrição dos componentes (exterior para o interior)		Peso Total (kg)	Peso Próprio (kg/m²)	PAG Total (kgCO <sub>2</sub> e)	EI Total (MJ)	EO total durante 60 anos (MJ)
COBERTURA E ENVOLVIMENTO VERTICAL (120m²)	<b>SAMB</b>					<b>485322 MJ</b> (134812 kWh)
	Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE	157	1.31	235.03*	92394.00*	
	Caixa-de-ar	0	0.00	0.00	0.00	
	Manta de lã de rocha	1080	9.00	1209.60	18144.00	
	Membrana de poliamida e polipropileno retardadora da difusão do vapor de água (estanqueidade e controlo de condensações)	1.2	0.01	6.04	114.48	
	Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE	157	1.31	117.45	46197.00	
	Membrana acústica (poliéster e poliuretano microperfurada)	57	0.48	63.84	957.60	
	<b>Total do revestimento</b>	<b>1451</b>	<b>12.10</b>	<b>1631.95</b>	<b>157807.08</b>	
	Pórtico em madeira lamelada x 6 unidades	648	-	563.76	7814.88	
	Tubos de aço, Ø 5cm; 12m (C) x 6 unidades	142	-	874.90	8066.14	
<b>Estrutura em madeira lamelada + tubos metálicos</b>	<b>790</b>	<b>-</b>	<b>1438.66</b>	<b>15881.02</b>		
<b>TOTAL</b>	<b>Piso recuado (67m²)</b>	<b>2242</b>	<b>33.45</b>	<b>3070.61</b>	<b>173688.10</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>nova laje + bordadura (67m²)</b>	<b>37496</b>	<b>559.64</b>	<b>15083.97</b>	<b>245891.52</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>Piso recuado + nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>39737</b>	<b>423.00</b>	<b>18154.58</b>	<b>419579.62</b>	

COBERTURA E ENVOLVENTE VERTICAL (120m²)	SAMv1 – incremento da inércia térmica com PCM** no teto					391355 MJ (108710 kWh)
	BioPCM M51Q29 (68m²) 185kg***	184	2.70	2295.00	0	
<b>Total do revestimento</b>	1635	14.8	3926.95	157807.08		
<b>Estrutura em madeira lamelada + tubos metálicos</b>	790	-	1438.66	15881.02		
<b>TOTAL Piso recuado (67m²)</b>	<b>2425</b>	<b>36.19</b>	<b>5365.61</b>	<b>173688.1</b>		
<b>TOTAL nova laje + bordadura (67m²)</b>	<b>37496</b>	<b>559.64</b>	<b>15083.97</b>	<b>245891.52</b>		
<b>TOTAL Piso recuado + nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>39921</b>	<b>424.69</b>	<b>20449.58</b>	<b>419579.62</b>		
COBERTURA E ENVOLVENTE VERTICAL (120m²)	SAMv2– incremento da inércia térmica com PCM** no teto e paramento interior das paredes exteriores					379616 MJ (105450 kWh)
	BioPCM M51Q29 (96m²) 259kg***	259	2.70	3240.00	0	
<b>Total do revestimento</b>	1710	14.8	4871.95	157807.08		
<b>Estrutura em madeira lamelada + tubos metálicos</b>	790	-	1438.66	15881.02		
<b>TOTAL Piso recuado (67m²)</b>	<b>2759</b>	<b>41.18</b>	<b>9550.61</b>	<b>173688.1</b>		
<b>TOTAL Nova laje + bordadura (67m²)</b>	<b>37496</b>	<b>559.64</b>	<b>15083.97</b>	<b>245891.52</b>		
<b>TOTAL Piso recuado + nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>40255</b>	<b>428.24</b>	<b>24634.58</b>	<b>419579.62</b>		
COBERTURA E ENVOLVENTE VERTICAL (120m²)	SAMv3 – incremento da inércia térmica com PCM** (no teto) e membrana vegetal na envolvente exterior (cobertura e paredes)					388230 MJ (107842 kWh)
	BioPCM M51Q29 (68m²) 185kg***	184	2.70	2295.00	0	
Membrana vegetal ****	3360	28.00	-978.00*****	8232.00		
<b>Total do revestimento</b>	4995	42.8	1317.00	166039.08		
<b>Estrutura em madeira lamelada + tubos metálicos</b>	790	-	1438.66	15881.02		
<b>TOTAL Piso recuado (67m²)</b>	<b>5785</b>	<b>86.34</b>	<b>2755.66</b>	<b>181920.1</b>		
<b>TOTAL Nova laje + bordadura (67m²)</b>	<b>37496</b>	<b>559.64</b>	<b>15083.97</b>	<b>245891.52</b>		
<b>TOTAL Piso recuado + nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>43281</b>	<b>460.44</b>	<b>17839.63</b>	<b>427811.62</b>		

**Notas:** \* Inclui a substituição da membrana após 30 anos de utilização. Energia incorporada: 295 MJ/kg - dados obtidos por Monticelli & Zanelli (2016); **Manutenção:** a membrana de fibra de vidro revestida a PTFE apresenta propriedades anti adesivas e de auto limpeza através da chuva. São necessárias inspeções periódicas para detetar possíveis danos. **Reciclagem:** a membrana de fibra de vidro revestida a PTFE é um material composto e não homogêneo; é possível realizar a reciclagem do PTFE (up cycling).

**Durabilidade:** a membrana de fibra de vidro revestida a PTFE apresenta 30 anos de durabilidade (Monticelli & Zanelli (2016).

\*\* PCM abreviatura em inglês de “Phase Change Materials”, em português Materiais com Mudança de Fase.

\*\*\* Valores de energia e carbono incorporados por kg obtidos através da base de dados do Design Builder (2017).

\*\*\*\* O peso total inclui o peso da membrana vegetal com vegetação, que corresponde a 28 kg/m². A membrana vegetal sem vegetação pesa apenas 4kg/m² (VGTEX, 2017).

\*\*\*\*\* Contabiliza o efeito positivo da produção de oxigénio, diminuído o CO<sub>2</sub> incorporado. Atenção: o peso total da solução alternativa continua inferior ao da solução convencional, mesmo com a adição de materiais à solução base. Valor calculado para 60 anos de vida útil, com base no estudo de Getter (2009), em que uma cobertura vegetal com um substrato de 6cm, durante um período de dois anos consegue captar em média 378 gramas de CO<sub>2</sub> por metro quadrado.

## • Resultados

Os resultados ACV, gerados através da ferramenta informática One Click LCA (2015), para cada solução de ampliação vertical em análise encontram-se na Tabela 7.26.

Tabela 7.26. Resultados ACV, considerando uma vida útil de 60 anos, para cada solução de ampliação vertical. Inclui o uso de energia operacional para a área útil ampliada.

Solução	Etapa	Descrição	Indicadores EN 15978 (unidade)				EI (MJ)
			PAG (kgCO2e)	PA (kgSO2e)	PE (kgPO4e)	PDCO/PCOF (kgEthenee)	
ST	A1-A3	Materiais de construção	20909	128	48	5.99	215024
	A4	Transporte para o local da obra	194	1	0	-0.23	2845
	A5	Processo de construção	1324	5	3	0.17	24395
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	2576	10	33	0.57	61074
	B6	Uso de energia operacional*	107092	582	79	28.44	1840055
	C1-C4	Desconstrução	1713	3	1	0.25	8303
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-3392	-6	-2	-0.41	-67055
		<b>Total s/ uso de energia operacional</b>	<b>23323</b>	<b>141</b>	<b>83</b>	<b>6.34</b>	<b>244587</b>
	<b>Total</b>	<b>130415</b>	<b>723</b>	<b>162</b>	<b>34.78</b>	<b>2084642</b>	
Solução	Etapa	Descrição	Indicadores EN 15978 (unidade)				EI (MJ)
			PAG (kgCO2e)	PA (kgSO2e)	PE (kgPO4e)	PDCO/PCOF (kgEthenee)	
SCMad	A1-A3	Materiais de construção	24503	237	49	11.39	329080
	A4	Transporte para o local da obra	162	1	0	-0.19	2385
	A5	Processo de construção	1324	5	3	0.17	24395
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	12298	207	57	5.27	154308
	B6	Uso de energia operacional*	125791	684	93	33.41	2161335
	C1-C4	Desconstrução	739	3	3	0.16	5315
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-16766	-23	-7	-1.28	-475779
		<b>Total s/ uso de energia operacional</b>	<b>22260</b>	<b>430</b>	<b>106</b>	<b>15.52</b>	<b>39704</b>
	<b>Total</b>	<b>148051</b>	<b>1114</b>	<b>199</b>	<b>48.93</b>	<b>2201038</b>	
SCMed	A1-A3	Materiais de construção	31754	251	52	13.75	390409
	A4	Transporte para o local da obra	161	1	0	-0.18	2417
	A5	Processo de construção	1324	5	3	0.17	24395
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	12298	207	57	5.27	154308
	B6	Uso de energia operacional*	125791	684	93	33.41	2161335
	C1-C4	Desconstrução	475	3	3	0.13	5088
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-19797	-29	-7	-2.50	-508313
		<b>Total s/ uso de energia operacional</b>	<b>26215</b>	<b>437</b>	<b>108</b>	<b>16.64</b>	<b>68305</b>
	<b>Total</b>	<b>152006</b>	<b>1121</b>	<b>201</b>	<b>50.05</b>	<b>2229639</b>	

<b>SAMb</b>	A1-A3	Materiais de construção	18212	119	17	8.78	229566
	A4	Transporte para o local da obra	99	0	0	-0.11	1460
	A5	Processo de construção	1324	5	3	0.17	24395
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	2315	14	1	1.17	30088
	B6	Uso de energia operacional*	125791	684	93	33.41	2161335
	C1-C4	Desconstrução	278	3	3	0.09	3421
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-16637	-23	-7	-1.22	-486055
		<b>Total s/ uso de energia operacional</b>	<b>5592</b>	<b>118</b>	<b>17</b>	<b>8.88</b>	<b>-197124</b>
	<b>Total</b>	<b>131383</b>	<b>802</b>	<b>110</b>	<b>42.29</b>	<b>1964211</b>	
<b>SAMv1</b>	A1-A3	Materiais de construção	19725	121	17	9.29	270309
	A4	Transporte para o local da obra	101	0	0	-0.11	1488
	A5	Processo de construção	1324	5	3	0.17	24395
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	3259	13	2	1.49	56768
	B6	Uso de energia operacional*	52696	286	39	14.00	905424
	C1-C4	Desconstrução	278	3	3	0.09	3421
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-16779	-24	-7	-1.23	-488446
		<b>Total s/ uso de energia operacional</b>	<b>7908</b>	<b>118</b>	<b>19</b>	<b>9.70</b>	<b>-132064</b>
	<b>Total</b>	<b>60604</b>	<b>405</b>	<b>58</b>	<b>23.70</b>	<b>773360</b>	
<b>SAMv2</b>	A1-A3	Materiais de construção	19958	122	18	9.36	276042
	A4	Transporte para o local da obra	101	0	0	-0.11	1496
	A5	Processo de construção	1324	5	3	0.17	24395
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	3259	13	2	1.49	56768
	B6	Uso de energia operacional*	52696	286	39	14.00	905424
	C1-C4	Desconstrução	281	3	3	0.09	3446
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-16779	-24	-7	-1.23	-488446
		<b>Total s/ uso de energia operacional</b>	<b>8144</b>	<b>119</b>	<b>19</b>	<b>9.77</b>	<b>-126299</b>
	<b>Total</b>	<b>60840</b>	<b>406</b>	<b>58</b>	<b>23.77</b>	<b>779125</b>	
<b>SAMv3</b>	A1-A3	Materiais de construção	20124	122	18	9.54	278592
	A4	Transporte para o local da obra	128	0	0	-0.15	1874
	A5	Processo de construção	1324	5	3	0.17	24395
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	2257	9	1	0.96	38562
	B6	Uso de energia operacional*	50996	277	38	13.54	876217
	C1-C4	Desconstrução	289	3	3	0.10	3640
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-16779	-24	-7	-1.23	-488447
		<b>Total s/ uso de energia operacional</b>	<b>7343</b>	<b>116</b>	<b>18</b>	<b>9.39</b>	<b>-141384</b>
	<b>Total</b>	<b>58339</b>	<b>393</b>	<b>56</b>	<b>22.93</b>	<b>734833</b>	

Notas: PAG (Potencial de Aquecimento Global); PA (Potencial de Acidificação); PE (Potencial de Eutrofização); PDCO/ PCOF (Potencial de Depleção de Camada de Ozono) e EI (Energia incorporada). Considera-se que todos os componentes em alumínio são produzidos a partir de alumínio reciclado. De acordo com EAA (2013), mais de 90 % do alumínio utilizado na construção de edifícios na Europa é reciclado. \* Energia operacional durante 60 anos para aquecimento e arrefecimento da área útil ampliada.

#### • Discussão dos resultados

Da análise da Tabela 7.26 verifica-se que os indicadores PAG e EI são os que apresentam maiores valores e com base nisso elaborou-se o gráfico da Figura 7.82, onde se comparam todas as etapas ACV considerando apenas estes indicadores para cada solução.

Da análise da Tabela 7.27 e da Figura 7.81, conclui-se que a melhor solução, no que se refere aos indicadores de impacto ambiental, é a SAMv3, e a pior solução é a SCMet. Contudo, as restantes soluções alternativas variantes apresentam um desempenho ambiental muito próximo da SAMv3. Refere-se ainda que, considerando o peso total do piso recuado, a SAMv1 e SAMv3 pesam menos 85% e 38%, respetivamente, do que a SCMet para o mesmo valor de U da envolvente exterior vertical e cobertura.

Um dos aspetos que tornam a SAMv3 melhor do que as restantes é o reduzido consumo de energia operacional e de emissão de dióxido de carbono durante a sua vida útil. A membrana vegetal na envolvente vertical e cobertura atua como um sequestrador de dióxido de carbono e como um isolante térmico, reduzindo o PAG (Potencial de Aquecimento Global), o consumo energético do edifício, em especial nos meios urbanos, mitigando os efeitos das ilhas de calor (Getter *et al.*, 2009), entre outros benefícios já mencionados.

De modo a sintetizar os resultados e aprofundar o aspeto da leveza das soluções alternativas, é relevante considerar o impacto dos componentes estruturais que constituem cada solução. A envolvente vertical e cobertura das soluções alternativas com membrana são muito mais leves do que as soluções convencionais de referência e, conseqüentemente, necessitam de uma estrutura de suporte mais reduzida. Deste modo, com a utilização de membrana, a quantidade de elementos estruturais utilizada reduz-se entre 65% a 78% e, como consequência, reduz-se entre 7% a 25% a energia incorporada. Contudo, é a ST que apresenta os menores impactos de PAG quando comparada com as restantes soluções. Isto deve-se ao facto de a ST apresentar materiais naturais e pouco industrializados, ao contrário do que sucede com as restantes soluções que são mais industrializadas. Contudo, estas últimas, apresentam maior energia incorporada por kg, mas como têm pouco

peso próprio acabam por ter um impacto menor por m<sup>2</sup>. Para além disso, perante este cenário com resultados estimados, pode concluir-se que, neste caso, é preferível utilizar um material com menor durabilidade, mas com menor impacto ambiental (que no caso das soluções alternativas é alcançado pelo seu reduzido peso próprio) do que um material com maior durabilidade e maior impacto ambiental (soluções convencionais) ao longo do ciclo de vida. Por outro lado, verifica-se que a maior poupança de energia operacional durante toda a vida útil estimada reside nas soluções alternativas variantes (Tabela 7.27), que incluem um incremento da massa térmica com PCMs. Refere-se também que a conceção das SAM considera que todos os seus componentes possam ser separados e reciclados no fim da sua vida útil (ver secção 7.7). Além disso, sob o ponto de vista de reabilitação funcional, a vantagem na facilidade de desconstrução da solução em membrana, favorece intervenções de reabilitação futuras – por exemplo, quando for necessário remover a ampliação vertical, ou executar alguma transformação que vá de encontro às necessidades espaciais/ funcionais dos futuros utilizadores do edifício. Espelho disso são os resultados do impacto ambiental para a etapa C1-C4 Desconstrução e etapa D Potencial de reutilização/reciclagem (Figura 7.83), onde as SAM aparecem em vantagem. Na etapa de desconstrução, as SAM são as que apresentam menor impacto ambiental (segundo os indicadores PAG e EI) e na etapa D, a par das SC, as que apresentam maior e significativo potencial de reutilização/reciclagem/valorização do que a ST.

Tabela 7.27. Comparação dos resultados totais ACV para cada solução de ampliação vertical, segundo os indicadores de impacto.

Solução	Indicadores EN 15978 (unidade)										
	PAG (kgCO2e)	%*	PA (kgSO2e)	%*	PE (kgPO4e)	%*	PDCO/PCOF (kgEthenee)	%*	EI (MJ)	%*	Ranking (1º é melhor)
ST	130415	55	723	46	162	65	35	34	2084642	65	4º
SCMad	148051	61	1114	65	199	72	49	53	2201038	67	5º
SCMet	152006	62	1121	65	201	72	50	54	2229639	67	6º
SAMb	131383	56	802	51	110	49	42	46	1964211	63	3º
SAMv1	60604	4	405	3	58	3	24	3	773360	5	2º
SAMv2	60840	4	406	3	58	3	24	4	779125	6	2º
SAMv3	58339	0	393	0	56	0	23	0	734833	0	1º

Nota: \* Redução/aumento da SAMv3 relativamente a cada uma das restantes soluções em análise.

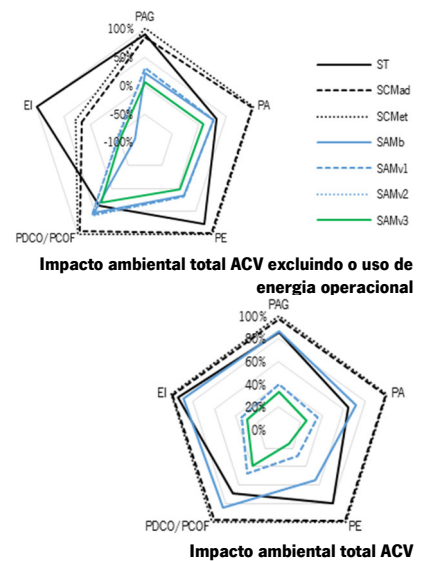
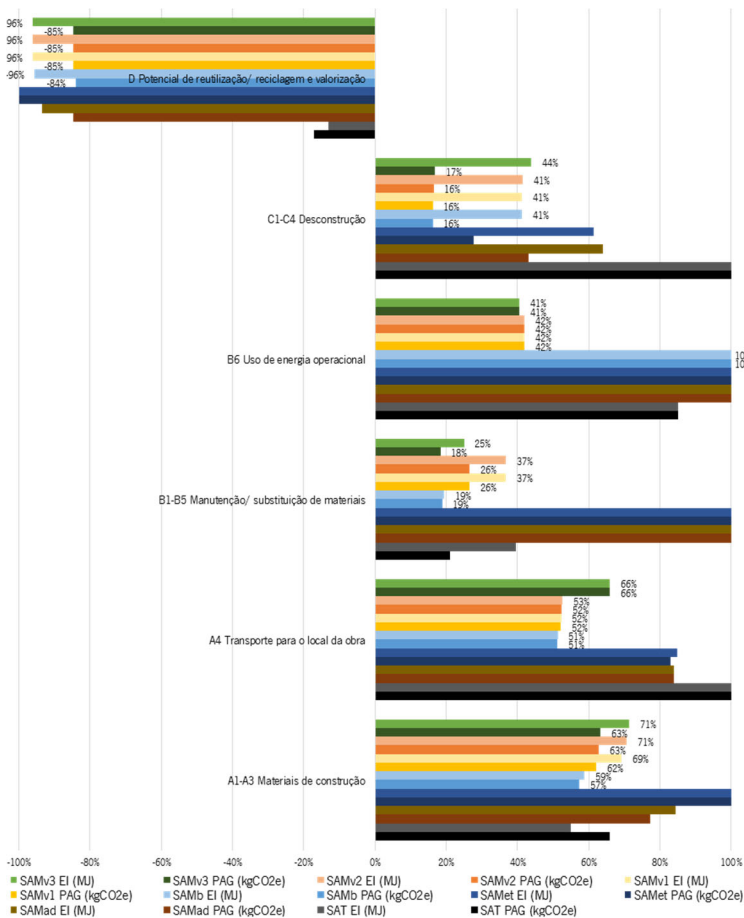


Figura 7.81. Comparação dos impactos ambientais de todas as soluções de reabilitação com ampliação vertical, segundo os resultados ACV (da Tabela 7.28, convertidos em percentagem).

Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área.

Figura 7.82. Comparação entre soluções segundo os indicadores PAG e EI e para todas as etapas ACV (valor em percentagem relativamente à solução com maior impacto).

### 7.8.5. Avaliação de aspetos económicos

O estudo comparativo de viabilidade económica da adoção de soluções construtivas leves em intervenções de reabilitação com ampliação vertical é feito entre o cenário inicial - edifício no estado original com ST – e o cenário de reabilitação – onde o piso recuado com ST existente no edifício REF é demolido e substituído por uma ampliação vertical, convencional ou alternativa.

Refere-se que a adoção de soluções construtivas leves para realizar ampliações verticais, na fase de projeto e de construção, segundo (Bergsten, 2005), demonstra ter interesse económico em intervenções de reabilitação nos centros urbanos. Entre as vantagens, algumas apresentam uma evidente consequência económica: (1) rapidez de construção = menores custos de mão-de-obra e das taxas de licença de construção; (2) desconstrução dos componentes para demolição futura = redução de desperdício e custos associados; (3) melhoria de aspetos térmicos = melhoria de eficiência energética e redução de custos energéticos operacionais.

A avaliação dos Custos de Ciclo de Vida (CCV) é um método que soma os custos de investimento associados ao período do ciclo de vida em estudo, sendo geralmente apresentada como Valor Atualizado Líquido (VAL). Este método é utilizado para comparar soluções construtivas que satisfaçam o mesmo nível de desempenho. Como tal, os CCV resultam da soma do valor atual do investimento e dos custos de energia, manutenção e substituição, durante um determinado período de tempo de análise (Tadeu, 2015).

#### • Análise CCV

Nas Tabelas 7.28 a 7.30 apresenta-se um inventário com os CCV das intervenções de ampliação com as soluções alternativas e convencionais em estudo para proceder à análise comparativa.

Tabela 7.28. Inventário dos custos associados ao ciclo de vida da ampliação vertical convencional com estrutura de madeira.

Componentes	Peso Total (kg)	Custo Construção * (€/m²)	Custo Construção * (€)	Custo de energia Operacional total 60 anos (€)	Custo Manutenção **** (€)	Observações
Envolvente vertical (77m²)	5300	106	9296	134812 kWh** 0.16€/kWh***	10753	Manutenção decenal dos revestimentos.
Cobertura (75m²)	6193	87	6500		3116	Manutenção decenal dos revestimentos.
Estrutura em madeira de pinho	2294	–	5042		0	* Custo da mão-de-obra incorporados no custo de construção e corresponde a 30%. Estimativa de custos de construção gentilmente fornecida por Anarchlab.
<b>Total do piso recuado (67m²)</b>	<b>13787</b>	<b>311</b>	<b>20838</b>		<b>13869</b>	** Consumo de Energia Operacional obtido através do modelo de simulação do comportamento térmico do piso recuado inserido no edifício em estudo.
<b>Total da nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>37496</b>	<b>49</b>	<b>4600</b>		<b>0</b>	*** Valor obtido em EDP (2016).
Custo de taxas e licenças*****	–	–	454		–	**** Valores de referência para cálculo do custo de manutenção obtidos em CYPE (2016).
<b>Total do piso recuado + nova laje + bordadura</b>	<b>51283</b>	<b>386</b>	<b>25892</b>	<b>21570</b>	<b>13869</b>	***** Valores obtidos através da consulta do Código Regulamentar do Município do Porto.

Tabela 7.29. Inventário dos custos associados ao ciclo de vida da ampliação vertical convencional com estrutura metálica.

Componentes	Peso Total (kg)	Custo Construção * (€/m²)	Custo Construção * (€)	Custo de energia Operacional total 60 anos (€)	Custo Manutenção **** (€)	Observações
Envolvente vertical (77m²)	5300	106	9296	134812 kWh** 0.16€/kWh***	10753	Manutenção decenal dos revestimentos.
Cobertura (75m²)	6193	87	6500		3116	Manutenção decenal dos revestimentos.
Estrutura em aço leve	3644	–	7650		0	* Custo da mão-de-obra já está incluído no custo de construção e corresponde a 30%. Estimativa de custos de construção em aço leve gentilmente fornecido pela FUTURENG.
<b>Total do piso recuado (67m²)</b>	<b>15137</b>	<b>350</b>	<b>23446</b>		<b>13869</b>	** Consumo de Energia Operacional obtido através do modelo de simulação do comportamento térmico do piso recuado inserido no edifício em estudo.
<b>Total da nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>37496</b>	<b>49</b>	<b>4600</b>		<b>–</b>	*** Valor obtido em EDP (2016).
Custo de taxas e licenças*****	–	–	434		–	**** Valores de referência para cálculo do custo de manutenção obtido em CYPE (2016) e período de manutenção em (PERRT, 1995).
<b>Total do piso recuado + nova laje + bordadura</b>	<b>52633</b>	<b>425</b>	<b>28480</b>	<b>21570</b>	<b>13869</b>	***** Valores obtidos através da consulta do Código Regulamentar do Município do Porto, Anexos G_1 Tabela de Taxas.



Tabela 7.30. Inventário dos custos associados ao ciclo de vida da ampliação vertical alternativa proposta em membrana com estrutura em madeira e respetivas variantes.

Componentes	Peso Total (kg)	Custo Construção (CC)* (€)	Custo de energia Operacional total 60 anos (€)	Custo Manutenção **** (€)	Observações
<b>SAMb</b>					
<b>Cobertura e envolvente vertical (120m²)</b>	1451	16374	134812 kWh** 0.16€/kWh***	4800	Substituição a cada 30 anos. *Estimativa de custos realizada através da base de dados Gerador de Preços Cype (2017), <a href="http://orcamentos.eu">http://orcamentos.eu</a> e consulta de mercado de fornecedores e instaladores. ** Consumo energético operacional para aquecimento e arrefecimento apenas da área útil do piso recuado
Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE*****	157	4800		4800	
Manta de lã de rocha	1080	2790		0	
Membrana de poliamida e PP retardadora de vapor de água	1.2	384		0	
Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE	157	4800		0	
Membrana acústica (poliéster revs. poliuretano microperfurada)	57	3600		0	
<b>Estrutura em madeira lamelada + tubos metálicos</b>	790	2280		0	
<b>Total do piso recuado (67m²)</b>	<b>2242</b>	<b>18654</b>		<b>4800</b>	
<b>Total da nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>37496</b>	<b>4600</b>			
<b>Total do piso recuado + nova laje + bordadura</b>	<b>39737</b>	<b>23648</b>		<b>21570</b>	
<b>SAMv1</b>					
Cobertura e envolvente vertical (120m²) + estrutura	2242	18654	108710 kWh** 0.16€/kWh***	4800	CC Inclui custo taxas licenciamento 394€
+ BioPCM M51Q29 (68m²) 185kg***	184	1924		0	
<b>Total do piso recuado (67m²)</b>	<b>2425</b>	<b>20578</b>		<b>4800</b>	
<b>Total da nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>37496</b>	<b>4600</b>			
<b>Total do piso recuado + nova laje + bordadura</b>	<b>39921</b>	<b>25572</b>	<b>17394</b>	<b>4800</b>	
<b>SAMv2</b>					
Cobertura e envolvente vertical (120m²) + estrutura	2242	18654	105450 kWh** 0.16€/kWh***	4800	*** Valores de energia e carbono incorporados por kg obtidos na base de dados do Design Builder (2017). **** O peso total inclui o peso da membrana vegetal com vegetação, que corresponde a 28 kg/m². A membrana vegetal sem vegetação pesa apenas 4kg/m² (VGTEX, 2017). CC Inclui custo taxas licenciamento 394€
BioPCM M51Q29 (96m²) 259kg***	259	2717		0	
<b>Total do piso recuado (67m²)</b>	<b>2759</b>	<b>21371</b>		<b>4800</b>	
<b>Total da nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>37496</b>	<b>4600</b>			
<b>Total do piso recuado + nova laje + bordadura</b>	<b>40255</b>	<b>26365</b>	<b>16872</b>	<b>4800</b>	
<b>SAMv3</b>					
Cobertura e envolvente vertical (120m²) + estrutura	2242	18654	107842 kWh** 0.16€/kWh***	0	Manutenção a cada 20 anos. CC Inclui custo taxas licenciamento 394€
BioPCM M51Q29 (68m²) 185kg***	184	1924		0	
Membrana vegetal exterior ****	3360	6600		13200	
<b>Total do piso recuado (67m²)</b>	<b>5785</b>	<b>27178</b>		<b>13200</b>	
<b>Total da nova laje + bordadura (94m²)</b>	<b>37496</b>	<b>4600</b>			
<b>Total do piso recuado + nova laje + bordadura</b>	<b>43281</b>	<b>31778</b>	<b>17255</b>	<b>13200</b>	

Apesar das soluções alternativas necessitarem de operações de substituição total da membrana exterior da envolvente vertical e cobertura, as soluções convencionais requerem manutenção decenal da cobertura (em telhas cerâmicas) e dos paramentos verticais interiores e exteriores com pintura e reparação, que no total apresentam um custo de manutenção muito superior ao da substituição da membrana nas SAM (Figura 7.83). No entanto, entre as SAM, a SAMv3 é a que apresenta maior custo de manutenção e construção comparativamente às soluções convencionais.

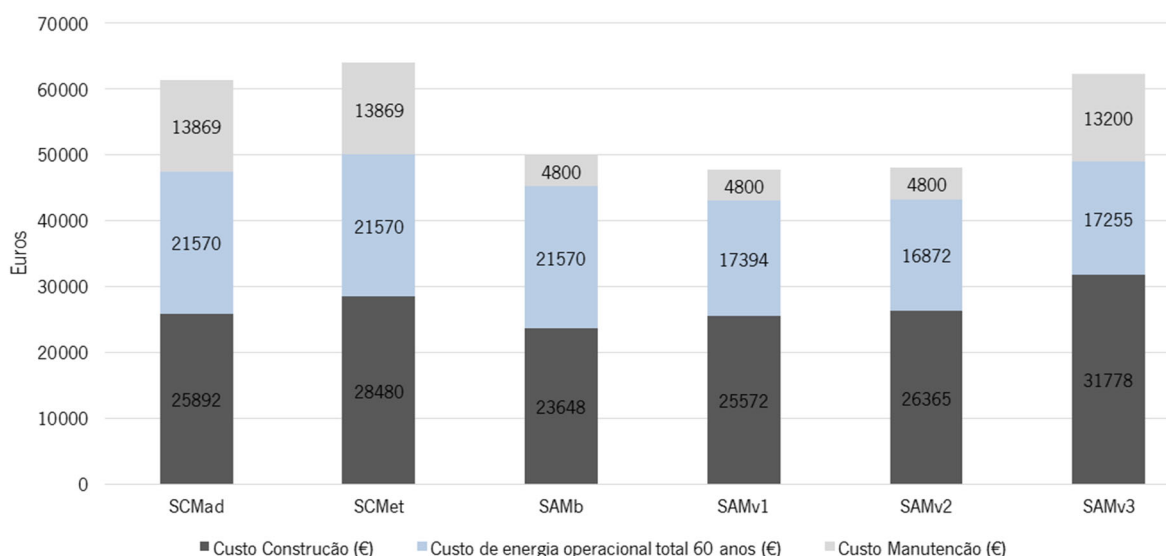


Figura 7.83. Análise económica do ciclo de vida das intervenções de ampliação em estudo.

• **Cálculo do período de retorno**

• *Metodologia*

A reabilitação funcional em estudo tem como objetivo o aumento do conforto dos ocupantes dos edifícios, bem como a diminuição dos gastos com energia e a consequente poupança. Tendo-se já analisado o impacto ambiental/ energético da intervenção de ampliação vertical sobre o edifício existente com várias soluções construtivas, nas etapas de construção e utilização/exploração, a presente análise tem como objetivo avaliar essas intervenções em termos financeiros, calculando-se, entre outros, o período de retorno do investimento, parâmetro indispensável no processo de tomada de decisão, da adoção ou não de uma solução mais eficiente em detrimento de uma solução menos eficiente em termos de investimento direto, apenas. Para a análise em causa comparou-se o edifício REFc/ST no seu estado original, sem intervenção, e o edifício intervencionado com as diferentes soluções de ampliação SCMs e SAMs.

O custo global de determinada intervenção que tenha como objetivo a poupança energética compõe-se pelo custo inicial, pelo custo de manutenção total e pelo custo de exploração, tal como mostra a Equação 1.

$$\text{Custo global } n = \text{Custo inicial ano } 0 + \text{Custo de exploração ano } n + \text{Custo de manutenção total} \tag{1}$$

O custo inicial corresponde ao custo de construção, ou seja, ao somatório do custo de materiais, mão-de-obra e equipamentos, enquanto o custo de exploração corresponde ao consumo energético na fase de utilização do edifício. O custo de exploração depende do custo da energia, bem como das necessidades energéticas. Para a análise económica em questão, os consumos energéticos (kWh) foram obtidos através da simulação do modelo executado com a ferramenta informática Design Builder (2016). Simularam-se vários cenários no *Design Builder* e somaram-se as necessidades energéticas ao longo de toda a estação de aquecimento e de arrefecimento<sup>17</sup> para: cenário 1 - o edifício todo (incluindo a parte ampliada) e cenário 2 – considerando apenas a parte ampliada. Multiplicando os consumos energéticos pelo preço unitário do kWh, obtém-se o custo de exploração. Visto que se pretende definir o período de retorno do investimento, esta é uma análise a longo prazo, que tem obrigatoriamente de ter em conta a evolução dos preços. Neste sentido, há que definir duas taxas: a taxa de variação do custo da energia e a taxa de capitalização. A taxa de variação do custo da energia deve ser aplicada pela fórmula dos juros compostos ao custo da energia, reportando os custos presentes para o futuro. Por outro lado, o custo inicial deve ser afetado da mesma forma pela taxa de capitalização. A taxa de capitalização deve também ser aplicada ao custo de exploração. As equações 2 e 3 permitem efetuar o cálculo anteriormente referido (em que  $\alpha$  = taxa e  $n$  =anos).

$$\text{custo energia}_n = \text{custo energia}_0 (1 + \alpha')^n \tag{2}$$

$$\text{custo de exploração}_n = \frac{\text{necessidades energéticas } x \text{ custo de energia }_n}{(1+\alpha)^n} \tag{3}$$

De modo a obter o preço da energia em Portugal, consultaram-se dados históricos fornecidos pela Pordata (2017) nos últimos 10 anos. Na Tabela 7.31, encontra-se representada a evolução dos preços da eletricidade em Portugal de 2006 a 2016. Por ser o mais desfavorável, considerar-se-á o preço de 2016 como o preço do ano 0, que corresponde a 0.235 €/kWh.

Tabela 7.31. Preço da eletricidade em Portugal de 2006 a 2016 para o setor doméstico (PORDATA, 2017).

	Anos										
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Preço da eletricidade (€/kWh)</b>	0.141	0.150	0.148	0.151	0.158	0.165	0,199	0,208	0,216	0,228	0,235

Fontes de Dados: Eurostat | Institutos Nacionais de Estatística | Ministérios | Agências de Energia | Companhias de Eletricidade; Fonte: PORDATA - Última atualização: 2016-09-16.

<sup>17</sup> Considerando que os compartimentos ocupados na estação fria são aquecidos de forma permanente, de modo a que a temperatura do ar interior não seja inferior a 18°C, e que na estação quente são arrefecidos para que a temperatura do ar interior não ultrapasse 25°C (condições de conforto regulamentares).

Tabela 7.32. Considerações tomadas para realizar a análise comparativa do período de retorno.

	Necessidades energéticas anuais (kWh.ano)	Custo inicial/ construção (€)	Custo construção da ampliação vertical (€)	Custo de Manutenção (€)
<b>Edifício no estado original (REF c/ST)</b>	44707	335071	-	-
<b>Edifício com ampliações verticais</b>			-	-
SCMad	34236	365463 *	-	-
SCMet	34236	368051*	-	-
SAMb	17549	363219*	-	-
SAMv1	15561	365143*	-	-
SAMv2	17107	365936*	-	-
SAMv3	17030	371349*	-	-
<b>Apenas ampliação vertical</b>				
SCMad	2247	-	25892	13869
SCMet	2247	-	28480	13869
SAMb	2034	-	23648	4800
SAMv1	1812	-	25572	4800
SAMv2	1757	-	26365	4800
SAMv3	1797	-	31778	13200

Nota: \* já inclui o custo de demolição da ampliação ST existente no edifício REF, de 4500 euros.

A definição das taxas de capitalização e de variação do custo da energia, que variam de ano para ano, são taxas que implicam cálculos económicos que fogem do âmbito deste trabalho. Consequentemente, de forma simplificada, arbitrou-se uma taxa de variação do custo da energia de 4% e uma taxa de capitalização de 3%.

O período de retorno corresponde ao período de tempo após o qual o investimento inicial (ano 0) é recuperado. Assim, quando o somatório dos custos de exploração (atualizados todos os anos) e do custo inicial, da situação após a intervenção, for inferior ao mesmo somatório para a situação sem intervenção, o investimento está recuperado. O período de retorno corresponde ao ponto de interceção das curvas representadas na Figura 7.84.

• *Resultados*

Analisando o gráfico da Figura 7.84 que apresenta a evolução do custo global para o edifício com e sem intervenção de reabilitação com ampliação vertical com as várias soluções construtivas em estudo, verifica-se que o edifício REFc/ST (sem intervenção) é o que apresenta um menor custo global inicial. Contudo, após 21 e 24 anos de utilização, a SAMv1 e SAMv2 passam a ter um menor custo global do que o edifício REFc/ST e as soluções de ampliação. Para além disso, o edifício com ampliação SAMv1 é o que apresenta o menor período de retorno, relativamente às restantes soluções em estudo. A SAMv3 passa a ter um custo global menor do que o edifício REFc/ST após 40 anos de utilização. Entre as soluções alternativas, a SAMb é a que apresenta maior período de retorno (44 anos). Contudo, este período de retorno é menor do que o das soluções convencionais; as SCMad ou SCMet só atingem um menor custo global do que o edifício REFc/ST após 59 anos de utilização.

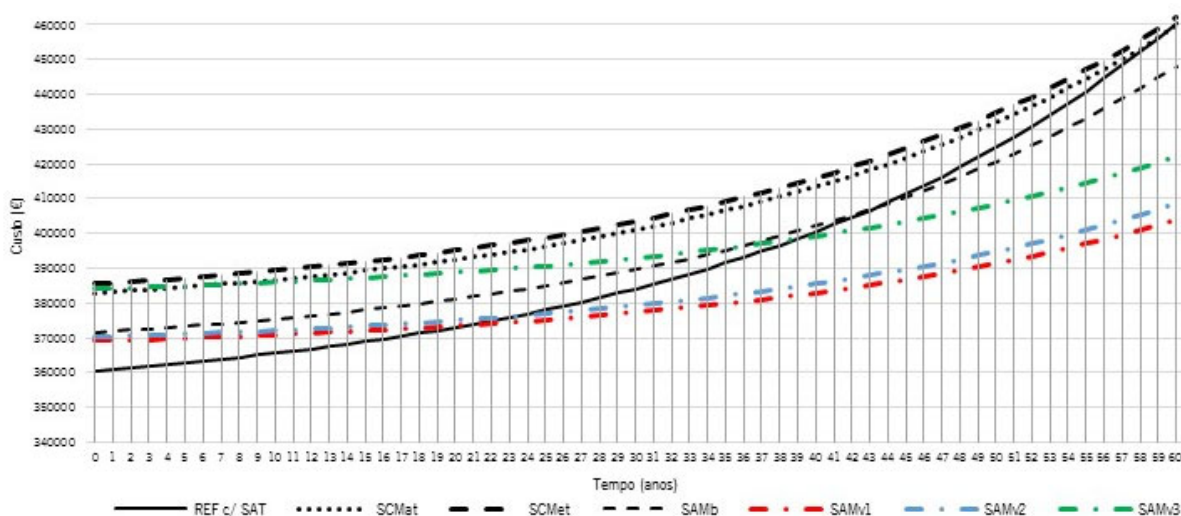


Figura 7.84. Custo global do edifício, com e sem intervenção de reabilitação. Cálculo do período de retorno do cenário de reabilitação com ampliações convencionais e alternativas relativamente ao cenário inicial – edifício no estado original (c/ST existente).

- *Discussão dos resultados*

O cálculo do retorno do investimento considera os custos de construção e de manutenção bem como o custo do consumo de energia operacional. A Tabela 7.33 e Figura 7.84 permitem concluir que (1) as soluções SCMat e SCMet são as que apresentam o maior período de retorno (59 anos) e (2) as soluções SAMs são as que apresentam os menores custos de construção, operacionais e de manutenção, com consequente redução do período de retorno do investimento, em especial para a ampliação com SAMv1 (21 anos).

Esta análise de Custos do Ciclo de Vida mostra que, apesar dos cenários de reabilitação com ampliação vertical apresentarem um Custo Global superior ao cenário sem reabilitação, após 21 anos de utilização tornam-se os mais económicos. Após 21 anos, a ampliação com SAMv1 passa a gerar uma poupança maior do que as restantes soluções (Figura 7.85). Para além disso, conclui-se que uma intervenção de ampliação vertical alternativa é melhor para o investidor, após 21 anos de utilização do que manter o edifício no estado original (REFc/ST) (pior cenário) ou de intervencioná-lo com uma SCMad/Met (retorno do investimento após 59 anos de utilização). Contudo, deve considerar-se o seguinte: (1) a análise apresentada é muito simplificada e que, na realidade, a evolução dos preços poderá sofrer desvios relativamente aos considerados; (2) pressupõe-se nesta análise que a área útil considerada é climatizada em todas as estações do ano. No entanto, relativamente a este último aspeto, conforme referido por Freitas *et al.* (2010) e na secção 6.1.1, salvaguarda-se que a realidade nacional, relativamente ao consumo energético para climatização das habitações, é diferente da realidade europeia. Pois, na generalidade, apesar das necessidades de aquecimento dos edifícios residenciais serem generalizadamente necessárias na estação de Inverno, a população portuguesa não climatiza significativamente as habitações, com base na invocada amenidade do clima. Por isso, na secção 7.8.3, para além do consumo energético (calculado para um ano inteiro, considerando um sistema de climatização com COP 3), também se avaliou a sensação de conforto no interior da parte ampliada, para as várias soluções em análise, para uma semana típica de verão e de inverno, considerando que o espaço não seria climatizado.

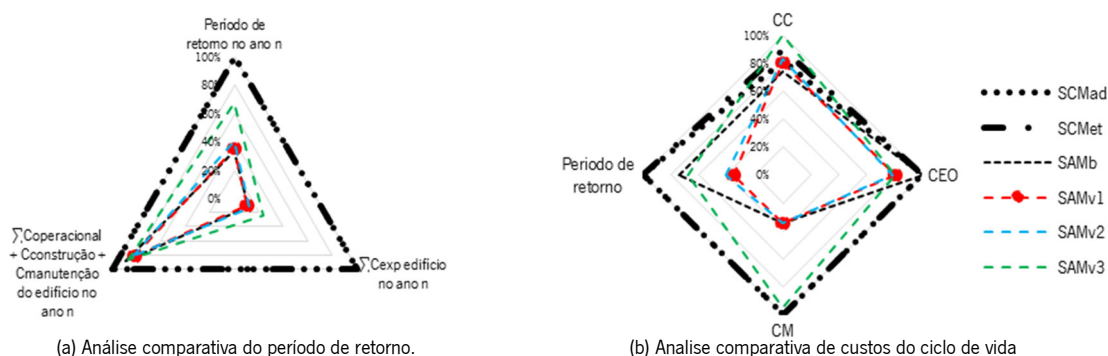
Verifica-se que os custos de construção das soluções alternativas em análise são elevados e muito próximos dos custos de construção das soluções convencionais. Contudo, o impacto da massificação do seu uso provocará uma redução dos preços. Como foi referenciado na secção 7.7.2 relativo aos aspetos construtivos, apesar de necessitar de mão-de-obra especializada, o rendimento de construção da solução alternativa em membrana é superior à média convencional, o que se traduz na redução do custo da mão-de-obra. Por outro lado, o aumento de construções em membrana, vulgarizando o seu uso, tornará, inevitavelmente, o custo de construção final mais competitivo. O aumento de consumo de certo tipo de materiais e equipamentos conduzirá tendencialmente à diminuição do preço de aquisição de matéria-prima até se alcançarem valores semelhantes aos da construção vulgar.

Tabela 7.33. Período de retorno das intervenções de reabilitação, relativamente ao edifício REFc/ST, utilizando energia elétrica.

Ampliações verticais	Período de retorno relativamente ao edifício s/intervenção de reabilitação n (anos)	$\Sigma C_{con}$ edifício para o ano n (€)	$\Sigma C_{operacional} + C_{construção} + C_{manutenção}$ Edifício para o ano n (€)	Ranking
SCMad	59	81379	456238	5º
SCMet	59	81379	458826	6º
SAMb	44	9036	408706	2º
SAMv1	21	8333	373776	1º
SAMv2	24	10305	376541	3º
SAMv3	40	19213	399262	4º

Tabela 7.34. Síntese dos custos associados ao ciclo de vida.

Ampliações verticais	Custo Construção (€)	Custo de energia Operacional total 60 anos (€)	Custo Manutenção (€)	Período de retorno relativamente ao edifício s/intervenção de reabilitação (anos)	Ranking
SCMad	25892	21570	13869	59	5º
SCMet	28480	21570	13869	59	6º
SAMb	23648	21570	4800	44	3º
SAMv1	25572	17394	4800	21	1º
SAMv2	26365	16872	4800	24	2º
SAMv3	31778	17255	13200	40	4º



(a) Análise comparativa do período de retorno. (b) Análise comparativa de custos do ciclo de vida  
 Figura 7.85. Comparação dos aspetos económicos das soluções de ampliação vertical em análise (valores em percentagem, relativamente à melhor solução para cada critério). Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área.

### 7.9. Aplicação de modelo multicritério para avaliar a eficiência relativa das soluções de reabilitação com membranas – critérios quantitativos e qualitativos

#### 7.9.1. Etapa 1: definição do problema

O problema a resolver consiste na seleção da melhor alternativa - solução construtiva – para a intervenção de reabilitação funcional com ampliação vertical, de um edifício antigo, localizado num centro urbano, em Portugal.

#### 7.9.2. Etapa 2: identificação dos decisores

O grupo de decisores encontra-se identificado na secção 6.6.2 do Capítulo 6, pelo motivo exposto na secção 5.4 do Capítulo 5.

#### 7.9.3. Etapa 3: definição das alternativas

Em síntese, as alternativas em análise correspondem às seguintes soluções construtivas:

SCMad	SCMet	SAM b	SAM v1	SAM v2	SAM v3
Solução convencional com estrutura de madeira: cobertura de telhas cerâmicas, envolvente vertical com revestimento exterior em chapa metálica e interior em OSB e gesso cartonado e isolamento térmico e acústico	Solução convencional com estrutura LSF: cobertura de telhas cerâmicas, envolvente vertical com revestimento exterior em chapa metálica e interior em OSB e gesso cartonado e isolamento térmico e acústico	Solução Alternativa Membrana (base) com estrutura metálica, envolvente exterior e interior em membrana de fibra de vidro revestida a PTFE, com isolamento térmico e acústico	Solução Alternativa Membrana versão 1 com estrutura metálica, envolvente exterior e interior em membrana de fibra de vidro revestida a PTFE, com isolamento térmico e acústico + membrana com material de mudança de fase apenas na cobertura	Solução Alternativa Membrana versão 2 com estrutura metálica, envolvente exterior e interior em membrana de fibra de vidro revestida a PTFE, com isolamento térmico e acústico + membrana com material de mudança de fase em toda a envolvente exterior	Solução Alternativa Membrana versão 3 Com estrutura metálica, envolvente exterior em membrana vegetal (com vegetação incorporada), com isolamento térmico e acústico + membrana com material de mudança de fase em toda a envolvente exterior.

#### 7.9.4. Etapa 4: definição dos critérios e estruturação hierárquica

Na Tabela 7.35 apresentam-se os níveis de prioridade necessários para aplicar o modelo de avaliação (Cap. 5).

Tabela 7.35. Quadro de avaliação multicritério para apoio à tomada de decisão da melhor solução para a abordagem de sobreposição – estruturação hierárquica a adotar no método AHP.

NIVEL 1 - objetivo							
Seleção da melhor solução construtiva para realizar uma intervenção de reabilitação, com ampliação vertical, de um edifício antigo, localizado no centro urbano							
NIVEL 2 – critérios e subcritérios							
N.	Critérios	N.	Código	Subcritérios	Tipo	Objetivo	Indicador
C1	Aspetos económicos	1	SC1.1	Custo de construção	QN	min.	€
		2	SC1.2	Custo energético operacional para aquecimento e arrefecimento (60 anos)	QN	min.	€
		3	SC1.3	Custo de manutenção (60 anos)	QN	min.	€
		4	SC1.4	Período de retorno do investimento na ampliação vertical	QN	min.	anos
C2	Aspetos sociais, culturais e patrimoniais	5	SC2.1	Uso de técnicas e materiais de construção tradicionais	QL	MAX.	0 a 5
		6	SC2.2	Capacidade de instalação em sítios ocupados	QL	MAX.	0 a 5
		7	SC2.3	Grau de intrusividade	QL	min.	0 a 5
		8	SC2.4	Impacto do processo construtivo para a vizinhança	QL	min.	0 a 5
C3	Aspetos percetivos	9	SC3.1	Qualidade estética da intervenção pelo exterior	QL	MAX.	0 a 5
		10	SC4.1	Resistência ao fogo dos materiais de revestimento da envolvente exterior	QL	MAX.	0a 4
C4	Aspetos de segurança	11	SC4.2	Resistência ao fogo dos materiais de revestimento da envolvente interior	QL	MAX.	0a 4
		12	SC4.3	Risco para os ocupantes perante furacões/ tempestades	QL	min.	0 a 5
		13	SC4.4	Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos	QL	min.	0 a 5
		14	SC4.5	Risco para os ocupantes em caso no caso da ativação de engenhos explosivos.	QL	min.	0 a 5
		15	SC4.6	Resistência à queda de granizo sobre a cobertura	QL	MAX.	0 a 5

N.	Critérios	N. Código	Subcritérios	Tipo	Objetivo	Indicador	
C5	Aspetos construtivos	16	SC5.1	Peso total (envolvente exterior e laje de pavimento da parte ampliada)	QN	min.	kg
		17	SC5.2	Facilidade de montagem	QL	MAX.	Oa5
		18	SC5.3	Tempo de execução estimado	QN	min.	dias
		19	SC5.4	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço exterior	QL	MAX.	0 a 5
		20	SC5.5	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço interior	QL	MAX.	0 a 5
		21	SC5.6	Durabilidade média dos materiais de revestimento da envolvente exterior da parte ampliada	QN	min.	anos
C6	Aspetos funcionais	22	SC6.1	Grau de adaptabilidade para futuras alterações	QL	MAX.	0 a 5
		23	SC6.2	Grau de repetibilidade	QL	MAX.	0 a 5
		24	SC6.3	Grau de reversibilidade	QL	MAX.	0 a 5
		25	SC6.4	Isolamento acústico (Rw) médio da envolvente exterior	QN	MAX.	dB
		26	SC6.5	Consumo energético operacional total do edifício c/ intervenção (em 60 anos)	QN	min.	KWh
C7	Aspetos de impacto ambiental	27	SC7.1	Energia incorporada total (EE) em todo o ciclo de vida - 60 anos	QN	min.	MJ
		28	SC7.2	Potencial de aquecimento Global total (PAG) em todo o ciclo de vida - 60 anos	QN	min.	kgCO2e
		29	SC7.3	Resíduos sólidos gerados na fase de construção e manutenção (em 60 anos)	QN	min.	kg
		30	SC7.4	Contributo para a biodiversidade local	QL	MAX.	0 a 5

**NIVEL 3 - Alternativas**

**SCMad** (Solução convencional com estrutura de madeira); **SCMet** (Solução convencional com estrutura LSF); **SAM b** (Solução Alternativa base com membrana); **SAM v1** (Solução Alternativa com Membrana versão 1); **SAM v2** (Solução Alternativa com Membrana versão 2); **SAM v3** (Solução Alternativa com Membrana v3).

Nota: QN – quantitativo; QL – qualitativo

Nota: Para além dos critérios quantitativos, avaliados na secção 7.8, uma vez que nos futuros quadros comunitários de apoio ao desenvolvimento será dado relevo aos seguintes aspetos: promoção da adaptação às mudanças climáticas, gestão de prevenção de riscos, proteção do ambiente e uso eficiente de recursos, optou-se por incluir alguns critérios qualitativos, associados aos referidos aspetos, na avaliação da eficiência das soluções de reabilitação em estudo. Para os subcritérios qualitativos, a pontuação é determinada com base nos julgamentos do grupo de decisores, segundo a descrição e a escala de avaliação apresentadas na Tabela 7.1 do Anexo 7.

#### 7.9.5. Etapa 5: obtenção do vetor de prioridades (atribuição de pesos aos critérios e subcritérios)

Numa primeira fase, optou-se por realizar uma avaliação da eficiência apenas para os critérios quantitativos e sem atribuição de pesos aos mesmos. Contudo, conforme se preconiza no modelo exposto no Capítulo 5, considera-se conveniente adotar um sistema de ponderação capaz de considerar a importância relativa dos critérios, pois caso contrário todos os critérios terão a mesma importância, o que não corresponde à realidade. Por conseguinte, executou-se uma 2ª fase da etapa 5 conforme descrito na secção 5.6 do Capítulo 5.

#### • 1ª fase: avaliação multicritério sem atribuição de pesos e apenas com critérios quantitativos

Na Tabela 7.36 e na Figura 7.86 apresentam-se os resultados da 1ª fase de avaliação. O gráfico radar com percentagens, Figura 7.86, elaborado com base nos resultados presentes na Tabela 7.36, mostram como todos os 14 parâmetros (indicadores quantitativos de eficiência) em análise se confrontam entre si, permitindo uma avaliação holística da eficiência de cada solução de ampliação vertical em estudo.

Tabela 7.36. Resultados dos indicadores selecionados para avaliar a eficiência das soluções de reabilitação com abordagem de sobreposição e percentagem de melhoria da SAMv1 relativamente às restantes soluções em análise.

Etapas	Indicadores	Un.	Soluções de reabilitação funcional com abordagem de sobreposição											
			SCMad	**	SCMet	**	SAMB	**	SAMv1	**	SAMv2	**	SAMv3	**
Recursos empregues A1-A5 Produção materiais-primas, transporte e Construção	Peso total (envolvente exterior e laje da parte ampliada)	kg	51283	22%	52633	24%	39737	-0.46%	39921	0%	40255	1%	43281	8%
	Tempo de execução estimado*	dias	120	75%	90	67%	30	0%	30	0%	30	0%	30	0%
	Resíduos gerados em obra	kg	800	97%	560	96%	23	0%	23	0%	23	0%	23	0%
	EI	MJ	25989	19%	33239	36%	19636	-8%	21151	0%	21383	1%	21576	2%
	PAG	kgCO2e	355861	17%	417221	29%	255422	-16%	296193	0%	301934	2%	304862	3%
	Custo de construção	€	25892	1%	28480	10%	23648	-8%	25572	0%	26365	3%	31778	20%
Resultados obtidos B1-D Utilização, manutenção, desconstrução e fim de vida Influência da ampliação no piso subjacente e no edifício como um todo	Custo energético operacional (60 anos)	€	21570	19%	21570	19%	21570	19%	17394	0%	16872	-3%	17255	-1%
	Custo de manutenção (60 anos)	€	13869	65%	13869	65%	4800	0%	4800	0%	4800	0%	13200	64%
	Custo total	€	61331	22%	63919	25%	50018	5%	47766	0%	48037	1%	62233	23%
	Consumo energético operacional (60 anos - edifício c/intervenção)	KWh	34236	55%	34236	55%	34236	55%	15561	0%	17107	9%	17029	9%
	Consumo médio anual da área útil ampliada	kWh.an	4293	58%	4293	58%	4293	58%	1812	0%	1757	-3%	1797	-1%
	Consumo médio anual da área útil do piso subjacente	kWh.an	9502	53%	9502	53%	4250	53%	4480	0%	5066	12%	4497	0%
	Absorção acústica (Rw)	dB	53	-81%	53	-81%	41	2%	42	0%	42	0%	51	-21%
	EI	MJ	122061	68%	118767	67%	111747	65%	39454	0%	39457	0%	36763	-7%
	PAG	kgCO2e	1845178	74%	1812418	74%	1708789	72%	477167	0%	477191	0%	429971	-11%
	Período de retorno	anos	59	64%	59	64%	44	52%	21	0%	24	13%	40	48%
Ranking e % de melhoria em relação à pior solução			6º	0%	5º	1%	4º	27%	1º	43%	2º	27%	3º	38%

Observações: Os componentes das soluções envidraçadas apenas são considerados na simulação do comportamento térmico do edifício.

\* Tempo estimado para a execução da envolvente exterior e laje de pavimento.



\*\* Percentagem de melhoria da SAMv1 relativamente às restantes soluções em análise. Os valores negativos e assinalados a vermelho correspondem aos indicadores em que a solução SAMv1 é pior do que as restantes.

Numa visão global e comparada das várias soluções construtivas em estudo, observa-se que a solução SAMv1 (com adição de membrana com PCM apenas na cobertura) é a mais eficiente (Figura 7.86), ou seja, é aquela que apresenta os melhores resultados com uma quantidade mínima de recursos empregues, num cenário em que todos os parâmetros analisados apresentam o mesmo peso na avaliação final. Em oposição, as soluções menos eficientes são as convencionais (SCMad e SCMet). Por outro lado, tratando-se de uma intervenção de reabilitação, verifica-se que todas as soluções alternativas contribuem para a redução do consumo do piso subjacente ao piso ampliado, beneficiando o edifício existente (ver “consumo médio anual do piso subjacente” Tabela 7.36).

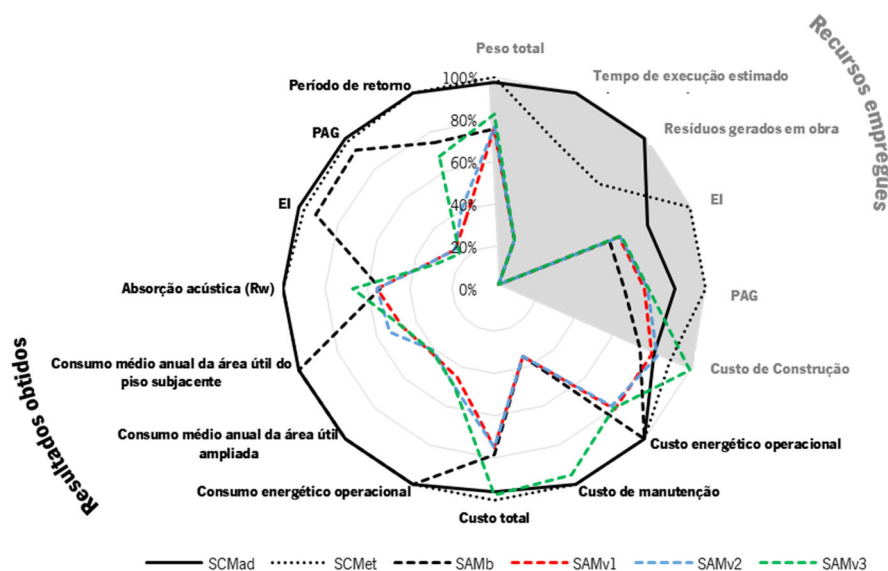


Figura 7.86. Comparação entre as diversas soluções de ampliação inseridas no edifício – edifício como um todo. Avaliação da eficiência em que todos os aspetos têm peso igual no resultado final. Melhor =0%; Pior =100%.

De modo a determinar os indicadores em que a solução de ampliação vertical SAMv1 é pior, ou melhor do que as restantes soluções em análise, apresenta-se na Tabela 7.36 essa comparação em percentagens. Assim, verifica-se que a SAMv1: (1) é melhor do que as SCMad/Met em todos os aspetos exceto no isolamento acústico; (2) é melhor do que a SAMb na etapa B1-D (utilização, manutenção, desconstrução e fim de vida) mas ligeiramente pior na etapa A1-A5 (produção matérias-primas, transporte e construção); (3) é melhor do que a SAMv2 e SAMv3 na etapa A1-A5 e ligeiramente pior na etapa B1-D (consumo energético do edifício, da parte ampliada e isolamento acústico, custo energético operacional, energia incorporada e emissões de carbono).

Em síntese, as soluções construtivas com membrana apresentam-se como uma alternativa eficiente às convencionais para realizar intervenções de reabilitação funcional com ampliação vertical sobre edifícios. Isto deve-se ao facto de apresentarem uma boa relação entre os recursos empregues e os resultados obtidos. Por exemplo, apesar de inicialmente a SAMb ser menos eficiente, a adição de recursos nas suas variantes SAMv1, v2 e v3, permite que os recursos empregues continuem a ser inferiores aos recursos empregues nas soluções convencionais e que, apesar disso, os resultados obtidos sejam melhores do que estas.

• **2ª fase: atribuição de pesos para avaliação multicritério - com critérios quantitativos e qualitativos – a realizar na etapa 6 - cenário base**

Os resultados finais da atribuição de pesos aos critérios e subcritérios são apresentados na Tabela 7.37. Estes mostram que o grupo de decisores atribuiu maior importância aos aspetos funcionais (C6), cujo peso é de 30%, entre os quais se destaca o consumo energético operacional do edifício (em 60 anos). O critério C4 (aspetos de segurança) é ponderado com 22%, e o critério C1 (aspetos económicos) com 15%. Para o critério C6, a ordenação mais elevada foi dada ao subcritério SC6.6 (consumo energético operacional com 47% do peso local e 14% do peso global).

Tabela 7.37. Resultados da atribuição de pesos a cada critério e subcritério – cenário base.

N.	Peso	Crítérios	N.	Código	Peso Local	Peso Global	Subcritérios	Objetivo
C1	15%	Aspetos econômicos	1	SC1.1	30%	5%	Custo de construção	min.
			2	SC1.2	30%	5%	Custo energético operacional para aquecimento e arrefecimento (60 anos)	min.
			3	SC1.3	30%	5%	Custo de manutenção (60 anos)	min.
			4	SC1.4	10%	2%	Período de retorno do investimento na ampliação vertical	min.
C2	8%	Aspetos sociais, culturais e patrimoniais	5	SC2.1	25%	2%	Uso de técnicas e materiais de construção tradicionais	MAX.
			6	SC2.2	11%	1%	Capacidade de instalação em sítios ocupados	MAX.
			7	SC2.3	52%	4%	Grau de intrusividade	min.
			8	SC2.4	12%	1%	Impacto do processo construtivo para a vizinhança	min.
C3	7%	Aspetos perceptivos	9	SC3.1	100%	7%	Qualidade estética da intervenção pelo exterior	MAX.
C4	22%	Aspetos de segurança	10	SC4.1	10%	2%	Resistência ao fogo dos materiais de revestimento da envolvente exterior	MAX.
			11	SC4.2	10%	2%	Resistência ao fogo dos materiais de revestimento da envolvente interior	MAX.
			12	SC4.3	20%	4%	Risco para os ocupantes perante furacões/ tempestades	min.
			13	SC4.4	20%	4%	Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos	min.
			14	SC4.5	20%	4%	Risco para os ocupantes em caso no caso da ativação de engenhos explosivos.	min.
			15	SC4.6	20%	4%	Resistência à queda de granizo sobre a cobertura	MAX.
C5	12%	Aspetos construtivos	16	SC5.1	45%	5%	Peso total (envolvente exterior e laje de pavimento da parte ampliada)	min.
			17	SC5.2	10%	1%	Facilidade de montagem	MAX.
			18	SC5.3	20%	2%	Tempo de execução estimado	min.
			19	SC5.4	5%	1%	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço exterior	MAX.
			20	SC5.5	5%	1%	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço interior	MAX.
			21	SC5.6	15%	2%	Durabilidade média dos materiais de revestimento da envolvente exterior da parte ampliada	min.
C6	30%	Aspetos funcionais	22	SC6.1	7%	2%	Grau de adaptabilidade para futuras alterações	MAX.
			23	SC6.2	7%	2%	Grau de repetibilidade	MAX.
			24	SC6.3	12%	4%	Grau de reversibilidade	MAX.
			25	SC6.4	27%	8%	Isolamento acústico (Rw) médio da envolvente exterior	MAX.
			26	SC6.5	47%	14%	Consumo energético operacional total do edifício c/ intervenção (em 60 anos)	min.
C7	6%	Aspetos de impacto ambiental	27	SC7.1	40%	2%	Energia incorporada total (EE) em todo o ciclo de vida - 60 anos	min.
			28	SC7.2	40%	2%	Potencial de aquecimento Global total (PAG) em todo o ciclo de vida - 60 anos	min.
			29	SC7.3	15%	1%	Resíduos sólidos gerados na fase de construção e manutenção (em 60 anos)	min.
			30	SC7.4	5%	0,3%	Contributo para a biodiversidade local	MAX.

7.9.6. Etapa 6: normalização dos valores e avaliação global de cada alternativa – cenário base

Nesta etapa, perante o cenário base de decisão (resultante da atribuição de pesos aos critérios pelo grupo de decisores (ver Tabela 7.37) adotou-se o procedimento descrito na secção 5.8 do Capítulo 5, resultando na elaboração da Tabela 7.38. Como resultado final, verifica-se que a alternativa SAMv1 é a mais relevante para atingir o objetivo enunciado (Figura 7.87), enquanto a alternativa SCMet é a que apresenta menor relevância.

Tabela 7.38. Resultados da avaliação global de cada alternativa para o cenário base.

C.	Peso	N.	SC.	Peso Local	Peso Global	Objetivo	Min.	Máx.	Decisão normalizada e ponderada					
									SCMad	SCMet	SAM b	SAM v1	SAM v2	SAM v3
C1	15%	1	SC1.1	30%	5%	min.	23648	31778	0,03	0,02	0,05	0,03	0,03	0,00
		2	SC1.2	30%	5%	min.	16872	21570	0,00	0,00	0,00	0,04	0,05	0,04
		3	SC1.3	30%	5%	min.	4800	13869	0,00	0,00	0,05	0,05	0,05	0,00
		4	SC1.4	10%	2%	min.	21	59	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01
C2	8%	5	SC2.1	25%	2%	MAX.	0	4	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		6	SC2.2	11%	1%	MAX.	3	4	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
		7	SC2.3	52%	4%	min.	2	3	0,00	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04
		8	SC2.4	12%	1%	min.	2	3	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
C3	7%	9	SC3.1	100%	7%	MAX.	3	4	0,07	0,07	0,02	0,02	0,02	0,00
C4	22%	10	SC4.1	10%	2%	MAX.	3	4	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
		11	SC4.2	10%	2%	MAX.	1	3	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
		12	SC4.3	20%	4%	min.	3	3	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
		13	SC4.4	20%	4%	min.	1	3	0,00	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04
		14	SC4.5	20%	4%	min.	3	3	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,04
		15	SC4.6	20%	4%	MAX.	4	5	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	0,01
C5	12%	16	SC5.1	45%	5%	min.	39737	52633	0,01	0,00	0,05	0,05	0,05	0,04
		17	SC5.2	10%	1%	MAX.	3	4	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
		18	SC5.3	20%	2%	min.	30	120	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
		19	SC5.4	5%	1%	MAX.	3	3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
		20	SC5.5	5%	1%	MAX.	4	5	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
		21	SC5.6	15%	2%	min.	30	60	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00
C6	30%	22	SC6.1	7%	2%	MAX.	3	4	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
		23	SC6.2	7%	2%	MAX.	3	4	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01
		24	SC6.3	12%	4%	MAX.	3	4	0,00	0,00	0,04	0,04	0,04	0,02
		25	SC6.4	27%	8%	MAX.	41	53	0,08	0,08	0,00	0,01	0,01	0,07
		26	SC6.5	47%	14%	min.	15561	34236	0,00	0,00	0,00	0,14	0,13	0,13
C7	6%	27	SC7.1	40%	2%	min.	58339	152006	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02
		28	SC7.2	40%	2%	min.	734833	2229639	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02
		29	SC7.3	15%	1%	min.	23	800	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
		30	SC7.4	5%	0,3%	MAX.	0	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Soma/Classificação final ponderada (%)/Pontuação global	Decisão Ponderada					
	SCMad	SCMet	SAM b	SAM v1	SAM v2	SAM v3
	0,356	0,353	0,46	0,68	0,67	0,62
Ordenação final	5ª	6ª	4ª	1ª	2ª	3ª

**Notas:** Formulas aplicadas para normalizar os valores dos subcritérios: MAXIMIZAR  $y = (X - \text{Min}) / (\text{MAX} - \text{min})$  Minimizar  $y = (\text{MAX} - X) / (\text{MAX} - \text{min})$ ; Normalização dos valores dos subcritérios - Escala final: (0=pior; 1=melhor); C = critérios; SB = subcritérios

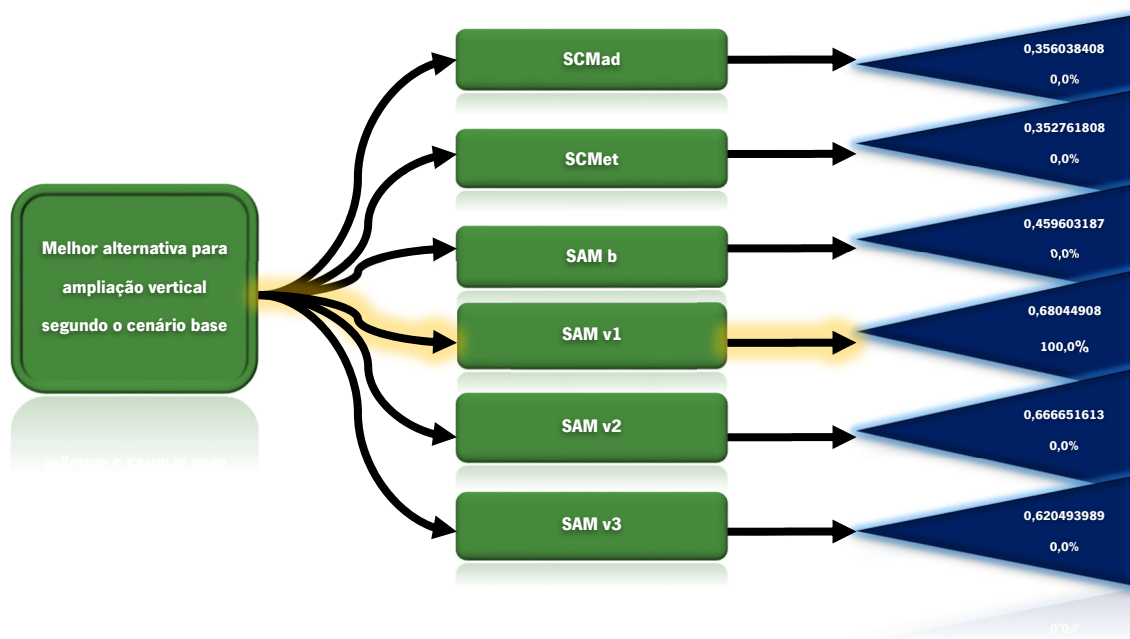


Figura 7.87. Árvore de decisão 'Melhor solução de sobreposição'. Gráfico obtido com a utilização da aplicação "Precision Tree" da ferramenta informática Decision Tools Suite (DTS) Industrial student version 7.6 (2018).

### 7.9.7. Etapa 7: análise de sensibilidade

Após a aplicação do método descrito, na secção 5.9 do Capítulo 5, verifica-se que a alternativa A4 – SAM v1 é a mais eficiente (93%) na maioria dos 77 cenários; enquanto a alternativa A2 – SCMet é a que apresenta menor eficiência (Tabela 7.39). Por ordem decrescente de importância (da melhor para a pior) tem-se A4>A5>A6>A3>A1>A2. A solução alternativa A4 - SAMv1, em média, considerando todas as variações de peso para todos os critérios avaliados, é 1% a 45% melhor do que as restantes soluções (A5 e A2 respetivamente).

Os resultados presentes na Tabela 7.39 também indicam que a alternativa A4 (SAMv1) mantém sua eficiência à medida que o peso dos aspectos funcionais aumenta, até 50%; a partir dos 70% a solução mais eficiente passa a ser a alternativa A6 (SAMv3), que possui envolvente exterior em membrana vegetal. Esta última solução alternativa contribui para: a redução das necessidades energéticas (através do isolamento térmico do edifício); mitigação de ilhas de calor urbano e substituição parcial da vegetação que foi destruída para construir o edifício existente, através do crescimento de vegetação na cobertura. Além disso, apresenta outros benefícios, como: redução dos níveis de poluição, capturando carbono, particularmente em meios urbanos, sendo por isso o parâmetro PAG - Potencial de Aquecimento Global - o mais reduzido, comparativamente ao das restantes soluções; aumenta o isolamento acústico e a longevidade dos materiais em membrana comuns (passando de 15 para 30 anos de durabilidade).

Na Figura 7.88, apresentam-se os resultados da análise de sensibilidade para cada um dos critérios. Observa-se que a alternativa A4 (SAMv1 – com 93% eficiência), a par da A5 (SAMv2 – com 92%) são as alternativas dominantes na maioria dos cenários de variação do peso de cada critério. Contudo, quando o critério C3 (aspectos percetivos) apresenta um peso igual ou superior a 60%, a alternativa A4 deixa de ser a escolhida, passando a ser a A1 (SCMad) a preferida. O mesmo sucede, quando C6 (aspectos funcionais) e C7 (aspectos de impacto ambiental) passam a ter um peso de  $\geq 70\%$ , passando a A2 (SCMet) e A6 (SAMv3), a ser as alternativas preferidas. Quando C4 (aspectos de segurança) apresenta um peso igual ou superior a 70%, a alternativa convencional A2 (SCMet) passa a ser a preferida.

Tabela 7.39. Resultados da análise de sensibilidade.

**Ordenação da eficiência para o cenário base**

Max.	A1 SC Mad	A2 SC Met	A3 SAMB	A4 SAMv1	A5 SAMv2	A6 SAMv3	Min.
AMv1	53%	51%	68%	100%	99%	91%	CMetl

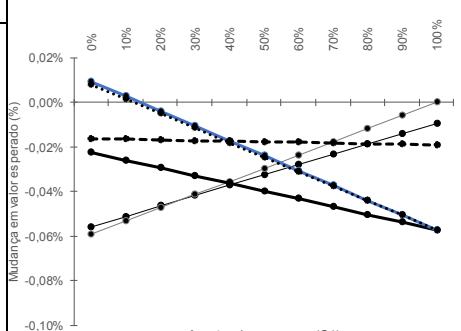
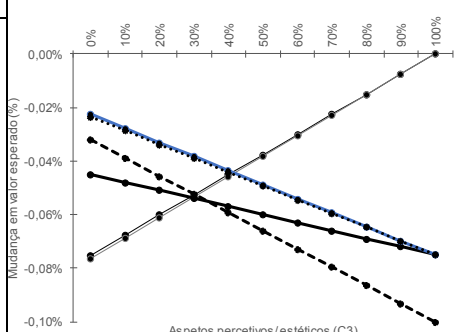
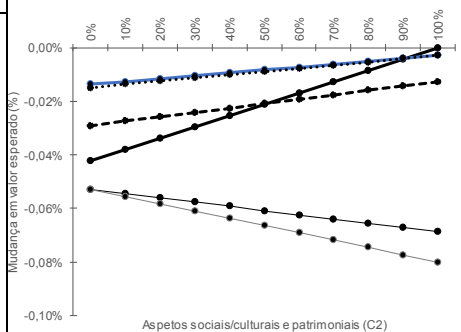
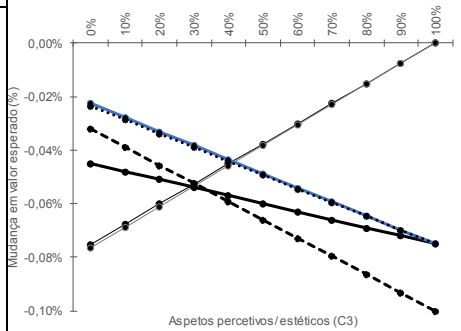
Figura 7.88. Valores de eficiência esperados para cada alternativa em análise, de acordo com a variação individual de cada critério. Gráficos obtidos com a utilização da aplicação Precision Tree da ferramenta informática Decision Tools Suite v. 7.6 (2018).

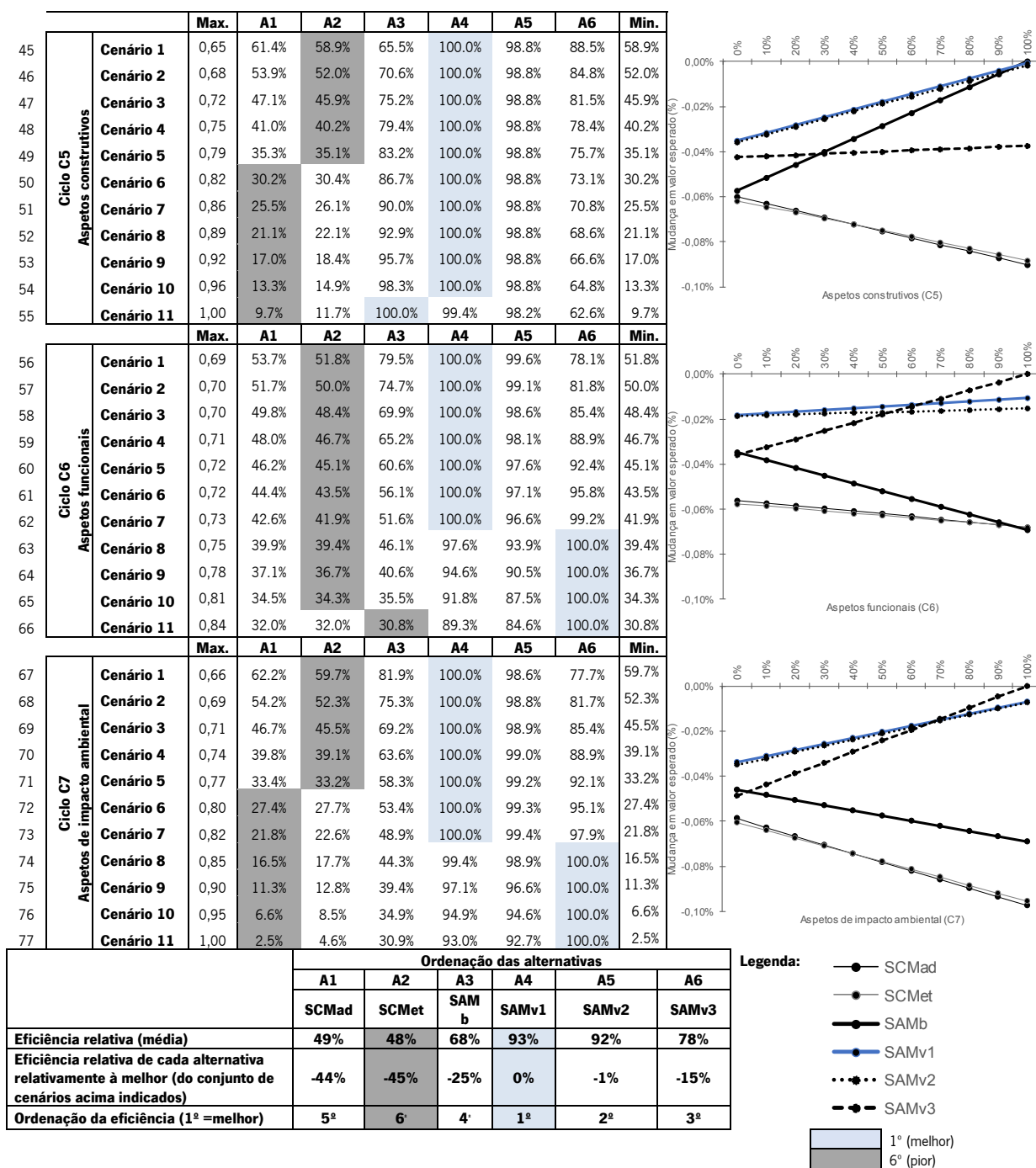
Nº da iteração  
Variação de peso para:

**Eficiência relativa para todos os cenários segundo vários ciclos**

		Max.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.	
1	<b>Ciclo C1</b> Aspectos econômicos	Cenário 1	0.67	56.9%	57.3%	72.9%	100.0%	98.7%	93.3%	56.9%
2		Cenário 2	0.69	52.7%	51.6%	72.7%	100.0%	98.8%	86.2%	51.6%
3		Cenário 3	0.71	48.7%	46.3%	72.5%	100.0%	98.9%	79.6%	46.3%
4		Cenário 4	0.74	45.0%	41.3%	72.3%	100.0%	99.0%	73.4%	41.3%
5		Cenário 5	0.76	41.5%	36.7%	72.2%	100.0%	99.1%	67.6%	36.7%
6		Cenário 6	0.78	38.2%	32.2%	72.0%	100.0%	99.2%	62.1%	32.2%
7		Cenário 7	0.80	35.1%	28.1%	71.9%	100.0%	99.3%	56.9%	28.1%
8		Cenário 8	0.83	32.1%	24.2%	71.8%	100.0%	99.4%	52.0%	24.2%
9		Cenário 9	0.85	29.4%	20.4%	71.6%	100.0%	99.4%	47.4%	20.4%
10		Cenário 10	0.87	26.7%	16.9%	71.5%	100.0%	99.5%	43.0%	16.9%
11		Cenário 11	0.90	24.2%	13.6%	71.4%	100.0%	99.6%	38.8%	13.6%
		Max.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.	
12	<b>Ciclo C2</b> Aspectos sociais, culturais e patrimoniais	Cenário 1	0.69	54.4%	54.7%	66.9%	100.0%	98.6%	82.1%	54.4%
13		Cenário 2	0.70	51.9%	50.9%	70.9%	100.0%	98.8%	83.0%	50.9%
14		Cenário 3	0.70	49.6%	47.2%	74.8%	100.0%	98.9%	83.8%	47.2%
15		Cenário 4	0.71	47.2%	43.6%	78.6%	100.0%	99.1%	84.6%	43.6%
16		Cenário 5	0.72	45.0%	40.1%	82.4%	100.0%	99.2%	85.5%	40.1%
17		Cenário 6	0.73	42.7%	36.6%	86.0%	100.0%	99.3%	86.2%	36.6%
18		Cenário 7	0.74	40.6%	33.3%	89.5%	100.0%	99.5%	87.0%	33.3%
19		Cenário 8	0.75	38.4%	30.0%	93.0%	100.0%	99.6%	87.8%	30.0%
20		Cenário 9	0.76	36.4%	26.8%	96.4%	100.0%	99.7%	88.5%	26.8%
21		Cenário 10	0.76	34.3%	23.7%	99.7%	100.0%	99.9%	89.2%	23.7%
22		Cenário 11	0.80	31.4%	20.0%	100.0%	97.1%	97.1%	87.4%	20.0%
		Max.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.	
23	<b>Ciclo C3</b> Aspectos perceptivos	Cenário 1	0,77	32.1%	30.4%	71.1%	100.0%	98.8%	87.8%	30.4%
24		Cenário 2	0,72	44.9%	43.2%	72.1%	100.0%	98.8%	84.8%	43.2%
25		Cenário 3	0,67	59.6%	58.0%	73.3%	100.0%	98.9%	81.3%	58.0%
26		Cenário 4	0,62	76.9%	75.4%	74.6%	100.0%	98.9%	77.1%	74.6%
27		Cenário 5	0,56	97.3%	95.9%	76.3%	100.0%	99.0%	72.3%	72.3%
28		Cenário 6	0,62	100.0%	99.0%	64.1%	82.0%	81.3%	54.4%	54.4%
29		Cenário 7	0,70	100.0%	99.3%	52.9%	65.7%	65.2%	38.9%	38.9%
30		Cenário 8	0,77	100.0%	99.5%	43.9%	52.6%	52.2%	26.3%	26.3%
31		Cenário 9	0,85	100.0%	99.7%	36.5%	41.8%	41.5%	16.0%	16.0%
32		Cenário 10	0,92	100.0%	99.9%	30.3%	32.7%	32.6%	7.4%	7.4%
33		Cenário 11	1,00	100.0%	100.0%	25.0%	25.0%	25.0%	0.0%	0.0%
		Max.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Min.	
34	<b>Ciclo C4</b> aspectos de segurança	Cenário 1	0,77	40.5%	37.3%	70.8%	100.0%	98.8%	76.4%	37.3%
35		Cenário 2	0,72	47.6%	45.5%	72.0%	100.0%	98.8%	81.1%	45.5%
36		Cenário 3	0,67	55.7%	54.8%	73.4%	100.0%	98.9%	86.5%	54.8%
37		Cenário 4	0,63	65.0%	65.5%	75.0%	100.0%	98.9%	92.6%	65.0%
38		Cenário 5	0,58	75.8%	77.9%	76.9%	100.0%	99.0%	99.7%	75.8%
39		Cenário 6	0,58	81.9%	85.6%	73.1%	92.5%	91.7%	100.0%	73.1%
40		Cenário 7	0,57	87.8%	93.1%	69.1%	84.7%	84.0%	100.0%	69.1%
41		Cenário 8	0,58	93.2%	100.0%	64.7%	76.4%	75.9%	99.4%	64.7%
42		Cenário 9	0,62	92.1%	100.0%	56.5%	63.7%	63.4%	92.4%	56.5%
43		Cenário 10	0,66	91.3%	100.0%	49.2%	52.6%	52.5%	86.3%	49.2%
44		Cenário 11	0,70	90.5%	100.0%	42.9%	42.9%	42.9%	81.0%	42.9%

Nota: "Mudança em valor esperado" significa qual será a alteração na pontuação/classificação final de eficiência para cada alternativa.





7.9.8. Etapa 8: discussão dos resultados e recomendações

Esta última etapa prende-se com a identificação de oportunidades que possam melhorar o desempenho da alternativa selecionada. Para tal são recomendadas e analisadas alternativas que permitam alcançar tais resultados.

A Figura 7.88 mostra que os aspectos estéticos (C3) e de segurança (C4) das soluções alternativas com membranas (A3, A4, A5 e A6) necessitam de ser melhoradas/aperfeiçoadas para alcançar uma melhor pontuação global de eficiência, especialmente quando atinge um peso acima de 30% na decisão final.

Analisando os resultados obtidos com a aplicação do modelo de avaliação proposto, verifica-se que, de acordo com as alternativas e os critérios analisados, a solução de reabilitação mais eficiente para realizar uma

ampliação vertical sobre um edifício antigo é a alternativa A4 (SAMv1<sup>18</sup>). A SAMv1 apresenta, em relação à maioria dos critérios analisados, melhor desempenho do que as restantes soluções em análise, sendo (por ordem crescente) A2 (SCMet) < A1(SCMad) < A3(SAM b) < A6 (SAMv3) < A5 (SAMv2). A utilização mais racional de materiais é determinante para que esta tecnologia construtiva obtenha este resultado.

Portanto, a alternativa menos eficiente é a A2 (SCMet<sup>19</sup>). As alternativas A1 (SCMad) e A2(SCMet) revelaram-se as menos eficientes, relativamente às soluções em membrana (A3, A4, A5 e A6), fundamentalmente devido a todos os critérios analisados, exceto no critério C3 (>30%) e C4 (>40%). As tecnologias convencionais de construção apresentam boa eficiência estética e de segurança, mas requerem um uso mais racional dos materiais para atingir um bom nível de eficiência nos demais critérios.

Em síntese, a eficiência relativa de soluções alternativas de membrana (SAMs) varia entre 20% a 45% (pior e melhor opção, respetivamente), ou seja, são 20% a 45% mais eficientes do que as soluções de referência convencionais (SCMet e SCMad).

Quando se trata de uma intervenção com abordagem de sobreposição, os intervenientes no processo de reabilitação, como os arquitetos, devem prestar especial atenção aos aspetos funcionais, económicos e de segurança, pois esses critérios receberam os mais elevados níveis de prioridade na avaliação da eficiência. Apesar dos aspetos de impacto ambiental apresentarem menor peso, isto não significa que os subcritérios do mesmo sejam menos importantes.

#### **7.10. Considerações finais**

Este estudo focou-se numa área relevante da arquitetura têxtil: a reabilitação funcional/energética de edifícios utilizando soluções construtivas com membranas arquitetônicas (têxteis técnicos). Foram avaliados os seguintes aspetos: utilização de membranas para executar intervenções de ampliação vertical sobre edifícios existentes de modo a reduzir o peso/sobrecarga sobre os mesmos; tempo de construção e problemas associados, bem como custo; consumo energético operacional, energia incorporada, emissões de CO<sub>2</sub> e período de retorno financeiro. Para avaliar a possível redução de peso, de consumo energético associados, entre outros aspetos, associados à intervenção de ampliação vertical, desenvolveram-se 7 modelos de simulação numérica com 7 soluções construtivas distintas (3 soluções convencionais e 4 alternativas em membrana). Neste sentido, para resolver este problema, como existem vários critérios a serem analisados, foi utilizado um modelo multicritério de suporte à decisão.

Considerando que os sistemas construtivos pesados apresentam peso superior a 500kg/m<sup>2</sup> e os sistemas leves, aproximadamente, 100≤500 kg/m<sup>2</sup>, se soluções construtivas com membranas, como as propostas neste estudo, pesam menos de 100kg/m<sup>2</sup>, então estas podem considerar-se soluções ultra-leves. Deste modo, considera-se que a avaliação de eficiência relativa realizada neste trabalho compara soluções construtivas convencionais leves com soluções alternativas ultra-leves.

As ampliações verticais leves, na maioria dos casos, permitem expandir o edifício sem a necessidade dos seus ocupantes mudarem de edifício; os trabalhos de construção podem, com apenas algumas interrupções, ser realizados com o edifício intervencionado ocupado. Tais extensões, não só aumentam a capacidade do edifício, como oferecem uma oportunidade para criar uma melhor utilização funcional do espaço existente, para acomodar uma mudança de uso, ou adaptação a novos estilos de vida. No entanto, a ligação entre a parte ampliada e a parte existente representa o maior desafio para o desenho e execução deste tipo de intervenções de reabilitação – abordagem de sobreposição.

Para determinar a eficiência relativa das soluções propostas com membrana, relativamente às soluções convencionais de referência, num contexto de reabilitação funcional de edifícios com abordagem de sobreposição, elaborou-se uma avaliação multicritério (de aspetos quantitativos e qualitativos), de acordo com

<sup>18</sup> Solução Alternativa em Membrana versão 1 - com estrutura metálica, envolvente exterior e interior em membrana, com isolamento térmico e acústico + membrana com material de mudança de fase apenas na cobertura.

<sup>19</sup> Solução Convencional Metálica - solução convencional com estrutura LSF, cobertura de telhas cerâmicas, envolvente vertical com revestimento exterior em chapa metálica e interior em OSB e gesso cartonado e isolamento térmico e acústico.



parâmetros associados às etapas do ciclo de vida de um edifício residencial (60 anos) e tendo em consideração os aspetos: económicos, sociais/culturais/patrimoniais, de segurança, percetivos, construtivos, funcionais/energéticos e ambientais. Da avaliação da eficiência relativa das soluções construtivas em membrana retiram-se as seguintes conclusões que auxiliam tomadas de decisão e desenvolvimentos futuros:

- 1) A eficiência relativa das soluções alternativas em membrana varia entre 45% a 20% (melhor e pior opção respetivamente entre as SAM), ou seja, são 45% a 20% mais eficientes do que as soluções convencionais de referência (SCMad e SCMet).
- 2) Por si só, as membranas, devido à sua reduzida massa térmica e isolamento, quando constituem a envolvente exterior de um espaço, não conseguem fornecer as condições necessárias para alcançar um conforto térmico constante no seu interior. Normalmente, as membranas arquitetónicas possuem cerca de um milímetro de espessura e um peso próprio aproximadamente de 1 kg/m<sup>2</sup>. O valor de U (coeficiente de transferência térmica) de uma membrana é de aproximadamente 5 W/(m<sup>2</sup>.°C). Como resultado, as membranas arquitetónicas são particularmente sensíveis às mudanças das condições climáticas, sendo afetadas muito mais rápido e significativamente do que a maioria dos outros materiais de construção e, por isso, necessitam de ser complementadas com outros materiais.
- 3) As soluções com membranas arquitetónicas, quando integradas num sistema construtivo, constituem superfícies de base para a adição de outros materiais, em variantes construtivas multicamada, com isolamento térmico/acústico e massa térmica não convencional, configurando-se assim soluções construtivas mais permanentes, mas com elevado grau de desconstrução, como se mostrou neste estudo.
- 4) As melhorias funcionais/energéticas alcançadas nas soluções alternativas com membranas arquitetónicas devem-se à adição de outros materiais. No entanto, mesmo assim, a quantidade de recursos empregues é menor e consegue-se, no mínimo, ter o mesmo desempenho funcional/energético com um peso por metro quadrado muito inferior ao das soluções convencionais de referência. Esta é a principal vantagem em adotar soluções alternativas com membranas em abordagens de sobreposição/ampliação vertical, apresentando uma eficiência maior do que as soluções convencionais, entre 27% a 43%, mínimo para a SAMb e máximo para a SAMv1, respetivamente.
- 5) Num cenário sem climatização do espaço interior, as ampliações verticais não alteram o comportamento do piso subjacente, tanto no inverno como no verão. Mas quando os espaços são climatizados, a situação altera-se e a ampliação vertical passa a beneficiar o edifício existente, reduzindo o seu consumo energético para suprir necessidades de aquecimento e arrefecimento.
- 6) O reduzido peso próprio, tempo de construção e custo das construções com membranas tornam-nas particularmente apropriadas para intervenções de ampliação vertical, em particular quando a cobertura existente tem de ser removida e, conseqüentemente, o edifício fica sujeito às intempéries.
- 7) Para além da extrema leveza, as SAM também facilitam o transporte (indispensável em contextos urbanos com limitações de acessos aos edifícios a interencionar) e de instalação, com conseqüente redução de custos e impacto ambiental.
- 8) As SAM são menos eficientes em termos de isolamento acústico., necessitando do emprego de mais recursos para atingir os mesmos resultados das soluções convencionais, como se sucede com a variante SAMv3. Apesar disso, a cobertura alternativa em membrana apresenta um índice de redução sonora de menos 2dB apenas do que a cobertura convencional de referencia (53dB)). Contudo, isso não afeta a sua eficiência relativa.
- 9) A intervenção de reabilitação com ampliação vertical SAMv1 é a que apresenta maior eficiência – benefícios funcionais (em termos termo energéticos) e estruturais (redução de sobrecargas) para o edifício interencionado.
- 10)O período de retorno do investimento económico é elevado para todas as soluções de ampliação vertical em estudo. Contudo as soluções alternativas são as que apresentam menor período de retorno: mínimo de 21 (SAMv1) e máximo de 44 anos (SAMv3), em oposição aos 59 das soluções convencionais, considerando um edifício com vida útil de 60 anos.
- 11)Atendendo à variação dos cenários climáticos e geográficos, verifica-se que os territórios ilhas e com estações de aquecimento mais amenas (como o caso da zona climática da cidade do Porto, Faro e R.A. da Madeira) são favoráveis à adoção das soluções construtivas leves, em particular da SAMv3, com massa térmica não convencional.

- 12) É possível compatibilizar esteticamente as construções com membranas arquitetônicas com os restantes tipos de construções, com várias cores e geometrias, para além de permitirem a incorporação/integração estética de vários elementos construtivos convencionais como janelas/chaminés, *etc.*, como se mostra neste estudo, na secção 7.7.3.
- 13) As SAM caracterizam-se por elementos construtivos multicamada com materiais de isolamento térmico e acústico entre dupla membrana. Para além disso, estas soluções permitem a otimização de cada camada considerando as suas propriedades funcionais, permitindo melhorar a resistência das membranas ao vento e ao impacto da chuva, combinando vários níveis de translucidez. Exemplo disso são as estruturas pneumáticas, propostas para constituírem claraboias neste tipo de intervenções, como se exemplifica neste estudo, no item 7.7.2.
- 14) A conceção das SAM consideram que todos os seus componentes possam ser separados e reciclados no fim da sua vida útil (ver secção 7.8.4) e por isso apresentam um reduzido impacto ambiental na fase de desconstrução e um elevado potencial de reutilização/reciclagem/valorização como se verificou neste estudo. Para além disso, sob o ponto de vista de reabilitação funcional, a vantagem na facilidade de desconstrução da solução em membrana favorece intervenções de reabilitação futuras, como, por exemplo, quando for necessário remover a ampliação vertical, ou executar alguma transformação que vá de encontro às necessidades espaciais/funcionais dos futuros utilizadores do edifício.
- 15) À semelhança das soluções convencionais, as tecnologias de construção com membranas arquitetônicas também podem contribuir para alcançar edifícios com energia positiva, através da integração de elementos fotovoltaicos. Como referido, atualmente já existem soluções de membrana com fotovoltaicos integrados flexíveis que se encontram disponíveis no mercado e vão surgindo em número crescente.
- 16) A avaliação da eficiência relativa e do ciclo de vida mostra que o consumo energético na fase de utilização é o fator com maior influência na tomada de decisão. Em contraste, a energia incorporada dos componentes de construção utilizados apresenta um reduzido peso na tomada de decisão e no cálculo do impacto ambiental no ciclo de vida.

Num futuro próximo, será possível a integração de camadas de isolamento com água e ar em composições multicamada de membrana de modo a permitir o aumento de massa térmica e de isolamento acústico de soluções com membranas transparentes/translúcidas. Outras propriedades, como a condutividade elétrica e eletroluminescência, ou a possibilidade de integração de nano estruturas, também serão aspetos relevantes que irão alterar as propriedades funcionais das membranas de modo positivo. Neste âmbito, as propriedades da envolvente do edifício podem ser especificamente adaptadas a parâmetros climáticos, atendendo às atuais e futuras demandas por soluções para os problemas associados às alterações climáticas. Em termos ambientais, fatores como a redução de energia e recursos incorporados na fase de produção, bem como de reutilização e reciclagem dos componentes e materiais de membrana são de grande importância para que as soluções construtivas que incorporam membranas arquitetônicas consigam ser ainda mais eficientes (no que toca ao impacto ambiental) e ganhar mais competitividade, relativamente às soluções convencionalmente adotadas, apresentando-se como alternativas cada vez mais eficientes.

Mesmo com a evolução crescente que os materiais de membrana conseguiram no passado recente, ainda há um longo caminho a percorrer antes que estes possam ser aceites e considerados como sustentáveis, especialmente no que se refere à resistência social e cultural, quando se trata de uma habitação. Portanto, em trabalhos futuros devem ser construídos e testados (funcionalmente e estruturalmente) protótipos à escala real para aumentar o conhecimento e a confiança no uso de soluções de membranas em intervenções específicas de ampliação vertical. Existem alguns projetos experimentais de referência, como os protótipos *Membrane Test Cell* (Mendonça; 2010), *Techstyle Haus* (2014 Solar Decathlon Europe) e *Airclad* (Airclad, 2016). Contudo, estes protótipos não foram construídos nem testados sobre edifícios existentes e por isso não foram considerados nem testados aspetos de ligação, ou de influência no desempenho funcional. Por isso, enquanto ensaio numérico e concetual, o presente trabalho configura um novo contributo a adicionar ao estado do conhecimento.

## Capítulo

# 08

*Teste n° 03 \_ abordagem de reposição:  
Repor a forma sem adição significativa de massa.*



*Figura 8.1. Fotomontagem com a solução de reposição do teto abobadado da Igreja do Carmo - alternativa em membrana.*

*De acordo com as conclusões do capítulo 4, verifica-se que as membranas arquitetónicas (transparentes e translúcidas) podem constituir uma alternativa às soluções convencionais (de vidro) na reabilitação de edifícios ordinários e classificados, ou na proteção de sítios arqueológicos, particularmente em situações onde o peso deve ser especialmente reduzido. A cobertura da Igreja do Carmo (atualmente convertida no Museu Arqueológico do Carmo – MAC) foi destruída pelo terramoto de 1755 e as suas ruínas permanecem como memorial deste evento. No entanto, a falta de proteção, não só está a expor a ruína e as peças arqueológicas (dispostas na nave) à deterioração, como tem limitado o número de atividades culturais e sociais que aí decorrem. Por estes motivos, a colocação de uma cobertura neste espaço permitiria expor/armazenar mais peças de achados arqueológicos e a realizar um maior número de eventos culturais durante todo o ano, sem limitações funcionais devido a variáveis climáticas. Deste modo, propõe-se a reposição do teto e da cobertura da nave da Igreja do Carmo com materiais transparentes e leves. A ideia de a cobertura ser transparente assenta na proposta feita em 1864 pelo arquiteto fundador do MAC – Possidónio da Silva – que reflete a necessidade de manter, tanto quanto possível, o caráter das ruínas, preservando a linguagem arquitetónica existente e a sensação de estar ao ar livre, mantendo a nave da igreja aberta para o céu e iluminada por luz natural. A opção por uma cobertura leve, feita com membrana transparente de ETFE como alternativa ao vidro, tem o intuito de reduzir a carga a colocar sobre os elementos estruturais existentes. As soluções propostas, nesta tese, para esta abordagem de intervenção - reposição – apresentam formas concebidas especificamente para o edifício em ruína, mas que se podem adotar noutros cenários de reabilitação, onde a atualização de requisitos funcionais gera a necessidade de ampliar o espaço coberto. Com o presente exercício/teste propõe-se mostrar que a reposição de uma cobertura e teto em membrana do espaço em ruína da Igreja do Carmo pode: (1) apresentar um reduzido impacto visual na área circundante às ruínas; (2) incrementar o desempenho funcional, preservando ao mesmo tempo o caráter arquitetónico do edifício; (3) minimizar custos e tempo de construção; (4) contribuir para a mitigação de riscos (desempenho na proteção dos ocupantes); (5) adotar princípios de reabilitação, como (a) a baixa intrusão, num compromisso entre a preservação do existente e o desempenho da solução, e (b) reversibilidade (no futuro se existir uma solução melhor, a membrana permitirá ser substituída sem danos para a preservação das características do existente; (6) globalmente, apresentar eficiência equivalente, ou superior à solução contemporânea de referência (em vidro).*

## 8.1. Introdução

### 8.1.1. *Justificação do caso de estudo para realização do teste*

Como se verificou no capítulo 4, as principais entidades que tutelam o património mundial têm progressivamente apoiado o desenvolvimento de soluções com membranas para proteção do património arquitetónico, por permitirem alcançar elevados padrões de proteção, flexibilidade e reversibilidade.

Ao procurar repor uma seção, ou componente em falta num edifício, esta abordagem arquitetónica requer um elevado nível de precisão na fase de conceção de modo a (a) preservar o caráter do edifício e (b) garantir a compatibilidade dos novos elementos com os existentes, quer na sua dimensão, quer na escala e valores arquitetónicos, de forma a evitar problemas futuros (Macieira, Mendonça & Guedes, 2017). No presente capítulo pretende-se, no âmbito de uma intervenção de reabilitação funcional e segundo uma abordagem arquitetónica de reposição, avaliar em que medida a adoção de uma solução construtiva em membrana para a reposição de uma cobertura de um edifício em ruína, constitui uma alternativa eficiente à solução convencional de vidro.

Como caso de estudo, selecionou-se o espaço em ruína da Igreja do Carmo (*atualmente convertida no Museu Arqueológico do Carmo – MAC*), localizado numa colina da cidade de Lisboa. A cobertura da nave deste edifício foi destruída pelo terramoto de 1755 e as suas ruínas permaneceram como memorial deste evento que afetou fortemente a cidade de Lisboa e os seus habitantes. No entanto, a falta de proteção expôs os elementos construtivos do edifício a 263 anos de deterioração. Entretanto, a nave foi transformada num museu arqueológico que expõem peças antigas que necessitam de proteção. A reposição da cobertura deste espaço não só permitiria proteger as peças, como também expor/armazenar um maior número de peças de achados arqueológicos e realizar mais eventos culturais durante todo o ano. Na secção seguinte são abordados alguns aspetos que se considera importantes para a concretização do caso de estudo

### 8.1.2. *Considerações iniciais*

Nas próximas secções serão feitas algumas reflexões em relação ao assunto em análise. Na *Reflexão 1* alerta-se para o facto de o território nacional ser vulnerável à ocorrência de eventos sísmicos, pelo que a adopção de soluções leves para a ligação/reforço dos elementos estruturais existentes e para execução de novos elementos pode ajudar a mitigar os efeitos provocados pela ocorrência destes eventos. Na *Reflexão 2* analisam-se alguns exemplos onde a cobertura de um edifício em ruína, ou de um espaço arqueológico se apresenta como uma solução recorrente de reabilitação funcional (temporária ou permanente) com o objetivo de dinamizar e conferir proteção a estes espaços. Dado que neste exercício se apresenta uma proposta de teto acústico pneumático e retrátil, fazem-se mais duas reflexões: *Reflexão 3* - sobre da evolução das estruturas retráteis em membrana e a *Reflexão 4* sobre estruturas pneumáticas e retráteis.

#### • **Reflexão 1: a massa e os sismos**

O propósito da reabilitação de um edifício é reduzir a sua vulnerabilidade - dos elementos estruturais, não estruturais e conteúdo - e a dos seus utilizadores face às ações que sobre ele atuam durante o seu período de vida. No presente caso de estudo, e porque os museus possuem objetos únicos e insubstituíveis, para além da proteção de vidas humanas é também necessário evitar danos em tais objetos. Além disso, como o edifício tomado como caso de estudo se localiza em Lisboa, uma cidade com risco sísmico moderado/elevado<sup>1</sup>, é fundamental avaliar o impacto de qualquer intervenção que interfira com o seu comportamento sísmico. Reabilitar funcionalmente um edifício consiste, também por isso, na melhoria do seu desempenho na proteção.

As forças sísmicas são forças inerciais que atuam em todos os elementos que possuem massa. Por isso, e embora a relação não seja direta, quanto menor for a massa, menor será o potencial de criação de forças sobre as construções. Charleson (2008) refere que o peso do edifício é um dos fatores, entre outros, que influencia a severidade das forças sísmicas. Por isso, em regiões com elevado risco sísmico, recomenda-se que se adotem soluções construtivas leves de modo a reduzir a vulnerabilidade à ação sísmica. Sempre que possível, devem

<sup>1</sup> De acordo com o Regulamento de Segurança e Ações ainda em vigor, Portugal continental está dividido em quatro zonas sísmicas, A, B, C e D. A zona A, onde o risco sísmico é mais elevado, inclui regiões detentoras de importante património edificado (Coias & Lourenço, 2017), nomeadamente Lisboa onde se localiza o caso de estudo.

substituir-se elementos pesados por outros mais leves e ligar todos os elementos estruturais entre si para promover um comportamento estrutural do tipo “caixa fechada”. Como tal, no presente caso de estudo propõe-se uma solução alternativa leve - em membrana, para reforçar elementos estruturais e executar elementos não estruturais - constituída por uma estrutura que interliga todos os elementos estruturais verticais existentes ao nível do coroamento, como se apresenta adiante no item 8.3.3, de modo a atenuar os efeitos causados pela ocorrência de terremotos, devido ao seu alto modo de falha flexível e benigno. Pois, como referido nos capítulos 3 e 4, a capacidade da membrana de ETFE, selecionada como alternativa ao vidro, para receber cargas instantâneas extremamente elevadas, combinada com a sua elevada tolerância à deflexão, torna-a adequada para aplicações em locais sujeitos a terremotos, condições climáticas severas, ou risco de explosão. Não obstante os seus atributos estruturais e o modo de falha benigno, o ETFE é extremamente robusto. Pois, ao contrário do vidro, a membrana de ETFE não quebra, o que constitui uma mais-valia em termos de proteção para os utilizadores do espaço encerrado com este material.

• **Reflexão 2: coberturas em membrana para edifícios património e espaços arqueológicos**

Tratando-se o presente exercício de uma abordagem de reposição de uma cobertura para um edifício em ruína, convertido em museu arqueológico e classificado como monumento nacional, apresentam-se alguns exemplos de intervenções de reabilitação funcional de edifícios património e de espaços arqueológicos, através da incorporação de coberturas em membrana. A cobertura de um edifício em ruína, ou de um espaço arqueológico apresenta-se como uma solução recorrente de reabilitação funcional, com o objetivo de dinamizar estes espaços, conferindo-lhes proteção. Para melhor ilustrar este aspeto, apresentam-se alguns exemplos de projetos de cobertura para edifícios património e espaços arqueológicos, dando particular atenção ao tipo de estrutura (temporária ou permanente) e às soluções de conexão entre a nova cobertura e os elementos antigos existentes.

Segundo Demas (2013), acerca do estado da arte sobre abrigos/coberturas para sítios arqueológicos, existem centenas em todo o mundo, dos quais 218 surgiram desde a década de sessenta até o ano de 2013, o que fornece um bom indicador do interesse em utilizar abrigos/coberturas em sítios arqueológicos. Contudo, Zanelli (2015) defende que é necessária uma revisão mais crítica da eficácia dos abrigos/coberturas, como forma de preservar as características arqueológicas *in situ*, o desafio futuro consiste em assegurar que estes abrigos/coberturas forneçam proteção efetiva sem causar a deteiorização do espaço ao longo do tempo e, procurar soluções que sejam esteticamente menos invasivas do que as opções existentes. A literatura mostra exemplos de casos em que certas características arqueológicas *in situ* foram danificadas após o uso de alguns sistemas de cobertura; a seleção de materiais na fase de conceção de uma cobertura, otimizando tanto a conservação quanto a visibilidade do património, é uma questão importante que precisa de um estudo mais aprofundado e de ser atualizada para a ampla gama de novos materiais e tecnologias de construção atualmente disponíveis (Palumbo & Teutónico, 2002; Campioli *et al.*, 2008). Por exemplo, os perigos de utilizar materiais transparentes para a cobertura estão associados aos efeitos negativos do sobreaquecimento e da condensação (Yaka *et al.*, 2013 *apud* Zanelli, 2015). Contudo, em vez dos materiais transparentes comuns, mais pesados, existem novos tipos de materiais leves, translúcidos, inovadores e até flexíveis (como as membranas) a utilizar em estruturas tensionadas e que podem encontrar lugar no desenho de coberturas para espaços arqueológicos.

Apesar de ainda ser necessário um guião para a conceção e implementação de coberturas em espaços arqueológicos, na última década têm sido feitos esforços, sobretudo para avaliar o desempenho higrótérmico de abrigos construídos através de ensaios experimentais; encontrando-se já publicados vários estudos multidisciplinares acerca da avaliação do desempenho de mais de 100 abrigos em Itália (Laurenti, 2006; Altieri *et al.*, 2006; Bartolini *et al.*, 2006 *apud* Zanelli, 2015). Os seguintes casos de estudo podem considerar-se como exemplos de eficácia das estruturas de membrana enquanto sistemas de preservação do existente.

○ *Coberturas permanentes de membrana:*

O espaço arqueológico da insula denominada de Casas Terraço em Efesus, Turquia (com aprox. 4000 m<sup>2</sup>), foi protegido por uma inovadora solução de abrigo permanente, composto por quatro elementos: uma cobertura em membrana de fibra de vidro revestida a politetrafluoroetileno (PTFE) (com durabilidade estimada entre 25 a 30 anos), tensada sobre uma estrutura metálica não corrosível, com fundações constituídas por blocos de betão reforçado, e uma fachada em lâminas de policarbonato transparente. O abrigo foi concebido com base nas

estratégias passivas de regulação do conforto térmico do espaço interior, como a promoção da ventilação através de aberturas no topo da cobertura. A fachada transparente, com lâminas de policarbonato (8mm espessura) oferece proteção contra atos de vandalismo e uma relação visual entre o espaço interior e o exterior. Por outro lado, a translucidez da membrana fornece iluminação natural adequada à observação das ruínas pelos visitantes e proteção contra a radiação solar direta durante os dias mais quentes. Para além disso, oferece proteção contra a chuva, integrando um sistema de drenagem de águas pluviais.

A cobertura permanente destes espaços podem ser concebida com uma grande variedade de geometrias e configurações, sem a desvantagem de ter um grande impacto nos elementos de fundação, como sucede na cobertura de membrana das ruínas dos templos de *Hagar Qim e Mnajdra* em Malta. As ruínas destes templos estavam expostas às intempéries e a pedra de calcário estava a deteriorar-se devido ao elevado teor de cloreto de sódio da água das chuvas e às grandes amplitudes térmicas. Como resultado, um comité de cientistas recomendou a “Conservação e proteção da interpretação” do local dos templos de acordo com os padrões da UNESCO. Deste modo, foram enunciadas três exigências a considerar no projeto de cobertura dos templos. A intervenção: (1) tinha de ser desconstruível sem provocar danos visíveis no local da escavação; (2) não podia obstruir a entrada de luz solar no solstício de verão e inverno e (3) devia fornecer proteção efetiva contra as variações climatéricas. Existiram algumas limitações que tornaram uma cobertura em membrana a única solução possível. Uma das limitações deveu-se ao facto de o templo não poder ser tocado de alguma forma, impossibilitando o uso de máquinas pesadas e de andaimes, motivo pelo qual a membrana foi instalada através de uma rede de cabos e alpinistas profissionais. Outra limitação estava associada à particularidade topográfica do local, com base na qual se obteve a geometria da cobertura, composta por uma estrutura que consiste em apenas dois arcos treliçados centrados e inclinados ligeiramente para o exterior. A membrana selecionada foi a de fibra de vidro revestida a PTFE, por filtrar a luz solar entre 10 a 15% e proteger as pedras calcárias dos raios Utra Violeta, reduzindo significativamente a amplitude térmica diária sobre as pedras, entre 20° a 70°.

o *Coberturas temporárias de membrana:*

De acordo com Minissi (1985), os sistemas de proteção temporários são muitas vezes concebidos como abrigos simples, puramente funcionais, de baixo custo, que normalmente se tornam permanentes e, com algumas exceções, ignoram o valor artístico e arquitetónico do existente. Atualmente, a conceção de abrigos temporários é bastante semelhante à de 25 anos atrás e cada vez mais as estruturas temporárias estão a tornar-se permanentes devido a uma gestão ineficaz (Demas, 2013). Uma abordagem inovadora de abrigos temporários, focada no desenvolvimento de soluções com melhor custo-benefício que acompanhe as várias fases da atividade arqueológica – desde a fase de escavação à de preservação após a fase de restauração - parece uma estratégia sustentável. Um exemplo notável de uma estrutura temporária é a cobertura do espaço arqueológico de Bibracte, Saint-Léger-sous Beuvray, Mount Beuvray, França. Este sistema de cobertura modular foi inicialmente concebido para a fase de escavação (facilmente adaptada e reconstruível em outras áreas de escavação do mesmo espaço arqueológico). Os balastros são o único componente arquitetónico e formal com claro impacto visual (Figura 8.2(b)). Este sistema integra: cobertura em membrana de poliéster revestida a PVC e PVDF; fundações reversíveis e envolvente vertical operável, feita em membrana, para otimizar a ventilação do espaço interior (Figura 8.2(c)).

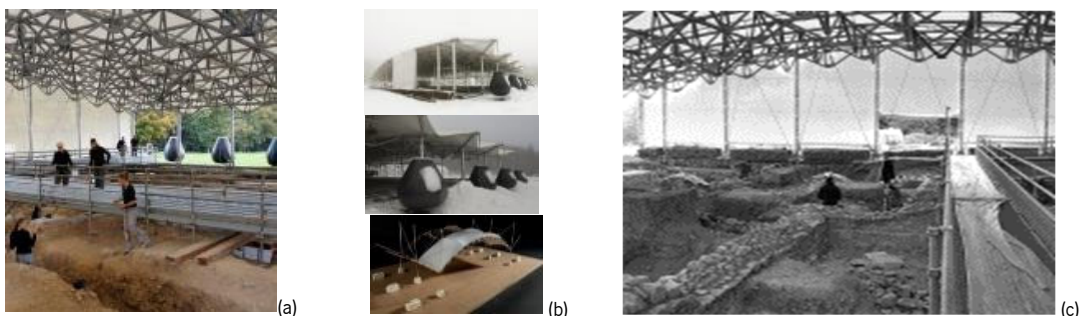


Figura 8.2. Bibracte, Mount Beuvray (França) concebido pelo arquiteto Paul Andreu: (a) arqueologistas em atividade sob a proteção da cobertura temporária em membrana; (b) vista da estrutura em membrana, com os balastros após queda de neve e maquete conceitual da solução modular; (c) painéis verticais móveis para regular a ventilação interior (Archeologicalshelters, 2012).

Outro exemplo é a cobertura pneumática e amovível, desenhada para o Castelo de *Bellver* (Maiorca, Espanha) por Ramon Sastre. Esta foi concebida para uso temporário, para proteger um pátio durante eventos culturais sazonais



(Figura 8.3). O processo construtivo desta cobertura foi concebido para não afetar a antiga construção existente. Por isso, foram concebidos balastros com 36 sacos de areia (25 kg cada) (Figura 8.3(d) para cada elemento de suporte, capaz de suportar cargas provocadas pela ação do vento ( $\leq 100$  km/h)). Não se utilizaram parafusos roscados, apenas cavilhas; nem cabos de aço, apenas redes e dois equipamentos de insuflação (Sastre, 2007).

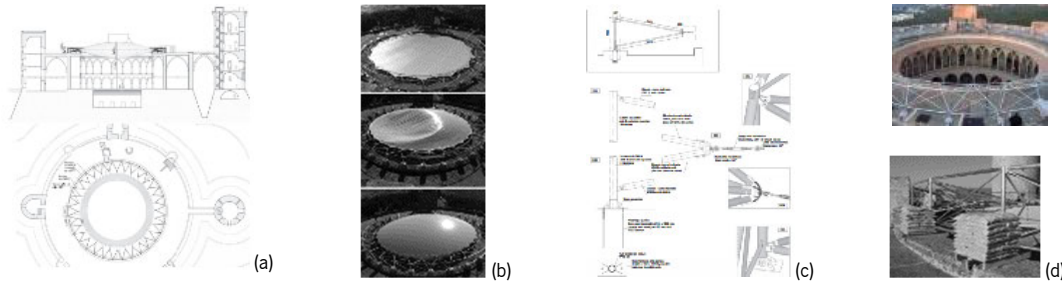


Figura 8.3. Castelo de Bellever (Maiorca, Espanha): (a) desenhos gerais da estrutura amovível (desenhos elaborados por Ramon Sastre); (b) etapas de instalação da cobertura insuflável (foto de Ramon Sastre apud Zanelli, 2015); (c) Pormenores de ligação da cobertura aos elementos resistentes existentes; (d) balastros de ancoragem da estrutura em membrana (totalmente reversíveis) (Tensinet, 2010).

Uma técnica diferente foi utilizada no sistema construtivo da cobertura para as Ruínas do castelo de *Thierstein* (Suíça). A nova cobertura em membrana, concebida pelo arquiteto Kugel (Figura 8.4), é instalada no verão para proteger os visitantes do sol e desmontada no inverno para que estes possam visualizar apenas a ruína. Na época de verão, o pátio do castelo é utilizado para vários eventos culturais e com a nova cobertura é possível albergar uma audiência de 200 pessoas e uma área de palco (Figura 8.4(c)). A cobertura tensada (de 350 m<sup>2</sup>) é feita com membrana de poliéster revestida a PVC e os componentes metálicos são de aço galvanizado. Uma vez que a cobertura em membrana não foi dimensionada para cargas de neve (dado que é removida no inverno) todos os elementos de aço são mais leves e finos do que os normalmente usados para suportar uma cobertura de membrana permanente. Baseada num conceito de montagem simples, esta cobertura de membrana não requer mão-de-obra especializada para a sua instalação. De modo a atender ao pedido da autoridade de proteção dos monumentos, para manter a cobertura invisível de longe, a membrana ajusta-se exatamente às ruínas, com uma geometria muito particular (Figura 8.4(c)); a membrana é suspensa com cinco pontos elevados a partir de um cabo de suporte central e é inclinada contra as ações do vento. Os dois mastros principais, o cabo de suporte e a maioria dos componentes da estrutura metálica permanecem durante o ano inteiro.



Figura 8.4. Ruínas do castelo de Thierstein (Suíça) - contraste entre a nova estrutura temporária entre as ruínas: (a) vista panorâmica da cobertura inserida na ruína; (b) vista interior do espaço coberto com estrutura em membrana; (c) vista axonométrica (Kugel, 2013).

### • Reflexão 3: evolução das estruturas retráteis em membrana

O desenvolvimento arquitetónico das estruturas retráteis e leves é impulsionado por duas forças: a necessidade dessa função numa construção e a disponibilidade de materiais adequados para a executar. Antes do século XX, a presença limitada desses fatores reduziu o desenvolvimento deste tipo de construções; o *velarium* do coliseu de Roma e as populares *Mansiones* (Figura 8.5) constituem exemplos excepcionais (Kronenburg, 1995).

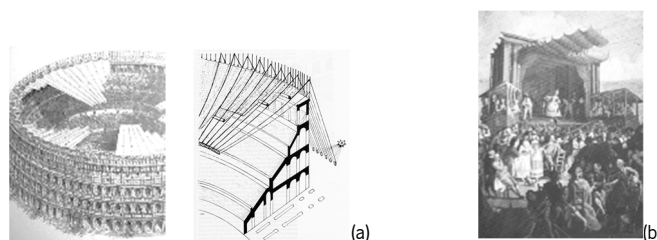


Figura 8.5. Exemplos de coberturas retráteis anteriores ao século XX: (a) velarium do coliseu de Roma; (b) teatros improvisados em edifícios existentes denominados de "Mansiones" com coberturas retráteis – imagem de Marco Marcola, a *Commedia dell'arte* na Arena de Verona, em 1772 (Kronenburg, 1995).

Os sistemas de estrutura retrátil foram inventados quase ao mesmo tempo que o conceito das estruturas tensadas. As vantagens de um sistema retrátil já eram evidentes na Roma antiga, quando o *velarium* pertencente ao coliseu era composto por engenhosos sistemas de sombreamento feitos com cordas, guinchos e velas de embarcações, para proteger os espectadores do calor e sol direto durante os eventos diurnos. Desde que Frei Otto iniciou a sua investigação sobre estruturas têxteis tensadas, entre 1954 e 1959, que se investigavam as possibilidades de as membranas integrarem coberturas móveis. A equipa do Instituto de Estruturas Leves (ILEK, em Estugarda) estava, naquela época (1954-1959), a realizar ensaios experimentais com ambas as estruturas tensadas com membrana fixa e permanente e, as suas primeiras homólogas retráteis foram influenciadas pelo *velarium* da Roma antiga. De facto, estas eram equipadas com sistemas de suporte fixos e permanentes (uma série de cabos que atuavam como carris de deslizamento) e uma membrana retrátil que assumia uma configuração estável apenas quando totalmente distendida. O único avanço em relação ao *velarium* é a adição de sistemas eletromecânicos para deslizar a membrana. Após mais de cinquenta anos, o diagrama resumo de todas as possibilidades de movimento para estruturas leves, elaboradas por académicos do ILEK, continua a ser significativo (Figura 8.6).

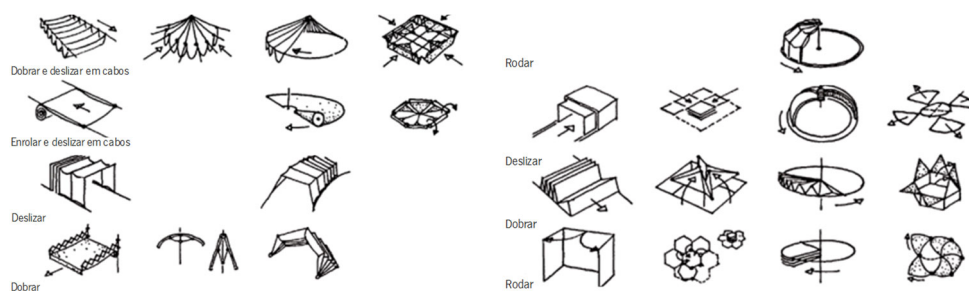


Figura 8.6. Diagrama de movimentos possíveis para as construções leves (Otto, 1971 apud Zanelli, 2015a).

De facto, as possibilidades de movimento para uma cobertura em membrana, provenientes de cabos e suportes fixos, foram consideradas amplas e diversificadas; da mesma forma que a viabilidade de sistemas conversíveis com base em elementos planos e leves parece ser igualmente vasta. Segundo Zanelli (2015), atualmente o verdadeiro desafio ainda está em aberto nestas três frentes: (1) mover a membrana e os elementos de suporte, a fim de obter um efeito “ar-livre” total quando o sistema de cobertura retrátil é aberto; (2) criar um sistema retrátil com mais liberdade formal relativamente às duas modalidades de movimento mais utilizadas, por exemplo as de abertura linear e tipo guarda-chuva; (3) transferir a membrana e os mecanismos de suporte para o perímetro exterior do edifício ou espaço, destinado a fins de proteção, deixando livre o movimento nas radiais.

A cobertura em membrana retrátil instalada no pátio da Camara Municipal de Viena (Figura 8.7) constitui um dos primeiros exemplos de um sistema convertível de retração linear, onde a membrana é retraída com o deslizamento de vigas treliçadas. Esta intervenção (com 1000m<sup>2</sup>) é totalmente reversível e teve um custo de construção de 580 000 euros (Tilner & Willinger, 2018).

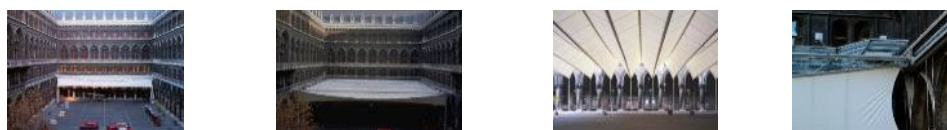


Figura 8.7. Cobertura em membrana retrátil da Camara Municipal de Viena (Tilner & Willinger, 2018).

Atualmente, os sistemas que fizeram grandes avanços no campo da arquitetura tensada são os deslizantes paralelos que derivam diretamente do *velarium* romano – como a cobertura retrátil em membrana do pátio do Palácio de Salzburgo (Figura 8.8) – e os sistemas guarda-chuva, amplamente utilizados em climas quentes enquanto instrumentos eficazes de mitigação microclimática, também presentes na Europa com a função principal de proteção contra chuva, como é o caso dos quatro guarda-chuvas colocados no pátio do Castelo de Weitra (Figura 8.9). Em 2012, o arquiteto Nicolai Kugel concebeu uma cobertura deslizante (22x37m), em membrana PTFE impermeável, para o Palácio de Salzburgo, que protege o palco e os espectadores durante espetáculos (Figura 8.8(a)). Nestas ocasiões, os novos elementos integram-se com o edifício antigo de modo a permitir a montagem de todos os equipamentos associados aos eventos (numa viga metálica, suportada por 4 colunas, que funciona como passagem para técnicos de iluminação, situada a 14 metros acima do solo (Figura 8.8(b)). Na parte oriental de pátio, uma membrana tensada e fixa protege as partes retraídas (Figura 8.8(c – d)).

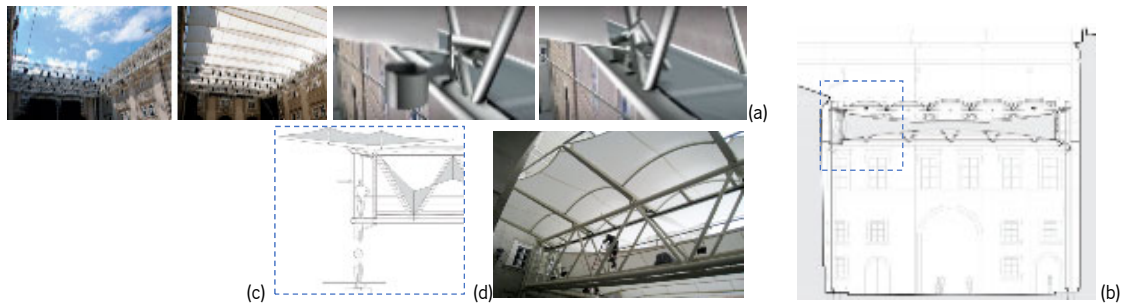


Figura 8.8. Palácio de Salzburgo, 2012: (a) as duas configurações principais do pátio e mecanismos de abertura e fecho da cobertura retrátil: ao ar livre (esquerda) ou coberto por uma membrana de PTFE (à direita); (b) a estrutura retrátil de proteção contra a chuva pode ser removida/recolhida na sua totalidade no final da temporada e, como se observa na seção transversal, o edifício existente não é afetado, sendo apenas são aplicadas pequenas forças horizontais nas fachadas; (c) e (d) viga reticular que suporta a cobertura de membrana (fixa) e calhas de deslize da membrana retrátil.

Em 2006, no pátio do Castelo de Weitra, Áustria, quatro guarda-chuvas, com dimensões de abertura invulgares (11x17m), foram instalados permanentemente, posicionados de forma a garantir proteção contra a chuva de toda a área do pátio (aprox. 750m<sup>2</sup>). Projetado por Clauss Markisen, constitui uma solução invulgar que envolve a conceção de guarda-chuvas retangulares. Outro aspeto a destacar reside nas conexões entre as várias peças de membrana e os perfis metálicos, pintados em branco, considerando que os guarda-chuvas podem ser vistos tanto do chão como dos pisos superiores do castelo (Figura 8.9). A recolha dos guarda-chuvas demora poucos segundos e não interfere com o decurso de um evento.



Figura 8.9. Castelo de Weitra, 2006 (fotos de Markisen): (a) quatro guarda-chuvas retangulares protegem 750 m<sup>2</sup> de pátio da chuva; (a) vista de baixo, durante o fecho dos guarda-chuvas e vista de cima, configuração totalmente aberta. Pormenores construtivos: (b) e (c) cada braço principal é equipado com um perfil metálico que forma uma das seções do guarda-chuva na configuração fechada.

Se o progresso em relação à forma dos guarda-chuvas se deve à miniaturização contínua dos elementos hidráulicos e ao desenho dos braços para garantir uma maior cobertura, atualmente a simplificação da estrutura deslizante tipo *velarium* deriva progressivamente da observação da natureza. Apesar dos especialistas em estruturas retráteis estarem cada vez mais inclinados para o uso de ferramentas informáticas paramétricas que controlem o movimento e a otimização das cargas durante a fase instável da membrana, que precede a fase de pré-esforço final, a abordagem multidisciplinar para a conceção de tais estruturas mais delicadas está a ganhar impulso, assumindo formas naturais cujas configurações são modificadas durante a fase de utilização. Adicionalmente à cinemática, o novo campo de investigação é a bio cinética<sup>2</sup> (Zanelli, 2015a). O projeto FLECTOFIN® inspira-se no estudo das fases de movimento da flor *Strelitzia reginae*. Esta flor possui uma espécie de pedestal em que as aves polinizadoras se apoiam; conseqüentemente, este peso cria uma deformação elástica das pétalas para um ângulo de 90°. Na prática, a sinergia entre os botânicos, arquitetos e engenheiros trouxe a ideia de explorar a deformabilidade da encurvadura de elementos de suporte excepcionalmente finos, como os perfis GFRP, para modificar a configuração de uma membrana tensada com uma lâmina reforçada. Este princípio tem inspirado a criação de sistemas inovadores de sombreamento de fachadas, como o protótipo *Flectofin® Lamella* (Clauss Markisen). Numa abordagem arquitetónica, os arquitetos SOMA reinterpretaram o mesmo princípio para modificar a configuração dos elementos de sombreamento de uma fachada, através da inflexão de elementos finos reforçados com varões de fibra de vidro pultrudidos, num Pavilhão da Expo 2012 na Coreia do Sul.

De acordo com esta abordagem, um sistema construtivo como o *velarium* pode ser aligeirado através da substituição de cabos de aço por bandas de tração embebidas na membrana, o que implica, portanto, uma redução do peso total das partes movimentadas e do impacto visual dos mecanismos de deslizamento. Como exemplo encontra-se o sistema de cobertura retrátil (50x10m) (resultante da colaboração multidisciplinar entre os gabinetes Arch22 e Str.ucture) que pode ser estendida/recolhida em 5 minutos (Figura 8.10(a)). O efeito visual

<sup>2</sup> estudo das modificações que ocorrem no crescimento e desenvolvimento de organismos vivos.

global é simples, precisamente devido à forma como os projetistas conseguiram reinterpretar os típicos componentes operacionais utilizados para pré-tensar a membrana (Figura 8.10(e)). A configuração da cobertura retrátil é muito semelhante ao exemplo do Palácio de Salzburgo. Contudo, no presente exemplo utilizam-se pormenores distintos, como: os tubos de aço que cobrem os trilhos deslizantes da membrana, as cintas tensoras embebidas na membrana (para substituir os típicos cabos de aço) e a ocultação de todas as peças eletromecânicas. Apesar de uma abordagem que envolve a redução dos elementos estruturais, os projetistas também conseguiram garantir a estabilidade da membrana perante as ações dos ventos de *Foehn*, típicos do Vale do Reno entre a Áustria e a Suíça; um protótipo da estrutura foi sujeito a um teste de túnel de vento para validar as simulações numéricas do projeto. Os elementos finos de conexão entre as peças fixas e móveis, visíveis na parte inferior da cobertura, representam uma nova geração de sistemas retráteis.

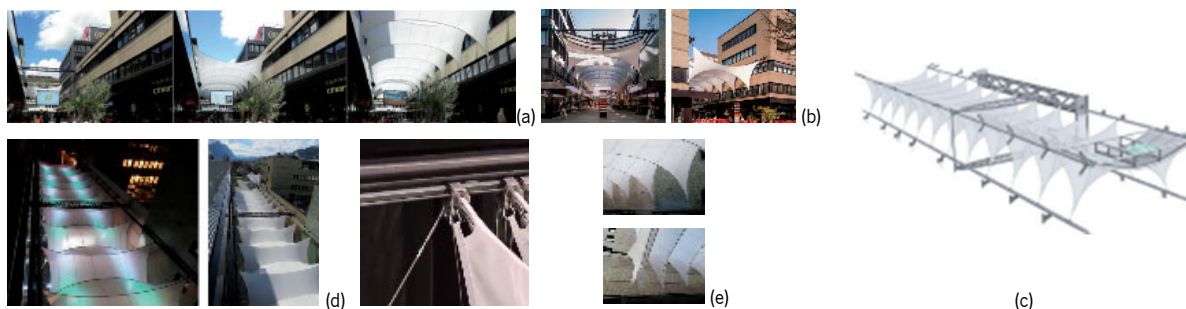


Figura 8.10. (a) Sequência de abertura (aprox. 530 m<sup>2</sup>) em 5 minutos (b) vista do arco formado na fachada norte (à esquerda), que abriga a totalidade da cobertura na posição de recolha, vista da fachada sul (à direita) (Gollnitz apud Zanelli (2015)); (c) modelo tridimensional da estrutura primária de suporte e do sistema de fixação aos edifícios existentes e adjacentes (Arch22 + Structure); (d) vista de cima noturna e diurna; (e) pormenores dos elementos de deslizamento (Kugel, 2014).

#### • Reflexão 4: estruturas pneumáticas e retráteis

No caso de estudo em análise, o MAC, propõe-se um teto abobadado retrátil constituído por uma estrutura de nervuras pneumáticas. Procedeu-se, por isso, a uma pesquisa sobre este tipo de soluções e verificou-se que existem poucos exemplos construídos, apesar de existir investigação experimental que explora diferentes técnicas de execução e conceção deste tipo de soluções. A maioria das estruturas pneumáticas retráteis construídas apenas deslizam numa direção, como se observa nos exemplos da Figura 8.11.

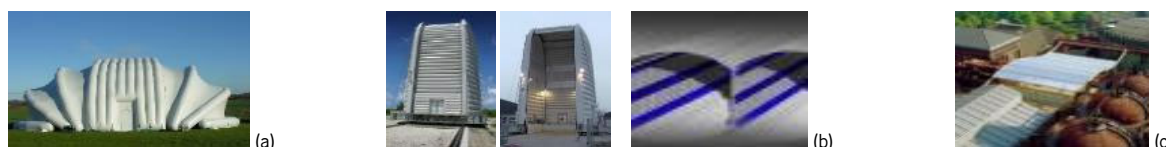


Figura 8.11. Cobertura retrátil e pneumática: (a) Hangar portátil em membrana de poliéster revestida a PTFE (Tektoniks, 2018); (b) composta por Elementos rígidos insufláveis no edifício da Pacific Test Range, 2013 (Tektoniks, 2018); (c) membrana dupla de ETFE em Casting house - Landschaftspark Duisburg-Nord, Alemanha (2003).

Neste âmbito, Kawaguchi (2000) apresentou uma nova abordagem para a conceção de estruturas retráteis com membranas, que se distingue das demais por ser pneumática. Uma das maiores vantagens deste sistema é a simplicidade do seu conceito: a extensão e a retração da cobertura em membrana realiza-se por movimento de rotação relativa do par de anéis de compressão final. O pré-esforço pode ser introduzido por pressão de ar, ou reduzindo ligeiramente as dimensões da membrana. A força de reação contra o pré-esforço é equilibrada pelos dois anéis de compressão. Embora a configuração inicial e final da membrana seja geometricamente compatível, a configuração intermédia não o é. Por isso, a membrana é submetida a uma certa deformação durante os estágios intermédios de abertura. As paredes laterais do prisma, ou cilindro na configuração inicial e a forma plana dobrada final são ambas superfícies evolutivas. Não é necessário recorrer a técnicas de corte tridimensional complexas para executar a cobertura em membrana; a membrana apenas deve ser submetida a uma ligeira deformação durante a dobragem e desdobragem como ilustra a Figura 8.12. Após a extensão, de modo a servir como estrutura, deve ser fornecida tensão suficiente à superfície de membrana. Um dos procedimentos propostos por Kawaguchi (2000) é a utilização da pressão do ar. Uma vez que a superfície da membrana se constitui por duas camadas na configuração final, é possível introduzir pressão de ar no espaço entre estas camadas (Figura 8.12 (d) e Figura 8.13 (b)). Deste modo, a estrutura da cobertura torna-se pneumática e retrátil.



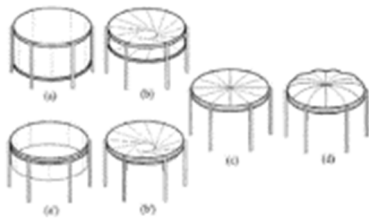


Figura 8.12. Tipos de cobertura pneumática e retrátil em membrana (Kawaguchi, 2000).

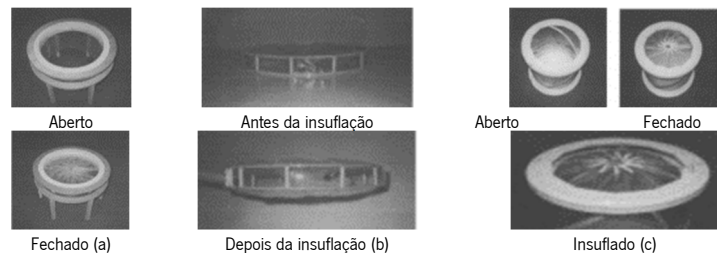


Figura 8.13. Protótipo de um sistema de cobertura: (a) em membrana retrátil; (b) em membrana retrátil e pneumática; (c) em membrana suportado pelo ar (Kawaguchi, 2000).

## 8.2. Caso de estudo: ruínas de uma igreja do sec. XIV

### 8.2.1. Nota histórico-artística

A igreja do Carmo – classificada como Monumento Nacional - erguido na colina fronteira à do Castelo de São Jorge, no ano de 1389, na cidade de Lisboa, em Portugal - sofreu diversas intervenções, que lhe foram alterando a feição inicial. De entre elas, destacam-se as realizadas durante o pós-terramoto de 1755, que deixaram as naves da igreja a céu aberto, criando assim um idílico cenário de ruína. Atualmente, constitui um dos principais testemunhos visíveis da catástrofe na cidade (Figura 8.14). Esta decisão resultou da ausência dos meios financeiros necessários ao seu restauro e/ou adaptação (Figura 8.15), bem como de uma certa postura assumida no âmbito da teoria de conservação e restauro mantida pelos mais destacados intelectuais desde, pelo menos, o 1º quartel de oitocentos (Monumentos, 2017).

O conjunto apresenta raiz no gótico mendicante, com certa influência do estaleiro do Mosteiro de Santa Maria da Vitória da Batalha. Ao longo dos séculos recebeu acrescentos e alterações, adaptando-se aos novos gostos e estilos arquitetónicos. De planta de cruz latina, constituída por três naves de cinco tramos, transepto saliente e cabeceira escalonada com a capela-mor ladeada por quatro absidiolos de diferentes dimensões - quer em largura, como em profundidade - o seu frontispício encontra-se dividido em três panos, terminando os laterais em empena, rasgando-se por um amplo vão retangular (Monumentos, 2017). Contrafortado com portal de arco com seis arquivoltas sobre colunas de capitéis vegetalistas, o seu corpo central termina com uma rosácea truncada. Interiormente, as suas naves encontram-se apartadas por intermédio de pilares cruciformes, de capitéis vegetalistas e arcos quebrados, sendo que as naves laterais possuem, cada uma, quatro capelas, de arco igualmente quebrado, coroadas por janelas de vão curvo. A fachada sul da igreja é sustentada por cinco arcobotantes, adicionados em 1399 após um desabamento durante a construção da igreja (Monumentos, 2017). Após o terramoto de 1755 e o consequente incêndio, grande parte da igreja do Carmo, com cerca de 70 metros de comprimento, acabou por ruir, perdendo assim uma parte importante do seu valioso espólio. A maior parte da estrutura do corpo da igreja foi profundamente abalada pelo sismo, ficando de pé apenas a zona da cabeceira (exceto o teto da capela-mor), a fachada principal e algumas frações das paredes Norte e Sul (Figura 8.14) (Pereira, 2017). O teto da nave da igreja desapareceu com o terramoto e só os arcos ogivais transversais que o sustentavam são atualmente visíveis (Figura 8.14).

Apesar das várias tentativas de reconstrução (Figura 8.15), estas não foram avante, acabando o templo por permanecer a céu aberto. Os trabalhos de reconstrução da igreja do Carmo iniciaram em 1756 (em estilo neogótico) incluindo a reconstrução das fachadas Sul e Norte<sup>3</sup>, da cobertura exterior e interior da cabeceira<sup>4</sup>. mas a falta de meios económicos impediu o seu término, sendo definitivamente abandonados depois de 1834, ano da extinção das ordens religiosas em Portugal (Pereira, 2017). Atualmente, o edifício sem cobertura funciona como uma cenografia arquitetónica e a nave da igreja foi transformada num espaço de exposição dos achados arqueológicos. O corpo da igreja divide-se, como na origem, em três naves sendo que a central era exteriormente coberta por um telhado de duas águas e as laterais por uma única água (Arnault & Fernandes, 2005) (Figura 8.16).

<sup>3</sup> O que facilmente se nota ao analisarmos as diversas tipologias dos materiais usados, mas também a forma como se encontram colocados.

<sup>4</sup> As soluções arquitetónicas adotadas nesta zona do edifício foram nitidamente condicionadas pela necessidade de solidez e de sustentação, razão pela qual os rasgos para iluminação foram comedidos e as paredes fortificadas (Pereira, 2017).

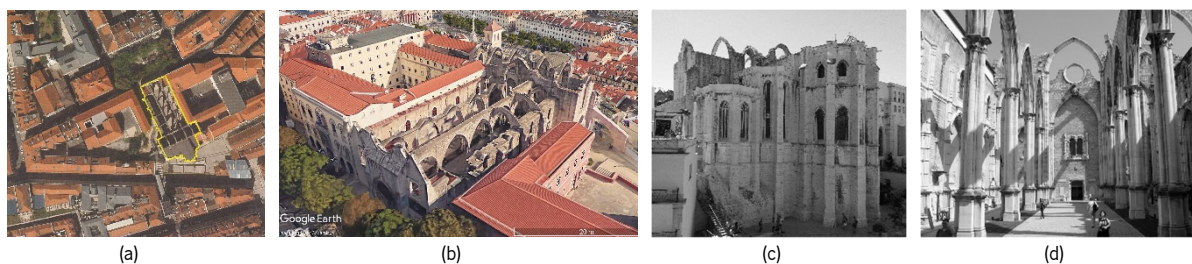


Figura 8.14. (a) Ortofotomapa com localização do MAC (adaptado de VIEIRA (2013)); (b) vista aérea do MAC (@ Landsat/ Copernicus); (c) vista da capela-mor desde o Elevador de Santa Justa; (d) vista interior da nave.

<p><b>Terramoto</b> de magnitude 8.5 a 9 (escala de Richter). <b>1755</b></p>	<p><b>1757</b> Vários pedidos de empréstimo para as ordens e fundição de peças de prata para angariar fundos para a reconstrução da igreja; decorrem obras no templo, dirigidas por Frei Patrício de São José.  <b>1758</b>  <b>1864</b> As ruínas da igreja são cedidas à Real Associação dos Arquitetos e Arqueólogos Portugueses presidida por Possidónio da Silva; pedido ao Ministério de Obras Públicas um projeto museológico; execução de um <b>projeto de cobertura da nave da igreja, em ferro e vidro</b>, por Valentim José Correia e Veríssimo José da Costa, tornando-a num grande espaço de exposição.  <b>1867</b> Joaquim da Costa Cascais sugere que se faça uma subscrição nacional para reconstruir o monumento.  <b>1871</b> Sucessivos pedidos de Possidónio da Silva para que o Governo cobrisse a zona do transepto.  <b>1875</b>  <b>1878</b> Cobrança de ingressos no Museu para fazer face às <b>obras</b> e cobrir as naves; pedidos de ajuda para as obras chegam ao Brasil.  <b>1881</b> Associação vai solicitando ao Governo a cobertura do imóvel, para poder expor achados arqueológicos, que ocupavam bastante espaço nas capelas.  <b>1897</b>  <b>1902</b> Grande campanha de <b>obras</b> na fachada que dá para o Largo do Carmo.  <b>1904</b> Comissão pretende <b>restaurar</b> o templo para as comemorações da Imaculada Conceição, criando-se uma <b>forte polémica</b> contra o desaparecimento das ruínas. Na sequência do terramoto o edifício foi examinado, verificando-se que estava arruinado.</p>
<p><b>Terramoto</b> de magnitude 6.3 (escala de Richter). O edifício ficou arruinado, foi examinado e faz-se um orçamento de 3518 escudos. Parecer favorável a <b>obras</b>.</p>	<p><b>1909</b></p>
<p><b>Terramoto</b> de magnitude 8.0 (escala de Richter). Danos nas estruturas da nave.</p>	<p><b>1969</b> O terramoto provoca danos na estrutura da nave.  <b>1995</b> Abertura das galerias do metropolitano sob o Convento. Criação de uma Comissão Técnica de Acompanhamento do comportamento estrutural do imóvel.  <b>2006</b> Definição de <b>Zona Especial de Proteção</b> conjunta do castelo de São Jorge e restos das cercas de Lisboa, Baixa Pombalina e imóveis classificados na sua área envolvente. Classificação como Monumento Nacional  <b>2011</b></p>

Figura 8.15. Enquadramento cronológico – visão geral da relação entre os abalos sísmicos e os pedidos de reposição da cobertura (elaborado com base na informação disponível em Monumentos, 2017).



in Diário de Notícias, 6 de Fevereiro de 1995.



Figura 8.16. Modelo tridimensional da Igreja do Carmo antes do terramoto de 1755 (Arnault & Fernandes, 2005).

### • Museu Arqueológico do Carmo (MAC)

O corpo principal da igreja e o coro, cujo telhado resistiu ao terramoto, foram requalificados e abrigam desde 1864 a sede da Associação dos Arqueólogos Portugueses, o Museu Arqueológico do Carmo (MAC), com uma pequena coleção<sup>5</sup> que se vai deteriorando ao longo dos tempos devido à sua exposição às intempéries, decorrente da falta de espaço coberto para abrigar todas as peças.

### • Caracterização geométrica e programática

As Figuras 8.17 a 8.23 apresentam as características geométricas e programáticas do edifício da Igreja do Carmo. O corpo da igreja divide-se, como na origem, em três naves, sendo que a central era exteriormente coberta por um telhado de duas águas e as laterais por um de água única (Soares, 2001 *apud* Pereira, 2017). As três naves

<sup>5</sup> Que integra peças de valor histórico, arqueológico e artístico, numa cronologia ampla que contempla artefactos e obras desde a Pré-História à época contemporânea.



do tempo e dividiam-se em cinco tramos, a central tinha 24.6 metros de altura, mais elevada que as laterais, com 18.4 metros. Os tramos eram marcados pelos respetivos arcos quebrados, torais e formeiros, que sustentavam a cobertura interna, sobre a qual pouco se conhece (Pereira, 2017). Frei José de Santa Ana (1754 *apud* Pereira, 2017) referiu que as naves possuíam *pesadas abobadas, no cimo com uns remates de pedra, nos quais se distinguem lavradas as imagens, que o Santo Condestável trazia na sua bandeira*. Através deste testemunho, depreende-se que a cobertura abobadada era preenchida por um sistema de cruzaria de ogivas, em consonância com as abóbadas da mesma tipologia da cabeceira, sendo igualmente rematadas por fechos de abóbadas decorados com a heráldica do fundador ou florões. Para percebermos um pouco melhor a reconstituição gótica deste templo, Paulo Pereira (1989 *apud* Pereira, 2017) alerta para o facto de nas extremidades das naves laterais ainda existirem alguns vestígios da antiga cobertura interior, concluindo que, segundo esses testemunhos, esta seria *“muito simples de berço quebrado, com arcos torais descansando sobre mísulas chanfradas”*.

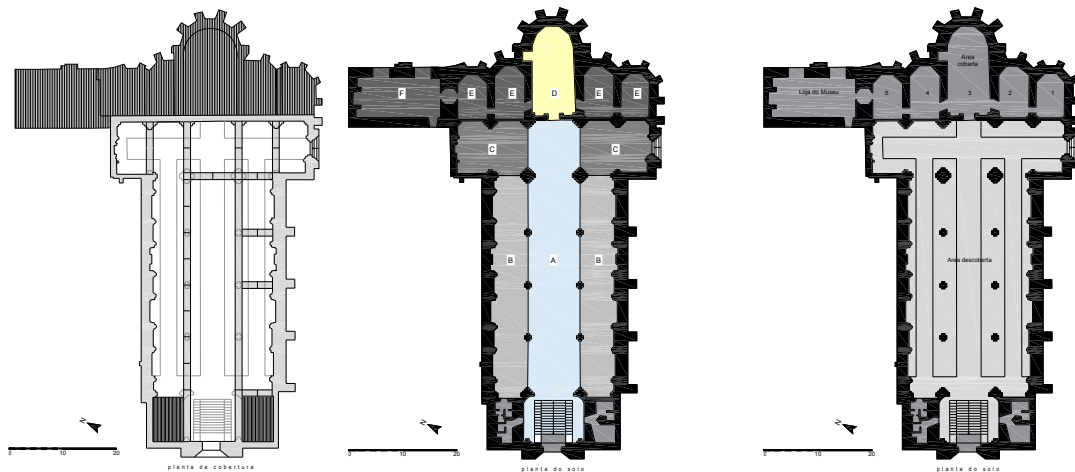


Figura 8.17. Planta de cobertura e plantas esquemáticas com indicação do programa funcional da igreja gótica do Carmo: A. Nave principal; B. Nave lateral; C. Transepto; D. Altar principal; E. Capelas laterais; F. Sacristia. Planta com o programa funcional das ruínas da igreja convertida no MAC: 1. Coleções da Pré e Prohistória; 2. Escultura e Epigrafia (do Romano ao islâmico); 3. Escultura Medieval e Moderna, Heráldica; 4. Coleções exóticas e Biblioteca Histórica da AAP; 5. Escultura, Epigrafia e Azulejaria.

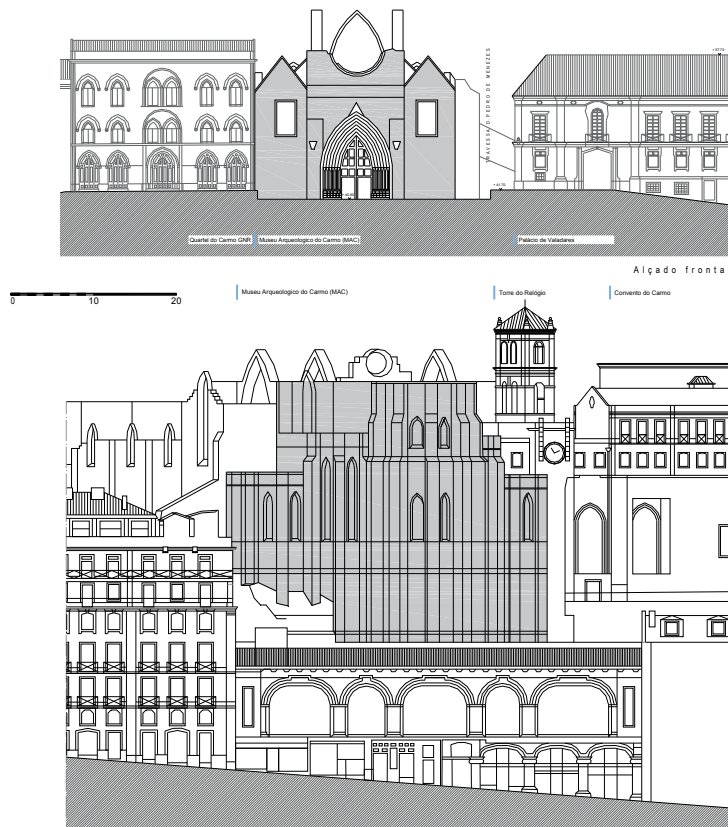




Figura 8.18. Desenhos dos alçados frontal, tardo e lateral (executados pela autora com base no cruzamento entre dimensões obtidas num levantamento in situ e desenhos da autoria do arquiteto Carlos Castanheira publicados em Vieira (2013)).



Figura 8.19. Fotomontagem do alçado da nave lateral (à esquerda da entrada).

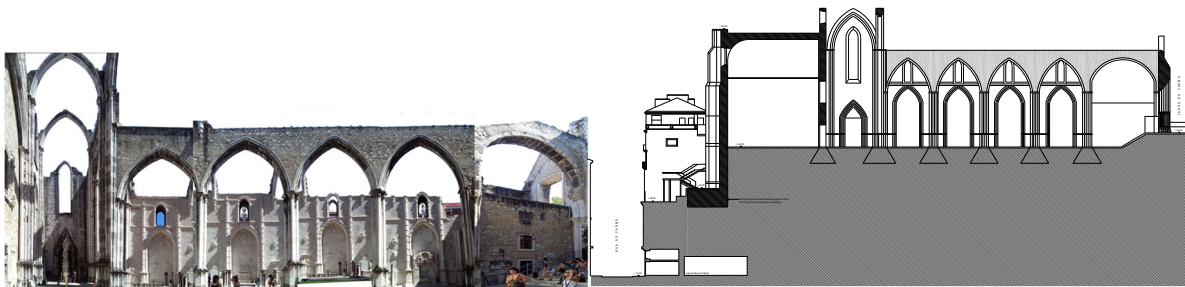


Figura 8.20. Fotomontagem do alçado da nave lateral (à direita da entrada). Secção longitudinal (executada pela autora com base no cruzamento entre dimensões obtidas in situ e desenho da autoria do arquiteto Carlos Castanheira publicado em Vieira (2013)).



Figura 8.21. Fotomontagem do alçado transversal em direção à entrada principal.



Figura 8.22. Fotomontagem do alçado transversal oposto à entrada principal.



© Goethe-Institut Portugal / Carlos Porfírio. Evento "Lisbon Under Stars" (experiência multidisciplinar onde se misturam projeções multimédia e efeitos visuais).  
Figura 8.23. Exemplo de eventos públicos promovidos pela Associação de Arqueólogos Portugueses (AAP), no espaço do IMAC, para sensibilizar a população da importância do património cultural. Vistas de eventos promovidos durante o dia e noite no verão.

### 8.3. Reposição da cobertura e teto da nave da igreja do Carmo

#### 8.3.1. Aspectos a considerar na conceção da reposição da cobertura

- **Localização e análise dos ventos dominantes**

O gráfico da Figura 8.24 mostra que os ventos dominantes anuais para a localização do caso de estudo (coordenadas geográficas: 38° 42' 44" N, 9° 8' 24" O; altitude: 38m) apresentam direção nor-noroeste e uma velocidade média de 16 km/h. Com base nesta informação, devem localizar-se aberturas a NW e reforçar a ligação da cobertura às paredes exteriores NW para evitar a sobrelevação da cobertura em membrana.



Figura 8.24. Análise dos ventos com Formit 360 pro © (licença académica autodesk) para a localização do caso de estudo.

- **Elementos das estruturas góticas**

A arquitetura gótica evoluiu da arquitetura românica; desenvolveram-se alguns elementos como o arco ogival (ou quebrado) e a abóbada de cruzaria, que se tornaram as principais características deste estilo arquitetónico. Numa visão global, as estruturas góticas procuram a verticalidade e a leveza, e um ambiente interior luminoso. A Tabela 8.1 apresenta uma síntese das características destas estruturas. No gótico, a transição do arco circular para o arco quebrado, ou ogival, conduziu à redução dos impulsos horizontais dos arcos e abóbadas, o que levou à redução da espessura dos elementos que os suportavam. Outras das inovações da arquitetura gótica foram o arcobotante, os pináculos e os contrafortes, que permitiram a transmissão das cargas até às fundações e a libertação das paredes de funções estruturais principais. Relativamente aos avanços nas estruturas arqueadas, o gótico é conhecido pelas abóbadas nervuradas. A introdução das nervuras, à semelhança dos arcos de alvenaria nas abóbadas de aresta romanas, facilitou a intersecção entre as várias superfícies e permitiu diminuir a espessura das abóbadas e reduzir a dimensão dos cimbres. Segundo alguns testemunhos da época, as abóbadas de cruzaria da igreja do Carmo encontravam-se fechadas por bocetes, decorados com ornamentos simbólicos, aludindo ao Condestável (Historia de Portugal, 2011).

Tabela 8.1. Síntese das características de uma estrutura gótica (adaptado de Chicó, 1968).

Inovações técnicas	Vantagens	Consequências	Alterações na estrutura formal	Aspetos Estéticos	Evolução dos pilares de sustentação	Materiais
Abobadas de cruzaria de ogivas. O arco ogival surgiu devido à necessidade de elevar os 4 arcos (principais e formeiros) à mesma altura, agudizando os arcos dos lados menores.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menor pressão lateral, permitindo uma melhor articulação de forças;</li> <li>As nervuras estruturais dos arcos em ogiva permitem o desvio das forças para os pilares de sustentação e para os contrafortes exteriores.</li> <li>Aumento das áreas de construção e da verticalidade dos edifícios nesta época.</li> </ul>	<p>Necessidade de reforçar os apoios exteriores com contrafortes mais esbeltos e elegantes</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planta tipo basilical em cruz latina, cabeceira virada para este e corpo com três naves;</li> <li>Pilares das arcadas interiores aumentam em número e são colocados mais próximos uns dos outros, pois os tramos eram retangulares;</li> <li>Em contrapartida, os pilares ficam mais finos e altos, o que, juntamente com o aumento da altura dos tetos, cria uma noção de verticalidade;</li> <li>Nova ordenação nas paredes laterais. Devido ao desaparecimento da galeria, passam a ter três níveis (arcadas, trifório e janelas clerestóricas).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumento da altura das abobadas;</li> <li>Pilares e colunelos mais delgados;</li> <li>Acentuação da verticalidade;</li> <li>Espaços internos mais amplos;</li> <li>Paredes libertadas do seu papel de suporte, passando a delimitar e proteger espaços;</li> <li>Interiores naturalmente iluminados (melhor aproveitamento da luz).</li> </ul>	<p>Os pilares evoluíram desde o simples pilar cilíndrico ou quadrado com 4 colunelos adossados até pilares fasciculados. A evolução e complexidade desses pilares traduziram a sofisticação da ossatura da construção, acontecendo o mesmo com os capitéis.</p>	<p>Estrutura em alvenaria de pedra e mista, revestida a cantaria de calcário; pavimentos em cantaria de calcário; abóbadas em tijolo e nervuras de pedra.</p>

• **Considerações sobre aspetos estruturais/construtivos relativos ao caso de estudo**

Desde o início da construção da Igreja do Carmo que se encontraram grandes dificuldades técnicas, não só a nível dos alicerces, que cederam por duas vezes, mas também a nível do suporte da cabeceira (Historia de Portugal, 2011). Foram necessários oito anos para que se consolidassem apenas os alicerces e o cruzeiro. Mesmo assim, pouco tempo depois, em 1399, foi necessário adquirir novos terrenos para que se pudesse estabilizar as fissuras do flanco sul através da adição de cinco arcobotantes. A procura de soluções mais leves para a construção da cobertura/teto desta igreja também foi uma das preocupações manifestadas; conforme sugerido por Gomes Martins, o autor do projeto, as abóbadas das naves laterais foram executadas com tijolo pois esse era um material bastante mais leve que a pedra tradicional, *propiciando menores tensões mecânicas nas fachadas laterais da Igreja (Pereira, 1989 apud Pereira, 2017)*. Deste modo, o conceito proposto para a reposição da forma da cobertura e teto sem adição significativa de massa - através de soluções construtivas com membranas - vai de encontro às preocupações manifestadas, apresentando-se como uma alternativa contemporânea.

Com fachadas em cantaria de calcário aparente, aparelho isódomo, percorridas por embasamento do mesmo material, a fachada Sul e o lado Norte foram reconstruídos em grande parte após a catástrofe sísmica setecentista, o que facilmente se nota ao analisar as diversas tipologias dos materiais usados e a forma como foram colocados (notando-se que alguns deles foram claramente aproveitados de entulhos pós-terramoto).

Em Outubro de 1995 o MAC foi obrigado a encerrar ao público devido às obras de construção do Metropolitano de Lisboa no seu subsolo, que sujeitaram a estrutura arquitetónica a elevados riscos. No âmbito da conservação do monumento, fizeram-se intervenções de grande envergadura que obrigaram a uma desmontagem e reestruturação completa do MAC que só voltou a reabrir em Junho de 2001. Essa operação implicou, segundo a conservadora do MAC, a arqueóloga Célia Pereira, as seguintes etapas: (1) inventário sumário e levantamento fotográfico do acervo do MAC; (2) desmontagem completa do MAC e colocação do seu acervo na antiga sacristia, por ser a zona mais segura do edifício; (3) escavação arqueológica de todas as cinco antigas capelas e de parte da nave central; (4) colocação de cerca de 150 mico estacas em torno das antigas capelas e do transepto para reforço dos alicerces; (5) escoramento e consolidação dos arcos da nave (Figura 8.25); (6) colocação de uma camada de impermeabilização em toda a extensão da nave; (7) reposição de pavimentos em toda a área da antiga igreja e (8) remontagem do MAC.

No âmbito do *Plano Operacional da Cultura*, foi assim realizada uma profunda remodelação do MAC. As primeiras cinco etapas foram realizadas em 1996. Porém, as restantes só foram completadas no ano 2000. Segundo a conservadora e arqueóloga Célia Pereira, os objetivos deste projeto<sup>6</sup> foram plenamente alcançados e até ultrapassados. Com efeito, em apenas 15 anos, o número de visitantes, e as correspondentes receitas, passaram de 20000, antes da remodelação, para os 170000, atingidos em 2015.

Com base na informação referida, considera-se pertinente propor uma solução construtiva leve para a reposição da cobertura. Em síntese, de modo a transformar o espaço da nave da antiga igreja num novo e seguro espaço público, multifuncional, que proporcione: um microclima adequado para preservar as peças em exposição da degradação e a salvaguarda de mais peças; o aumento do espólio do museu e a criação de condições de dinamização cultural do MAC durante todo o ano, propõem-se as seguintes soluções de cobertura leve e transparente: solução convencional em vidro e solução alternativa em membrana.

Dado que os arcos e colunas existentes se encontram sem travamento horizontal (Figura 8.25(b)), necessário para a melhoria do comportamento sísmico do edifício, entende-se que a solução de cobertura terá que ligar estes

<sup>6</sup> Que incluiu as seguintes operações: (1) limpeza, conservação e restauro de todo o acervo, por técnicos qualificados, especialistas no tratamento da pedra, da madeira, do azulejo, e da pintura; (2) estudo exaustivo do acervo por uma equipa de mais de 30 especialistas nas mais diversas áreas; (3) instalação de um novo sistema de iluminação do edifício e do acervo; (4) construção de uma estrutura de receção confortável e de dimensão adequada; (5) remodelação e ampliação das instalações sanitárias para o público e para o pessoal; (6) remodelação dos serviços de apoio ao pessoal e aos visitantes; (7) criação de um espaço de livraria/loja; (8) alargamento e requalificação dos quadros de pessoal, incluindo a criação do lugar de Conservador; (9) projeto de musealização, elaborado *pro bono* pelo Arq.º Mário Varela Gomes; (10) remontagem integral do Museu Arqueológico do Carmo; (11) publicação de um catálogo exaustivo das coleções permanentes do Museu Arqueológico do Carmo e (12) criação de um Serviço Educativo.



elementos ao nível do coroamento, com travamento horizontal, de modo a evitar impulsos horizontais da cobertura sobre os elementos estruturais existentes. Propõe-se uma estrutura metálica leve e autoportante para a solução de cobertura, que segue a modulação do edifício. Os oito tramos modulares (4 na nave central e 4 no transepto), com largura de 10m cada, apresentam arcos distribuídos paralelamente a cada 2m (Figura 8.26(a)) na proposta de cobertura em vidro; e arcos distribuídos paralelamente a cada 5m na proposta de cobertura em membrana (Figura 8.26(b) e (c)).



Figura 8.25. (a) Operação de consolidação/regularização do espaço entre arcos com o enchimento dos mesmos - vista do terraço da cabeceira; 1954 (Fonte: [http://www.monumentos.pt/Site/APP\\_PagesUser/SIPA.aspx?id=6521](http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=6521)). (b) Espaço entre arcos a regularizar (proposta).

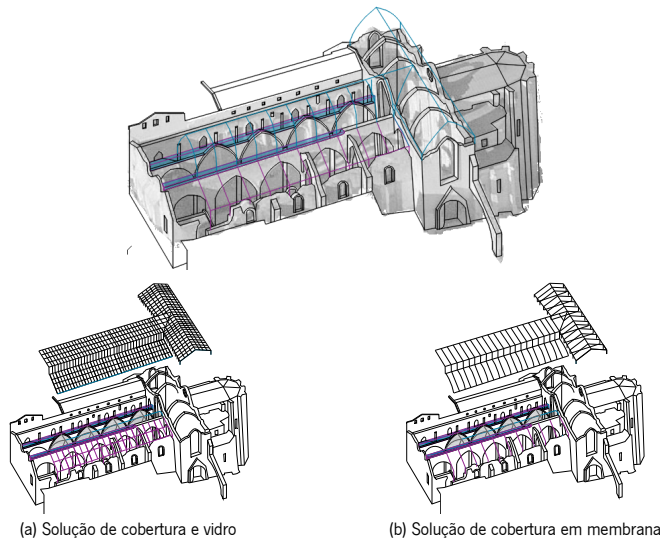


Figura 8.26. Vista axonométrica explodida da estrutura das soluções de cobertura (a) e (b) propostas. (c) Pormenores de ligação da estrutura da cobertura aos elementos estruturais existentes, ao nível do coroamento.

### 8.3.2. Solução de referência convencional: cobertura em vidro

Em 1864 as ruínas da igreja do Carmo são cedidas à *Real Associação dos Arquitetos e Arqueólogos Portugueses*, criada por Possidónio da Silva<sup>5</sup>, e no mesmo ano, segundo Noé & Figueiredo (2008), foi projetada uma cobertura para a nave da igreja em ferro e vidro (por Valentim José Correia e Veríssimo José da Costa) que alterava o interior, tornando-o num grande espaço de exposição - Figura 8.27(a). Contudo, este projeto nunca chegou a ser executado.

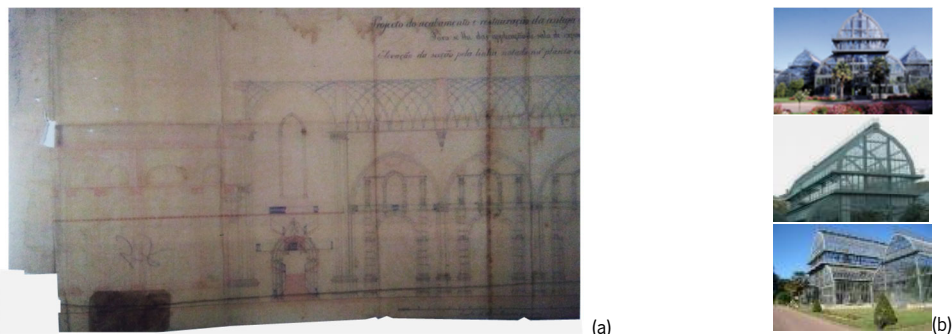


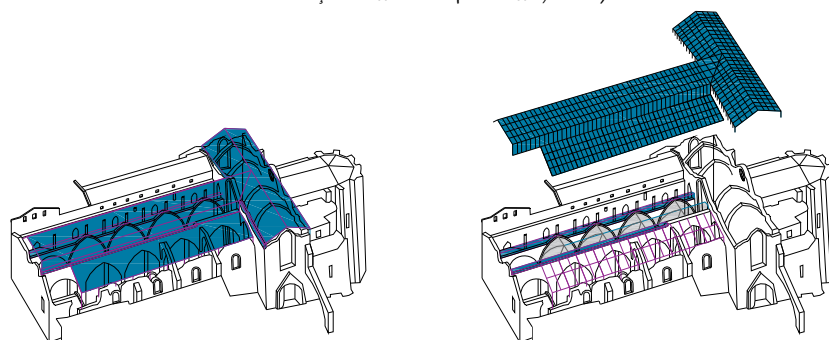
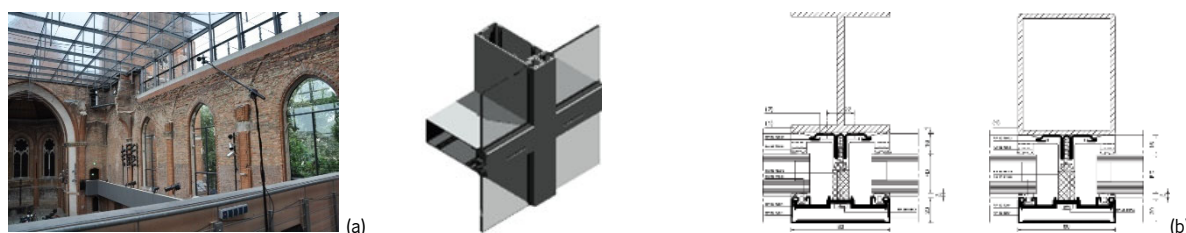
Figura 8.27. (a) Projeto da cobertura das ruínas da Igreja do Carmo em ferro e vidro (IAN/TT, Arquivo Histórico do Ministério das Finanças-Ministério do Reino. Plantas Cx.5277, IV/C/121 (17) apud Arnault & Fernandes (2005). (b) Exemplo de cobertura vítrea contemporânea do projeto da cobertura da Igreja do Carmo: Estufas do Jardim Botânico de Lion (1857).

<sup>5</sup> Atualmente designada por Associação dos Arqueólogos Portugueses.

<sup>6</sup> Este arquiteto da família real portuguesa viajava intensamente pelo país e usou toda a sua influência para proteger o património nacional – através de um projeto museológico - que sentia estar fortemente ameaçado, primeiro pela extinção das ordens religiosas e, depois, pelas invasões francesas e pelas lutas liberais que se seguiram.

Possidónio entendia que a cobertura das ruínas devia transmitir aos visitantes uma sensação de simplicidade e leveza. Afastava-se, por isso, do clássico conceito de restauro *violletiano*, ao mesmo tempo que se aproximava do de “reparação”, ou do que designou de “*Projeto de acabamento e restauração da antiga Igreja do Carmo, para lhe dar aplicação de sala de exposições*”. Por outro lado, esta sua posição atestava com bastante clareza a forma como interiorizara as novas teorias de conservação e restauro desenvolvidas além-fronteiras, nomeadamente pelo italiano Camillo Boito (1836-1914), para quem se deveriam sempre utilizar materiais distintos dos originais quando se optasse pela adaptação de um edifício antigo a novos usos. E, no entender de Possidónio, os materiais que concediam essa pretensa simplicidade eram, com efeito, o ferro e o vidro. Na realidade, estes materiais tinham desde sempre merecido a sua atenção, designadamente ao nível da remodelação e cobertura de espaços antigos, porquanto “[...] *satisfaziam na distribuição, na abundancia da luz, na ventilação regular, todas as condições essenciais que se exigem em edifícios d’este género, para que ofereçam comodidade e salubridade*”. Este projeto propunha a criação de um espaço quase cenográfico e a reafirmação de alguns dos elementos estruturais da linguagem plástica do estilo primitivo da igreja. Os espaços interiores seriam maximizados mediante a criação de novos dispositivos, colocando, por exemplo, na nave lateral direita, segundo o eixo transversal, e junto à porta sul, uma escada que permitiria o acesso a um segundo andar, onde se destacava um varandim intermédio.

No presente estudo, considera-se como solução de referência a cobertura de vidro laminado de segurança (12mm de espessura) com estrutura metálica convencional (Figura 8.28). A dimensão máxima adotada para os painéis de vidro é de 1.5mx1.5m, por se considerar a mais económica, segundo Watts (2011) (Figura 8.29).



Os problemas das coberturas de vidro são diferentes dos das fachadas, na medida em que a vedação externa dos caixilhos é frequentemente submersa por uma camada de água durante a queda de chuva, tornando-a mais vulnerável à penetração de água. Por esta razão, os sistemas de drenagem interna e de equalização de pressão são ligeiramente modificados (geometricamente) para permitir a inclinação da cobertura e são adicionados canais de condensação para drenar a água através de uma calha interna (Figura 8.30). Além disso, o plano do telhado é escalonado por baixo, geralmente com uma calha, de modo a permitir a drenagem para o exterior. As travessas incorporam uma aresta chanfrada para permitir que a água da chuva passe sobre si, de um painel envidraçado para o seguinte (Figura 8.30). Os painéis de vidro são fixados à estrutura de suporte, em perfis de alumínio extrudido com uma placa de pressão contínua, montada externamente por encaixe, também em alumínio extrudido (Figura 8.30). Todos os componentes são cortados em oficina e montados no local da obra.



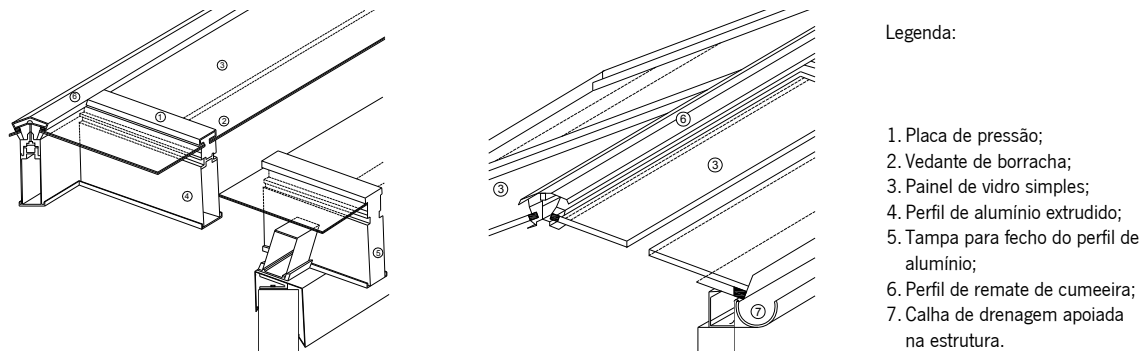


Figura 8.30. Configuração Exemplo de pormenor construtivo de cobertura com vidro simples.

Legenda:

1. Placa de pressão;
2. Vedante de borracha;
3. Pannel de vidro simples;
4. Perfil de alumínio extrudido;
5. Tampa para fecho do perfil de alumínio;
6. Perfil de remate de cumeeira;
7. Calha de drenagem apoiada na estrutura.

### 8.3.3. Solução alternativa proposta: cobertura fixa e teto abobadado retrátil em membrana

Em alternativa à solução convencional de cobertura leve e transparente mencionada no ponto anterior, apresenta-se a seguinte solução alternativa com membranas arquitetônicas.

#### • Aspectos arquitetónicos – conceito de intervenção

A proposta de reposição da cobertura e teto abobadado da *Igreja do Carmo* apresenta o seguinte conceito de intervenção:

##### Problema:

- Necessidade de espaço coberto;
- Sismos;
- Ventos;
- Acústica.

##### Objetivos:

- Repor a cobertura com solução reversível/ baixa intrusão (na ligação ao existente); a intervenção tem de ser desconstruível sem provocar danos visíveis no edifício;
- não obstruir a entrada de luz solar no solstício de verão e inverno;
- Criação de microclima; fornecer proteção efetiva contra as variações climáticas;
- Preservar o carácter de ruína;
- Criar proteção para espaço público multifuncional.

##### Questões de projeto:

- Reposição de cobertura e teto com linguagem da arquitetura gótica, século XIV, mas com tecnologia construtiva do século XX;
- Reposição sem adição significativa de massa;
- Luminosidade;
- Acústica;
- Ventilação;
- Pontos de fixação e de consolidação;
- Manutenção.

##### Requisitos funcionais para a cobertura:

- Conforto lumínico;
- Conforto acústico;
- Transparência;
- Conforto higratérmico;
- Impermeabilidade;
- Drenagem das águas pluviais.

A solução alternativa<sup>9</sup> consiste numa cobertura leve feita em membrana de ETFE, tensionada numa estrutura metálica autoportante (Figura 8.40). A estrutura metálica proposta, que configura um coroaamento com vigas metálicas, em perfil U (Figura 8.40), subdividido por arcos ogivais tubulares e cabos de aço, assentará pontualmente, através de placas de fixação, sobre o espaço regularizado entre os arcos (Figura 8.35). Para tal propõe-se a reposição e regularização do enchimento em falta entre arcos, com material de enchimento compatível. A membrana pousa sobre os arcos ogivais tubulares e os cabos de aço tensionam-na, oferecendo dupla curvatura (Figuras 8.38(b) e 8.40). Além disso, para evitar que se crie alguma confusão entre os elementos adicionados e os antigos, propõe-se: (1) que o perfil metálico de coroaamento fique elevado dos elementos de suporte (Figura 8.35), criado um espaço livre, permeável ao ar, delimitado por uma rede; (2) que todos os componentes metálicos da estrutura da nova cobertura sejam pintados de cor clara. A cobertura mantém-se como a original, com duas águas, mas com seção em arco ogival. Atendendo à promoção da ventilação, a cobertura proposta inclui aberturas superiores (automatizadas electromecanicamente) (Figura 8.39), de modo a evitar o sobreaquecimento do espaço subjacente devido à elevada transparência da membrana de ETFE<sup>10</sup>.

Além disso, propõe-se uma solução de teto ajustável, para complementar a cobertura transparente, de modo a obter conforto lumínico e acústico adequado para transformar a nave num espaço multifuncional, permitindo variar as condições acústicas e de iluminação natural. Para se aproximar da linguagem visual gótica do estilo primitivo do edifício existente propõe-se o seguinte: (1) repor o teto, composto por abobadas de *tijolo*, por abobadas constituídas por uma membrana simples de poliéster de alta tenacidade (que absorve 65% do som (para 500-

<sup>9</sup> Neste estudo, assume-se que o sistema da cobertura em membrana é fixo, como o da cobertura em vidro, mas poderá tornar-se retrátil. Esta solução permite cobrir o espaço da nave com reduzida carga adicional, aplicada sobre os elementos estruturais existentes, ou seja, permite uma reposição formal da cobertura, sem adição significativa de massa.

<sup>10</sup> Tipicamente produzida como transparente, a membrana de ETFE permite ser impressa com um esmalte opaco (com padrão de pontos, riscas, etc.) de modo a reduzir ganhos térmicos. Quanto mais denso for o padrão, melhor será o efeito de sombreamento.

1000Hz) e transmite 41% da luz, ou seja, possui propriedades absorventes acústicas) e (2) repor as nervuras de calcário por nervuras pneumáticas feitas com membrana de poliéster revestida a neopreno e PVC (Figura 8.40).

Para albergar diferentes eventos culturais ao longo do ano (com variantes climáticas diárias e sazonais), é necessário adotar uma solução dinâmica para regular condições acústicas e luminicas adversas, de modo a maximizar o uso do espaço da nova nave. Em particular, essa solução deve permitir: (1) sombrear/servir de difusor de luz natural (uma vez que pode ocorrer desconforto por encadeamento), neste sentido o teto retrátil proposto também atua como difusor/sombreador de luz para a “claraboia” gigante proposta (Figura 8.31 (b)); (2) reduzir/aumentar o tempo de reverberação para certos eventos acústicos (Figura 8.31 (b) ou (c)); (3) dar a sensação de ruína ao ar livre.

Ao recolher o teto retrátil, ele cobre a área de entrada do MAC, onde se localizam as escadas de acesso à nave, que deste modo ficarão permanentemente sombreadas. Atualmente, as escadas são usadas pelos visitantes para se sentarem, relaxarem e apreciarem a vista a céu aberto das ruínas. Salienta-se que a estrutura da cobertura proposta é reversível, ou seja, pode ser montada e desmontada, garantindo que o edifício classificado como Monumento Nacional, não será alterado definitivamente.



Figura 8.31. Esquema de aplicação do conceito adotado: (a) operação do sistema retrátil; (b) e (c) cenários com a cobertura transparente permanente e teto abobadado translúcido e retrátil.

De acordo com Pereira (2017), existiam gravuras no teto abobadado primitivo. De modo a recriar essas gravuras, a membrana selecionada permite a impressão de elementos gráficos na sua superfície e incorporar iluminação LED como se exemplifica na Figura 8.32. Adicionalmente, propõe-se fechar as aberturas que antes eram janelas de vidro, com janelas operáveis constituídas por membrana dupla de ETFE encapsulada em aro metálico, para promoção da ventilação do espaço e condicionamento acústico (Figura 8.33).



Figura 8.32. Exemplo de teto em membrana digitalmente impressa e com iluminação incorporada (Barrisol, 2018).



Figura 8.33. Exemplo de aplicação de membrana dupla de ETFE na em janelas: (a) solução pneumática – San Michele Arcangelo (Canobbio, 2018); (b) solução tensada através de encapsulamento de aro - KWO Grimselstrom (Texlon, 2018).

• **Aspetos estruturais a considerar na conceção da solução de cobertura proposta**

Na conceção da solução de reposição da cobertura, atendendo a aspeto estruturais, considera-se que se devem adotar as seguintes medidas:

- Por se tratar de um edifício histórico, o nível de intrusão deve ser mínimo, sem adição de elementos de suporte/resistentes massivos. Deste modo, aproveitando os elementos existentes, com o intuito de reduzir a vulnerabilidade do edifício, propõe-se aumentar as ligações entre os seus elementos resistentes através da estrutura da nova cobertura. Dado que os arcos e colunas existentes nos dois alinhamentos internos não têm ligações horizontais transversais entre si, necessárias para melhorar o comportamento sísmico do edifício, entende-se que a solução de cobertura terá de ligar estes elementos ao nível do coroamento com um sistema

de travamento horizontal (Figura 8.34(b)) e (Figura 8.38). Para além disso, propõe-se que a cobertura seja concebida como um elemento autoportante, à semelhança da solução de cobertura adotada no projeto de reabilitação *Frossilo* (Figura 8.36), de modo a evitar impulsos horizontais da cobertura sobre os elementos estruturais existentes. Dado a natureza estrutural da nova cobertura tensionada, reforça-se a importância do travamento horizontal da estrutura da nova cobertura de modo a evitar que ocorram esforços indesejáveis nos elementos resistentes verticais (existentes) pelo facto de suportarem uma cobertura tensionada.

- A cobertura proposta para o transepto apoia-se, pontualmente, sobre o espaço existente entre arcos através de elementos de distribuição de cargas (Figura 8.35); as etapas de construção previstas são semelhantes às do projeto da Figura 8.37.
- 3º A cobertura interior retrátil (teto) conecta-se à estrutura da cobertura exterior (na parte superior) e ao solo.

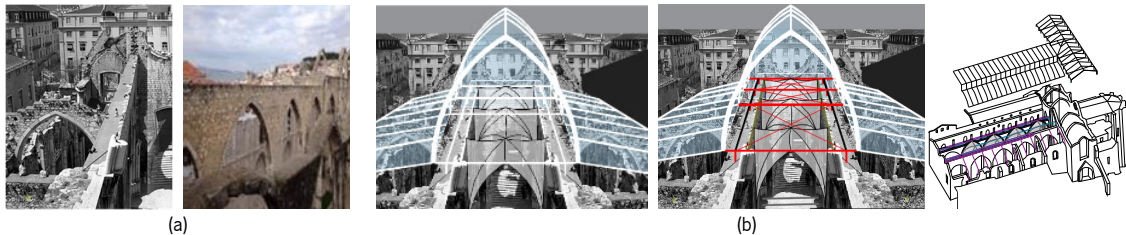


Figura 8.34. (a) Estado atual dos arcos existentes. (b) Proposta de conexão da estrutura da cobertura aos elementos resistentes existentes (fotomontagem) - cobertura autoportante (axonometria explodida); travamento horizontal assinalado a cor vermelha - Inclusão de elementos de contraventamento - cabos com esticadores - entre vigas de coroamento.

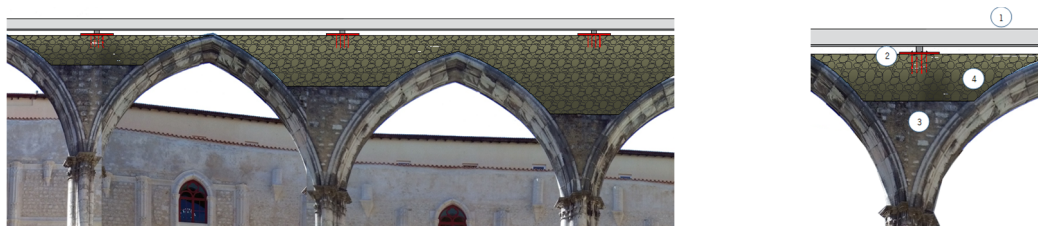


Figura 8.35. Ligação da cobertura à estrutura existente: 1) cota da cobertura; 2) elemento de distribuição de cargas/ coroamento; 3) ancoragens pontuais; (4) reposição do enchimento em falta entre os arcos existentes, com material adequado para o efeito.

Na hipótese de não ser possível utilizar máquinas pesadas e andaimes in situ, a membrana da cobertura pode ser instalada através de uma rede de cabos e alpinistas profissionais, ou pré montada em estaleiro juntamente com a estrutura metálica, e colocada in situ por via aérea, ou outros meios mecânicos de elevação como se exemplifica nas Figuras 8.36 e 8.37.

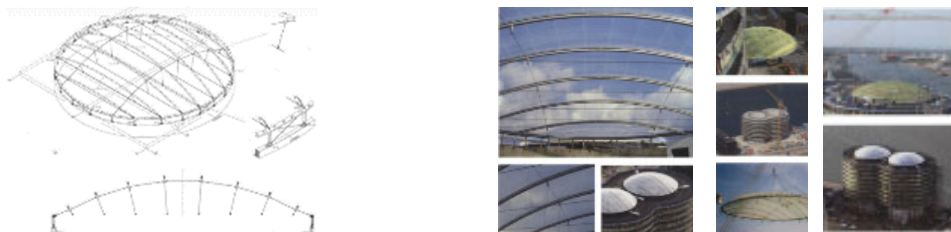


Figura 8.36. Frossilo, Copenhaga, MVRDV (2005). A cobertura é autoportante, em membrana pneumática de ETFE, com treliças.

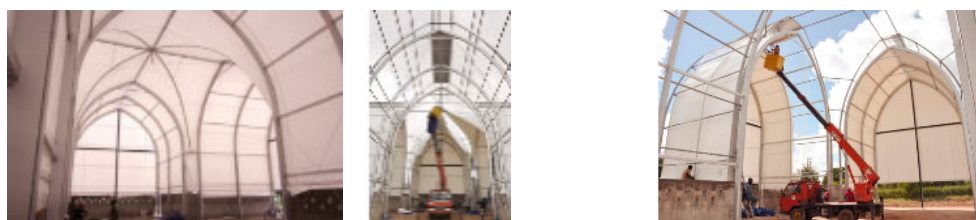


Figura 8.37. Etapas de montagem de uma cobertura em membrana, com formato em abobada de berço com secção ogival (Monita, 2015).

A cobertura é composta por uma estrutura principal (autoportante e metálica) e uma estrutura secundária (Figura 8.38). A estrutura principal é composta por arcos ogivais unidos na base por tirantes para travamento horizontal,

de modo a contrariar os efeitos de encurvadura nos pilares laterais. A estrutura secundária constitui-se por membrana de ETFE reforçada/contraventada com cabos de aço, como se exemplifica nas Figuras 8.38 (b) e 8.41(b). A aplicação de membrana simples de ETFE constitui um sistema integrado com perfil de selagem/fixação perimetral e cabos de aço embebidos em bolsas de membrana ETFE (soldadas à membrana de revestimento exterior) espaçados a cada metro para aumentar a resistência da membrana (este espaçamento depende das condições estruturais e da forma) (Figura 8.38 (b) e 8.41(b)). Por se tratar de uma estrutura composta por diferentes materiais (membrana e aço), o seu dimensionamento tem de combinar o comportamento distinto de ambos.

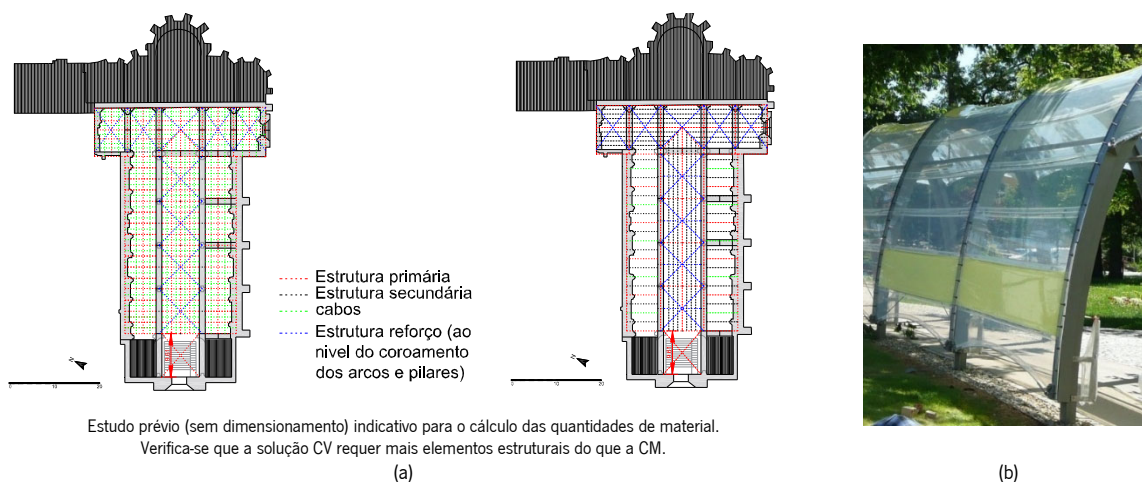


Figura 8.38. (a) Planta de cobertura do MAC, com a solução de cobertura em vidro (CV, à esquerda) e em membrana (CM, à direita). (b) Exemplo de aplicação de perfil de selagem, fixação perimetral e cabos de aço embebidos em bolsas de membrana ETFE, soldadas à membrana de revestimento exterior.

As propriedades mecânicas típicas das membranas de ETFE são apresentadas na Tabela 8.2. A grande variedade de propriedades mecânicas da membrana de ETFE presentes na Tabela 8.2 deve-se a variáveis como temperatura, espessura da membrana e fabricante. Estas gamas de propriedades mecânicas tornam a conceção/dimensionamento de coberturas com membrana ETFE desafiador, e por vezes não convencional, comparativamente às práticas correntes de construção. Devido à elevada resistência e elasticidade do material, a membrana de ETFE é ideal para aplicar em locais onde possam ocorrer cargas extremas repentinas, como terremotos ou explosões. Ao contrário do vidro, que pode quebrar e causar grandes danos, a membrana ETFE dissipa as cargas elevadas e não projeta material para fora do plano (Lecuyer, 2008).

Tabela 8.2. Propriedades mecânicas das membranas ETFE (Bessey, 2012).

Propriedades mecânicas	Min.	Máx.	Unidades
Módulo de elasticidade	300	1100	MPa
Coefficiente de Poisson	0.43	0.45	
Tensão elástica	15	18	MPa
Tensão de rutura	25	35	MPa
Temperatura de serviço	-200	150	C
Temperatura de fusão	250	280	C
Dureza	31	33	MPa
Densidade	1.7	1.77	g/cm <sup>3</sup>

- Cobertura permanente com membrana simples de ETFE

Os 3000m<sup>2</sup> de cobertura com a solução construtiva de membrana ETFE (simples) são compostos por várias tiras/folhas de membrana, com 2m x 10m cada, unidas entre si lado a lado (por soldadura). Cada tira/folha de ETFE é soldada ao longo de seu perímetro para formar uma aresta que pode ser dobrada e soldada sobre um perfil extrudido tipo "keder" que permite uma conexão estrutural entre a membrana de ETFE e a estrutura perimetral de alumínio (Figuras 8.39 a 8.41).

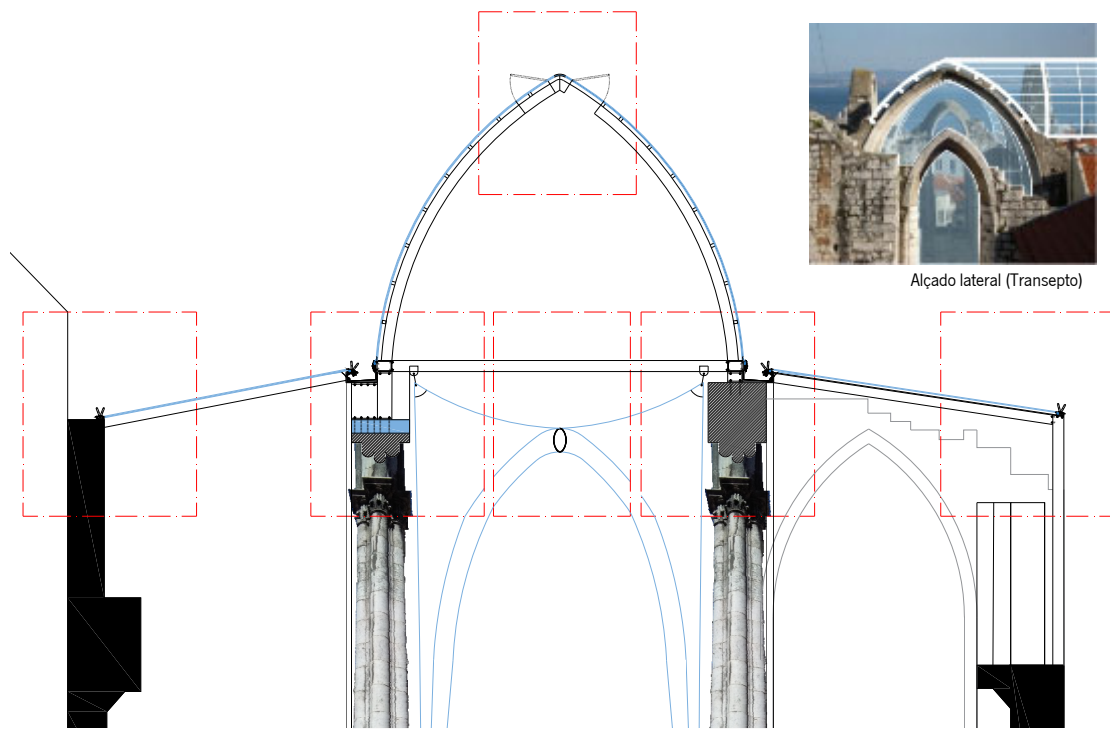


Figura 8.39. Corte transversal da nave com a cobertura e teto retrátil em membrana.

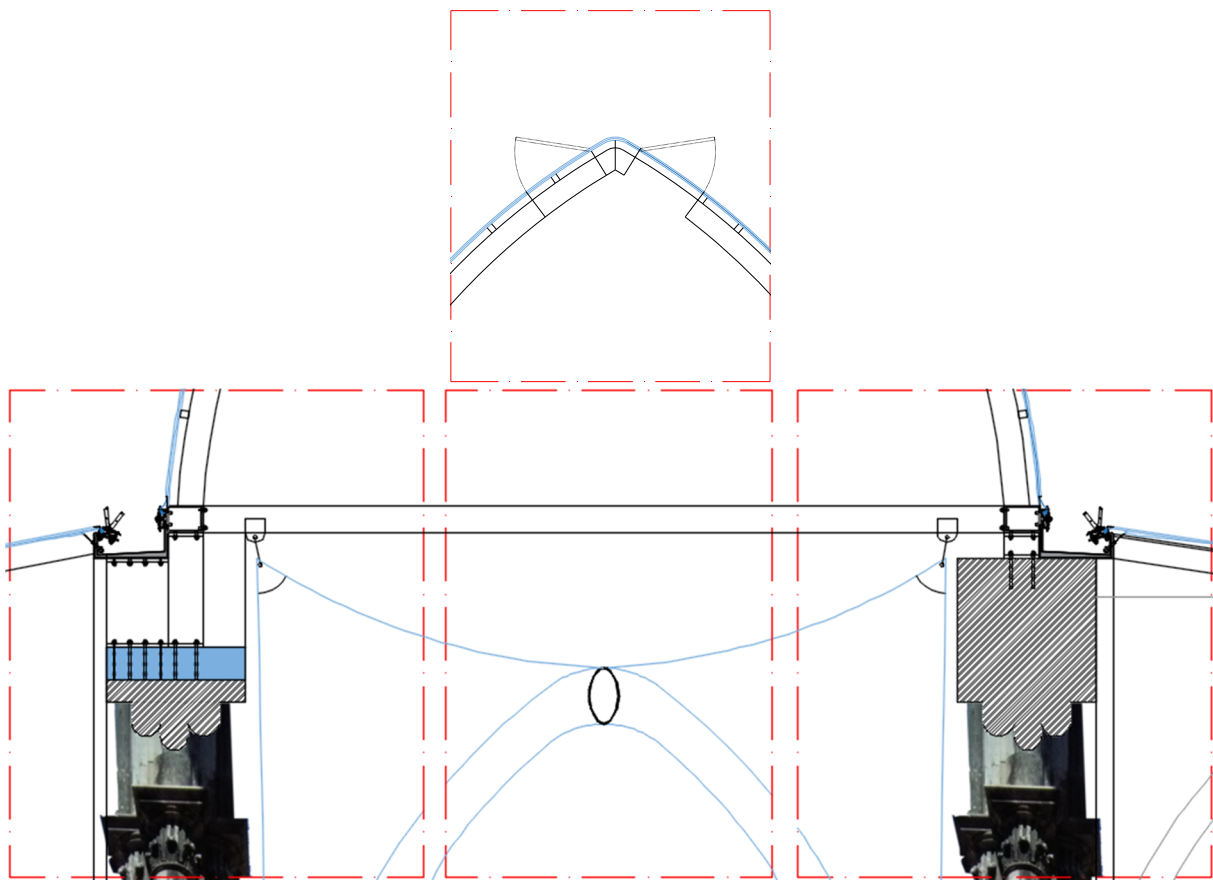


Figura 8.40. Pormenor da ligação da cobertura proposta aos elementos existentes.



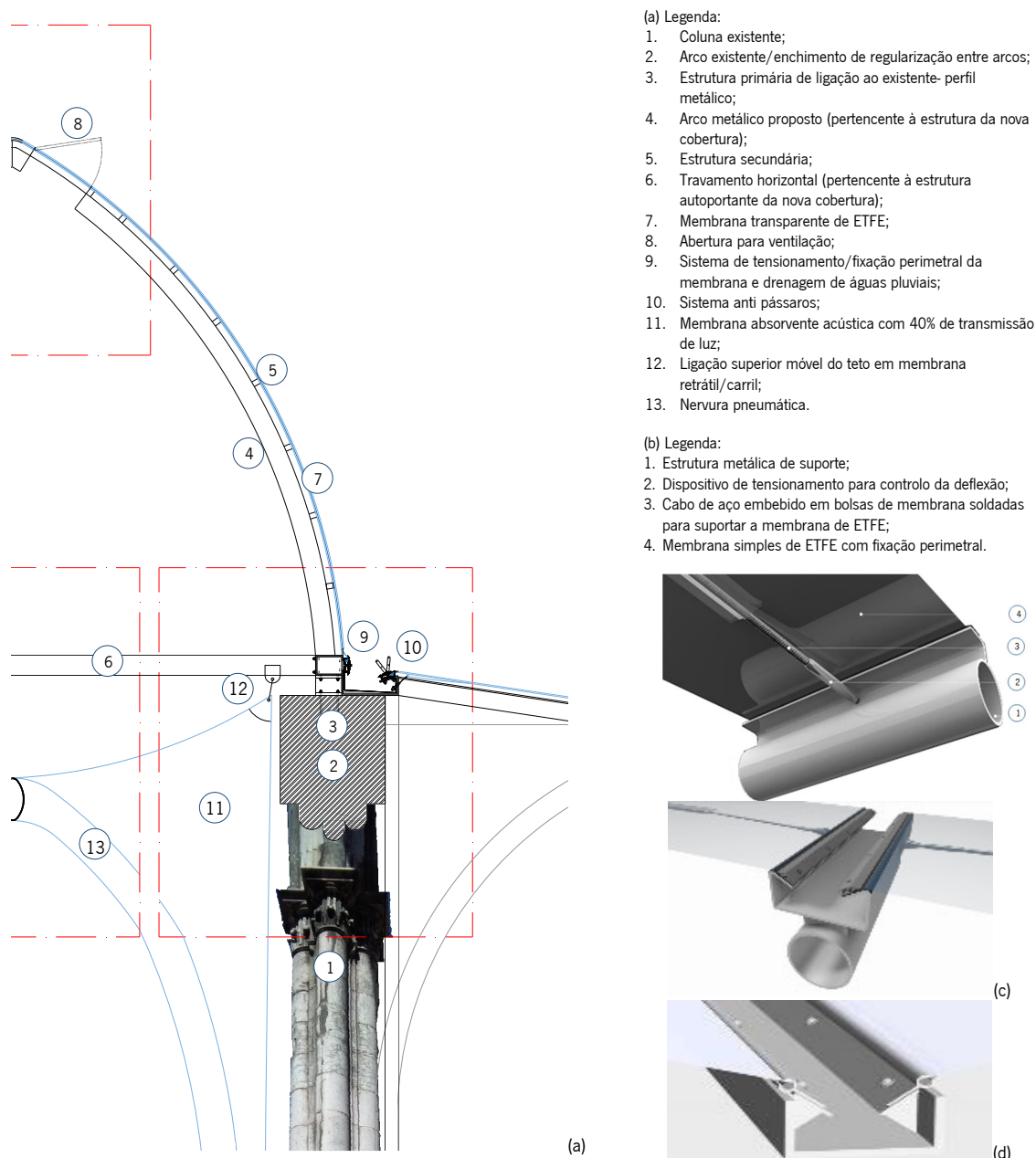


Figura 8.41. (a) Pormenor de ligação da solução em membrana ao existente. Tipos de ligações/ modos de tensionamento/ reforço da membrana de ETFE: (b) reforço da membrana simples de ETFE com cabos embestados em bolsas de ETFE (Birdair, 2018); (c) (d) com canal de drenagem.

• **Teto abobadado retrátil em membrana com nervuras pneumáticas**

A membrana de poliéster selecionada para a superfície do teto retrátil (Tabela 8.3) é não combustível e apresenta uma transmissão de luz de 40%, passível de eliminar os problemas de encadeamento que podem ocorrer através da cobertura transparente em membrana de ETFE, ou em vidro.

Tabela 8.3. Características da membrana selecionada para o teto retrátil.

<b>Propriedades físicas</b>	Material:	Membrana de poliéster de alta tenacidade	
	Peso: 600 g/m <sup>2</sup>	Largura: 270 cm	
	Resistência à tração:	250/220 daN/5cm	EN ISSO 1421
	Resistência ao rasgo (teia/trama):	25/25 daN	DIN 53.363
	Resistência a micro organismos:	Grau 0, excelente	ISSO 846 Método A
	Temperaturas de serviço extremas:	-30°C/ +70°C	Em posição estática
<b>Retardamento da chama</b>	Classificação europeia:	<b>B-s2,d0</b>	EN 13501-1
<b>Propriedades solares</b>	Reflexão visível (Rv):	57%	EN 14501
	Transmissão visível (Tv):	40%	EN 14501
	Fator Solar interno (G):	0.40	EN 14501



O teto abobadado e retrátil proposto apresenta nervuras pneumáticas (Figura 8.42(d)) que se podem insuflar para estender o teto e desinsuflar para retrain-lo (Figura 8.42(a)). O meio de suporte das nervuras pneumáticas é o ar, ou outro tipo de gás comprimido que crie forças de tração na membrana, garantindo a resistência e estabilidade da estrutura. As nervuras insufladas com ar utilizam membranas tubulares (vigas de ar/ *air beam*, Ø 40cm) com pressurização interna (Figuras 8.42 e 8.43) e que podem ser de alta ou baixa pressão. A membrana assume as forças de tração, enquanto o ar é responsável pelas forças de compressão. As nervuras de baixa pressão (operam até 16kPa) normalmente necessitam de uma fonte de ar constante, ou intermitente, enquanto as nervuras de alta pressão, semelhantes a um pneumático, apenas necessitam de insuflação ocasional. A nova geração de estruturas insufláveis não tem, em geral, nenhum tipo de reforço metálico convencional e conseguem suportar grandes cargas. Através de um sistema de insuflação (que corresponde ao elemento *chave*<sup>11</sup> (Figura 8.42(c)) com uma válvula de insuflação central, mangueiras e uma bomba elétrica, é possível insuflar as nervuras pneumáticas do teto retrátil (Figura 8.42(c)). Estima-se que o teto retrátil fique estendido em 13 minutos.

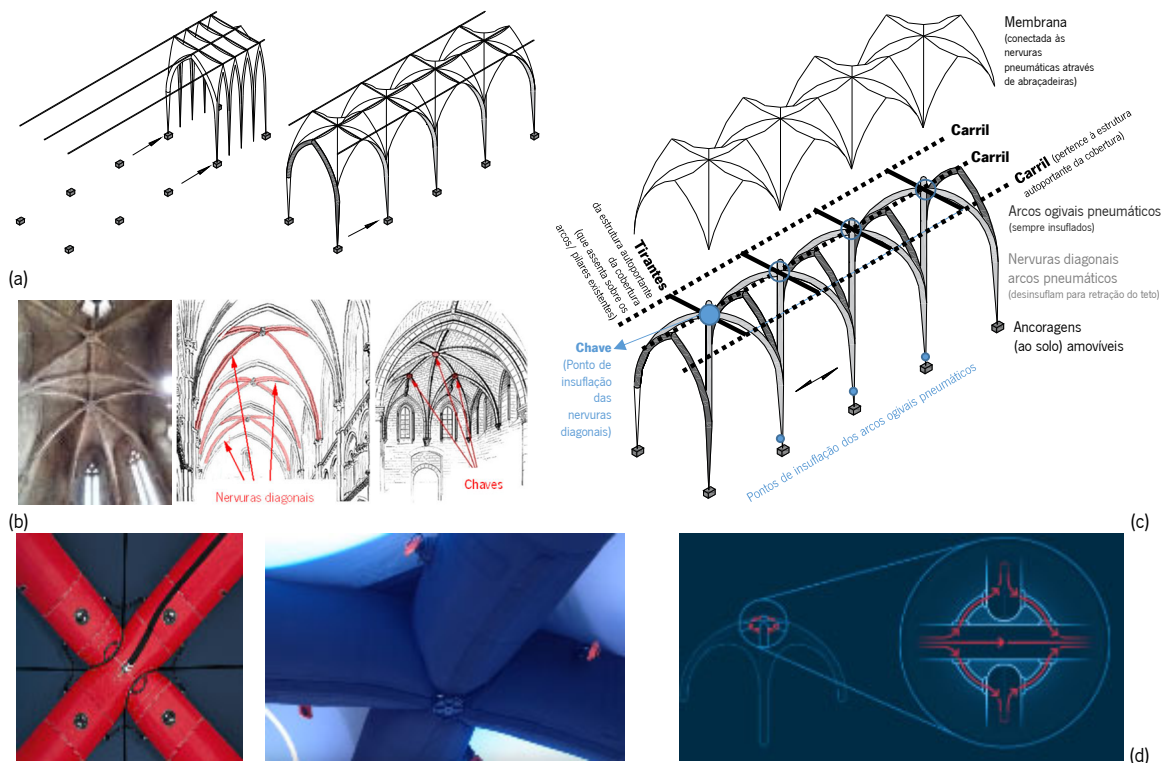


Figura 8.42. Teto abobadado retrátil com nervuras pneumáticas: (a) posição retraída e estendido; (b) imagem da cobertura interior da capela lateral da Igreja do Carmo com nervuras em cantaria de pedra; (c) composição e esquema de funcionamento; (d) válvula de insuflação central - "chave" (Gybe, 2018).

Os tubos que compõem as nervuras pneumáticas são constituídos, cada um, por um invólucro externo de uma membrana que envolve um tubo hermético feito de membrana de poliuretano termoplástico (TPU). A sua anatomia é semelhante à de um pneu de uma bicicleta (Figura 8.43). Cada tubo pode ser insuflado através de uma válvula soldada e usando uma bomba elétrica ou manual. Quando a pressão máxima de ar tiver sido atingida, a válvula de sobrepressão (vermelha) abre-se para liberar o excesso de ar (Figura 8.43). Estima-se que após a insuflação das nervuras, estas permanecem cheias durante 4 semanas sem necessidade de serem re-insufladas. Quando desinsufladas e dobradas, as nervuras retomam a forma original, sem danos; podem assumir várias formas/configurações e adaptarem-se à mudança de forma (Next Big Future, 2014).

Embora mais caras do que as estruturas metálicas equivalentes, o transporte e instalação das vigas pneumáticas apresentam menores custos, sobretudo devido ao seu peso e às reduzidas dimensões de embalagem (Linstrand, 2006 apud Friedman, 2011). A cobertura pneumática da estação central de autocarros do aeroporto de Heathrow (Figura 8.44(a)) constitui um exemplo disso. A opção por esta solução foi preferida relativamente a uma solução

<sup>11</sup> Utilizado para rematar as nervuras de cantaria na arquitetura gótica.

convencional por existir uma estação de metro abaixo da estação; a opção por uma cobertura convencional iria encontrar obstáculos na realização de fundações e a instalação desta cobertura durou apenas uma noite. Outro exemplo de aplicação de vigas pneumáticas é o hangar realocável por transporte aéreo e que pesa menos de 900 kg (Figura 8.44(b)). Este hangar apresenta: uma entrada retrátil, um vão de 9m (aprox.) e uma altura de 3m (aprox.); arcos insuflados (com Ø 42cm e pressão do ar interior de 5 psi) unidos a membrana de poliéster revestida a PVC através de cintas de amarração e conectados ao solo através de estacas helicoidais.

Legenda:

**Nervura:**

1. Tiras tipo velcro para fixar as extremidades da nervura às superfícies do teto;
2. Membrana de reforço com costura tripla em zig-zag;
3. Tiras tipo velcro intermédias para fixar as nervuras às superfícies abobadadas em membrana;
4. Tecido multi-laminado tipo x-ply;
5. Bolso de acesso à câmara de ar;
6. Reforço da válvula em membrana de neopreno;
7. Base da nervura;
8. Tampa de proteção da válvula;
9. Válvula de desconexão rápida para inflação/ deflação;
10. Válvula de deflação.
11. Câmara de ar interna substituível.

**Bomba de manual:**

12. Membrana soldada;
13. Válvula de descarga;
14. Desconexão rápida.

**Bomba integrada:**

15. Membrana soldada;
16. Válvula de liberação de umidade;
17. Desconexão rápida.



Figura 8.43. Anatomia de uma nervura pneumática (adaptado de Cyclocamping (2018)).

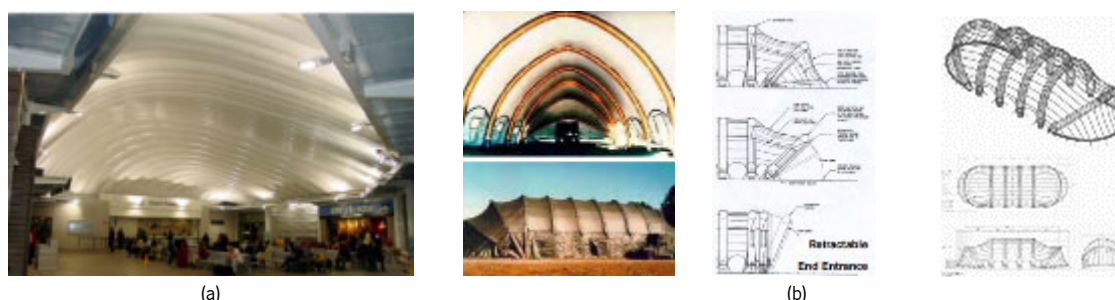


Figura 8.44. Exemplos de aplicação de vigas pneumáticas: a) cobertura insuflável para a central de autocarros do aeroporto de Heathrow (Lindstrand, 2006); b) hangar "Transportable Maintenance Enclosure (TME)" (concebido por FTL Happold) (Bell, 2018).

• **Ligações aos elementos construtivos existentes**

Ao contrário da maioria dos sistemas estruturais, o principal problema de uma estrutura tensada não é como transferir a carga para as fundações, mas sim como manter a estrutura ancorada ao solo, ou a elementos construtivos resistentes. Para as estruturas tensadas, conectadas diretamente ao solo, é comum utilizarem-se cabos e estacas. Contudo, para as que estão diretamente ligadas a edifícios, como uma cobertura tensada, por exemplo, utilizam-se frequentemente coroamentos de betão para ancorar a estrutura tensada aos elementos estruturais existentes do edifício. De modo a constituir uma solução com um nível reduzido de intrusão sobre o edifício existente e reduzir a quantidade de solicitações de carga, propõe-se: (1) conexão pontual da estrutura da cobertura em membrana aos elementos de suporte existentes, através de ligações reversíveis e pontuais (Figura 8.45); (2) conexão superior do teto abobadado amovível, com calhas de deslize (conectadas às vigas da nova cobertura - parte superior) (Figura 8.45S) e conexão inferior, pontual, ao pavimento (parte inferior) de modo a tensar e estabilizar o teto retrátil na posição de abertura.

A Figura 8.46 mostra o impacto visual da reposição da cobertura para a área circundante ao edifício e a Figura 8.47 mostra o impacto visual da reposição da cobertura e do teto abobadado no interior do espaço.

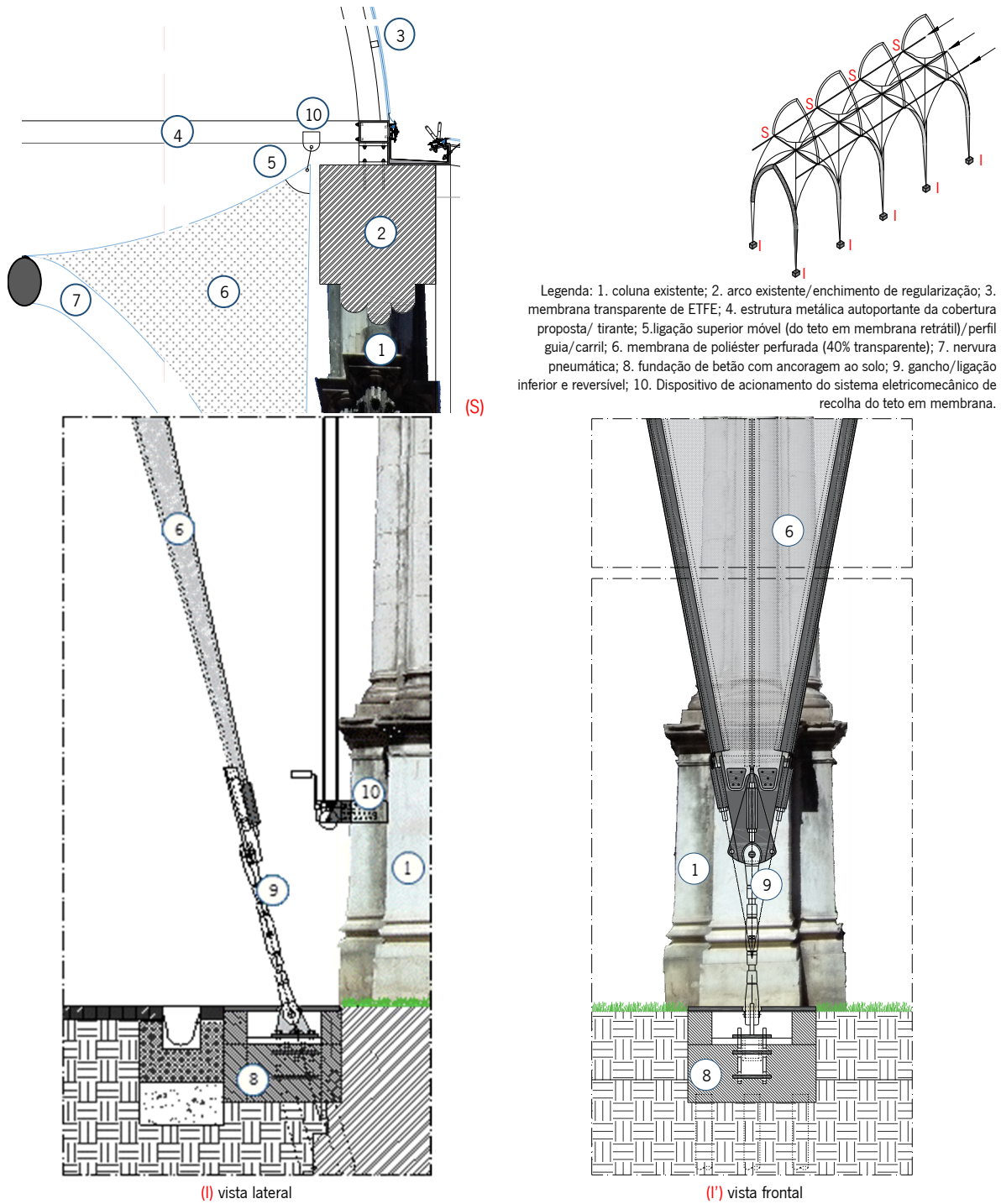
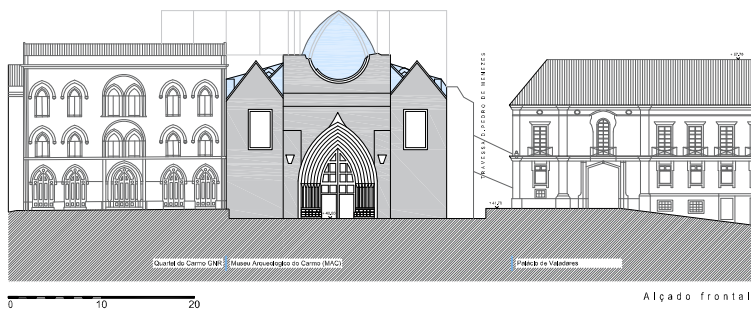


Figura 8.45. Pormenores das ligações superiores (S) e inferiores (I e I') do teto abobadado com nervuras pneumáticas ao existente.





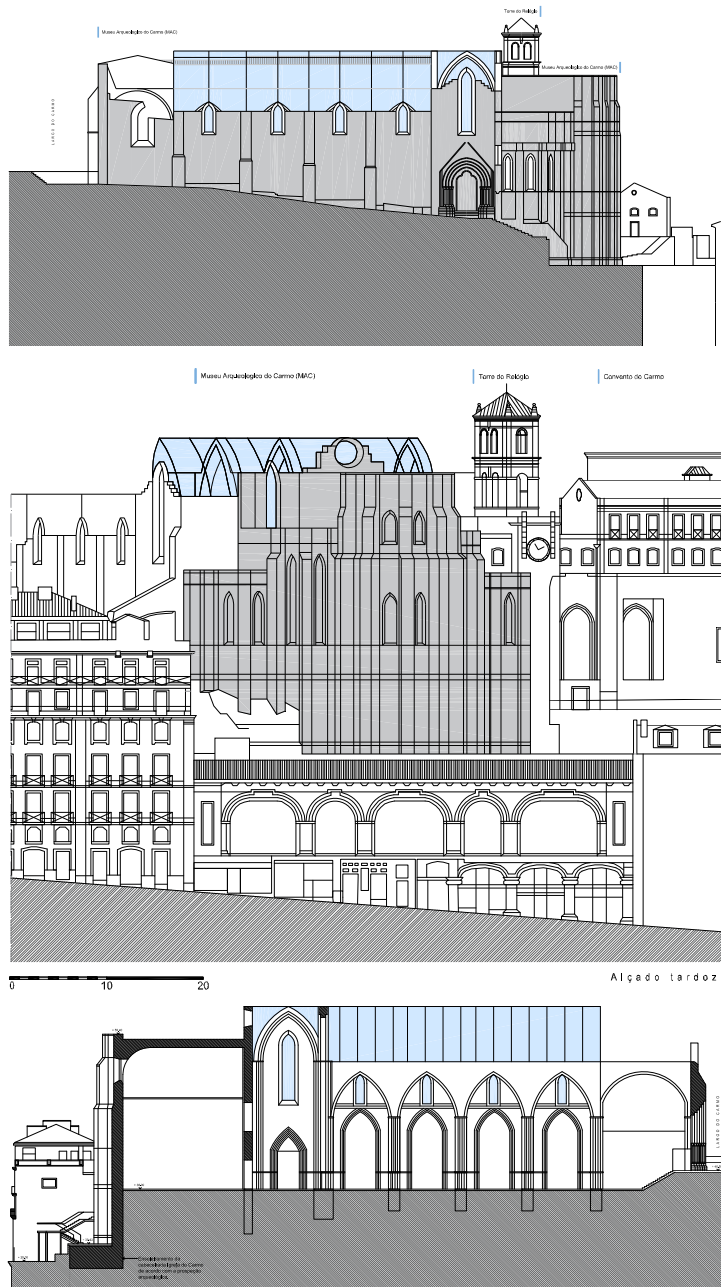


Ilustração da solução em membrana: vista interior do MAC com teto abobadado retraído (nas naves laterais) e estendido na nave central.

Figura 8.46. Desenhos do alçado frontal, alçado tardoz, alçado lateral e secção longitudinal do MAC com a cobertura alternativa proposta.



Figura 8.47. Ilustração do antes e após implementação da solução alternativa com membrana: (a) vista do transepto (b) vista da nave.

## 8.4. Avaliação da eficiência da solução alternativa com membrana

### 8.4.1. Método

Procede-se de seguida ao exercício de avaliação da eficiência da solução alternativa com membrana para a reposição de teto e cobertura do edifício em ruína/espaço arqueológico tomado como caso de estudo – nave do MAC. A Figura 8.48 apresenta o método adotado. Inclui o estado da arte, a definição de uma proposta alternativa e a criação de um modelo, com base no qual se determinam os recursos empregues e se obtêm resultados. Da relação entre recursos empregues e resultados obtidos determina-se a eficiência da solução alternativa proposta, comparativamente às soluções convencionais.

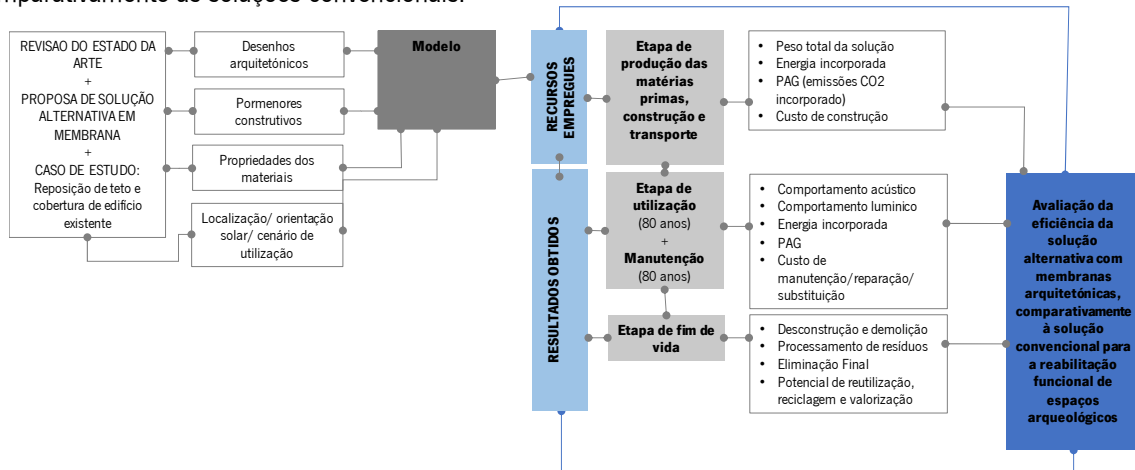


Figura 8.48. Esquema do método adotado para avaliação da eficiência.

### 8.4.2. Soluções de reabilitação em avaliação

Apresentam-se duas soluções para repor a cobertura deste edifício: uma convencional e outra alternativa. A solução convencional consiste numa estrutura metálica autoportante revestida com vidro laminado (12 mm de espessura) (Figura 8.49 CV). A solução de reabilitação alternativa resulta da combinação de uma cobertura em membrana de ETFE com um teto abobadado retrátil em membrana de poliéster (com propriedades absorventes acústicas e de regulação luminica). A cobertura em membrana de ETFE é tensionada numa estrutura metálica autoportante (Figura 8.49 CM+TMR). Neste estudo, assume-se que o sistema da cobertura em membrana é fixo, como o da cobertura em vidro, mas poderá tornar-se retrátil.

Na conceção destas duas soluções consideraram-se os princípios de intrusividade e reversibilidade e avaliaram-se/compararam-se os seguintes aspetos: de conforto (acústico, de iluminação e ventilação natural); segurança e proteção dos ocupantes; construtivos; económicos e de impacto ambiental. Os cenários de reabilitação, com ambas as soluções, foram comparados ao cenário existente sem cobertura (Figura 8.49 S/C).

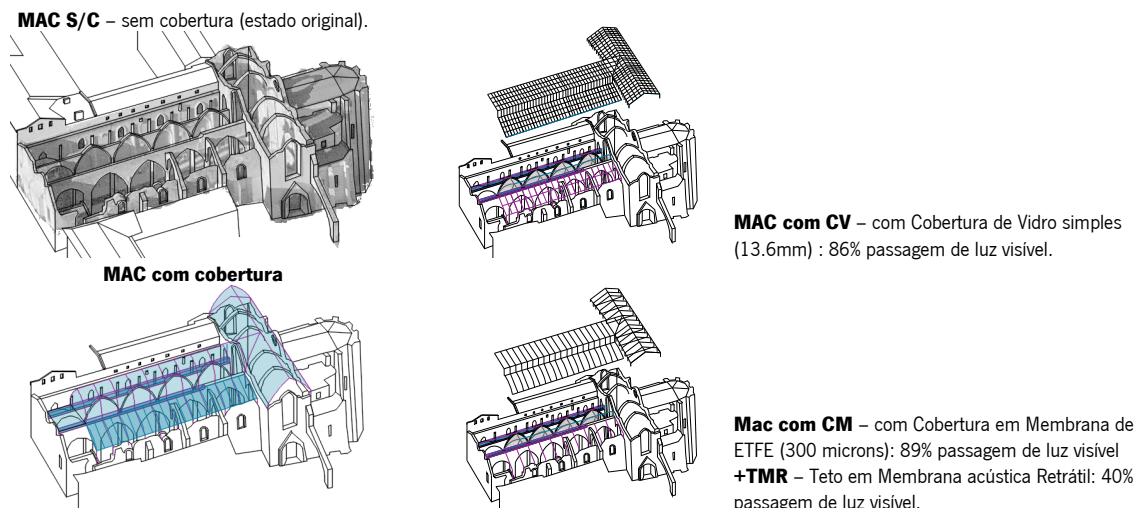


Figura 8.49. Vista geral das ruínas da Igreja do Carmo/MAC com todas as soluções/configurações em avaliação.

### 8.4.3. Avaliação do desempenho acústico

O desempenho acústico das duas configurações propostas para o espaço da nave (*CV* e *CM+TMR*) foi avaliado para multiusos, sobretudo para a eventos relacionados com a emissão de música, e comparado à configuração atual do espaço, ou seja, sem cobertura (*S/C*).

- **Breve introdução**

- *A presença inicial das soluções em membrana para “reabilitação acústica” de espaços muito grandes* Navarro *et al.*, (2009), na análise da evolução das condições acústicas nas igrejas, descreve vários usos de tapetes e pendentes/cortinas (também considerados membranas) e analisa os seus efeitos sobre a acústica destes locais, particularmente no período barroco: “(...)as soluções de ornamentação de igrejas, especialmente utilizadas para celebrações religiosas e civis também se podem considerar ações de reabilitação acústica, pois a abundância de tapetes e pendentes/cortinas, veludos e damascos/jacquards, e a profusa decoração em geral, combinada com o grande número de pessoas (que por sua vez estavam vestidas com grandes e pesados tecidos) só podiam aumentar a absorção sonora dessas igrejas, reduzindo ecos e elevadas reverberações, que são defeitos acústicos graves (...)” (tradução de inglês).

Outro exemplo da utilização de materiais de membrana na reabilitação acústica de edifícios é o *Crystal Palace* (século XIX, Sydenham, Londres) projetado por Joseph Paxton. Com 540 m de largura; foi o primeiro e maior palácio de ferro e vidro destinado a albergar eventos musicais. Como comentário sobre a acústica deste espaço, com base nos relatórios de Forsyth e Charlie Greville (1985 *apud* Simões, 2000), considera-se que as paredes de vidro proporcionam absorção sonora de baixas frequências. Mas, a presença de uma grande quantidade de pessoas (cerca de 88.000 pessoas) juntamente com uma elevada quantidade de cortinas e toldos no interior, proporcionou a absorção de sons de média e alta frequência. Como resultado, obteve-se uma elevada absorção em toda a banda de frequências audíveis, parecendo deste um espaço aberto.

Relativamente a exemplos do século XX, Berger (1996) refere-se ao efeito alcançado no *Bullock's Mall* (Califórnia): “*Tensada sobre uma estrutura de arcos cruzados em madeira, a dupla membrana (1400 m²) transmite 7,7% da luz visível. A membrana inferior porosa absorve o som e melhora a acústica do espaço*”. Coberturas com outros formatos, como a de *Shoreline Amphitheatre* (8000 m²) e *Cynthia Woods Mitchell Performing Arts Center* (2600 m²) também se consideram acusticamente ideais “*por eliminar ecos focados*” (Berger, 1996).

Em síntese, apesar dos exemplos históricos assinalados, existem poucas referências que discutem o comportamento acústico de espaços com envolvente (interior ou exterior) em membrana no passado (Monjo, 1985; Llorens & Soldevila, 1991; Simões, 2000; Chemlik, et al., 2015).

- *Exemplos contemporâneos de soluções em membrana para reabilitação de edifícios antigos/históricos* Existem muitos tipos diferentes de membranas: têxteis (revestidos ou não, tecidos, não tecidos, malhas, etc.) e películas (perfuradas ou não). A relação das suas propriedades acústicas com o desenho arquitetónico pode ser investigada sob diferentes pontos de vista. Os estudos mais comuns referem-se às suas propriedades relativamente à (1) acústica de sala, p.e. absorção sonora e (2) acústica de edifícios, p.e. isolamento acústico, sendo que ambas as relações contribuem para o conforto acústico geral das construções.

Os exemplos mencionados no item denominado *Cobertura transparente/translúcida de pátios*, na secção 4.1.1 do Anexo 4, mostram que a obtenção de boas condições acústicas num espaço fechado, utilizando soluções de membrana é fortemente influenciada pelo seu desenho. Vários estudos apontam os benefícios da aplicação de membranas porosas/permeáveis para a melhoria do desempenho acústico dos espaços interiores. Em relação à acústica de salas, as soluções de membrana são comumente aplicadas nos tetos, especialmente em espaços muito grandes. Existem vários exemplos de soluções de teto em membrana projetadas para reabilitar edifícios existentes/históricos: Museu da História Alemã/ *Schlüterhof Museum* (Alemanha); Igreja St. Petri-Pauli (Alemanha); Igreja da Elevação de Santa Cruz/ *kostel Povýšení sv. Kříže* (República Checa); Abadia de Dargun (Alemanha); Abadia Milenar Beneditina de Pannonhalma (Hungria) (ver mais detalhes nas secções 4.4 e 4.5 do Anexo 4).

- **Objetivo**

Atualmente, a nave principal sem cobertura - um espaço exterior - é um espaço multiusos, principalmente no verão. De acordo com as informações fornecidas pelo MAC, nos últimos quatro anos, a maioria dos eventos



realizados na nave foram orientados para a emissão de música (coral, sinfônica e concertos semi-clássicos) (Figura 8.50(a)). Pelo contrário, os eventos que ocorrem no auditório interior do MAC, que tem uma capacidade de assentos muito limitada (atualmente 50 assentos, com possibilidade de expansão até 90), foram orientados para a emissão de palavra (conferências, colóquios, palestras, teatro, *etc.*) (Figura 8.50(b)). Contudo, no total, a maioria dos eventos realizados no MAC ocorreu no auditório interior (Figura 8.50(c)). Neste sentido, para validar a possibilidade de transferir os eventos com emissão de palavra, que decorrem no auditório interior para o espaço da nave (com capacidade para acomodar aproximadamente 300 a 500 pessoas sentadas e 500 a 600 pessoas em pé), para além do desempenho para a emissão de música na nave, também se avalia o desempenho para a emissão de palavra. No entanto, haverá sempre eventos com emissão de palavra que só podem ser realizados no auditório interior, como p.e. conferências, devido aos requisitos luminicos para a projeção de imagens (que podem não ser alcançados, durante o dia, devido à transmissão de luz através dos materiais propostos para a cobertura/teto).

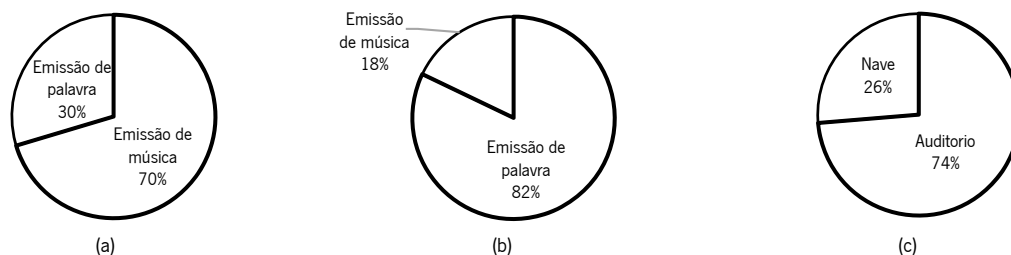


Figura 8.50. Distribuição (percentagem) da localização e tipo de eventos realizados na Igreja do Carmo/MAC de 2015 a 2018 (informação gentilmente cedida pelo MAC): (a) tipo de eventos acústicos realizados na nave em ruína; (b) tipo de eventos acústicos realizados no auditório interior e (c) localização dos eventos.

O presente exercício serve para determinar a influência que a solução de cobertura e teto em membrana exerce sobre o desempenho acústico de espaços com características semelhantes ao edifício tomado como estudo de caso, dirigidos para a emissão de música. No entanto, o desempenho para eventos associados à emissão de palavra também é considerado nesta avaliação. Os resultados apresentados que se apresentam se seguida baseiam-se em testes numéricos realizados a três configurações/soluções: *S/C*, *CV* e *CM+TMR*.

#### • Ferramenta selecionada para ensaio numérico

A ferramenta informática utilizada para calcular o desempenho acústico das referidas soluções/configurações foi a *Olive Tree Lab (OTL) Suite Room*, versão 4.3 (Pemard, 2018). Esta ferramenta foi selecionada por permitir: (1) a modelação acústica tridimensional num ambiente de trabalho integrado; (2) calcular a propagação de ondas planas e os coeficientes de absorção sonora dos materiais considerados; (3) a criação de estruturas multicamada com base no método da matriz de transferência; e (4) calcular o Tempo de Reverberação ( $TR$ ), o Tempo de Decaimento Inicial (*Early Decay Time* -  $EDT$ ), a Definição ( $D_{50}$ ) e a Claridade ( $C_{80}$ ), usando modelos 3D - isto é particularmente relevante para este caso de estudo, pois a configuração das soluções propostas apresentam características geométricas peculiares.

#### • Método

A ferramenta informática *OTL Suite Room* baseia-se na metodologia de Pemard (2018) para calcular a propagação do som. Esta metodologia, desenvolvida e apresentada em detalhe por Charalampous & Economou (2016), foca-se em preservar a natureza da *Geometria Acústica Baseada em Ondas (Wave Based Geometrical Acoustics - WBGA)* (Lam, 2005) e utiliza simplificações apenas nos casos em que não há alternativa. As opções de cálculo seguem as seguintes normas: ISO 9613-2 (2016), ISO 3382-1 (2009), ISO 3382-2 (2008), ISO 3382-3 (2012) e IEC 60268-16 (2011).

A comparação entre as soluções/configurações de reabilitação mencionadas é feita através dos seguintes parâmetros acústicos: Tempo de Reverberação ( $TR$ ), Tempo de Decaimento Inicial (*Early Decay Time* -  $EDT$ ), Claridade ( $C_{80}$ ) (estes três primeiros relacionados à inteligibilidade musical), Índice de Transmissão de Fala (*Speech Transmission Index* -  $STI$ ) e Definição ( $D_{50}$ ) (estes dois últimos relacionados à perceção da articulação de palavras).

#### • Modelação

As simulações/testes implicaram um conjunto de ações: (a) transferir o modelo 3D, criado na ferramenta informática *SketchUp*, para a ferramenta *OTL Suite Room* (Figura 8.51); (b) atribuir materiais às superfícies de acordo com as suas propriedades físicas e o seu coeficiente de absorção sonora, ou calculando a impedância da superfície; (c) caracterizar e posicionar os recetores a 1.2 m de altura e as fontes de ruído a 3.0 m de altura; (d) executar cálculos para recetores únicos ou múltiplos (mapeamento) para avaliar o desempenho acústico do espaço interior considerado.

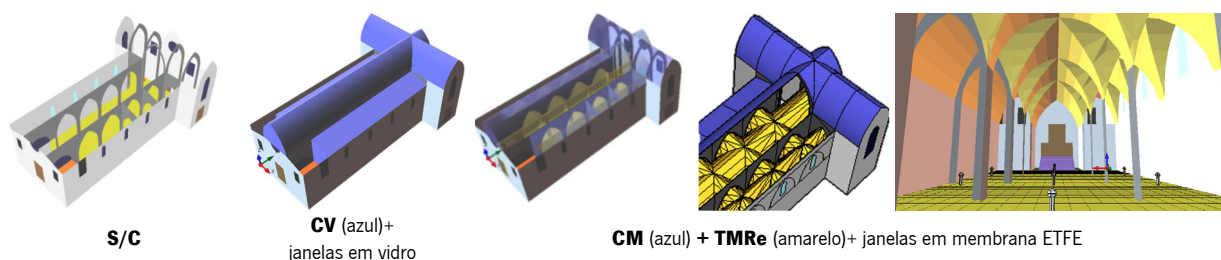


Figura 8.51. Modelos virtuais do edifício com as configurações/soluções de reabilitação em avaliação.

Relativamente à influência da forma, Bouillart (1977, *apud* Simões, 2000), no estudo acerca de piscinas cobertas por estruturas em membrana tensionada, conclui que as superfícies interiores das paredes desses espaços devem ser o mais difusivas possível, com lados não paralelos, com muitas cortinas e ornamentos, proporcionando superfícies convexas refletoras. As formas mais comuns de coberturas em membrana tensionada são *hipar*, ou seja, anticlásticas. Contudo, as superfícies anticlásticas não são côncavas nem convexas. Por isso, segundo Simões (2000), deve dar-se especial atenção a este problema na fase de modelação e de cálculo. Os planos tangentes à superfície da membrana tensada devem ser determinados nos pontos em que o raio sonoro toca a membrana, de modo a definirem-se ângulos de incidência e reflexão.

#### • Dados de entrada

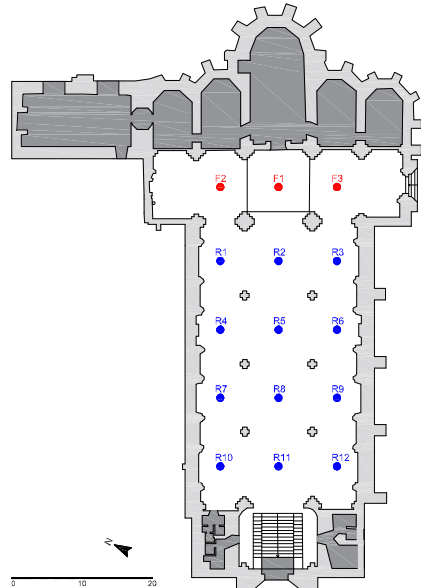
Para realizar a avaliação/simulação do desempenho acústico, considera-se como dados de entrada o seguinte: (1) um nível de ruído exterior de 75 dB (A) e um nível de ruído interior de 53 dB (A), com base em medições experimentais realizados *in situ*, pela autora; (2) o espaço da nave encontra-se sem ocupação, sem climatização e destina-se à emissão de música (sem suporte eletroacústico); (3) a posição das fontes e dos recetores sonoros conforme a disposição apresentada na Figura 8.52. Na Figura 8.52 encontra-se uma síntese das características dimensionais e dos materiais que constituem as superfícies do espaço interior da nave. A Tabela 8.4 apresenta as propriedades desses e de outros materiais considerados na avaliação.

Para realizar a análise comparativa, através de ensaio numérico, entre o edifício existente sem cobertura (S/R) - um espaço exterior - e duas soluções alternativas com cobertura (CV e CM) - um espaço interior - considerou-se que S/R apresenta uma cobertura virtual com a mesma área superficial de CV e CM, e teoricamente, o valor máximo para o coeficiente de absorção sonora (1.0). O volume interior do edifício com cobertura é aproximadamente de 38145 m<sup>3</sup>, com o TMR retraído (doravante designado por TMR<sub>r</sub>) e de 19600 m<sup>3</sup>, com o TMR estendido (doravante designado por TMR<sub>e</sub>). Para a modelação numérica de S/C, considera-se considerado um volume virtual de 38145 m<sup>3</sup>.

Tabela 8.4. Propriedades físicas e coeficientes de absorção Sonora dos materiais considerados nos ensaios numéricos (calculados e retirados da base de dados *OTL Suite Room*).

Solução para teto e cobertura	Material	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Peso (kg/m <sup>2</sup> )	Frequências (Hz)					
				Coeficiente de absorção sonora					
				125	250	500	1000	2000	4000
<b>S/C</b> (espaço sem cobertura)	“Cobertura virtual” (ar)	2500		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>CV</b> (cobertura de vidro)	Vidro simples 12mm	2500	30.00	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
<b>CM</b> (cobertura em membrana)	Membrana ETFE 0.3mm	2500	0.53						
	Rede de supressão acústica em PVC-perfuração com Ø90mm (1mm); 53% abertura; 0.44kg/m <sup>2</sup>	2500	0.44	0.78	0.47	0.19	0.06	0.02	0.01
<b>TMR</b> (Teto abobadado em Membrana Retrátil)	Membrana de poliéster em malha aberta (40% de transmissão de luz visível)	2030	0.60	0.20	0.60	0.80	0.90	0.95	1.00

Paredes/pavimentos e outros:								
Cadeiras ocupadas (estofa reduzido)	900		0.51	0.64	0.75	0.80	0.82	0.83
Cadeiras vazias (estofa reduzido)	900		0.36	0.47	0.57	0.62	0.62	0.60
Portas em madeira	120		0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
Mármore/ calcário	7100		0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Relva	90		0.10	0.16	0.26	0.39	0.56	0.73
Janelas de vidro existente (4mm)	35		0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Fecho de janelas com membrana ETFE (0.3mm)	120		0.79	0.48	0.20	0.06	0.02	0.01
Fecho de janelas com vidro (6mm)	120		0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02



Fonte sonora (a 3 metros de altura: F1)

**Recetores sonoros**

R1, R4, R7 e R10  
R2, R5, R8 e R11  
R3, R6, R9 e R12

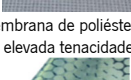
R1, R4, R7 e R10  
R2, R5, R8 e R11  
R3, R6, R9 e R12

**Materiais**

**cobertura/teto**



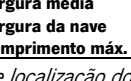
rede de PVC



membrana de poliéster de elevada tenacidade



membrana de ETFE

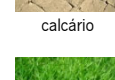


vidro

**Paredes e pavimento**



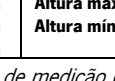
mármore



calcário



relva



mármore

**portas/janelas**



madeira



Vidro/caixilho madeira

<b>Volume com TMRr</b>	38 145 m <sup>3</sup>	<b>Largura máx.</b>	41 m	<b>Altura máx. s/teto</b>	26 m
<b>Volume com TMR</b>	19 600 m <sup>3</sup>	<b>Largura média</b>	32 m	<b>Altura máx. c/teto</b>	16 m
<b>Área total</b>	1 500 m <sup>2</sup>	<b>Largura da nave</b>	23 m	<b>Altura mín. c/teto</b>	14 m
<b>Área total das superfícies interiores</b>	12 697 m <sup>2</sup>	<b>Comprimento máx.</b>	60 m		

Figura 8.52. Características dimensionais do espaço em análise e localização dos pontos de medição (fontes e recetores), considerados nos ensaios numéricos.

Segundo LeCuyer (2008), em contraste com o excelente desempenho acústico num espaço interior, uma cobertura em membrana de ETFE fornece pouca ou nenhuma redução de som perante um ruído externo; p.e., quando a superfície tensada da membrana é excitada por chuvas fortes, esta transmite esse ruído de impacto para o espaço interior. Um estudo experimental conduzido pelo *British Research Establishment* (BRE) confirma os elevados níveis de ruído provocados pela queda de chuva em sobre coberturas com membranas. Quando aplicada na cobertura de átrios e espaços comerciais, essa percepção acústica das mudanças climáticas é considerada um atributo positivo. No entanto, em espaços como escritórios e bibliotecas, que exigem condições internas muito silenciosas, isso pode ser um problema. Os resultados experimentais obtidos pelo BRE (*apud* Chiu et al., 2015) (Figura 8.54) comparam os níveis de ruído provocados por queda artificial de chuva sobre vidro, policarbonato e membrana de ETFE (com e sem supressores de ruído); verifica-se que o ruído de impacto provocado pela queda de chuva pode ser suprimido através da adição de uma rede ou membrana com malha aberta na superfície exterior da membrana de ETFE (Figura 8.53), criando uma fina camada de água sobre a membrana. Isto tem dois efeitos: (1) aumento da massa da cobertura, reduzindo a transmissão de som e (2) redução do impacto da própria gota de chuva que é dissipado sobre a membrana em rede ou malha aberta.

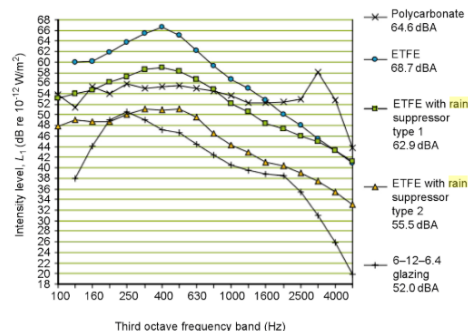
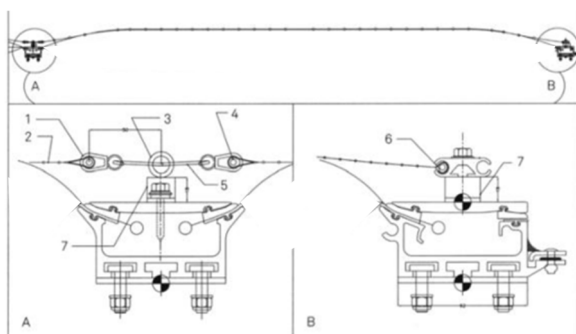


Figura 8.53. Pormenor construtivo de cobertura em membrana ETFE com membrana de supressão de ruído adicional: 1. manilha; 2. membrana de supressão de ruído; 3. anilha de suporte; 4. cordão de fibra de vidro; 5. cordão de nylon com Ø 3mm; 6. keder prefixado em polietileno; 7. suporte (adaptado de LeCuyer, 2008).

Figura 8.54. Níveis de ruído de impacto provocado pela queda de chuva em vários materiais leves aplicados em coberturas; teste conduzido por British Research Establishment, BRE Report Number 220312 BRE: Rain noise from roof glazing, polycarbonate roofing and ETFE roofing (Chiu, 2015).

• **Resultados e discussão – comparação entre as soluções de reabilitação propostas**

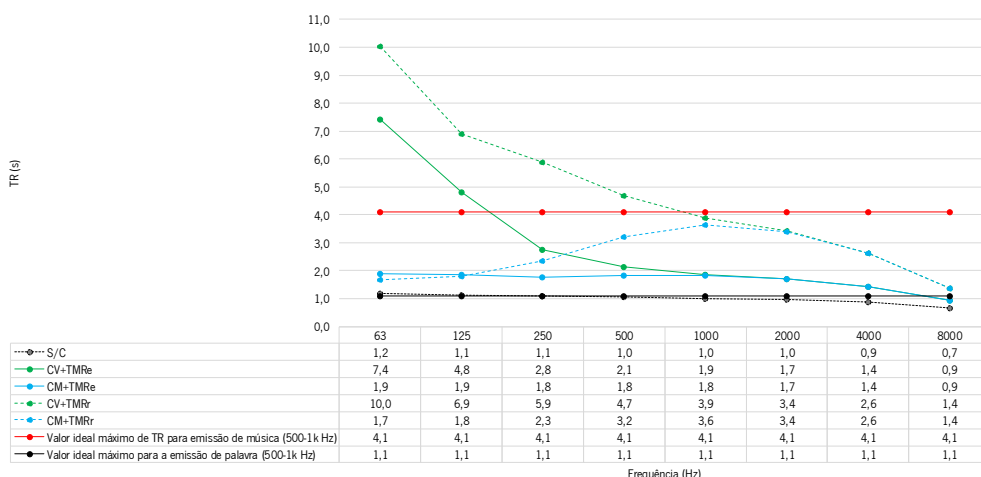
Nota: A caracterização acústica de um espaço é determinada pelo grau de inteligibilidade da palavra e/ou pela qualidade da percepção auditiva causada pela música. Como o espaço da nave tem sido utilizado para eventos de com emissão de palavra (30%) e musicais (70%), a avaliação do desempenho acústico do espaço da nave da igreja do Carmo/MAC, com as soluções de reabilitação propostas, foi feita em termos de inteligibilidade da palavra e percepção musical, através dos parâmetros descritos de seguida.

○ *Tempo de reverberação (TR)*

Segundo o RRAE (Decreto-lei 129/2002), o valor médio para o TR – nas bandas de oitava centradas em frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz - a considerar em auditórios com volume (V) acima de 9000 m³ (mobilados e sem ocupação) deve satisfazer a relação:  $RT_{médio} \leq 0.05V^{1/3}$ . No presente caso de estudo, como o volume varia entre 19600 m³ e 38145 m³, considerando o espaço com cobertura e teto estendido ou retraído, respetivamente, o valor máximo legal de TR deve situar-se entre 1.3 e 1.7 s.

Os valores estimados para TR, obtidos para todas as configurações da Igreja do Carmo/MAC, para bandas de frequência entre 63 Hz e 8k Hz são apresentados na Figura 8.55. De modo a comparar o espaço da nave com cobertura de vidro ou de membrana, com o mesmo volume, ou seja, ambas com TMR<sub>e</sub> e TMR<sub>r</sub>, também se estimaram os valores de TR para estas configurações. O valor médio estimado de TR para as bandas de frequência médias (500 - 1000 Hz) varia desde 1.0 s (S/C) a 4.3 s (CV sem TMR).

Na Figura 8.55 verifica-se que a variação do volume, devida à extensão ou retração do teto em membrana, influencia o desempenho acústico do espaço da nave, quer seja com a opção CV ou CM. Um exemplo deste efeito pode ser encontrado no auditório Edwin Thomas Hall (Akron, Ohio, E.U.A.), projetado para assumir variações de volume em função do tipo de desempenho acústico pretendido (Carvalho, 2018).



Escala de cores/  
valores de RT(s)  
(500Hz):

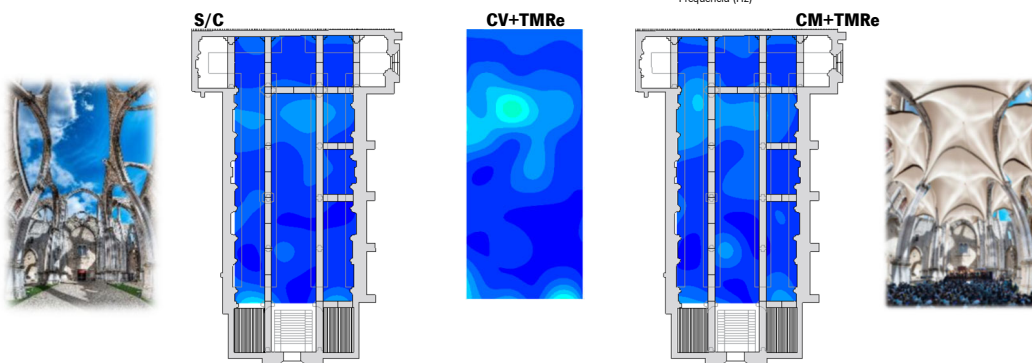
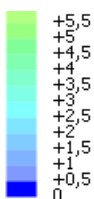


Figura 8.55. Gráfico com o Tempo de Reverberação (TR) para cada banda de oitava e mapas de distribuição dos valores de TR, obtidos através de ensaio numérico com a ferramenta OTL suite.

Contudo, como o valor TR ideal/ótimo, para espaços onde a música é importante, também depende do tipo de música, apresenta-se uma comparação entre os valores estimados e os valores ótimos de TR para diferentes tipos de usos (ver Tabela 8.5). Por conseguinte, todas as configurações para o espaço da nave são avaliadas, em relação ao seu desempenho para a emissão de música e de palavra, comparando os valores de TR estimados com os valores ótimos, para os volumes e usos/funções mencionados. A Tabela 8.5 mostra que a configuração CM+TMRe é adequada para a maioria dos tipos de música nas bandas de frequência 500-1000 Hz, exceto para música popular, órgão e coros gregorianos. No entanto, verifica-se que com a configuração CM+TMRe se consegue alcançar valores ótimos de TR para estes últimos tipos de música, ou seja, esta variação do volume com o sistema de teto em membrana retrátil aumenta a utilização do espaço para uma gama mais ampla de tipos de música. Em oposição, as configurações S/C (exceto para música popular) e CV não apresentam bom desempenho para a emissão de música; a configuração S/C apenas apresentam bom desempenho para a teatro e cinema. Considerando este último aspeto, como o valor estimado de TR para a opção CM+TMRe está 0.8 s acima do valor ótimo máximo para a emissão de palavra, é espectável que com a ocupação do espaço (para a capacidade máxima) o valor estimado para o TR possa ser reduzido e alcançar o ótimo.

Tabela 8.5. Comparação entre os valores ótimos/ideais de TR (para 500 -1000 Hz), segundo o tipo de uso (Carvalho, 2018), e os valores estimados de TR para cada configuração do espaço da nave (obtidos através de ensaios numéricos com OTL suite).

Uso	Uso atual do espaço da nave (%)	Limite mínimo TR (s)	TR Ideal (s)	Limite máximo TR (s)	TR estimado (500 – 1000 Hz). Comparativo para as seguintes configurações do espaço da nave:				
					S/C	CV	CM	CM+TMRe	
					1.0 s	4.3 s	3.4 s	1.8 s	
Auditório (palavra)	12	0.6	0.7 – 0.8	0.9	x	x	x	x	
Teatro	12	0.6	0.7 – 0.9	1.0	+	x	x	x	
Cinema	8	0.7	0.8 – 1.0	1.1	++	x	x	x	
Música	Ópera (non-Wagner)	-	1.2	1.3 – 1.7	1.8	x	x	x	+
	(Wagner)	-	1.7	1.8 – 1.9	2.0	x	x	x	++
	de câmara	-	1.3	1.4 – 1.7	1.8	x	x	x	+
	Sinfónica Barroca	-	1.3	1.4 – 1.6	1.7	x	x	x	+
	Clássica	-	1.5	1.6 – 1.8	1.9	x	x	x	++
	Romântica	16	1.8	1.9 – 2.2	2.3	x	x	x	+
	Moderna	32	1.4	1.4 – 1.9	2.0	x	x	x	++
	Popular	4	0.7	0.8 – 1.0	1.1	++	x	x	x
	Órgão	-	2.4	2.5 – 3.5	3.6	x	x	+	x
	Coros Gregorianos	16	2.9	3.0 – 4.0	4.1	x	x	++	x

++ O TR do espaço é ideal para este uso. + O TR do espaço situa-se no intervalo ótimo para este uso. x O TR do espaço não é adequado para este uso.

o *Claridade (C<sub>80</sub>) – emissão de música*

Claridade é um índice que define a inteligibilidade das notas musicais e relaciona-se com o equilíbrio entre a claridade percebida e a reverberação. Este indicador é extremamente importante para a caracterização acústica de espaços onde se realizam eventos orientados sobretudo para a emissão de música, mas também para a emissão de palavra, tal como o presente caso de estudo. Segundo Isbert (1998), a Claridade é muito influenciada pela forma e pelos materiais dos elementos que definem o espaço, mas não pelo volume do espaço. Nesse sentido, a distância fonte/recetor é relevante para calcular este parâmetro. Salienta-se que ainda não há uma investigação precisa que defina o melhor valor que este parâmetro acústico deve ter. No entanto, considera-se que cada tipo musical admite variações neste índice, através da articulação das notas musicais pertinentes para cada tipo.

Os valores médios de C<sub>80</sub> calculados para a banda de frequências 500-1000 Hz são: -2.6 dB (σ=1.01) para S/C, -8.2 dB (σ=1.33) para CV, - 6.9 (σ=1.35) para CM, -3.2 dB (σ=0.74) para CM+TMRe (Figura 8.56). O grau de dispersão dos valores por banda de frequência é relativamente elevado (Figura 8.56). Por último, verifica-se que os valores de C<sub>80</sub> reduzem à medida que a distancia fonte/recetor aumenta.

Os valores de Claridade, obtidos por ensaio numérico, foram utilizados para avaliar o comportamento acústico do espaço da nave em relação à emissão de música. Como resultado, comparam-se os valores calculados de C<sub>80</sub> com os valores ideais de C<sub>80</sub> (Carvalho, 2018) para cada configuração do espaço (ver Tabela 8.6).

Atendendo aos parâmetros  $TR$  e  $C_{80}$  (Tabela 8.6), concluir-se que, globalmente, nenhuma das configurações em análise apresenta excelente desempenho acústico para todos os usos, sobretudo quando se considera o parâmetro  $C_{80}$ . A Tabela 8.6 mostra que, para todas as configurações, os valores estimados de  $C_{80}$ , não estão no intervalo de valores ideais para a maioria dos tipos de música (exceto para coro gregoriano e órgão). Considerando os valores ideais de  $TR$  e  $C_{80}$ , a configuração  $CM+TMRe$  é acusticamente mais adequada para opera e música sinfónica, mas, com a configuração  $TMRr$ , alcança-se um ambiente mais adequado para música coral e de órgão, potenciado por uma maior reverberação. Em comparação, a configuração  $CV$  apenas atinge os valores ideais de  $C_{80}$  para música de órgão e S/C para música coral e de órgão.

Atendendo ao atual uso principal do espaço da nave (eventos musicais), verifica-se que a configuração  $CM+TMRe$  é a única que se apresenta como sendo a mais adequada para emissão de música sinfónica moderna, apesar dos baixos valores de  $C_{80}$ . Por isso, em estudos futuros, recomenda-se adotar medidas para melhorar a clareza, como as sugeridas por Alonso, *et al.* (2014).

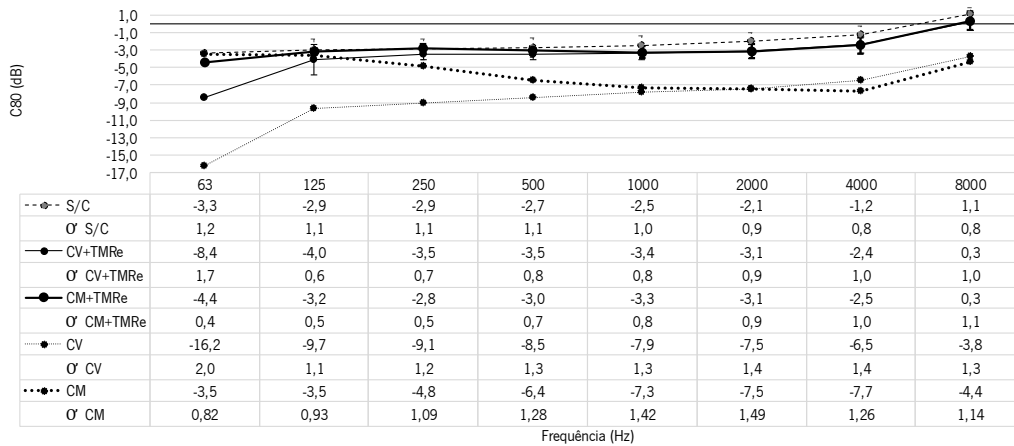


Figura 8.56. Resultados do parâmetro Claridade ( $C_{80}$ ): média para cada combinação fonte/recetor e respetivo desvio padrão para cada banda de oitava (valores obtidos por ensaio numérico com OTL suite room).

Tabela 8.6. Comparação entre os valores ideais de  $TR$  e  $C_{80}$  (500-1000 Hz), de acordo com o tipo de uso (Carvalho, 2018), e os valores calculados para cada configuração do espaço da nave (valores obtidos por ensaio numérico com OTL suite).

Uso	Uso atual do espaço da nave (%)	TR Ótimo (s)	$C_{80}$ Ideal (dB)	$TR$ (500 – 1 kHz) e $C_{80}$ (500 – 1000 Hz) estimados. Comparativo para as seguintes configurações do espaço da nave:								
				S/C		CV		CM		CM+TMRe		
				1.0 s	-2.6 dB	4.3 s	-8.2 dB	3.4 s	-6.9 dB	1.8 s	-3.2 dB	
Auditório (palavra)	12	0.6 – 0.9	> 6	x	x	x	x	x	x	x	x	
Teatro	12	0.6 – 1.0	> 6	+	x	x	x	x	x	x	x	
Cinema	8	0.7 – 1.1	> 5	++	x	x	x	x	x	x	x	
Música	Ópera (non-Wagner)	-	1.2 – 1.8	3 a 4	x	x	x	x	x	x	+	x
	(Wagner)	-	1.7 – 2.0	1 a 2	x	x	x	x	x	x	++	x
	de câmara	-	1.3 – 1.8	-1 a 1	x	x	x	x	x	x	+	x
	Sinfónica Barroca	-	1.3 – 1.7	0 a 2	x	x	x	x	x	x	+	x
	Clássica	-	1.5 – 1.9	-1 a 0	x	x	x	x	x	x	++	x
	Romântica	16	1.8 – 2.3	-2 a -1	x	x	x	x	x	x	+	x
	Moderna	32	1.4 – 2.0	-1 a 0	x	x	x	x	x	x	++	x
Popular	4	0.7 – 1.1	> 6	++	x	x	x	x	x	x	x	
Órgão	-	2.4 – 3.6	< -2	x	++	x	++	+	++	x	++	
Coros Gregorianos	16	2.9 – 4.1	-3 a -1	x	++	x	x	++	x	x	+	

++ O TR do espaço é ideal para este uso. + O TR do espaço situa-se no intervalo ótimo para este uso. x O TR do espaço não é adequado para este uso.

○ *Tempo de decaimento inicial (Early Decay Time - EDT)*

Segundo Cirillo & Martellotta (2006), num espaço difuso ideal com decaimento linear, o  $EDT$  e  $TR$  podem ser os mesmos. No entanto, a primeira parte do decaimento é fortemente influenciada pelas reflexões iniciais e, consequentemente, o  $EDT$  é muito mais sensível à posição relativa e à distância entre fonte e recetor. Quando o  $EDT$  é menor que o  $TR$ , a sensação de reverberação é reduzida e, quando o  $EDT$  é maior que o  $TR$ , a sensação de reverberação aumenta. Estas características influenciam o conceito de qualidade acústica; a maior presença



de superfícies refletoras aumenta o *EDT*, conseqüentemente, aumenta a sensação de reverberação sentida pelo ouvinte.

O valor de *EDT* calculado para bandas de frequência entre 500-1000 Hz é de: 2.4 s (*S/C*), 3.4 s (*CV*), 2.6 (*CM*) e 2.1 s (*CM+TMRe*). O grau de dispersão dos valores, por gama de frequências (Figura 8.57), é relativamente baixo para as configurações *S/C* e *CM+TMRe*; existe mais variação nas frequências baixas, de 63 Hz ( $\sigma = 0.2$  s), do que nas altas, de 1000 Hz ( $\sigma = 0.1$  s).

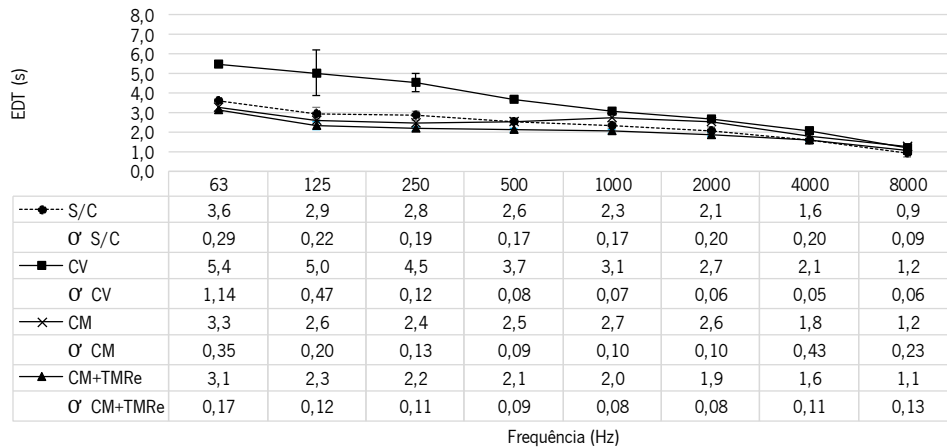


Figura 8.57. Resultado para o parâmetro de Tempo de Decaimento Inicial (*EDT*): valor médio para cada combinação fonte/recetor e respetivo desvio padrão para cada banda de oitava (valores obtidos por ensaio numérico com *OTL suite room*).

Na Figura 8.58 apresentam-se os resultados da análise comparativa entre os valores *TR* e *EDT*, para todas as bandas de frequência em análise. Verifica-se que os valores calculados para *TR* e *EDT* são muito próximos entre si, contudo o *TR* é sempre menor do que o *EDT*, exceto nas configurações *CV* e *CM*, onde o *TR* é superior ao *EDT*; a diferença máxima entre *EDT* e *TR* é 2.0 s (*S/C*) e 1.2 s (*CM+TMRe*) e ocorre em baixas frequências (63 Hz). Entre as soluções em análise, a solução *CM+TMRe* é a que apresenta o *EDT* mais próximo do *TR*, ou seja, é a que se aproxima do espaço difuso ideal.

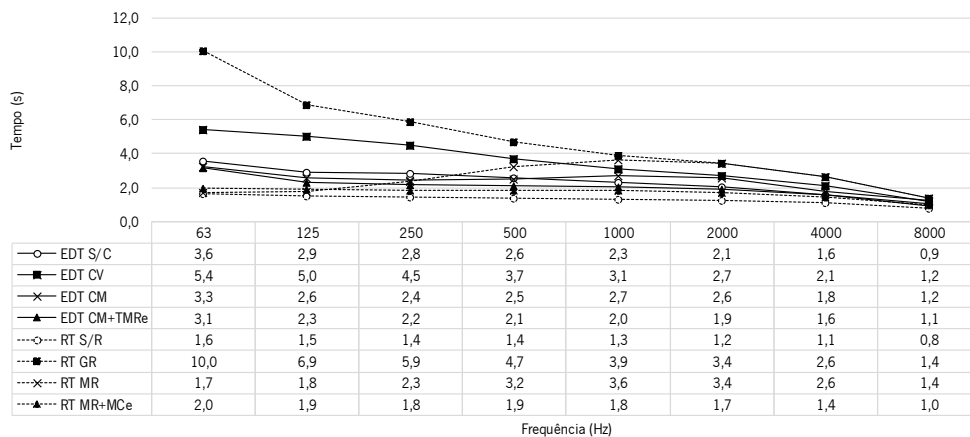


Figura 8.58. Comparação entre os valores calculados para o Tempo de Reverberação (*RT*) e Tempo de Decaimento Inicial (*EDT*).

○ *Inteligibilidade (Speech Transmission index - STI)*

O *STI* (*índice de transmissão da palavra*) é um dos critérios utilizados para caracterizar a percepção das palavras. É um parâmetro adimensional que aceita valores entre 0 e 1; quanto mais próximo o valor chegar de 1, melhor é a inteligibilidade da palavra falada. A Tabela 8.7 mostra os valores de *STI* obtidos para cada configuração, numa combinação fonte (*F01*)/recetor. Estes são classificados numa escala de cores: quanto mais escura a célula, melhor é o resultado. Com exceção da configuração *CV*, que apresenta classificação nulo, todas as soluções são classificadas como pobres (de acordo com a escala de inteligibilidade subjetiva da palavra normalizada (Patrício,

2010)). O máximo valor médio de STI (0,41) é atribuído à configuração *S/C*. Isto mostra que a solução *S/C* é um pouco mais adequada para a realização de atividades com emissão de palavra do que as restantes configurações.

Tabela 8.7. STI para as combinações *F01/recetor* (resultados obtidos através de ensaio numérico com *OTL Suite*).

S/C	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10	R11	R12	média
<b>S/C</b>	0.42	0.44	0.45	0.39	0.41	0.41	0.40	0.41	0.38	0.38	0.41	0.31	<b>0.41</b>
<b>CV + TMR<sub>e</sub></b>	0.36	0.34	0.35	0.35	0.32	0.34	0.33	0.33	0.31	0.32	0.30	0.31	<b>0.33</b>
<b>CM + TMR<sub>e</sub></b>	0.37	0.36	0.38	0.35	0.38	0.38	0.35	0.36	0.36	0.34	0.35	0.34	<b>0.36</b>
<b>CV + TMR<sub>r</sub></b>	0.26	0.27	0.24	0.26	0.24	0.25	0.24	0.24	0.23	0.23	0.24	0.24	<b>0.25</b>
<b>CM + TMR<sub>r</sub></b>	0.31	0.33	0.31	0.31	0.31	0.28	0.29	0.27	0.29	0.28	0.29	0.30	<b>0.30</b>

Legenda: STI/Inteligibilidade (adaptado de Patrício (2010))

0.00 a 0.29	Nula	0.45 a 0.59	Razoável	0.75 a 1.00	Excelente
0.30 a 0.44	Pobre	0.60 a 0.74	Boa		

Os elevados valores do *TR* em médias e, principalmente, altas frequências, prejudicam a inteligibilidade da fala das configurações em análise; conforme se verifica na Tabela 8.7, a capacidade dos ouvintes entenderem uma mensagem oral é baixa em todas as configurações. Por isso, devem realizar-se mais estudos com o objetivo de aumentar a absorção sonora nessas frequências, o que pode ser alcançado através do desenho ou presença de superfícies mais absorventes, por exemplo cortinas, tapetes ou estofos.

o *Definição (D<sub>50</sub>) – emissão de discurso*

A Definição (*D<sub>50</sub>*) é um parâmetro acústico baseado na quantificação da energia das reflexões que atingem o recetor até 50 metros depois da chegada do som direto, dividido pela energia total recebida (Patrício, 2010). Normalmente, estas reflexões são consideradas benéficas porque dão suporte ao som direto e contribuem para a audibilidade do som, sem afetar a sua qualidade. É calculada a partir da resposta impulsiva e o seu resultado toma valores entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo é da unidade, melhor é a definição de um discurso num determinado ambiente. As médias dos valores de *D<sub>50</sub>* calculados para a banda de frequências de 500-1000 Hz são: 0.18 ( $\sigma=0.07$ ) para *S/C*; 0.04 ( $\sigma=0.02$ ) para *CV*; 0.05 ( $\sigma=0.03$ ) para *CM* e 0.17 ( $\sigma=0.05$ ) para *CM+TMR<sub>e</sub>* (Figura 8.59). Concluindo-se que as configurações *S/C* e *CM+TMR<sub>e</sub>*, sendo a *S/C* ligeiramente melhor, são próximas do valor ideal de *D<sub>50</sub>*, de 1, ou seja, são adequadas para a emissão de palavra. No entanto, considerando apenas as configurações de cobertura da nave, ou seja, excluindo *S/C*, a configuração *CM+TMR<sub>e</sub>* é melhor que as configurações *CV* e *CM*.

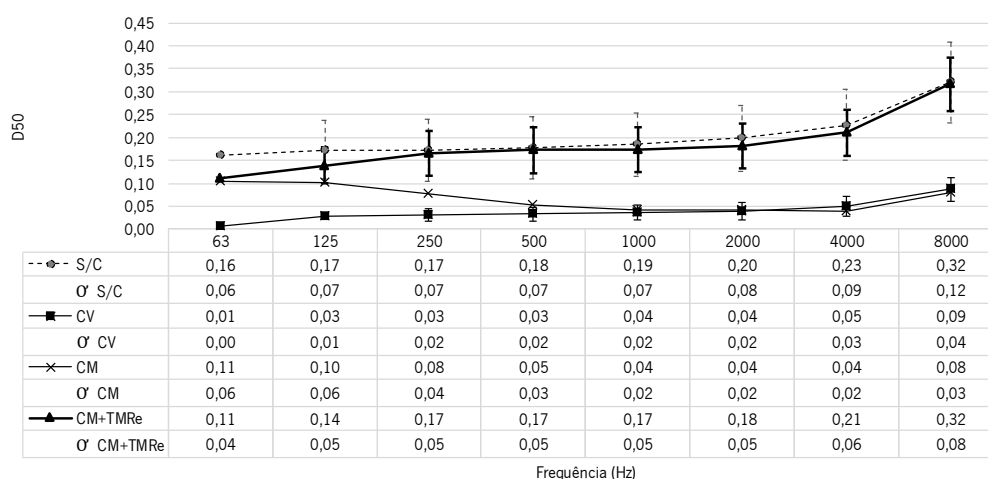


Figura 8.59. Resultado para o parâmetro Definição (*D<sub>50</sub>*): valor médio calculado para cada combinação fonte/recetor e respetivo desvio padrão, para cada banda de oitava (valores obtidos por ensaio numérico com *OTL suite room*).

o *Comparação com outros casos de estudo com volumetria da mesma ordem de grandeza*

Com base nos resultados apresentados e nos estudos de Carvalho (2011), esta seção compara as semelhanças e diferenças nas características acústicas do caso de estudo (ruínas da Igreja do Carmo/MAC) com outras igrejas, que apresentam volume semelhante à configuração MAC com *CM+TMR<sub>e</sub>* e tetos em abobada de cantaria. Em

particular, a Tabela 8.8 e a Figura 8.60 mostram que: (1) a Igreja do Carmo/MAC com a solução *CM+TMRe* apresenta menores valores de *TR*, *EDT* e *C<sub>80</sub>* - que por sua vez se encontram no intervalo de valores recomendados para os parâmetros acústicos associadas à emissão de música (especialmente do tipo sinfónica); (2) a Igreja do Carmo/MAC com as configurações *CV* ou *CM* apresenta quase o dobro do volume das restantes igrejas portuguesas selecionadas, elevados valores de *TR*, *EDT* e *C<sub>80</sub>*, e reduzidos valores de *D<sub>50</sub>*; (3) não é apenas o volume que interfere nos valores dos parâmetros acústicos, mas a presença de superfícies absorventes ou refletoras.

Tabela 8.8. Comparação entre as opções de reabilitação funcional da igreja do Carmo/MAC com outros edifícios/igrejas, desocupados e com volume semelhante, através de vários parâmetros acústicos.

Igreja	Volume (m <sup>3</sup> )	TR (s) (500 - 1k Hz)	EDT (s) (500 - 1k Hz)	C <sub>80</sub> (dB) (500 - 1k Hz)	D <sub>50</sub> (500 -1k Hz)
S. Roque (Lisboa)*	14 207	3.8	3.7	-4.6	0.15
Sé (Porto)*	15 260	3.6	3.5	-6.9	0.08
S. Francisco (Évora)*	18 631	5.0	4.9	-6.5	0.17
Basilica da Estrela (Lisboa)*	18 674	8.1	8.1	-10.0	0.09
Igreja do Carmo/MAC (Lisboa):					
S/C **	***38 145	1.0	2.5	-2.6	0.18
CV **	38 145	4.3	3.4	-8.2	0.04
CM **	38 145	3.4	2.6	-6.9	0.05
<b>CM+TMRe **</b>	<b>19 600</b>	<b>1.8</b>	<b>2.2</b>	<b>-3.2</b>	<b>0.17</b>
<b>Valores recomendados:</b>					
Música		<b>1.3 &lt; RT &lt; 2.3</b>	1.3 < EDT ≤ 2.3	<b>-4.0 ≤ C80 ≤ 4.0</b>	D50 ≤ 0.50
Palavra		<b>0.6 &lt; RT &lt; 1.3</b>	0.6 < EDT ≤ 1.3	C80 ≥ 3.0	<b>D50 &gt; 0.50</b>

\*Valores obtidos em Carvalho (2011); \*\* Valores estimados (obtidos por ensaios numéricos com *OTL suite*); \*\*\*volume virtual.

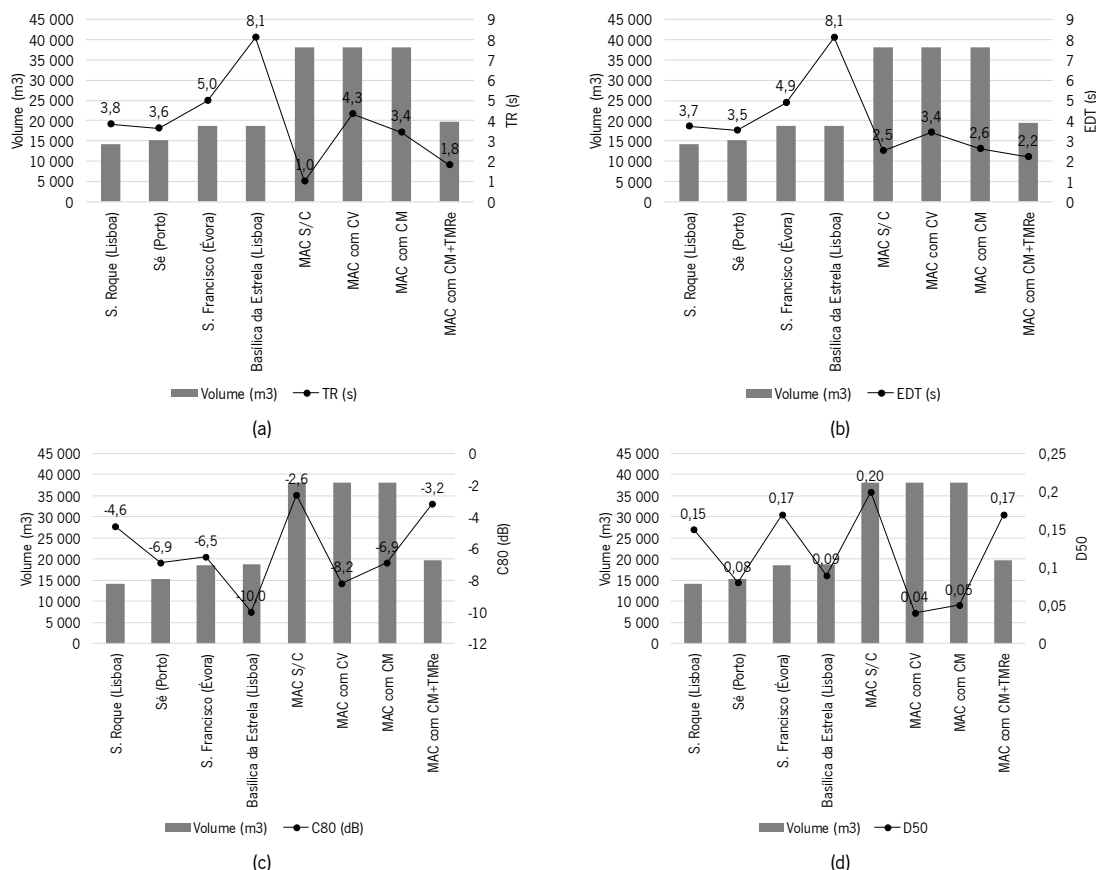


Figura 8.60. Resultados da análise comparativa entre a Igreja do Carmo/MAC e outras igrejas com volume similar para os seguintes parâmetros: (a) *TR*; (b) *EDT*; (c) *C<sub>80</sub>* e (d) *D<sub>50</sub>*.

### • Considerações finais

O objetivo deste estudo é avaliar e comparar o comportamento acústico de duas soluções de reabilitação funcional, com a reposição da cobertura/teto, aplicadas a um edifício histórico - Igreja do *Carmo/MAC* em Lisboa (Portugal) – com o objetivo de determinar a eficiência relativa das soluções que utilizam membranas arquitetónicas.

Considera-se a reintrodução da cobertura no referido edifício, com uma solução de membrana ou de vidro e do teto com uma solução de membrana.

Os resultados desta avaliação, sintetizados na Tabela 8.9, indicam que a solução de reabilitação com membrana (*CM*) influenciaria positivamente o desempenho acústico da Igreja do *Carmo*/MAC relativamente ao seu estado atual cobertura (*S/C*), constituindo uma boa alternativa acústica relativamente à solução de reabilitação com cobertura de vidro (*CV*). Os valores calculados para vários parâmetros acústicos não estão dentro da gama de valores recomendada para a emissão de música ou palavra, ou seja, as soluções avaliadas não apresentam um bom desempenho acústico. Contudo, a solução *CM+TMR* (opção dinâmica – com teto retraído ou estendido): (1) aumenta a gama de tipos de música passíveis de serem emitidos no espaço da nave; (2) seria uma solução adequada para a emissão de música do que as opções *GR* e *S/C* (Tabela 8.9), ou seja, substituir o teto e a cobertura seria mais favorável do que substituir apenas a cobertura. Além disso, estima-se que a opção *CM+TMR* seria boa para a emissão da maioria dos tipos de música (especialmente sinfónica) e que, considerando o principal motivo para a reabilitação funcional da igreja do *Carmo*/MAC (para uso musical), torna-a melhor opção.

Relativamente à emissão de discurso, todas as soluções de reabilitação avaliadas apresentam um comportamento nulo ou pobre (Tabela 8.9).

Em síntese, relativamente aos aspetos arquitetónicos e de desempenho acústico da melhor solução proposta. (a *CM+TMR*), conclui-se que: (1) os valores calculados para o tempo de reverberação estão dentro dos valores ótimos para o uso de música sinfónica; (2) o teto retrátil em membrana melhoraria as condições acústicas do espaço da nave - reduzindo o seu volume e melhorando as suas propriedades de absorção sonora - mantendo, ao mesmo tempo, a linguagem arquitetónica do teto original (abóbadas com nervuras); (3) a aparência da solução alternativa proposta não causaria alterações negativas na aparência do espaço original – a abordagem arquitetónica proposta também pode ser vista como uma reinterpretação do tradicional uso de elementos decorativos têxteis (membranas) em cerimónias importantes (mencionadas no início da secção 8.4.3); (4) as tecnologias de construção com membranas constituem uma alternativa adequada para intervenções de reabilitação acústica, especialmente nos casos em que paredes/superfícies antigas/históricas são muito refletoras e não podem ser alteradas por motivos de proteção.

A análise dos parâmetros de conforto acústico estimados para a configuração *CM+TMR* sugeriu as seguintes considerações: (1) os valores calculados para o *TR* revelam que o espaço é muito reverberante para a emissão de palavra (com valores acima do dobro do máximo de referência ótimo), contudo estão dentro do intervalo ótimo para a maioria dos tipos de música; (2) os valores calculados para o *EDT* aproximam-se dos valores calculados para o *TR*, ou seja, esta solução poderá estar próxima do espaço difuso ideal; (3) os valores calculados de  $C_{50}$  não estão dentro do intervalo de valores ótimos para a maioria dos tipos de música, exceto para música de órgão e de coros *Gregorianos*; (4) os valores de  $D_{50}$  não são aceitáveis para a emissão de palavra; (5) os valores de *STI* permitem classificar o espaço como tendo inteligibilidade *pobre*.

O tempo de reverberação no espaço da nave é significativamente influenciado pelo material usado na cobertura e no teto. Com a solução alternativa em membrana - *CM* ou *CM+TMR* - é alcançada uma redução significativa no tempo de reverberação, mesmo quando comparada com a solução de vidro convencional nas mesmas condições - *CV* ou *CV+TMR* - para bandas de média e baixa frequência, respetivamente.

Salienta-se que as informações disponíveis sobre as propriedades acústicas das membranas arquitetónicas são escassas e não se encontram suficientemente detalhadas pelos produtores e fornecedores destes materiais. Para ganhar mais confiança nos resultados apresentados, seria aconselhável realizar testes experimentais com soluções em membrana multicamada. Além disso, recomenda-se a realização de mais análises para cada parâmetro e configurações avaliados, no sentido de: (1) explorar completamente os tópicos levantados neste estudo; (2) melhorar a solução proposta com membranas, idealmente com soluções corretivas dinâmicas, como as que foram mencionadas na secção 4.5.1 do Capítulo 4 (no item “Acústica”), de modo a alcançar o desempenho acústico ideal, tanto para a emissão de palavra quanto de música.

Tabela 8.9. Síntese de valores ótimos para vários parâmetros acústicos e diferentes usos; valores calculados/resultados obtidos para o espaço da nave da igreja do Carmo/MAC - com e sem soluções de reabilitação (através de ensaio numérico com OTL Suite).

Parâmetros acústicos	Palavra Intervalo ótimo	Música Interval ótimo	S/C	CV	CM	CM+TMR <sub>e</sub>
TR (s) (500 - 1k Hz)	0.6 < TR < 1.3	1.3 < TR < 2.3	1.0	4.3	3.4	1.8
EDT (s) (500 - 1k Hz)	0.6 < EDT ≤ 1.3	1.3 < EDT ≤ 2.3	2.5	3.4	2.6	2.2
C <sub>80</sub> (dB) (500 - 1k Hz)	C <sub>80</sub> > 4.0	-4.0 ≤ C <sub>80</sub> ≤ 4.0	-2.6	-8.2	-6.9	-3.2
D <sub>50</sub> (500 - 1k Hz)	D <sub>50</sub> > 0.50	D <sub>50</sub> ≤ 0.50	0.18	0.04	0.05	0.17
STI (escala de inteligibilidade)	0.00 - 0.29 (nula); 0.30 - 0.44 (pobre); 0.45 - 0.59 (razoável); 0.60 - 0.74 (bom); 0.75 - 1.00 (excelente)		0.41	0.25	0.30	0.36
Parâmetros acústicos	Palavra Intervalo ótimo	Música Interval ótimo	S/C	CV	CM	CM+TMR <sub>e</sub>
<b>Palavra (uso)</b>	TR		+	x	x	x
	EDT		x	x	x	x
	C <sub>80</sub>		x	x	x	x
	D <sub>50</sub>		x	x	x	x
	STI		pobre	nula	pobre	pobre
<b>Música (uso)</b>	TR		x	x	x	+
	EDT		x	x	x	+
	C <sub>80</sub>		x	x	x	+
	D <sub>50</sub>		+	+	+	+
	STI		pobre	nula	pobre	pobre

Legenda:

+ Dentro do intervalo ótimo para este uso.

x Não é adequado para este uso

#### 8.4.4. Avaliação das condições de iluminação natural

No que diz respeito aos aspetos lumínicos, é evidente, a partir da análise realizada no capítulo 4, a notável capacidade das membranas para assegurar o conforto visual necessário em diferentes utilizações, em particular a capacidade de regulação de luz direta ou difusa. Para além disso, segundo Campbell (1995), as membranas arquitetônicas continuam a ser eficientes na proteção solar, uma vez que são capazes de reduzir a radiação solar sem prejudicar os níveis de luminosidade adequados para cada espaço. Nos casos de estudo analisados no capítulo 4 verificou-se que esta foi a principal motivação funcional para aplicar membranas nas intervenções de reabilitação.

##### • Aspetos qualitativos

Um dos principais aspetos que condicionam a qualidade do ambiente visual e, conseqüentemente, o desempenho visual, é a existência de valores de luminâncias substancialmente diferentes dentro do campo de visão de um determinado observador, afirma Byoce (apud Santos, 2003). Existe conforto visual quando as luminâncias das várias superfícies no campo visual de uma pessoa são mantidas dentro dos limites aceitáveis. Ao fixarmos um determinado objeto ou superfície, os olhos têm necessidade de se adaptar a esse nível de luminância, ao desviarmos o olhar para outra superfície, terão de adaptar-se ao novo nível de luminância. Quanto maior for o contraste de luminâncias, maior será o tempo de adaptação e, conseqüentemente, pior será o desempenho visual.

##### • Aspetos quantitativos

Existem muitos fatores que fazem variar a quantidade de luz natural no interior de um espaço. Mas é importante que a luz obedeça a parâmetros quantitativos para poder satisfazer corretamente as exigências funcionais humanas necessárias para um determinado espaço. Dessa forma, existem valores de iluminância recomendados para o plano de trabalho, consoante as atividades que aí se vão desenvolver. O indicador mais adequado para quantificar a iluminação natural interior é o Fator Luz-Dia (FLD), uma vez que o consegue fazer nas piores condições de iluminação natural no exterior. A Comissão Internacional de Iluminação (CIE - *Commission Internationale de l'Éclairage*) define o Fator Luz-Dia como sendo o quociente (em percentagem) entre a iluminância<sup>12</sup> num ponto no interior de um compartimento (Eint.) e a iluminância exterior (Eext.) em simultâneo, proveniente de um hemisfério desobstruído de céu. Assume-se que o céu é do tipo encoberto, convencionado pela CIE de forma a excluir a contribuição da luz direta do Sol. Todas as superfícies na envolvente a um compartimento contribuem para a quantidade e distribuição da iluminação natural no interior desse espaço. Logo, é necessário avaliar as propriedades óticas dos materiais que revestem as superfícies envolventes. Para as superfícies opacas necessitamos do valor da sua refletância, e para as superfícies transparentes, ou translúcidas a sua transmitância (Tabela 8.10).

<sup>12</sup> Iluminância - termo que descreve a medição da quantidade de luz sobre uma determinada área de superfície. A unidade do SI para iluminância é o lux.

Tabela 8.10. Resumo das propriedades óticas dos materiais analisados.

	Refletância	Transmitância
Pedra calcária	0,45	
Vidro 12 mm	-	0,86
ETFE transparente 200micros	-	0,89
Membrana Poliéster	-	0,40

A membrana de ETFE com 200 µm apresenta maior transmitância do que o vidro e o policarbonato, dentro de comprimentos de onda de 250-780 µm, e tem um nível significativamente maior de transparência nos espectros de luz ultravioleta (Figura 8.51). Isto acontece porque a membrana ETFE deixa passar a maior parte da luz ultravioleta (UV) e é resistente à degradação e descoloração UV, que é um problema comum com outras soluções transparentes (Vector Foiltec, 2012). Este facto tem interesse para a cobertura de pátios e sobretudo para a conceção de estufas, já que as plantas usam todo o espectro de luz para realizarem a fotossíntese (Lecuyer, 2008). Contudo, isso pode ter efeitos adversos no ganho de calor solar no espaço interior e gerar situações de sobreaquecimento. Para contornar este problema, é possível imprimir um padrão refletor solar sobre a membrana de ETFE – com uma variedade infinita de padrões de sombreamento - que podem bloquear a luz em quantidades variáveis. A Figura 8.62 mostra um exemplo de impressão.

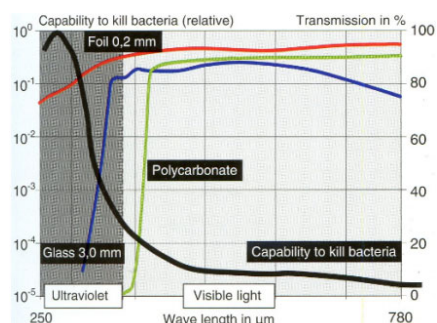


Figura 8.61. Transmissão de luz da membrana ETFE e de outros materiais transparentes (Lecuyer, 2008).



Figura 8.62. Membrana de ETFE transparente (à esquerda) e membrana de ETFE com padrão refletor impresso (à direita) (Koch, 2004).

Devido à elevada transparência da membrana de ETFE selecionada para a reposição da cobertura do edifício em estudo, o risco de encandeamento<sup>13</sup> devido ao excesso de iluminância no espaço interior do edifício é extremamente elevado (Chilton & Lau 2015), podendo ainda ocorrer efeitos de sombreamento indesejáveis. Por isso, selecionou-se uma membrana translúcida para a reposição formal do teto (operável quando desejável) atendendo a duas funções: (1) uniformizar a distribuição de luz de acordo com as necessidades funcionais e (2) promover o comportamento acústico do espaço da nave. A membrana translúcida, de coloração branca e transmissão de 40% de luz, fornece um bom nível de iluminação natural durante o dia. No entanto, é possível regular a abertura do teto e instalar iluminação artificial para complementar o desempenho lumínico do interior da nave, quando os níveis de iluminação natural forem reduzidos ou excessivos. Todos os acessórios podem ser fixos à estrutura da cobertura. A opção da reposição da cobertura com um material transparente vs um material opaco, para além de preservar o caráter de ruína do espaço, permite a poupança em custos energéticos com iluminação artificial.

• **Simulação das condições de iluminação natural – aspetos quantitativos**

A localização do caso de estudo é Lisboa, Portugal, e o ficheiro climático utilizado é do INETI (2018). Utilizou-se a ferramenta informática *Radiance* como motor de análise do Fator Luz Dia, através do programa de interface *DesignBuilder®*. O desempenho lumínico é medido segundo os níveis de iluminância. A análise de iluminância realiza-se através de uma grelha dimensional colocada no plano de trabalho (0.76m acima do plano de pavimento). A grelha apresenta as dimensões de 50cm x 50cm. Para cada cenário, realizou-se uma análise de iluminância às 9h, 12h e 15h (Horário civil) para o solstício de verão, equinócio de outono e solstício de inverno (21 de Junho, 21 de Setembro e 21 de Dezembro respetivamente) (Figura 8.63).

<sup>13</sup> O encandeamento ocorre quando o campo de visão apresenta elevados contrastes nos níveis de iluminância, sobretudo quando os elevados contrastes estão adjacentes ou existe uma grande área com alto brilho. A medição do encandeamento, tal como o desconforto térmico, são subjetivos. Por este motivo, o encandeamento é descrito como potencial ou provável, com base em estudos sobre as opiniões dos ocupantes.



Neste estudo avaliaram-se 3 cenários: (1) estado atual do edifício (sem cobertura (SC)); (2) edifício com cobertura em vidro de 12mm espessura e 86% de passagem de luz visível (CV86%); (3) edifício com cobertura em membrana ETFE (200  $\mu$ m) e teto retrátil em membrana de poliéster com 40% de passagem de luz visível (CM89%<sup>14</sup>+TMR40%).

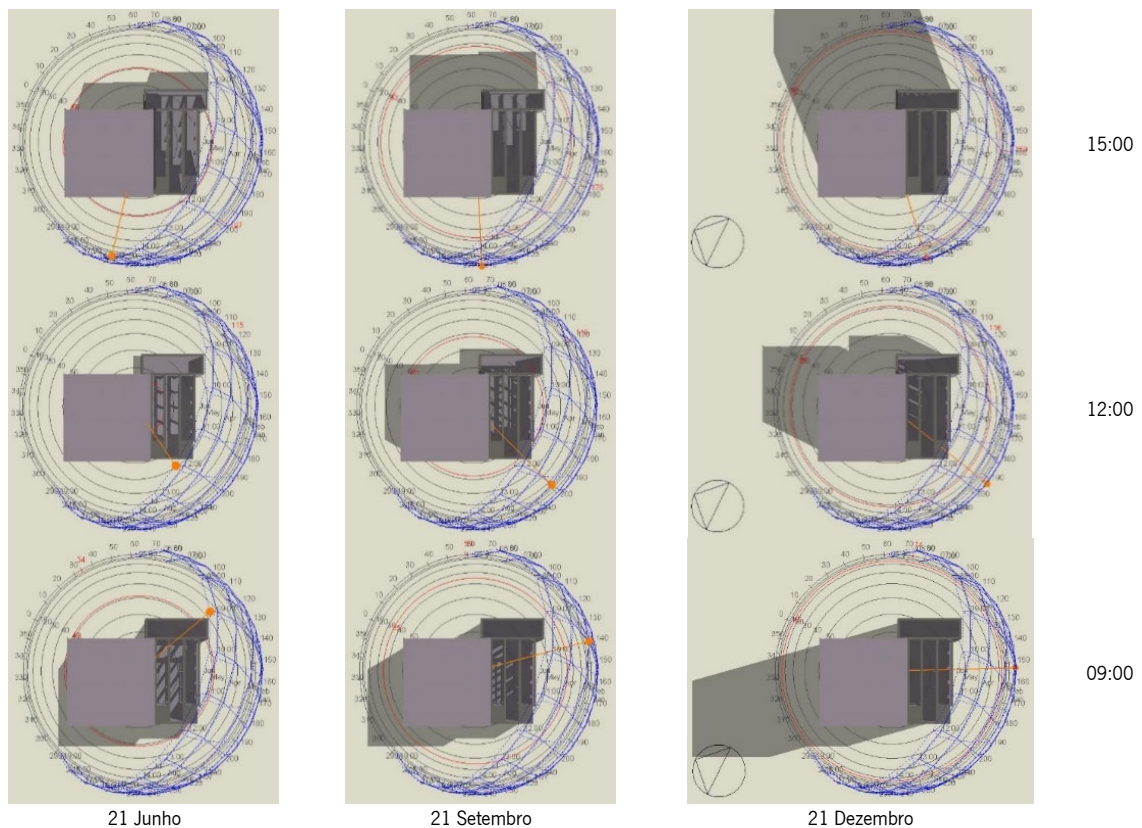


Figura 8.63. Análise da penetração de luz solar no interior da nave no estado atual – modelo virtual 3D realizado com DesignBuilder.

#### • Discussão dos resultados

##### ○ Indicador FLD (Fator Luz Dia)/ DF (Daylight Factor) – com base em dados normalizados

Este indicador serve para determinar se a luz natural é suficiente para os ocupantes realizarem determinadas atividades. O dia de projeto para o cálculo do FLD baseia-se na norma da CIE (EN12464-1,2011): céu nublado e nível de iluminância exterior de 10000 Lux. Para avaliar se o fator de iluminação natural é adequado para o espaço em análise, recorreu-se aos valores de referência presentes na norma CIE (EN12464-1,2011): iluminância de 300 lux e FLD superior a 1,5%.

A Figura 8.69 apresenta os resultados de uma simulação do conforto luminoso através da avaliação do FLD das diferentes soluções em análise. A simulação foi efetuada com a ferramenta informática *DesignBuilder v5.3/Radiance*, para o dia com céu nublado e nível de iluminância exterior de 10000 Lux.

Segundo a metodologia de avaliação *LEED NC 2.2 Credit EQ 8.1* (U.S. Green Building Council, 2014), 75% da área do espaço ocupado deve ser adequadamente iluminada, com um nível de iluminância superior a 300lux. Adicionalmente, para eliminar o calor excessivo e o perigo de encadeamento pela luz natural, quando dois cenários são classificados como ótimos, o cenário com menos iluminância (<1200 lux) é o melhor.

Verifica-se que todos os cenários fornecem níveis de iluminação adequados (Figura 8.64). Contudo, a solução CM89% + TMR40% é a ideal, por apresentar uma área com níveis máximos de iluminância inferiores a 1200 lux. Estes resultados mostram que o uso do sistema de cobertura em membrana com teto retrátil/ ajustável pode fornecer níveis de iluminação de alto desempenho, adequadas às variações climáticas externas (em constante mudança). Para além disso, a Figura 8.64 mostra que solução SC apresenta níveis de iluminância próximos de

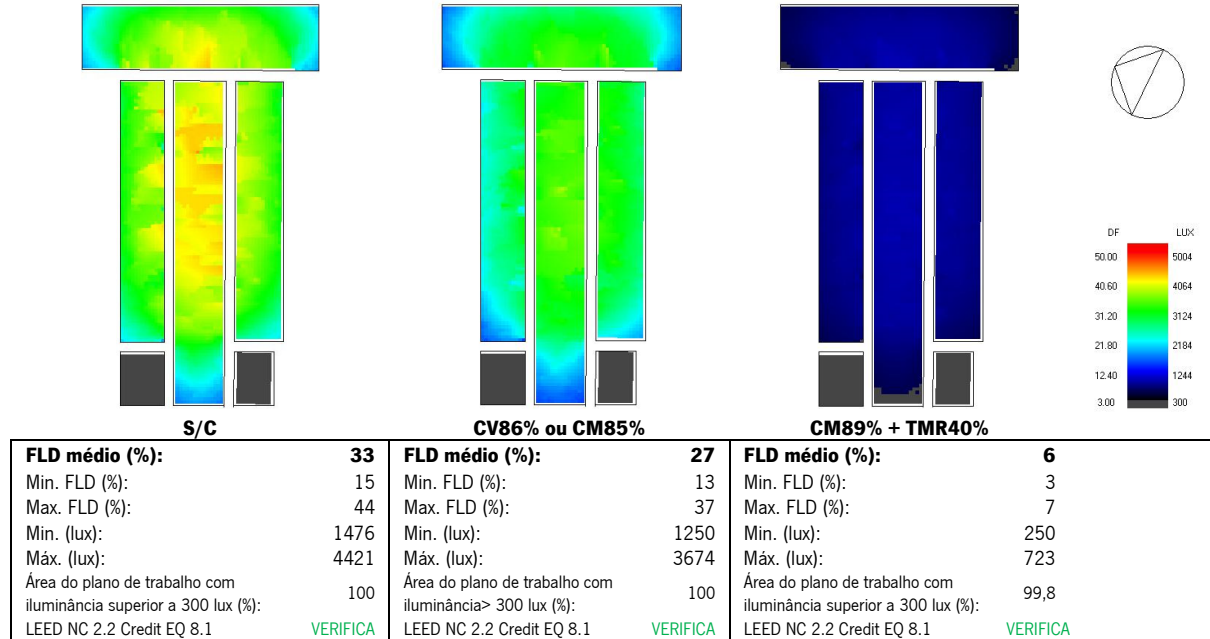
<sup>14</sup> Valor de transmissão de luz adotado segundo Gibbs et al. (2009) para membrana simples de ETFE, com 200 microns de espessura.

5000lux, onde o risco de ocorrer encandeamento é elevado. Deste modo, segundo o conforto lumínico, a opção de cobrir a nave do edifício com qualquer uma das soluções CV e CM é vantajosa, relativamente à opção de manter a nave sem cobertura.

**Dados introduzidos:**

Área do plano de trabalho (nave):	1238 m <sup>2</sup>
Tipo de céu:	CIE overcast day (specify illuminance – zenith illuminance of 10000lux)
Altura do plano de trabalho (m):	0,750
Dimensão máxima e mínima da grelha:	0,5 x 0,25 m

**Resultados:**



Mapas FLD e de iluminância para cada solução em análise- imagem codificada por cores para ilustrar a distribuição de iluminância/FLD. Uma escala de cores consistente, variando de 3 lux (preto) a 5000 lux (vermelho), é aplicada a todas os mapas resultantes da modelação numérica para garantir a comparabilidade de cada resultado.

Figura 8.64. Fatores Luz Dia (FLD) e valores de iluminância obtidos por simulação numérica, através da ferramenta informática DesignBuilder com céu nublado.

○ *Previsão do comportamento lumínico dinâmico do espaço - com base nos dados climáticos anuais do local*  
 A simulação numérica da iluminação natural dinâmica com base no clima (*Climate-based daylight modelling - CBDM*) consiste no cálculo da iluminância no plano de trabalho com recurso a dados climáticos médios. Na ferramenta informática *DesignBuilder*, as avaliações CBDM são anuais, segundo intervalos de tempo horários, de modo a registar a dinâmica diária e sazonal da luz natural. Para realizar tal simulação, o *DesignBuilder* utiliza a aplicação *Daysim*<sup>15</sup>. Os resultados desta simulação numérica incluem os seguintes indicadores de iluminação natural baseados no clima: Autonomia da Luz natural (AELD/ *Daylight Autonomy - sDA*), Exposição Anual da Luz Solar (*Annual Solar Exposure - ASE*) e a Iluminação Natural Útil (*Useful Daylight Illuminance - UDI*).

Esta análise serve para auxiliar o posicionamento/seleção das áreas mais apropriadas para exposição, de acordo com o grau de iluminância desejável ao longo do ano. Os seguintes indicadores resumem a disponibilidade de luz natural anual no espaço em estudo.

A metodologia *LEED v4 Option 1*. (U.S. Green Building Council, 2014) mostra, através de simulação numérica anual, se o indicador AELD de 300 lux é alcançado em pelo menos 50% da área ocupada regularmente. Além disso, também indica a percentagem de área do plano de trabalho que está exposta a mais de 1000 lux. Para obter um bom indicador de Exposição Solar Anual (ESA), a área exposta a mais de 1000 lux não pode ser superior a 10% e o número de horas de exposição não pode ser superior a 250.

<sup>15</sup> *Daysim* é uma aplicação informática que modela a quantidade anual de luz natural fornecida ao espaço interior e exterior de edifícios.

Tabela 8.11. Síntese dos dados introduzidos no DesignBuilder/Daysim para a previsão do comportamento lumínico com base nos dados climáticos locais.

Localização:	Lisboa; 38° 42' 44" N, 9° 8' 24" O; altitude: 38m
Dados climáticos:	Ficheiro climático de Lisboa (Fonte: INETI)
Altura do plano de trabalho (m):	0,760
Dimensão máxima e mínima da grelha (m):	0,5 x 0,25 m
Nível mínimo de iluminância:	300
Nível máximo de iluminância:	1000

○ *Indicador AELD (Autonomia Espacial da Luz do Dia)/SDAS (Spatial Daylight Autonomy)*

A Figura 8.65 apresenta aos mapas AELD para cada solução, resultante da simulação numérica referida. O mapa ADL mostra a distribuição da luz natural num plano de trabalho horizontal (a 0,76m de altura do pavimento) durante todo o ano. Os valores em percentagem correspondem à proporção de tempo, no período de ocupação das 9h-18h, em que os níveis de luz natural estão acima de 300 lux (nível de iluminância mínimo recomendado pela CIE).

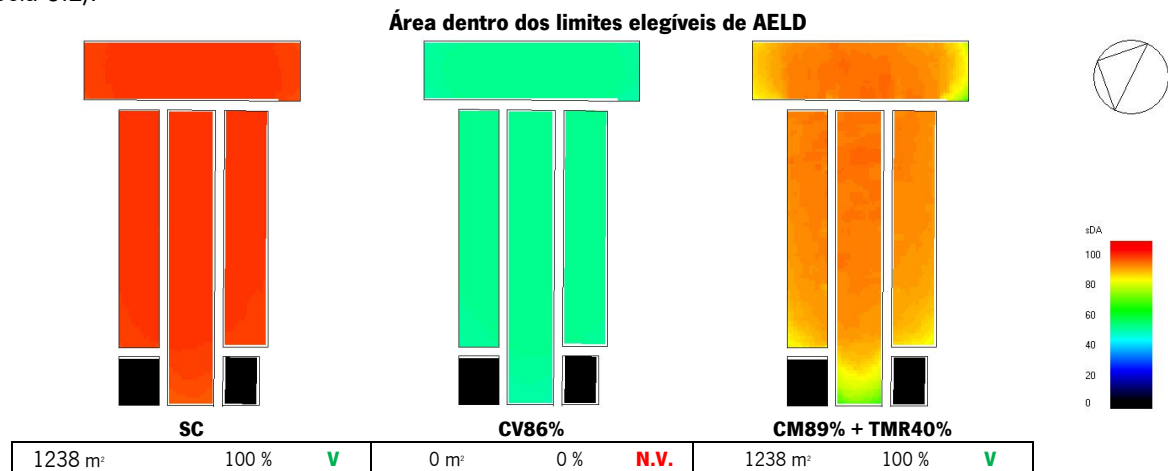


Figura 8.65. Percentual da média de horas superiores a 300 lux - mapas resultantes da simulação numérica do indicador AELD (obtidos através da ferramenta informática DesignBuilder).

○ *Indicador ESA (Exposição Solar Anual) /ASE (Annual Solar Exposure)*

O indicador ESA define a área que recebe demasiada luz solar direta, situação que pode causar desconforto visual por encandeamento. A Figura 8.66 apresenta o mapa ESA resultante da simulação numérica de cada solução em análise. O mapa ESA mostra, para cada célula no plano de trabalho horizontal definido, o número de horas onde o nível de luz natural excede 1000 lux (nível de iluminância máximo recomendado por CIE). O valor de referência aceitável dever ser igual ou inferior a 250 horas. Uma exposição de 1000 lux, superior a 250 horas e a 10% da área da edificação, pode significar que existem áreas demasiado quentes e com luz solar direta excessiva.

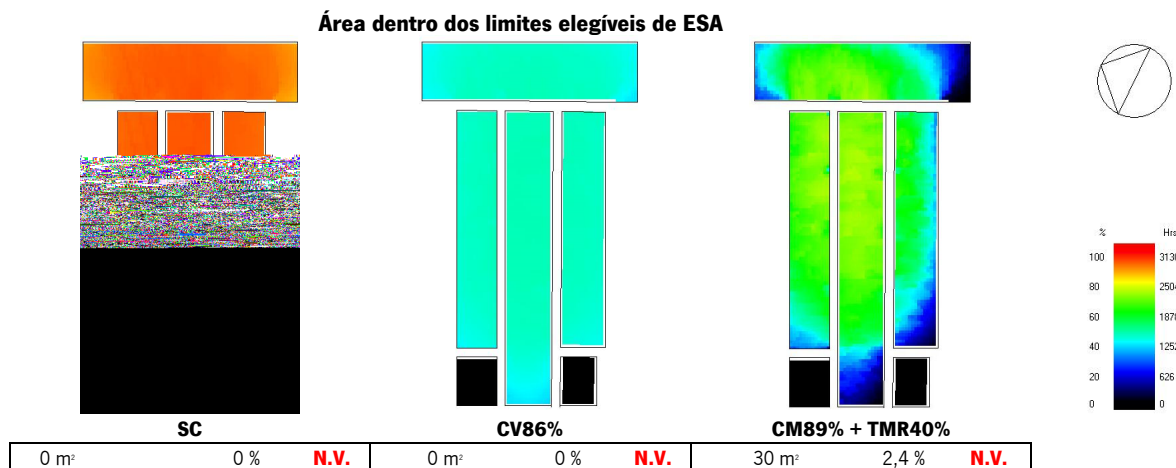


Figura 8.66. Percentual da média de horas superiores a 1000 lux - mapas resultantes da simulação numérica do indicador ESA (obtidos através da ferramenta informática DesignBuilder).

○ *INU (Iluminância Natural Útil) /UDI (Usefull Daylight Illuminance)*

O indicador INU recolhe valores horários com base em três intervalos de iluminância: 0-100 lux; 100 -3000 lux e acima de 3000 lux. Um bom resultado para este indicador situa-se no intervalo de iluminância 100-3000 lux. Ou seja, quanto maior for a percentagem de área do plano de trabalho em estudo com valores de iluminância no referido intervalo, melhor é a solução.

Conclui-se que nenhuma solução atinge os limites elegíveis para todos os indicadores. Contudo, a solução CM89%+TMR40% é a que alcança resultados positivos para 2 dos 3 indicadores mencionados: AELD e INU. De acordo com o indicador FLD, entre os três cenários em análise, a solução em membrana com TMR é também a mais adequada para alcance de um bom conforto luminoso do espaço em estudo (Figura 8.67).

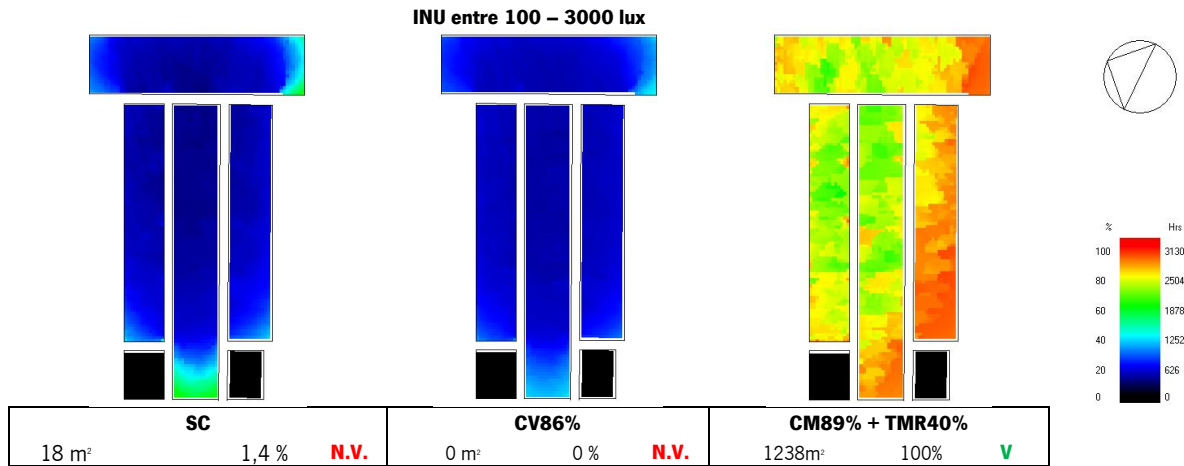


Figura 8.67. Percentual da média de horas simuladas, distribuídas nos intervalos de iluminância útil de todos os modelos em estudo. Mapas obtidos através da ferramenta informática DesignBuilder. Nota: V - verifica; N.V. - Não verifica.

8.4.5. Avaliação do impacto ambiental no ciclo de vida

• Definição do objetivo e enquadramento

Esta análise tem como objetivo comparar o impacto ambiental de soluções de reabilitação do edifício existente através de 2 tipos de cobertura. A unidade funcional utilizada é o kg. O sistema de fronteira da avaliação é do berço ao portão (*Cradle-to-gate*, em inglês) (Tabela 8.12) até ao fim de vida do produto (disposição final). Na Tabela 8.13 apresentam-se os pressupostos e limitações consideradas na presente avaliação.

Tabela 8.12. Módulos considerados no sistema de avaliação do ciclo de vida - fronteira do sistema de avaliação (EN 15804).

Módulos	Tipo de fronteira do Sistema: "Do Berço ao túmulo com opções"														Benefícios e cargas ambientais para além da fronteira do sistema		
	Obrigatório			Opcional		Opcional					Opcional						
Etapas do ciclo de vida	Etapa de produção			Etapa de construção		Etapa de utilização					Etapa de fim de vida				Potencial de reutilização, reciclagem e valorização		
	Extracção e processamento de matérias-primas	Transporte	Produção	Transporte	Processo de construção	Utilização	Manutenção	Reparação	Substituição	Reabilitação	Uso de energia (operacional)	Uso de água (operacional)	Desconstrução e demolição	Transporte		Processamento de resíduos	Eliminação final
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	X	V	V	V	V	V

V = incluído; X= módulo não declarado (por não se conhecerem todos os impactos ambientais associados).

Tabela 8.13. Síntese da definição do enquadramento da análise ACV em estudo.

<b>Unidade funcional:</b> 1 kg de material
<b>Fronteira do Sistema:</b> "Do berço ao túmulo"

<b>Período de cálculo:</b> 80 anos
<b>Pressupostos e limitações:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Os impactos ambientais associados ao transporte foram obtidos com base no peso dos materiais, negligenciando o seu volume.</li> <li>Considera-se que as membranas de ETFE e de Poliéster serão substituídas ao fim de 40 anos, os restantes materiais apresentam a durabilidade de 80 anos mas requerem manutenção periódica decenal. As operações de manutenção foram definidas com base nas indicações dos instaladores de cada solução. A reciclagem da membrana de ETFE foi documentada por Peters-plastic GmbH (Texlon, 2011).</li> <li>A membrana ETFE apresenta propriedades anti adesivas, de auto limpeza através da chuva (Monticelli &amp; Zanelli, 2016); requer inspeções periódicas para: (a) verificar se existe deposição de sujidade nas extremidades; (b) detetar possíveis danos de modo a serem reparados o mais rápido possível (Texlon, 2011).</li> <li>Ambas as soluções apresentam materiais homogêneos, sistema de construção seco, fácil desconstrução e separação de componentes: reciclagem tipo <i>down cycling</i>.</li> <li>A solução CV+TMR requer manutenção periódica dos elementos de calafetagem (borrachas) de 10 em 10 anos e limpeza dos vidros pelo mesmo período (EPD, 2012).</li> </ul>

### • Inventário

A Tabela 8.14 apresenta o inventário de materiais (com o respetivo peso) de cada solução construtiva de modo a proceder à avaliação do perfil ambiental de cada solução de cobertura em análise.

Tabela 8.14. Inventário para ACV. Para todos os componentes a massa inicial baseia-se na quantidade de material usada para construir uma cobertura com superfície de 3000m<sup>2</sup> e um teto retrátil com superfície de 2000m<sup>2</sup>.

Materiais utilizados:	Peso [kg]	Propriedades:	Vidro simples laminado (e=12mm)	Membrana ETFE (e=0,3mm)	Notas:
			<b>CV</b>		
Vidro simples (12mm)	90 000	<b>Durabilidade</b>	Eterno	+ 30 anos	A)
Estrutura primária - Aço	180 120	<b>Peso próprio</b>	30 kg/m <sup>2</sup>	0,35 kg/m <sup>2</sup>	B)
<b>Total</b>	<b>270 120</b>	<b>Peso próprio da estrutura primária (aço)</b>	55 a 75 kg/m <sup>2</sup>	25 a 35 kg/m <sup>2</sup>	
<b>Total para 1 m<sup>2</sup> de área útil de pavimento</b>	<b>193kg/m<sup>2</sup></b>	<b>Dimensões do painel</b>	3.2m x 6m (1m x 1.5m no caso estudo)	+ 4m x 200m de vão (com cabos)	
<b>CM+ TMR</b>		<b>Limpeza exterior</b>	Requer limpeza regular.	Auto lavável.	C)
Membrana de ETFE (0.3 mm)	1050	<b>Manutenção</b>	Anual	Bianual	
Estrutura primária - Aço	90 000	<b>Reparação</b>	Substituir, ou proteger o painel imediatamente.	Reparação com remendo.	D)
Membrana de poliéster + nervuras insufladas	120				
<b>Total</b>	<b>91 170</b>				
<b>Total para 1 m<sup>2</sup> de área útil de pavimento</b>	<b>65kg/m<sup>2</sup></b>				

Notas:

- A) Todas as soluções requerem manutenção periódica das selagens.  
 B) As membranas podem ser produzidas para qualquer dimensão e formato (limitadas pela ação do vento e neve).  
 C) A membrana ETFE é auto-lavável sob a ação da chuva. O vidro normal não é auto-lavável e é suscetível a marcas de água, especialmente quando instalado numa posição quase horizontal.  
 D) A membrana ETFE pode ser reparada quando apresenta pequenas perfurações e danos localizados. Quando apresenta danos grandes pode exigir a substituição da mesma. Em caso de perfuração, a membrana pode ser facilmente reparada/ substituída a baixo custo. O vidro também é suscetível a danos e, uma vez danificado, é perigoso, exigindo a substituição imediata e, dependendo das dimensões do vidro pode apresentar um custo elevado.

### • Resultados

Os resultados da avaliação do impacto ambiental de cada solução de cobertura encontram-se na Tabela 8.15.

Tabela 8.15. Resultados da avaliação ACV, considerando uma vida útil de 80 anos, para cada solução de cobertura. Resultados gerados com a ferramenta informática One Click LCA © (2015) copyright Bionova Ltd | Versão: 14.04.2018, Versão da base de dados: 7.4.

Solução	Etapa	Descrição	Indicadores EN 15978 (unidade)				EI (MJ)
			PAG (kgCO2e)	PA (kgSO2e)	PE (kgPO4e)	PDCO/PCOF (kgEthenee)	
CV	A1-A3	Materiais de construção	1,30E+06	8,08E+03	2,33E+03	5,36E+02	2,17E+07
	A4	Transporte para o local da obra	5,80E+03	2,64E+01	5,75E+00	3,36E-01	1,64E+05
	A5	Processo de construção	2,87E+04	9,95E+01	5,91E+01	3,58E+00	5,29E+05
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	2,91E+04	1,52E+02	1,12E+02	4,01E+01	7,69E+05
	C1-C4	Desconstrução	1,07E+03	7,59E+00	1,89E+00	1,08E+00	2,23E+04
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-2,77E+03	-3,32E+00	-4,54E-01	-3,42E-01	-4,66E+04
	<b>Total</b>	<b>1,36E+06</b>	<b>8,36E+03</b>	<b>2,51E+03</b>	<b>5,81E+02</b>	<b>2,31E+07</b>	
CM+ TMR	A1-A3	Materiais de construção	2,07E+05	8,45E+02	9,46E+01	7,83E+01	3,80E+06
	A4	Transporte para o local da obra	4,93E+02	1,97E+00	4,26E-01	3,69E-02	1,28E+04
	A5	Processo de construção	2,87E+04	9,95E+01	5,91E+01	3,58E+00	5,29E+05
	B1-B5	Manutenção/ substituição de materiais	4,14E+04	1,69E+03	1,89E+02	1,57E+02	7,61E+05
	C1-C4	Desconstrução	6,87E+03	1,64E+01	1,36E+00	8,76E-01	3,65E+03
	D	Potencial de reutilização/ reciclagem e valorização	-4,61E+04	-5,53E+01	-7,55E+00	-5,69E+00	-7,76E+04
	<b>Total</b>	<b>2,80E+05</b>	<b>2,65E+03</b>	<b>3,45E+02</b>	<b>2,39E+02</b>	<b>5,03E+06</b>	

Notas: EI (Energia Incorporada); PAG (Potencial de Aquecimento Global); PA (Potencial de Acidificação); PE (Potencial de Eutrofização); PDCO/ PCOF (Potencial de Depleção de Camada de Ozono). Considera-se que todos os componentes em alumínio são produzidos a partir de alumínio reciclado. De acordo com EAA (2013), mais de 90 % do alumínio utilizado na construção de edifícios na Europa é reciclado.

• **Discussão dos resultados**

Da análise da Tabela 8.15 verifica-se que os indicadores PAG e EI são os que apresentam maiores valores; com base nisso, elaborou-se o gráfico da Figura 8.68, onde se comparam todas as etapas ACV considerando apenas estes indicadores para cada solução de reabilitação. Assim, verifica-se o seguinte:

- (1) a solução CM+TMR apresenta menor impacto ambiental, comparativamente à solução CV;
- (2) globalmente, com a solução alternativa de membrana (CM+TMR) consegue-se alcançar uma redução dos indicadores de impacto ambiental na ACV entre 59 a 86%, relativamente à CV (Tabela 8.16);
- (3) a estrutura de suporte das coberturas CM e CV é feita de alumínio, cuja produção envolve grandes quantidades de energia; como a membrana de ETFE é muito mais leve do que o vidro, a cobertura necessita de uma estrutura de suporte mais reduzida. Deste modo, a utilização da membrana reduz a quantidade de alumínio em 30 a 60% (Tabela 8.16), reduzindo a conseqüente energia incorporada (Figura 8.70);
- (4) as emissões de CO<sub>2</sub> para transportar a solução CM são superiores às da solução CV, devido ao facto da membrana de ETFE ser produzida em Londres, a aprox. 2000km de distância da cidade de Lisboa, enquanto o vidro é produzido em Portugal, a aprox. 200km de distância (Figura 8.70).

Para além dos aspetos referidos, existem outros que influenciam a ACV, tais como a durabilidade e a manutenção, considerando que: (1) apesar da necessidade de substituição da membrana de ETFE e da membrana de poliéster, num período de utilização de 80 anos, a CM+TMR continua a apresentar menor impacto ambiental ACV, sobretudo devido ao facto de apresentar os menores impactos na fase de produção e fim de vida/potencial de reciclagem (modulo A1 a A4 e Modulo D); (2) a membrana ETFE é auto-lavável (se existir chuva) e requer menos água, energia e produtos de limpeza para a sua manutenção do que o vidro (Vector Foiltec, 2012).

Em relação à etapa de desconstrução, verifica-se que a solução alternativa CM+TMR apresenta menores impactos ambientais, em oposição à solução convencional CV. Relativamente ao potencial de reutilização/reciclagem (módulo D<sup>16</sup>), a solução CM+TMR é a que requer menor consumo de energia e produz menos CO<sub>2</sub>, em oposição à solução CV.

Refere-se ainda que a poupança de energia através da reciclagem, em vez da produção de novos materiais, é muito mais elevada nos plásticos (88%) do que no vidro (apenas 5%) (Mumma, 1995). O ETFE apresenta um baixo ponto de fusão (aprox. 260°C) em relação ao vidro (aprox. 1250°C), o que torna o seu processo de reciclagem económico e com baixo impacto ambiental (LeCuyer, 2008), para além de que a reciclagem de vidro consome mais energia no processo de reciclagem e não permite a reintrodução do material com a mesma qualidade (processo downcycling) (Mendonça, 2005).

Tabela 8.16. Comparação dos resultados ACV de cada solução de reabilitação segundo todos os indicadores de impacto.

Solução	Indicadores EN 15978 (unidade)										Ranking (1º é melhor)
	PAG (kgCO2e)	%*	PA (kgSO2e)	%*	PE (kgPO4e)	%*	PDCO/PCOF (kgEthenee)	%*	EI (MJ)	%*	
<b>CV</b>	1360000	79	8360	68	2510	86	581	59	23137700	78	2º
<b>CM+TMR</b>	279853	0	2650	0	345	0	239	0	5028850	0	1º

Nota: \* Redução/ aumento da solução alternativa CM+TMR relativamente à solução convencional CV.

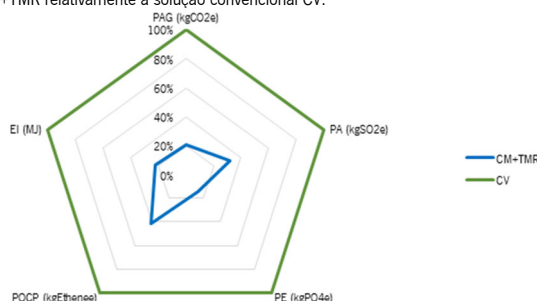
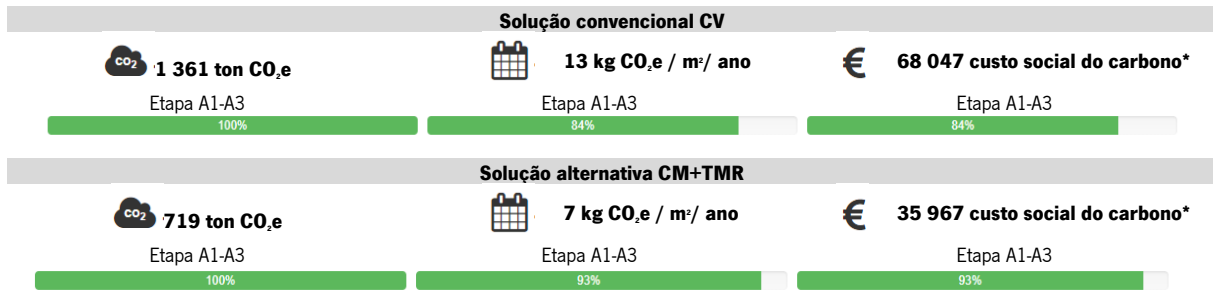


Figura 8.68. Comparação entre as soluções de reabilitação segundo os resultados para o impacto ambiental total da ACV (valores em percentagem). Globalmente, a melhor solução é a que apresenta o polígono com menor área.

<sup>16</sup> O método de cálculo para a etapa de fim de vida (C3-C4) e do potencial de reutilização/ reciclagem (modulo D) do programa One Click LCA (2015) segue a norma EN 15 978/EN 15804 e baseia-se na informação das fichas DAP quando disponíveis ou segue a categorização dos cenários de fim de vida DGNB (2014) apud One Click LCA (2015) - ver ANEXO 1





Nota: \*O valor do custo social do carbono não é regulamentar (mas os E.U.A., os departamentos de negócios/energia e Estratégia Industrial da EPA e do Reino Unido, têm esses valores publicados. Apenas para fins ilustrativos, o custo social do carbono é de 50€/tonelada (OneClickLCA©, 2015).

Figura 8.69. Ilustração dos resultados globais acerca do indicador PAG (Potencial de Aquecimento Global) de cada solução em análise.

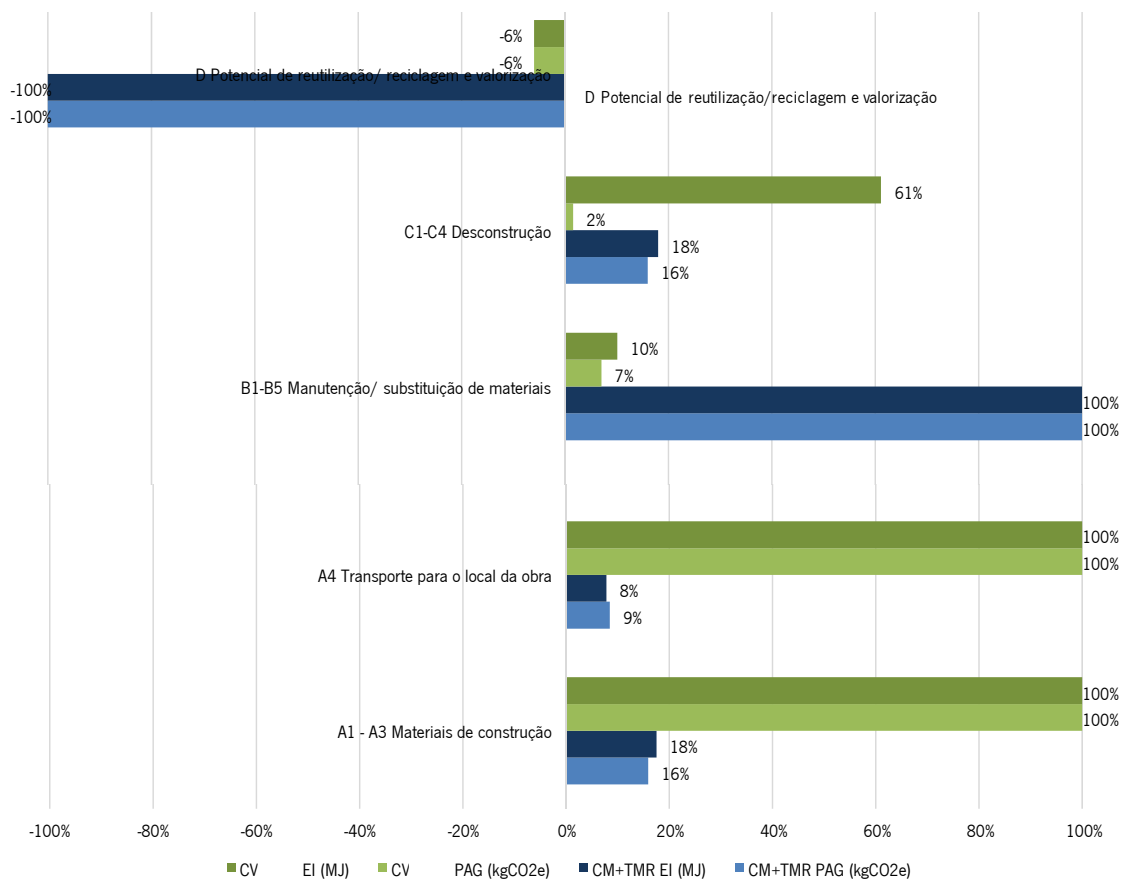


Figura 8.70. Comparação do impacto ambiental entre todas as etapas da ACV segundo os indicadores com maior impacto (PAG e EI).

#### 8.4.6. Avaliação de aspetos económicos no ciclo de vida

Na Tabela 8.18 apresentam-se os resultados da avaliação dos custos associados ao ciclo de vida das intervenções de reposição da cobertura da nave e transepto do edifício em estudo durante o período de 80 anos. Verifica-se que o edifício com a solução CM+TMR é o que tem menor impacto económico global (durante o ciclo de vida considerado) ou seja, é a solução mais económica (Tabela 8.17). Refere-se ainda que (Tabela 8.17 e Tabela 8.18): (1) a manutenção/limpeza periódica é decenal para cada solução e a substituição da membrana ETFE realiza-se ao fim de 40 anos (Architen, 2017); (2) o custo de construção e o de manutenção já incluem o custo de material e de mão-de-obra, e os valores são obtidos através de consulta a fornecedores e instaladores existentes no mercado.

Segundo Winsor & Thompson (2003) o custo de manutenção de uma cobertura com membrana de ETFE é menor do que o de uma cobertura de vidro devido às propriedades repelentes/auto-limpeza da membrana ETFE que

reduzem a necessidade da sua limpeza regular. Poeiras ou depósitos minerais da neve, ou da água da chuva permanecem separados do ETFE e são imediatamente removidos numa próxima ocorrência de chuva. De acordo com um relatório fornecido pelo *Department of the Environment Transport and the Regions* (DETR), o Hospital Westminster (4200m<sup>2</sup>) teve £ 30 500 (€ 34 865) de custos com a limpeza da cobertura do átrio em membrana de ETFE durante 60 anos de vida do hospital em oposição a £ 104 700 (€ 119685) de custos estimados caso a cobertura fosse em vidro (Winser & Thompson, 2003).

Tabela 8.17. Custos económicos estimados durante 80 anos de vida útil para o edifício com as diferentes soluções de cobertura.

Soluções	Material	Quantidade ***	Custo de Construção (€) ***	Custo de Manutenção (€)***	Custo Total (€)***
<b>CV</b>	Vidro incolor 12mm	3000 m <sup>2</sup>	2 360 000 €		
	+Estrutura principal	93 kg/m <sup>2</sup>	786 €/m <sup>2</sup>	85 500€	2 445 500 €
	+Estrutura secundária	279 000 kg	50% Estrutura 10% Vidro 40% Mão-de-obra/ instalação		
<b>CM</b>	Membrana ETFE 0,2mm	3000 m <sup>2</sup>	1 350 000 €	270 000 €	1 644 900 €
	+Rede supressão acústica	30 kg/m <sup>2</sup>	450 €/m <sup>2</sup> **	+24 900 €	
	+Estrutura principal +Estrutura secundária	90 000 kg	(50% Estrutura; 20% Membrana; 30% Mão-de-obra/instalação)	=294 900 €	
<b>TMR</b>	Membrana de poliéster	2000 m <sup>2</sup>	120 000€ membrana +	-	170 000 €
	+nervuras insufladas	0,06 kg/m <sup>2</sup> 120 kg	50 000 € nervuras = 170 000 €		
<b>CM + TMR</b>	Área útil de pavimento coberto	1400 m <sup>2</sup>	1296 €/m <sup>2</sup> (área útil pavimento)		<b>1 814 900 €</b>
<b>CV</b>	Área útil de pavimento coberto	1400 m <sup>2</sup>	1747 €/m <sup>2</sup> (área útil pavimento)		<b>2 445 500 €</b>

Notas: \*\* Custo médio com base na consulta a empresas e consulta do custo de projetos semelhantes, como o da reabilitação da Igreja de Corbera de Ebre, em Espanha, que teve um custo de 448euros/m<sup>2</sup> para execução da cobertura com estrutura metálica e membrana simples de ETFE; referência: <http://www.fabricarchitect.com/faq.html>; \*\*\* relativamente à solução no seu conjunto.

Embora o ETFE não se quebre como o vidro, pode ser perfurado. As furações não se propagam, ou alongam facilmente através da membrana de ETFE devido às suas propriedades químicas. Rasgos inferiores a 100 mm de comprimento podem ser remendados através da uma fita de ETFE soldada a quente, evitando a necessidade de substituir a totalidade da membrana danificada, o que não sucede no caso dos painéis de vidro se quebrarem. No caso de substituição total do painel, a membrana de ETFE é tão leve que pode ser facilmente substituída sem a necessidade de andaimes ou equipamentos de elevação. A manutenção da cobertura de membrana com trabalhadores sobre a sua superfície não é problemática, já que a membrana tensada pode suportar o peso do tráfego pedestre (Lecuyer, 2008) (Figura 8.72).

Tabela 8.18. Tempo estimado e equipamentos necessários para a instalação das soluções de cobertura em análise.

Equipamentos necessários:	Tempo (dias)	Custo de utilização (€)
<b>CV</b> Autogrua de braço telescópico com uma capacidade de elevação de 30 toneladas e 27 metros de altura máxima de trabalho	30	19 200
<b>CM</b> Plataforma elevatória de braço articulado, motor diesel, de 25 m de altura máxima de trabalho, incluindo manutenção e seguro de responsabilidade civil.	7	1666
<b>TMR</b> - 40 minutos a insuflar manualmente e 13 minutos com um insuflador elétrico de 220v.		

Devido ao reduzido peso das membranas, a execução de uma cobertura (Figura 8.71) traduz-se numa solução mais económica do que a de vidro, por requerer menor quantidade de aço na estrutura primária e de alumínio na estrutura secundária. Além disso, as propriedades físicas da membrana permitem a realização de projetos com formas geométricas livres, apresentando-se como um recurso estético para a realização de projetos que requerem formas não convencionais. As membranas são muito rápidas de instalar devido à sua leveza e maioritariamente são prefabricadas fora do local da obra. As soluções de vidro, apesar de também serem prefabricadas fora do local da obra, requerem uma grande preparação de componentes complementares para garantir a sua manutenção. Requerem técnicas especiais de instalação para acomodar o peso próprio desses sistemas (Figura 8.72). Segundo Lecuyer (2008) a cobertura de ETFE com estrutura metálica apresenta ganhos na fase de construção e nas restantes fases do ciclo de vida - devido ao facto de ser mais leve, menos rígida e dispensar a aplicação de dispendiosos pórticos e conectores indispensáveis para a manutenção das coberturas de vidro - custando metade do que uma cobertura em vidro com estrutura metálica.

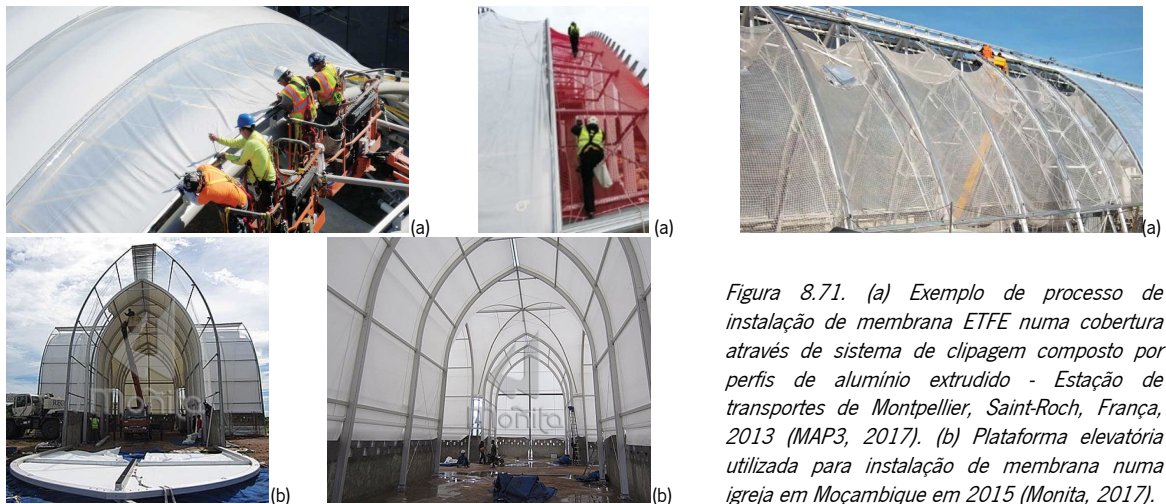


Figura 8.71. (a) Exemplo de processo de instalação de membrana ETFE numa cobertura através de sistema de clipagem composto por perfis de alumínio extrudido - Estação de transportes de Montpellier, Saint-Roch, França, 2013 (MAP3, 2017). (b) Plataforma elevatória utilizada para instalação de membrana numa igreja em Moçambique em 2015 (Monita, 2017).

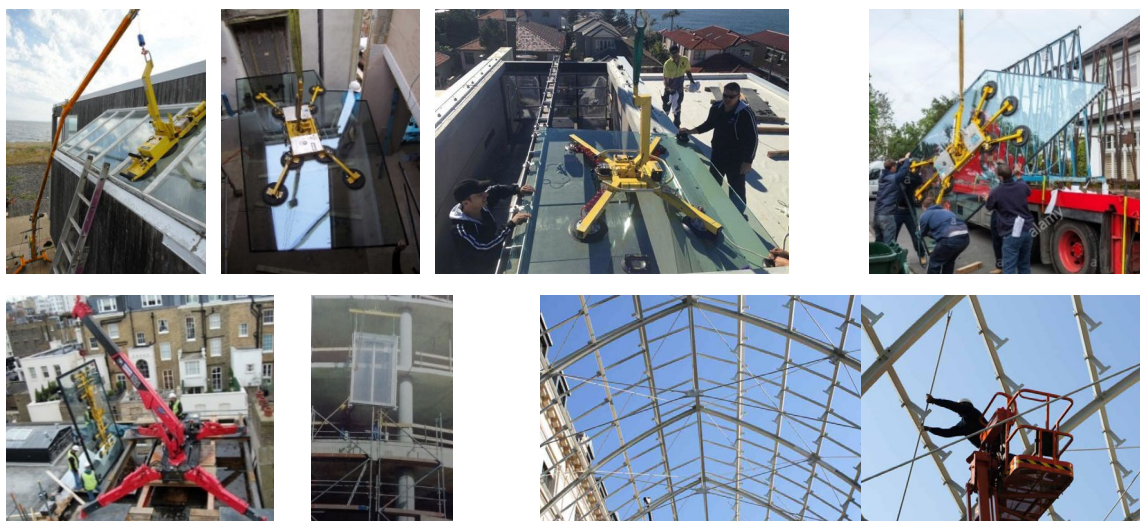


Figura 8.72. Exemplo de processo de instalação de cobertura de vidro: elevação de pano de vidro pesado através de guindaste/grua (GGroup, 2017) (VEonglass, 2017); Gare de Lion, França, 2012 (MAP3, 2017).

## 8.5. Aplicação de modelo multicritério para avaliar a eficiência relativa das soluções construtivas– critérios quantitativos e qualitativos

### 8.5.1. Etapa 1: Definição do problema

O problema a resolver consiste na seleção da melhor alternativa - solução construtiva - para a intervenção de reabilitação funcional com a reposição da cobertura da nave, de um edifício classificado como património nacional - Igreja do Carmo, atual Museu de Arqueologia, localizado no centro urbano de Lisboa, em Portugal. Atualmente o edifício é utilizado como museu, sede de associação e para a organização de eventos (sobretudo musicais, no espaço da nave).

### 8.5.2. Etapa 2: identificação dos decisores

O grupo de decisores encontra-se identificado na secção 6.6.2 do Capítulo 6, pelo motivo exposto na secção 5.4 do Capítulo 5.

### 8.5.3. Etapa 3: definição das alternativas

Em síntese, as alternativas em análise correspondem às seguintes soluções construtivas: (1) **CV** – com Cobertura de Vidro simples (13.6mm) 86% passagem de luz visível e (2) **CM** – com Cobertura em Membrana de ETFE (300 microns) 89% passagem de luz visível **+TMR** – Teto em Membrana acústica Retrátil e 40% passagem de luz visível.

8.5.4. Etapa4: definição dos critérios e estruturação hierárquica

Na Tabela 8.19 apresentam-se os níveis de prioridade necessários para aplicar o modelo de avaliação (Cap. 5).

Tabela 8.19. Quadro de avaliação multicritério para apoio à tomada de decisão da melhor solução para a abordagem de reposição – estruturação hierárquica a adotar no método AHP.

NÍVEL 1 - objetivo						
Seleção da melhor solução construtiva para a intervenção de reabilitação, com a reposição da cobertura da nave, de um edifício classificado como património nacional - Igreja do Carmo, atual Museu de Arqueologia, localizado no centro urbano de Lisboa, em Portugal. O referido edifício é utilizado como museu arqueológico e sede de associação onde decorrem eventos predominantemente associados à emissão de palavra e de música.						
NÍVEL 2 – critérios e subcritérios						
N. Critérios	N. Código	Subcritérios	Tipo	Objetivo	Indicadores	
C1	Aspetos económicos	1 SB1.1	Custo de construção	QN	min.	€
		2 SB1.2	Custo operacional e de manutenção (80 anos)	QN	min.	€
C2	Aspetos culturais/ patrimoniais	3 SB2.1	Respeito pela autenticidade	QL	MAX.	0 a 5
		4 SB2.2	Respeito pelas intervenções anteriores/ Preservação do existente	QL	MAX.	0 a 5
		5 SB2.3	Grau de intrusividade	QL	min.	0 a 5
C3	Aspetos perceptivos	6 SB3.1	Qualidade estética da intervenção pelo exterior	QL	MAX.	0 a 5
		7 SB3.2	Qualidade estética da intervenção pelo interior	QL	MAX.	0 a 5
C4	Aspetos de segurança	8 SB4.1	Risco para os ocupantes perante incêndio	QL	min.	0 a 5
		9 SB4.2	Risco para os ocupantes perante tempestades	QL	min.	0 a 5
		10 SB4.3	Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos	QL	min.	0 a 5
		11 SB4.4	Risco para os ocupantes no caso da ativação de engenhos explosivos.	QL	min.	0 a 5
		12 SB4.5	Resistência à queda de granizo sobre a cobertura	QL	MAX.	0 a 5
C5	Aspetos construtivos	13 SB5.1	Peso total da solução de cobertura	QN	min.	kg
		14 SB5.2	Facilidade de montagem	QL	MAX.	0 a 5
		15 SB5.3	Facilidade de transporte até ao local da obra	QL	MAX.	0 a 5
		16 SB5.4	Tempo de instalação estimado	QN	min.	dias
		17 SB5.5	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço exterior	QL	MAX.	0 a 5
		18 SB5.6	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço interior	QL	MAX.	0 a 5
		19 SB5.7	Durabilidade do material de revestimento da cobertura	QN	MAX.	anos
C6	Aspetos funcionais	20 SB6.1	Grau de repetibilidade	QL	MAX.	0 a 5
		21 SB6.2	Grau de reversibilidade	QL	MAX.	0 a 5
		22 SB6.3	Indicador Fator Luz Dia (FLD)	QN	MAX.	0 a 1
		23 SB6.4	Indicador de Autonomia Espacial da Luz do dia (AELD)	QN	MAX.	%
		24 SB6.5	Indicador de Exposição Solar Anual (ESA)	QN	MAX.	%
		25 SB6.6	Indicador de Iluminância Natural Útil (INU)	QN	MAX.	%
		26 SB6.7	Isolamento acústico da cobertura (Rw)	QN	MAX.	dB
		27 SB6.8	Tempo de reverberação médio (T60) do espaço com a solução	QN	MAX.	1.3 a 1.8s
		28 SB6.9	Clareza do som (C80) do espaço com a solução	QN	MAX.	(-)2 e 4dB
C7	Aspetos de impacto ambiental	29 SB7.1	Energia incorporada total (EE) em todo o ciclo de vida - 80 anos	QN	min.	MJ
		30 SB7.2	Potencial de aquecimento Global total (PAG) em todo o ciclo de vida - 80 anos	QN	min.	kgCO2e
NÍVEL 3 -Alternativas						
CV - Solução de Cobertura em Vidro com estrutura e subestrutura metálica						
CM + TMR - Solução de Cobertura em Membrana (CM) + Teto em Membrana Retrátil (TMR) com estrutura e subestrutura metálica.						

Notas: QN – quantitativo; QL – qualitativo

Nota: Para além dos critérios quantitativos, avaliados na secção 8.4, uma vez que nos futuros quadros comunitários de apoio ao desenvolvimento será dado relevo aos seguintes aspetos: promoção da adaptação às mudanças climáticas, gestão de prevenção de riscos, proteção do ambiente e uso eficiente de recursos, optou-se por incluir alguns critérios qualitativos, associados aos referidos aspetos, na avaliação da eficiência das soluções de reabilitação em estudo. Para os subcritérios qualitativos, a pontuação é determinada com base nos julgamentos do grupo de decisores, segundo a descrição e a escala de avaliação apresentadas na Tabela 8.1 do Anexo 8.

8.5.5. Etapa 5: obtenção do vetor de prioridades (atribuição de pesos aos critérios e subcritérios)

Numa primeira fase, optou-se por realizar uma avaliação da eficiência apenas para os critérios quantitativos e sem atribuição de pesos aos mesmos. Contudo, conforme se preconiza no modelo exposto no Capítulo 5, considera-se conveniente adotar um sistema de ponderação capaz de considerar a importância relativa dos critérios, pois caso contrário todos os critérios terão a mesma importância, o que não corresponde à realidade. Por conseguinte, executou-se uma 2ª fase da etapa 5 conforme descrito na secção 5.6 do Capítulo 5.

• 1ª fase: avaliação multicritério sem atribuição de pesos e apenas com critérios quantitativos

Na Tabela 8.20 e na Figura 8.73 apresentam-se os resultados da 1ª fase de avaliação. O gráfico radar com percentagens, Figura 8.73, elaborado com base nos resultados presentes na Tabela 8.21, mostram como todos os 10 parâmetros (indicadores quantitativos de eficiência) em análise se confrontam entre si, permitindo uma avaliação holística da eficiência de cada solução de ampliação vertical em estudo.

Numa visão global e comparada das soluções de cobertura em estudo, observa-se que a solução alternativa com membrana (CM+TMR) é a mais eficiente (Figura 8.73), ou seja, é aquela em que se consegue obter os melhores

resultados com uma quantidade mínima de recursos empregues, num cenário em que todos os parâmetros analisados apresentam o mesmo peso na avaliação final. Em oposição, a solução CV é a menos eficiente.

Verifica-se que, globalmente, a solução CM+TMR é melhor do que a CV na maioria dos indicadores, com exceção do custo de manutenção (245% pior) e do potencial de aquecimento global (59% pior) associados à fase de manutenção e fim de vida. O pior desempenho apresentado pela CM+TRM nestes indicadores, justifica-se pelo facto de se considerar o pior cenário para a substituição da membrana de ETFE, a cada 40 anos, num ciclo de vida de 80 anos. Contudo, uma vez que não existem construções com membranas de ETFE instaladas há mais de 40 anos, ainda não se consegue determinar com precisão se a sua durabilidade pode ser superior.

Tabela 8.20. Resultados dos indicadores selecionados para avaliar a eficiência das soluções de reabilitação em estudo, numa abordagem de reposição, para um ciclo de vida de 80 anos.

Etapas do ciclo de vida		Indicadores	Unidades	Soluções de reabilitação funcional		
				CV	% de melhoria da CM+TMR relativamente a CV	CM+TMR
Recursos empregues	A1-A5 Produção matérias-primas, transporte e Construção	Peso total	kg	270 120	66%	91 170
		EI	MJ	22 393 000	81%	4 341 800
		PAG	kgCO2e	1 334 500	82%	236 193
		Custo de construção	€	2 360 000	36%	1 520 000
Resultados Obtidos	B1-D Utilização, manutenção e fim de vida	Iluminação natural (FLD)	%	27	78%	6
		Tempo de reverberação	s	4.3	58%	1.8
		Índice de Transmissão da fala - STI		0.33	9%	0.36
		Custo de manutenção (80 anos)	€	85 500	-245%	294 900
		EI	MJ	744 700	8%	687 050
		PAG	kgCO2e	27 400	-59%	43 660
<b>Ranking % de melhoria em relação à pior solução</b>				2°		1°
						10% melhor do que a CV

Observações: Os valores negativos e assinalados a vermelho correspondem aos parâmetros em que a solução CM+TMR é pior do que a CV.

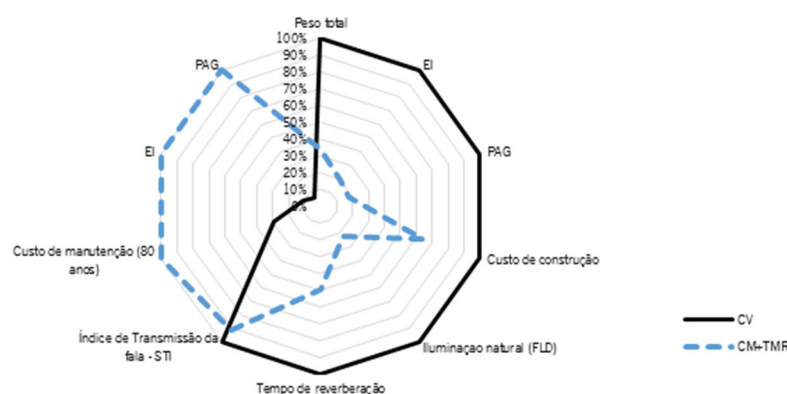


Figura 8.73. Comparação entre as soluções de reposição da cobertura. Avaliação da eficiência em que todos os indicadores têm peso igual no resultado final. Melhor =0%; Pior =100%.

• **2ª fase: atribuição de pesos para avaliação multicritério - com critérios quantitativos e qualitativos – a realizar na etapa 6 - cenário base**

Os resultados finais da atribuição de pesos aos critérios e subcritérios são apresentados na Tabela 8.21. Estes mostram que o grupo de decisores atribuiu maior importância ao critério C6 (aspectos funcionais), cujo peso é de 30%. O critério C4 (aspectos de segurança) é ponderado com 20%, e o critério C5 (aspectos construtivos) com 15%. Para o critério C6, a ordenação mais elevada foi dada ao subcritério SB6.8 (22%), seguida pelo subcritério SB6.9 (12%), e a menor pontuação neste nível é atribuída aos subcritérios SB6.1 e SB6.2 (2%).

Quando se trata de uma intervenção com abordagem de reposição, os intervenientes no processo de reabilitação, como os arquitetos, devem prestar especial atenção aos aspectos funcionais, de segurança e construtivos, pois esses critérios receberam os mais elevados níveis de prioridade na avaliação da eficiência. Apesar dos aspetos culturais/patrimoniais e percetivos apresentarem menor peso, isto não significa que os seus subcritérios também

sejam menos valorizados. Na verdade, os subcritérios qualidade estética e grau de intrusividade estão entre os que apresentam maior peso global (Tabela 8.21).

Tabela 8.21. Resultados da atribuição de pesos a cada critério e subcritério – cenário base.

N.	Peso	Critérios	N.	Código	Peso Local	Peso Global	Subcritérios	Objetivo
C1	6%	Aspetos económicos	1	SB1.1	50%	3%	Custo de construção	min.
			2	SB1.2	50%	3%	Custo operacional e de manutenção (80 anos)	min.
C2	12%	Aspetos culturais/patrimoniais	3	SB2.1	9%	1%	Respeito pela autenticidade	MAX.
			4	SB2.2	28%	3%	Respeito pelas intervenções anteriores/ Preservação do existente	MAX.
			5	SB2.3	63%	8%	Grau de intrusividade	min.
C3	12%	Aspetos percetivos	6	SB3.1	50%	6%	Qualidade estética da intervenção pelo exterior	MAX.
			7	SB3.2	50%	6%	Qualidade estética da intervenção pelo interior	MAX.
C4	20%	Aspetos de segurança	8	SB4.1	20%	4%	Risco para os ocupantes perante incêndio	min.
			9	SB4.2	20%	4%	Risco para os ocupantes perante tempestades	min.
			10	SB4.3	20%	4%	Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos	min.
			11	SB4.4	20%	4%	Risco para os ocupantes no caso da ativação de engenhos explosivos.	min.
			12	SB4.5	20%	4%	Resistência à queda de grânulo sobre a cobertura	MAX.
C5	15%	Aspetos construtivos	13	SB5.1	30%	5%	Peso total da solução de cobertura	min.
			14	SB5.2	10%	2%	Facilidade de montagem	MAX.
			15	SB5.3	10%	2%	Facilidade de transporte até ao local da obra	MAX.
			16	SB5.4	15%	2%	Tempo de instalação estimado	min.
			17	SB5.5	10%	2%	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço exterior	MAX.
			18	SB5.6	10%	2%	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço interior	MAX.
			19	SB5.7	15%	2%	Durabilidade do material de revestimento da cobertura	MAX.
C6	30%	Aspetos funcionais	20	SB6.1	5%	2%	Grau de repetibilidade	MAX.
			21	SB6.2	6%	2%	Grau de reversibilidade	MAX.
			22	SB6.3	11%	3%	Indicador Fator Luz Dia (FLD)	MAX.
			23	SB6.4	11%	3%	Indicador de Autonomia Espacial da Luz do dia (AELD)	MAX.
			24	SB6.5	11%	3%	Indicador de Exposição Solar Anual (ESA)	MAX.
			25	SB6.6	11%	3%	Indicador de Iluminância Natural Útil (INU)	MAX.
			26	SB6.7	11%	3%	Isolamento acústico da cobertura (Rw)	MAX.
			27	SB6.8	22%	7%	Tempo de reverberação médio (500 a 100Hz) do espaço com a solução	MAX.
			28	SB6.9	12%	4%	Clareza do som (C <sub>s</sub> ) (500-1000Hz) do espaço com a solução	MAX.
C7	5%	Aspetos de impacto ambiental	29	SB7.1	50%	3%	Energia incorporada total (EE) em todo o ciclo de vida - 80 anos	min.
			30	SB7.2	50%	3%	Potencial de aquecimento Global total (PAG) em todo o ciclo de vida - 80 anos	min.

### 8.5.6. Etapa 6: normalização dos valores e avaliação global de cada alternativa – cenário base

Nesta etapa, perante o cenário base de decisão (resultante da atribuição de pesos aos critérios pelo grupo de decisores (ver Tabela 8.22) adotou-se o procedimento descrito na secção 5.8 do Capítulo 5, resultando na elaboração da Tabela 8.22. Como resultado final, verifica-se que a alternativa CM+TMR é a mais relevante para atingir o objetivo enunciado (Figura 8.74), enquanto a alternativa CV é a que apresenta menor relevância.

Tabela 8.22. Resultados da avaliação global de cada alternativa para o cenário base.

N.	Peso	Critérios	Código	Subcritérios	Objetivo	Decisão agrupada		Decisão normalizada <sup>2</sup>		Decisão Ponderada	
						CV	CM+TMR	CV	CM+TMR	CV	CM+TMR
C1	6%	Aspetos económicos	SB1.1	Custo de construção	min.	2360000	1520000	0,00	1,00	0,00	0,03
			SB1.2	Custo operacional e de manutenção (80 anos)	min.	85500	294900	1,00	0,00	0,03	0,00
C2	12%	Aspetos culturais/patrimoniais	SB2.1	Respeito pela autenticidade	MAX.	2	3	0,00	1,00	0,00	0,01
			SB2.2	Respeito pelas intervenções anteriores/ Preservação do existente	MAX.	4	4	0,00	1,00	0,00	0,03
			SB2.3	Grau de intrusividade	min.	4	2	0,00	1,00	0,00	0,08
C3	12%	Aspetos percetivos	SB3.1	Qualidade estética da intervenção pelo exterior	MAX.	4	4	0,00	1,00	0,00	0,06
			SB3.2	Qualidade estética da intervenção pelo interior	MAX.	3	4	0,00	1,00	0,00	0,06
C4	20%	Aspetos de segurança	SB4.1	Risco para os ocupantes perante incêndio	min.	4	2	0,00	1,00	0,00	0,04
			SB4.2	Risco para os ocupantes perante tempestades	min.	4	3	0,00	1,00	0,00	0,04
			SB4.3	Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos	min.	5	2	0,00	1,00	0,00	0,04
			SB4.4	Risco para os ocupantes no caso da ativação de engenhos explosivos.	min.	5	2	0,00	1,00	0,00	0,04
			SB4.5	Resistência à queda de grânulo sobre a cobertura	MAX.	4	4	0,00	1,00	0,00	0,04
C5	15%	Aspetos construtivos	SB5.1	Peso total da solução de cobertura	min.	270120	91170	0,00	1,00	0,00	0,05
			SB5.2	Facilidade de montagem	MAX.	2	4	0,00	1,00	0,00	0,02
			SB5.3	Facilidade de transporte até ao local da obra	MAX.	2	5	0,00	1,00	0,00	0,02
			SB5.4	Tempo de instalação estimado	min.	30	15	0,00	1,00	0,00	0,02
			SB5.5	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço exterior	MAX.	2	3	0,00	1,00	0,00	0,02
			SB5.6	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço interior	MAX.	2	3	0,00	1,00	0,00	0,02
			SB5.7	Durabilidade do material de revestimento da cobertura	MAX.	1000	40	1,00	0,00	0,02	0,00



N.	Peso	Critérios	Código	Subcritérios	Objetivo	Decisão agrupada		Decisão normalizada <sup>2</sup>		Decisão Ponderada	
						CV	CM+TMR	CV	CM+TMR	CV	CM+TMR
C6	30%	Aspetos funcionais	SB6.1	Grau de repetibilidade	MAX.	3	4	0,00	1,00	0,00	0,02
			SB6.2	Grau de reversibilidade	MAX.	3	4	0,00	1,00	0,00	0,02
			SB6.3	Indicador Fator Luz Dia (FLD)	MAX.	0	1	0,00	1,00	0,00	0,03
			SB6.4	Indicador de Autonomia Espacial da Luz do dia (AELD)	MAX.	0	100	0,00	1,00	0,00	0,03
			SB6.5	Indicador de Exposição Solar Anual (ESA)	MAX.	0	2,4	0,00	1,00	0,00	0,03
			SB6.6	Indicador de Iluminância Natural Útil (INU)	MAX.	0	100	0,00	1,00	0,00	0,03
			SB6.7	Isolamento acústico da cobertura (Rw)	MAX.	35	9	1,00	0,00	0,03	0,00
			SB6.8	Tempo de reverberação médio (T60) do espaço com a solução (500 a 1000Hz)	MAX.	4,3	1,8	1,00	0,00	0,07	0,00
			SB6.9	Clareza do som (C80) do espaço com a solução	MAX.	-8,2	-3,2	0,00	1,00	0,00	0,04
C7	5%	Aspetos de impacto ambiental	SB7.1	Energia incorporada total (EE) em todo o ciclo de vida - 80 anos	min.	23137700	5028850	0,00	1,00	0,00	0,03
			SB7.2	Potencial de aquecimento Global total (PAG) em todo o ciclo de vida - 80 anos	min.	1361900	279853	0,00	1,00	0,00	0,03
<b>Soma (Método Aditivo Simples)</b>								<b>4,00</b>	<b>26,00</b>	<b>0,15</b>	<b>0,85</b>

Notas: <sup>1</sup> Valoração dos parâmetros quantitativos e decisão agrupada dos parâmetros qualitativos e quantitativos. <sup>2</sup> Formulas aplicadas para normalizar os valores dos subcritérios: MAXIMIZAR  $y = (X-Min) / (MAX-min)$  Minimizar  $y = (MAX-X) / (MAX-min)$  Normalização dos valores dos subcritérios - Escala final: (0=pioor; 1=melhor)

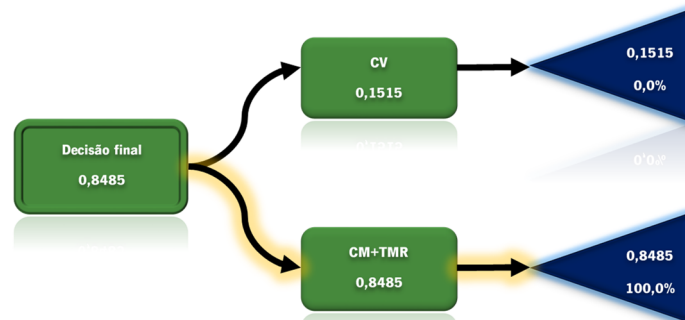


Figura 8.74. Árvore de decisão 'Melhor solução de reposição'. Gráfico obtido com a utilização da aplicação Precision Tree da ferramenta informática Decision Tools Suite (DTS) Industrial student version 7.6 (2018).

Em síntese, as soluções construtivas com membrana apresentam-se como uma alternativa eficiente à solução convencional para realizar intervenções de reabilitação funcional de edifícios através de abordagens de reposição. Isto deve-se, sobretudo, ao facto de apresentarem um peso e custo de construção inferior. Comparativamente à opção S/C, a opção com cobertura (quer seja a CV ou CM) traz benefícios para o desempenho funcional do edifício (Tabela 8.23), para além da proteção mais evidente às variantes climáticas.

Tabela 8.23. Comparativa entre a solução de cobertura CV e CM (síntese) (adaptado de Vector Foiltec, 2012).

Propriedades	CV	CM	Notas
<b>Durabilidade</b>	Eterno	+ de 30 anos	A)
<b>Peso próprio</b>	33 kg/m <sup>2</sup>	0.35 kg/m <sup>2</sup>	
<b>Peso próprio da estrutura primária (aço)</b>	55-75 kg/m <sup>2</sup>	25-35 kg/m <sup>2</sup>	
<b>Dimensões do painel</b>	3.2 x 6 m (1 x 2m caso estudo)	+ 4m x 200m de vão (com cabos)	
<b>Personalização do formato do painel</b>	Sim. O custo aumenta significativamente, sobretudo devido ao manuseamento, transporte e instalação.	Sim	B)
<b>Curvatura numa direção</b>	Sim; aumento do custo	Sim	
<b>Curvatura em duas direções</b>	Sim; custo aumenta muito e as variações geométricas são limitadas.	Sim	C)
<b>Transmissão de luz visível</b>	85%	Personalizável: 0% - 95%	
<b>Transmissão UV</b>	0%	Personalizável: 0% - 48%	D)
<b>Propriedades</b>	<b>CV</b>	<b>CM</b>	
<b>Coloração</b>	Transparente; variáveis de coloração disponível a custo superior.	Transparente e outras.	E)
<b>Isolamento acústico</b>	Moderado	Baixo	
<b>Transmissão do ruído da chuva</b>	Moderado	Baixo	F)
<b>Resistência ao fogo</b>	Não combustível	Não combustível, nem produz gotas flamejantes.	
<b>Limpeza exterior</b>	Requer limpeza regular.	Auto lavável.	G)
<b>Manutenção</b>	Anual	Manutenção bianual	
<b>Reparação</b>	Substituir ou proteger o painel imediatamente.	Reparação com remendo.	H)
<b>Segurança</b>	Boa	Boa	
<b>Resistência ao vandalismo</b>	Elevada	Elevada	I)
<b>Resistência ao impacto (queda de granizo)</b>	Moderada - os painéis podem requerer substituição.	Excelente	
<b>Tempo de instalação</b>	Moderado - fraco (dependente maioritariamente da dimensão e peso individual dos painéis)	Bom	

Notas:

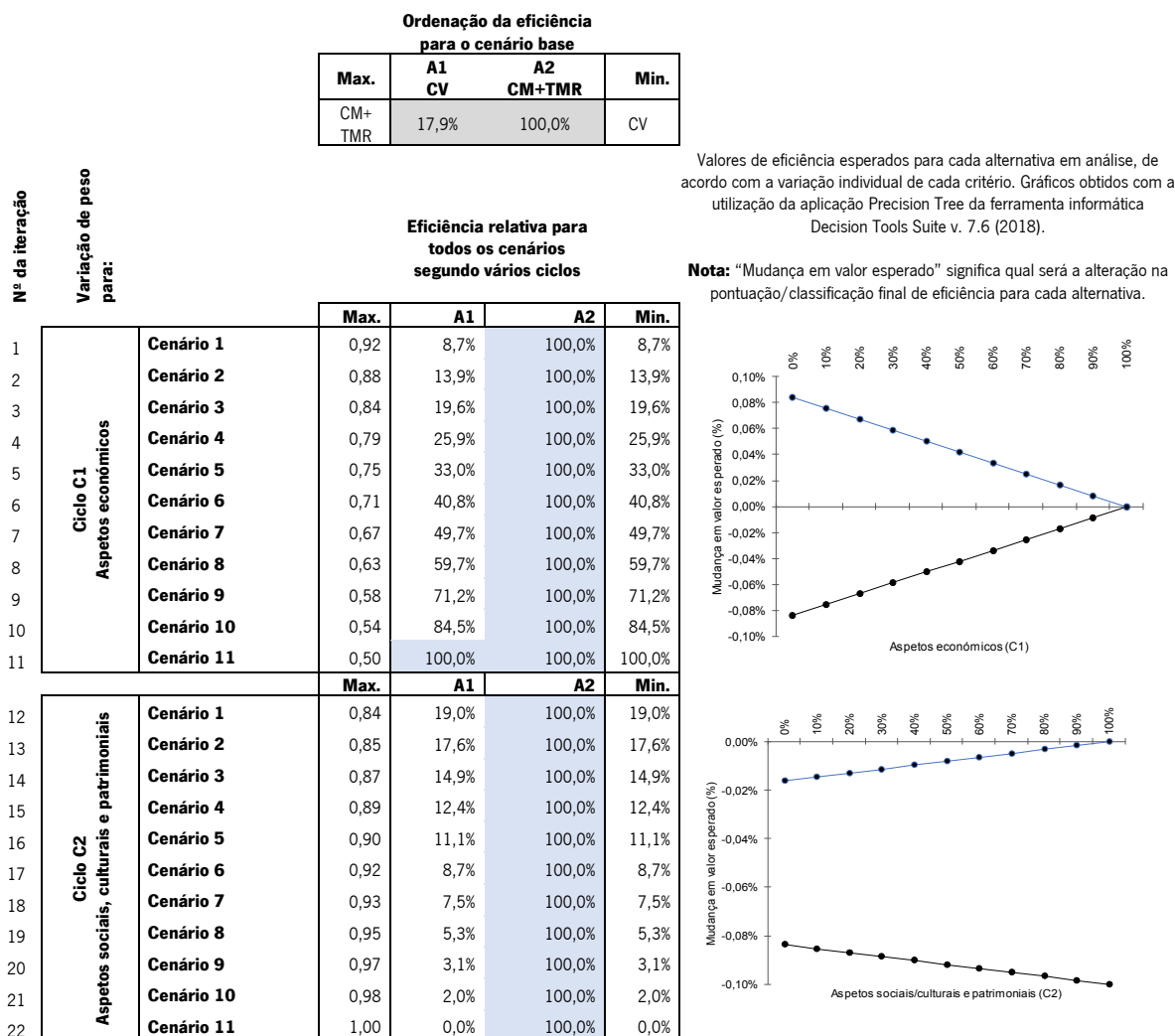
- A. As membranas podem ser produzidas para qualquer dimensão e formato (limitadas pela ação do vento e neve).
- B. A luz UV é importante para o crescimento de plantas e para o desenvolvimento da vitamina D nos humanos.

- C. O sistema de supressão do ruído da chuva é uma solução de correção. Ao contrário dos outros materiais, a membrana de ETFE não suporta reverberação acústica dentro de um espaço encerrado. Isso significa que os níveis internos de ruído durante uma tempestade, embora altos, não são cumulativos. Por esta razão, A Vêtor Foiltec (2012) recomenda que os supressores do ruído da chuva não sejam instalados até se considerarem absolutamente necessários.
- D. A membrana ETFE é auto-lavável sob a ação da chuva. O vidro normal não é auto lavável e é suscetível a marcas de água, especialmente quando instalado numa posição quase horizontal.
- E. A membrana ETFE pode ser reparada quando apresenta pequenas perfurações e danos localizados. Quando apresenta danos grandes pode exigir a sua substituição.
- F. Recomenda-se que a membrana ETFE seja colocada fora do alcance público, pois os aspetos de segurança tornam-se um problema. Da mesma forma, as soluções construtivas com vidro também podem ser facilmente danificadas intencionalmente.
- G. A membrana de ETFE é resistente a ações de impacto. No entanto, em caso de perfuração, a membrana pode ser facilmente reparada/substituída a baixo custo. O vidro também é suscetível a danos e, uma vez danificado, é perigoso, exigindo a substituição imediata a um alto custo.
- H. A membrana ETFE é resistente aos efeitos da queda de granizo devido à sua capacidade de absorver impacto em vez de quebrar. Além disso, devido às suas propriedades termoplásticas, qualquer deformação que ocorra provavelmente desaparecerá após vários períodos prolongados de clima quente.
- I. As membranas são muito rápidas de instalar devido à sua leveza; maioritariamente são prefabricadas fora do local da obra. As soluções de vidro, apesar de também serem prefabricadas fora do local da obra, requerem uma grande preparação de componentes complementares para garantir o desempenho a longo prazo. Requerem técnicas especiais de instalação para acomodar o peso próprio desses sistemas.

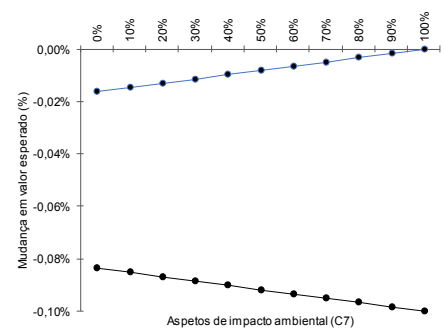
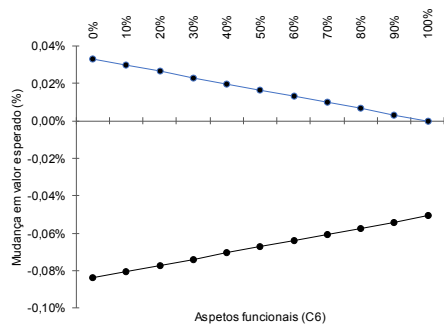
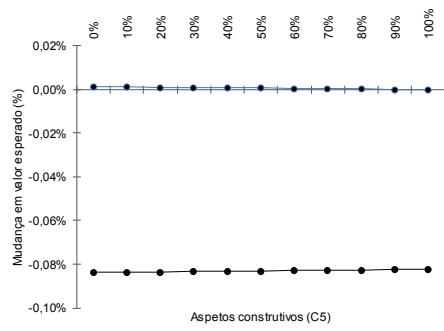
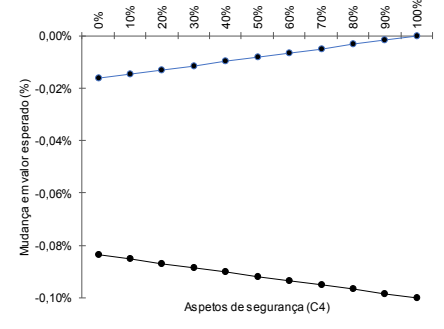
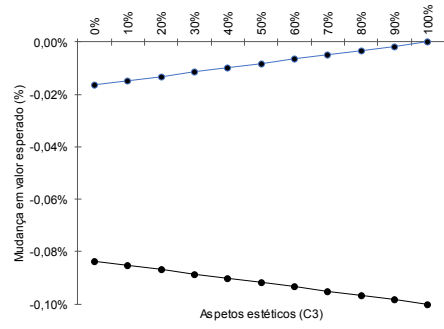
8.5.7. Etapa 7: análise de sensibilidade


Após a aplicação do método descrito, na secção 5.9 do Capítulo 5, verifica-se que a alternativa CM+TMR é a mais eficiente, por ser a dominante em todos os cenários, para atingir o objetivo enunciado. Enquanto a alternativa CV é a que apresenta menor eficiência. Em 77 iterações, a alternativa A2 - CM+TMR é a que apresenta maior eficiência (100%); em média, considerando todas as variações de peso para todos os critérios avaliados, é 82% melhor do que a alternativa A1 - CV. Nos gráficos presentes na Tabela 8.24 observa-se que a alternativa CM+TMR é sempre a alternativa escolhida, para qualquer variação de peso em todos os critérios. Contudo, quando o critério C1 – aspetos económicos – apresenta um peso de 100%, a alternativa CV também é escolhida.

Tabela 8.24. Resultados da análise de sensibilidade.



		Max,	A1	A2	Min,	
23	<b>Ciclo C3</b> Aspetos perceptivos	Cenário 1	0,84	19,0%	100,0%	19,0%
24		Cenário 2	0,85	17,6%	100,0%	17,6%
25		Cenário 3	0,87	14,9%	100,0%	14,9%
26		Cenário 4	0,89	12,4%	100,0%	12,4%
27		Cenário 5	0,90	11,1%	100,0%	11,1%
28		Cenário 6	0,92	8,7%	100,0%	8,7%
29		Cenário 7	0,93	7,5%	100,0%	7,5%
30		Cenário 8	0,95	5,3%	100,0%	5,3%
31		Cenário 9	0,97	3,1%	100,0%	3,1%
32		Cenário 10	0,98	2,0%	100,0%	2,0%
33		Cenário 11	1,00	0,0%	100,0%	0,0%
		<b>Max,</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>Min,</b>	
34	<b>Ciclo C4</b> aspetos de segurança	Cenário 1	0,84	19,0%	100,0%	19,0%
35		Cenário 2	0,85	17,6%	100,0%	17,6%
36		Cenário 3	0,87	14,9%	100,0%	14,9%
37		Cenário 4	0,89	12,4%	100,0%	12,4%
38		Cenário 5	0,90	11,1%	100,0%	11,1%
39		Cenário 6	0,92	8,7%	100,0%	8,7%
40		Cenário 7	0,93	7,5%	100,0%	7,5%
41		Cenário 8	0,95	5,3%	100,0%	5,3%
42		Cenário 9	0,97	3,1%	100,0%	3,1%
43		Cenário 10	0,98	2,0%	100,0%	2,0%
44		Cenário 11	1,00	0,0%	100,0%	0,0%
		<b>Max,</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>Min,</b>	
45	<b>Ciclo C5</b> Aspetos construtivos	Cenário 1	0,86	16,3%	100,0%	16,3%
46		Cenário 2	0,86	16,3%	100,0%	16,3%
47		Cenário 3	0,86	16,3%	100,0%	16,3%
48		Cenário 4	0,86	16,3%	100,0%	16,3%
49		Cenário 5	0,86	16,3%	100,0%	16,3%
50		Cenário 6	0,86	16,3%	100,0%	16,3%
51		Cenário 7	0,85	17,6%	100,0%	17,6%
52		Cenário 8	0,85	17,6%	100,0%	17,6%
53		Cenário 9	0,85	17,6%	100,0%	17,6%
54		Cenário 10	0,85	17,6%	100,0%	17,6%
55		Cenário 11	0,85	17,6%	100,0%	17,6%
		<b>Max,</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>Min,</b>	
56	<b>Ciclo C6</b> Aspetos funcionais	Cenário 1	0,89	12,4%	100,0%	12,4%
57		Cenário 2	0,87	14,9%	100,0%	14,9%
58		Cenário 3	0,85	17,6%	100,0%	17,6%
59		Cenário 4	0,83	20,5%	100,0%	20,5%
60		Cenário 5	0,80	25,0%	100,0%	25,0%
61		Cenário 6	0,78	28,2%	100,0%	28,2%
62		Cenário 7	0,76	31,6%	100,0%	31,6%
63		Cenário 8	0,74	35,1%	100,0%	35,1%
64		Cenário 9	0,71	40,8%	100,0%	40,8%
65		Cenário 10	0,69	44,9%	100,0%	44,9%
66		Cenário 11	0,67	49,3%	100,0%	49,3%
		<b>Max,</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>Min,</b>	
67	<b>Ciclo C7</b> Aspetos de impacto ambiental	Cenário 1	0,84	19,0%	100,0%	19,0%
68		Cenário 2	0,85	17,6%	100,0%	17,6%
69		Cenário 3	0,87	14,9%	100,0%	14,9%
70		Cenário 4	0,89	12,4%	100,0%	12,4%
71		Cenário 5	0,90	11,1%	100,0%	11,1%
72		Cenário 6	0,92	8,7%	100,0%	8,7%
73		Cenário 7	0,93	7,5%	100,0%	7,5%
74		Cenário 8	0,95	5,3%	100,0%	5,3%
75		Cenário 9	0,97	3,1%	100,0%	3,1%
76		Cenário 10	0,98	2,0%	100,0%	2,0%
77		Cenário 11	1,00	0,0%	100,0%	0,0%



	Ordenação das alternativas		Legenda:
	A1	A2	
	CV	CM+TMR	
Eficiência relativa (média)	18%	100%	 (melhor)
Eficiência de cada alternativa relativamente à melhor (do conjunto de cenários indicados)	-82%	0%	●— CV ●— CM+TMR
Ordenação da eficiência (1º =melhor)	2º	1º	

### 8.5.8. Etapa 8: discussão dos resultados e recomendações

Analisando os resultados obtidos verifica-se que, dentro desta amostra e de acordo com os critérios analisados, a solução de reabilitação mais eficiente é a alternativa CM+TMR – cobertura em membrana e teto em membrana retrátil. A CM+TMR apresenta, em relação a todos os critérios analisados, melhor desempenho do que a solução de referência, a alternativa CV. A utilização mais racional de materiais é determinante para que esta tecnologia construtiva obtenha este resultado. Em contrapartida, a alternativa CV revelou-se a menos eficiente em todos os critérios analisados, exceto no critério C1 – aspetos económicos. Em futuros trabalhos, a atribuição de pesos pode ser atualizada, relativamente a necessidades específicas do decisor. Caso contrário, esta listagem de pesos pode ser utilizada em todos os casos de estudo, mesmo que um ou mais parâmetros sejam excluídos da avaliação, sem a necessidade de voltar a fazer uma comparação por pares.

## 8.6. Considerações finais

Este capítulo iniciou-se com a reflexão sobre a relação entre massa e desempenho sísmico de edifícios, concluindo-se que a adoção de soluções leves e de reforço/ligação entre elementos estruturais existentes, como se pretende com a proposta de colocação de cobertura e teto em membrana, permite reduzir a vulnerabilidade ao risco dos ocupantes do edifício. Mitiga o risco de queda, reduz a vulnerabilidade ao fogo e, perante a ocorrência de eventos sísmicos, é potencialmente menos vulnerável do que uma cobertura em vidro.

Conclui-se que a solução proposta em membrana, inserida numa ação de reabilitação com reposição da forma sem adição significativa de massa, se apresenta como uma alternativa eficiente à solução convencional em vidro. A reposição do teto e cobertura é positiva ao nível funcional, devido às melhorias das condições de iluminação natural e acústicas. A linguagem, forma e seleção dos materiais adotados na solução de cobertura proposta teve o intuito de reduzir a adição de carga sobre os elementos construtivos do edifício existente. Devido às características das membranas, é possível a adoção formal da linguagem gótica, mas com expressão e eficiência funcional contemporâneas.

Com a reposição da cobertura e teto em membrana, implementa-se uma solução que: (1) apresenta reduzido impacto visual na área circundante às ruínas (neste caso, no topo de uma colina); (2) incrementa o desempenho funcional, preservando ao mesmo tempo o caráter arquitetónico do edifício, atenua as flutuações térmicas, permitindo a correta iluminação natural sem criar efeito estufa (através da ventilação natural do mesmo), e incrementa o desempenho acústico; (3) minimiza custos, tempo de construção (entre 24 a 70% menos do que uma cobertura de vidro) e o acesso externo para instalação e manutenção de coberturas em membrana de ETFE não exige instalações de segurança dispendiosas tornando-as económicas; (4) não causa sobrecargas significativas ao edifício existente; (5) contribui para a mitigação de riscos (desempenho na proteção); (6) adota princípios de reabilitação, como o da reversibilidade (no futuro se existir uma solução melhor, a membrana poderá ser substituída sem danos para a preservação do existente); (7) globalmente, apresenta eficiência superior à solução contemporânea de referência em vidro.

Os sistemas construtivos em membrana constituem uma solução alternativa adequada à reabilitação acústica de edifícios, sobretudo nos casos em que as paredes antigas/históricas são muito refletoras e não podem ser alteradas por questões de proteção patrimonial. Segundo o conforto lumínico, a opção de cobrir a nave do edifício é vantajosa, quer seja com a solução CV+TMR como com a CM+TMR, relativamente à opção de manter a nave sem cobertura. Apesar da necessidade de substituição da membrana de ETFE e da membrana de poliéster após 40 anos, a CM+TMR continua a apresentar menor impacto ambiental do que a CV, sobretudo devido aos menores impactos na fase de produção, transporte, desconstrução e potencial de reciclagem.

Em linha com as conclusões retiradas da análise do estado da arte (capítulo 4), salienta-se que as tecnologias de construção de coberturas com membrana de ETFE não substituirão as de vidro em todos os casos. A membrana de ETFE apenas fornece uma alternativa interessante e eficiente nos casos onde o uso do vidro é limitado pelas dimensões, peso, custo e quando a necessidade de proteção ao risco é elevada. Trabalhos futuros sobre a solução alternativa de cobertura poderão incluir: execução de modelos experimentais para ensaios estruturais, construtivos e funcionais, sobretudo acústicos relativos ao ruído de impacto da chuva; teste dos efeitos que a cobertura produz nos elementos construtivos que a suportam, quando uma estrutura deste tipo é submetida a ações sísmicas.

# Capítulo

# 09

## Conclusões

O presente capítulo encontra-se dividido em três secções, nas quais se apresentam: resultados (secção 9.1); limitações encontradas (secção 9.2) e objetivos futuros (secção 9.3) da presente tese.

### 9.1. Resultados

A atual e crescente importância atribuída ao impacto ambiental leva os projetistas a combinar o uso de materiais energeticamente eficientes com soluções técnicas que maximizem a poupança de recursos. Neste sentido, o principal objetivo desta tese consistiu em avaliar e comparar a eficiência de tecnologias construtivas com membranas arquitetónicas relativamente às soluções convencionalmente utilizadas, em intervenções de reabilitação funcional de edifícios. Para tal, realizou-se: (1) uma análise do estado do conhecimento sobre reabilitação com membranas, com base num inventário de 70 projetos de reabilitação; (2) conceberam-se e avaliaram-se soluções em membrana, através de ensaios numéricos e alguns experimentais, com potencial para melhorar o desempenho funcional de edifícios existentes e (3) aplicou-se um modelo multicritério de apoio à decisão, que combina técnicas de apoio à tomada de decisão (AHP e SAW) e uma análise de sensibilidade, para determinar a eficiência relativa das soluções em membrana segundo múltiplos critérios - funcionais, técnico/construtivos, económicos, ambientais, de segurança, socioculturais e percetivos. A eficiência relativa das soluções em membrana foi determinada para três testes/casos de estudo. Cada estudo representou uma abordagem arquitetónica comum em intervenções de reabilitação funcional - integração, sobreposição e reposição - preenchendo lacunas de investigação associadas ao uso de tecnologias de reabilitação com membranas arquitetónicas.

A seguinte declaração resume o argumento chave desta tese, com base nas evidências dos resultados obtidos, suportados pela análise do estado do conhecimento e avaliação de três casos de estudo: quando integradas em tecnologias construtivas, as membranas arquitetónicas constituem uma alternativa eficiente em intervenções de reabilitação funcional de edifícios, permitindo alcançar reduções significativas no emprego de recursos para se obterem melhorias funcionais nos edifícios existentes. De seguida, passa-se a apresentar os resultados/contributos desta tese.

Na Tabela 9.1 apresenta-se uma visão global dos resultados desta tese, com a análise dos pontos fracos e pontos fortes e das oportunidades e ameaças às soluções de reabilitação com membranas arquitetónicas.

*Tabela 9.1. Análise dos pontos fracos e fortes, das oportunidades e ameaças às soluções de reabilitação em membrana.*

Pontos fracos
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>O que prejudica a sua eficiência?</b> R: aspetos estéticos e socioculturais; a durabilidade limitada a 20-30 anos (dependendo das condições climáticas, poluição, <i>etc.</i>), o custo e o impacto ambiental (a maioria das membranas é composta por matéria prima fóssil (p.e. petróleo)).</li><li>• <b>O que é que os outros veem como fraquezas?</b> R: aspetos estéticos, pouca resistência à intrusão e às ações do vento.</li><li>• <b>Onde é que são menos competitivas do que as outras soluções construtivas?</b> R: apesar de terem surgido no paleolítico, a procura de materiais em membrana mais duráveis atrasou o desenvolvimento de construções em membrana, o que torna este tipo de construção recente (com cerca de 50 anos). Por este motivo, ainda existe resistência sociocultural, sobretudo devido ao facto de serem associadas a soluções efémeras, e requerem instaladores com formação especializada.</li></ul>
Pontos fortes
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>O que promove a sua eficiência?</b> R: no geral são os aspetos económicos, construtivos e funcionais. Estes aspetos estão intrinsecamente associados ao seu peso reduzido e à sua grande flexibilidade, que promovem soluções construtivas reversíveis e repetíveis.</li><li>• <b>O que é que os outros veem como forças?</b> R: liberdade de criação de formas, rapidez do processo construtivo e facilidade de montagem e desmontagem.</li></ul>

#### Oportunidades (externas)

- **Que oportunidades disponíveis existem?** R: melhoria do comportamento térmico através da adição de acabamentos superficiais na membrana e de novos tipos de fibras e métodos de produção ou, através da adição de outros materiais leves que se podem configurar em sistemas multicamada, com flexibilidade, como os PCM, aerogel, folhas de chumbo (p/melhorias acústicas),
- **Que tendências/novidades se podem aproveitar?** R: auto-construção (soluções em kit); procura de materiais em membrana com menor impacto ambiental (de origem vegetal); inclusão de soluções passivas para arrefecimento, aquecimento e produção de energia em membranas (p.e.: membranas vegetais, membranas PCM/aerogel e membranas fotovoltaicas);

#### Oportunidades (externas)

- Existe cada vez menos a necessidade de instalações técnicas com fios. Os sistemas wireless promovem a adoção de soluções construtivas + flexíveis e adaptáveis, onde as membranas se apresentam como soluções viáveis;
- Podem constituir soluções para a reabilitação de edifícios em cenários de alterações climáticas. Outras propriedades, como a condutividade elétrica e eletroluminescência, ou a possibilidade de integração de nano materiais, também serão aspetos relevantes que irão alterar as propriedades funcionais das membranas de modo positivo. Neste âmbito, as propriedades da envolvente do edifício podem ser especificamente adaptadas a parâmetros climáticos;
- Conjuguar as membranas com "*Bending-active systems*" (em vez de perfis estáticos), por exemplo com perfis GFRP, para grandes vãos, de modo a requerer menos forças de ancoragem sobre elementos existentes construídos;
- Num futuro próximo, será possível a integração de massa térmica - com água e/ou outros fluidos com elevado calor específico, inertes, PCMs, etc. - em composições multicamada de membrana de modo a permitir o aumento da massa térmica de soluções com membranas transparentes/translúcidas;
- Em termos ambientais, fatores como a redução de energia e recursos incorporados na fase de produção e reciclagem das membranas são de grande importância para que as soluções construtivas que incorporam membranas consigam ser ainda mais eficientes (no que toca ao impacto ambiental) e ganhar mais competitividade relativamente às soluções convencionalmente adotadas.
- **Como transformar as forças em oportunidades?** R: conceber soluções reversíveis e repetíveis para contextos de reabilitação específicos, sobretudo para adaptar os edifícios existentes perante as alterações climáticas.

#### Ameaças (externas)

- **Quais as ameaças?** R: barreiras culturais; falta de harmonização de normas (como os Eurocódigos) para a conceção estrutural de estruturas em membrana.
- **O que é que a concorrência anda a fazer?** R: soluções mais leves, em kit (auto construção), modulares, com menor impacto ambiental e mais económicas.
- **As suas fraquezas expõem-no a que possíveis ameaças?** R: esgotamento de recursos fósseis, como o petróleo, do qual depende a produção dos materiais em membrana.

Em particular, os pontos seguintes apresentam aspetos analisados e discutidos durante a realização da tese e que importa realçar:

- Benefícios dos materiais em membrana.* Estes materiais apresentam qualidades inerentes que motivam o seu uso na reabilitação de edifícios, tais como: resistência; flexibilidade; leveza; durabilidade e resistência às variações climáticas; transmissão lumínica variável; eletromagnéticas/electroestáticas/anti-corrosão e permitem ser funcionalizadas (de forma ativa ou passiva).
- Resistência sociocultural e outras limitações.* Na última década, foram desenvolvidos materiais em película e têxteis técnicos avançados (onde se incluem as membranas arquitetónicas) com utilização no setor da reabilitação de edifícios, como por exemplo: tecidos utilizados para reforço e monitorização do comportamento estrutural de elementos construtivos, têxteis técnicos de elevado desempenho à tração utilizados para cobrir grandes áreas, etc. No entanto, apesar destes benefícios, muitos profissionais do setor da construção não estão familiarizados com o comportamento e as características desses materiais. A falta de informação sobre o uso e as propriedades destes materiais, tanto para os profissionais projetistas como instaladores, limita a sua capacidade de alcançar elevados padrões na garantia da qualidade e gestão da construção. Para estes materiais, os atuais códigos ou regulamentos de construção não são sempre aplicáveis. Por esse motivo, grupos de especialistas estão a desenvolver novos códigos/especificações/diretrizes para a conceção/dimensionamento, construção e teste de estruturas com membranas. Segundo os resultados do inquérito realizado sobre a perceção geral dos instaladores de soluções construtivas com membranas (SMC) (apesar da amostra não ser significativa, contendo apenas respostas de 6 empresas nacionais e 3 internacionais, num universo de 60 inquéritos distribuídos), as empresas salientam a resistência sociocultural e a falta de meios humanos e de formação como limitações principais para o desenvolvimento e aplicação das SCM.
- Setor Buildtech.* Do confronto entre as empresas produtoras de membranas e a construção com estes materiais, verifica-se que a maioria das construções realizou-se no período em que houve maior criação de empresas produtoras de membranas. Ou seja, o mercado da construção tem acompanhado o mercado da



produção destes materiais com pouco desfasamento temporal entre a produção e a aplicação destes produtos. Isso significa que as inovações destes materiais chegam rapidamente ao mercado da construção.

*Inventário de projetos de reabilitação executados com membranas arquitetônicas.* A análise deste inventário mostra que (1) muitos dos edifícios intervencionados, sobretudo nos últimos 15 anos, são classificados como património e (2) existem diversas formas de utilizar membranas arquitetônicas neste contexto específico. Várias estratégias de conceção foram identificadas e confrontadas com os princípios estabelecidos para intervenções em edifícios - destacando boas práticas na atualidade e definindo diretrizes para apoiar a tomada de decisões no futuro. Verificou-se que os materiais em membrana apresentam qualidades inerentes que motivam o seu uso na reabilitação de edifícios, permitindo a conceção de soluções reversíveis e repetíveis. No entanto, o desempenho desses materiais, bem como das soluções construtivas que os incorporam em intervenções de reabilitação, necessitam de ser mais investigadas para garantir a melhor resposta a cada contexto específico. Verificou-se também que as intervenções de reabilitação com soluções que integram membranas têm cada vez mais um caráter permanente de utilização. Esta análise constitui um retrato do estado do conhecimento sobre as possibilidades de reabilitação com membranas.

- (iv) *Património edificado classificado.* A utilização deste tipo de soluções constitui uma forma de superar o problema da conservação e gestão deste tipo de património, devido, pelo menos, a duas razões: rapidez de execução/instalação e facilidade de reverter e/ou repetir o processo. Contudo, é necessário maior investimento na conceção e no desenvolvimento tecnológico desta soluções para torná-las mais discretas e menos visualmente invasivas, especialmente na ancoragem aos elementos estruturais existentes. Verificou-se que, quando deixam de ser necessárias, ou necessitam de ser renovadas, as estruturas em membrana são mais fáceis e rápidas de instalar e desmontar, do que outros sistemas estruturais. Por isso, a sua aplicação em edifícios antigos é altamente recomendada; é menos intrusiva do que as convencionais, evitando danos severos na estrutura original do edifício a intervencionar. Deste modo, quando incluídas em sistemas construtivos para a reabilitação funcional de edifícios, as membranas arquitetônicas dotam os edifícios de uma maior capacidade de adaptação a novas situações e permite que se mantenham atualizados dentro do quadro contemporâneo da sustentabilidade, sobretudo devido ao seu potencial de desconstrução e reutilização, aumentando o ciclo de vida do edifícios intervencionados.
- (v) *Papel de mitigação do risco sísmico.* Reconhece-se que em eventos sísmicos, a utilização de soluções construtivas com membranas assume um papel de mitigação do risco para os ocupantes e para a estrutura pré-existente. Verificou-se que a integração de tecnologias construtivas com membranas está a tornar-se uma prática comum em contextos específicos de reabilitação funcional de edifícios (quer seja para reforço estrutural ou para executar elementos construtivos não estruturais, sobretudo em elementos construtivos horizontais - coberturas ou tetos). Devido ao reduzido peso próprio das membranas, constituem sistemas estruturais altamente eficientes para cobrir, por exemplo, pátios de edifícios antigos, sobretudo se estes se encontrarem implantados em solos com reduzidas propriedades mecânicas e/ou em zonas sísmicas pois não implicam a adição de grandes massas sobre a estrutura antiga. Contudo, neste caso é necessário considerar as tensões transmitidas através dos cabos e mastros à estrutura antiga através dos pontos de ancoragem ao edifício, elementos que são fulcrais no comportamento destas estruturas. Como referido nos capítulos 3 e 4, a capacidade dos materiais em membrana para receber cargas instantâneas extremamente elevadas, combinada com a sua elevada tolerância à deflexão, torna-as adequadas para aplicações em locais sujeitos a terremotos, condições climáticas severas, ou risco de explosão. Pois, p.e. ao contrário do vidro, as membranas não quebram, o que constitui uma mais-valia em termos de proteção para os utilizadores do espaço encerrado com estes materiais. O modo de queda “benigno” das membranas abre caminho a mais aplicações.

No seguimento da caracterização do estado do conhecimento, foi avaliada a eficiência de utilização de soluções com membranas em contextos de reabilitação específicos, numa relação de proximidade com a peculiaridade dos edifícios existentes, com o intuito de validar a utilização de soluções alternativas relativamente às convencionalmente utilizadas.

A reabilitação de edifícios e a consequente seleção/avaliação da eficiência das soluções para esse fim é influenciada por vários parâmetros/critérios. Esta visão global pode fornecer aos decisores todos os elementos necessários para uma eventual justificação das opções tomadas. Nesse sentido, a presente tese tornou possível

examinar as questões específicas deste complexo processo e configurar um modelo de avaliação multicritério estruturado, que considera em simultâneo critérios funcionais, económicos, técnico-construtivos, de impacto ambiental, socioculturais, económicos, de segurança e percetivos. Este modelo incorpora árvores de decisão, métodos multicritério de tomada de decisão (SAW e AHP) e análise de sensibilidade. A avaliação multicritério da eficiência envolveu uma ponderação, determinada através de um grupo de especialistas na área (por isso sujeitas a alguma subjetividade) de todos os critérios avaliados. Esta ponderação depende fortemente do destino/utilização final da intervenção de reabilitação. Por isso, a análise de sensibilidade permite avaliar a robustez do modelo criado, avaliando o impacto da variação de peso de cada critério na decisão final – determinando-se assim qual é a alternativa dominante/mais eficiente. A expectativa do presente estudo é que o modelo de avaliação multicritério proposto, integrado num processo de tomada de decisão, possa ser utilizado em diferentes cenários de reabilitação, servindo de base para futuras avaliações (dado que a atribuição de pesos pode ser atualizada de acordo com as necessidades específicas dos decisores).

Os resultados revelam que o modelo proposto é bem sucedido e ilustra o potencial desta metodologia de avaliação para comparar e quantificar a eficiência de um conjunto finito de diferentes soluções construtivas. Como resultado, obtiveram-se respostas às duas questões fundamentais, formuladas na secção 1.3 do capítulo 1:

**Q2:** *Quais os aspetos avaliados que mais beneficiam/penalizam a eficiência das soluções em membrana? Quando é que as soluções com membranas arquitetónicas constituem uma alternativa eficiente para a reabilitação de edifícios, relativamente às soluções convencionais?*

As membranas constituem uma alternativa eficiente em intervenções de reabilitação, sobretudo quando: (1) o peso é um fator fundamental; (2) a rapidez de montagem e a reversibilidade são um requisito. Considerando a tomada de decisão/avaliação da eficiência segundo o modelo multicritério proposto, nos pontos seguintes apresentam-se os aspetos que mais beneficiam/penalizam a eficiência das soluções em membrana:

- No exercício 1 - integração - verifica-se que quando os aspetos percetivos apresentam pesos superiores a 40%, as soluções em membrana perdem eficiência e deixam de ser as preferidas. Quando os aspetos de impacto ambiental apresentam peso superior a 30%, a solução alternativa em membrana EP2M perde eficiência, mas a solução alternativa em membrana EM é sempre a mais eficiente relativamente às convencionais. Nos restantes aspetos - económicos, construtivos, funcionais, de segurança, sociais/patrimoniais - as soluções dominantes, com maior eficiência relativamente às soluções convencionais, são as soluções alternativas em membrana;
- No exercício 2 – sobreposição - verifica-se que quando os aspetos percetivos apresentam um peso superior a 60%, as alternativas em membrana deixam de ser as mais eficientes/preferidas, dando lugar às convencionais. O mesmo sucede quando os aspetos de segurança passam a ter um peso superior a 60%. Nos restantes aspetos - económicos, construtivos, funcionais, sociais/patrimoniais e ambientais - as soluções dominantes, com maior eficiência relativamente às soluções convencionais, são as soluções alternativas em membrana;
- No exercício 3 – reposição - verifica-se que em todos os aspetos considerados na avaliação realizada, a solução em membrana é a preferida relativamente à solução convencional em vidro. O aspeto em que ambas as soluções se aproximam na preferência é o económico, no cenário de decisão em que este se apresenta com um peso de 100%.

Em particular, o exercício com abordagem de integração permitiu concluir que:

- As soluções construtivas com membranas transparentes não estão capacitadas para substituir as soluções de vidro em todos os cenários de reabilitação. Contudo, apresentam-se como alternativas interessantes nos casos onde o uso do vidro é limitado, sobretudo pelas suas dimensões, peso e custo;
- De um modo geral, a adoção de intervenções de reabilitação funcional com a criação de espaços solares integrados em edifícios antigos, localizados num clima onde as necessidades de aquecimento são muito superiores às necessidades de arrefecimento, beneficia positivamente a redução de consumo energético para aquecimento. Deste modo, não existe a necessidade de reabilitar termicamente as paredes que fazem mediação entre o espaço criado e os compartimentos adjacentes a este, mantendo-se inalterada a sua inércia térmica.

- Verificou-se que o encerramento de varandas com materiais transparentes tem impacto positivo no desempenho funcional dos edifícios existentes, com aumento da área útil e melhoria da durabilidade, do desempenho térmico e acústico. No entanto, inevitavelmente, muitos edifícios antigos estão localizados em áreas com restrições de acesso e físicas para o movimento de materiais, componentes e equipamentos - o que limita o processo construtivo/manutenção – requerendo por isso soluções alternativas. As soluções com vidro são correntemente utilizadas para encerrar varandas, de tal modo que os projetistas assumem que é inevitável utilizar estas soluções. No entanto, as principais desvantagens associadas ao vidro são o peso e o custo - associadas à complexidade da instalação, estrutura e acessórios necessários. O facto de as soluções com membranas requererem menos subestrutura, altera a abordagem arquitetónica - dando mais liberdade para as opções de desenho. Verificou-se que a tecnologia de construção e o processo de instalação de soluções com membranas constituem uma alternativa prática às tradicionais soluções construtivas para encerrar varandas em edifícios antigos.
- Os resultados sobre o comportamento higratérmico e o desempenho energético dos espaços adjacentes e dos espaços de varanda encerrados com as várias soluções de estufa (tradicionais, convencionais, contemporâneas (em vidro) e alternativas (em membrana)) foram obtidos através de ensaios numéricos e o modelo numérico foi calibrado com os resultados dos ensaios experimentais - realizados com um protótipo à escala real (de uma solução em membrana e uma solução em vidro tradicional) instalados no edifício tomado como caso de estudo. Verificou-se que o edifício com as estufas alternativas em membrana apresenta um consumo para aquecimento/arrefecimento de 29 a 40% menos do que o edifício sem estufas (p/orientação solar a poente e sul, pior e melhor opção respetiva e, com posição geográfica na cidade do Porto, ou seja, num clima temperado onde as necessidades de aquecimento são muito superiores às necessidades de arrefecimento), sem reduções prejudiciais na transmissão de luz para os compartimentos adjacentes. O período de retorno económico previsto é de 3 a 7 anos (para a orientação solar identificada como mais favorável da fachada principal da estufa/varanda envidraçada - sul)). Contudo, estes resultados podem variar em função da orientação solar e localização geográfica.

Relativamente ao exercício com abordagem de sobreposição, conclui-se que:

- Para realizar uma ampliação vertical, particularmente, nos edifícios que apresentam limitações estruturais, (p.e. quando a estrutura da ampliação vertical tem de ser desalinhada dos principais elementos estruturais do piso inferior) e que estejam localizados em áreas com restrições de acesso, é necessário ponderar soluções alternativas às convencionais.
- O reduzido tempo de construção com membranas tornam-nas particularmente apropriadas para intervenções de ampliação vertical em situações onde a cobertura existente tem de ser removida (por ser inclinada, por exemplo), deixando o edifício sujeito às intempéries. Para além disso, o peso reduzido das membranas facilita o transporte (fundamental em contextos urbanos com limitações de acesso aos edifícios a intervir) e a instalação, com a conseqüente redução de custos e impacto ambiental;
- Por si só, as membranas não conseguem fornecer as condições para alcançar conforto térmico. Estas são particularmente sensíveis às mudanças das condições climáticas, sendo afetadas muito mais rápido e significativamente do que a maioria dos outros materiais de construção, e por isso necessitam de ser complementadas com outros materiais. Quando integradas num sistema construtivo, as membranas arquitetónicas permitem a adição de outros materiais - com isolamento térmico/acústico e massa térmica não convencional - compondo soluções multicamada que permitem a otimização de cada camada. Deste modo, configuram-se soluções construtivas permanentes, mas com elevado grau de desconstrução/reversibilidade e repetibilidade, indispensáveis em intervenções de reabilitação sustentável. A conceção das soluções alternativas propostas com membranas considera que todos os seus componentes possam ser separados e reciclados no fim da sua vida útil. Além disso, a facilidade de desconstrução deste tipo de soluções favorece intervenções de reabilitação futuras; quando se julgue necessário, é possível remover a ampliação vertical em membrana, ou executar transformações que vão ao encontro das necessidades espaciais/funcionais dos futuros utilizadores do edifício;
- As melhorias funcionais/energéticas alcançadas nas soluções alternativas com membranas arquitetónicas devem-se à adição de outros materiais. No entanto, mesmo assim, a quantidade de recursos empregues é menor e consegue-se, no mínimo, ter o mesmo desempenho funcional/energético, com um peso próprio e impacto ambiental muito inferior ao das soluções convencionais de referência. Em modo sem climatização,

as ampliações verticais em membrana não alteram o comportamento do piso subjacente, ou seja, não o melhoram nem pioram, tanto no inverno como no verão. Mas quando os espaços são climatizados, a situação altera-se e a ampliação vertical em membrana passa a beneficiar o edifício existente, reduzindo o consumo energético necessário para suprir necessidades de aquecimento e arrefecimento;

- Atendendo à variação dos cenários climáticos e geográficos, verifica-se que os territórios com estações de aquecimento mais amenas são favoráveis à adoção das soluções construtivas em membrana com massa térmica não convencional;
- Avaliação do desempenho energético de várias soluções de ampliação vertical para um edifício antigo de acordo as zonas climáticas nacionais. Os resultados mostram que as soluções em membrana beneficiam o edifício existente, mas querem a adição de outros materiais para aumentar o seu desempenho termo-energético, relativamente às soluções convencionais, contudo, isto não penaliza a quantidade total de energia incorporada no ciclo de vida de 60 anos.
- É possível compatibilizar esteticamente as construções com membranas arquitetónicas com construções existentes. Para além disso, e à semelhança das soluções convencionais, as tecnologias de construção com membranas arquitetónicas também podem contribuir para alcançar edifícios com energia positiva, através da integração de elementos fotovoltaicos.
- Os resultados mostram que as soluções alternativas em membrana apresentam uma eficiência económico-ambiental superior à das soluções convencionais, por apresentarem uma boa relação entre os recursos empregues e os resultados obtidos.

No caso do exercício com abordagem de reposição, concluiu-se que:

- A solução proposta em membrana, inserida numa ação de reabilitação com reposição da forma sem adição significativa de massa, constitui uma alternativa eficiente à solução convencional em vidro. A reposição do teto e cobertura é positiva ao nível funcional, sobretudo devido à proteção que a cobertura oferece relativamente à mitigação do risco para os ocupantes, às variações climáticas, às melhorias lumínicas e acústicas.
- Os sistemas construtivos em membrana constituem uma solução alternativa adequada à reabilitação acústica de edifícios, sobretudo nos casos em que as superfícies das paredes e tetos antigos/históricos são muito refletoras e não podem ser alteradas por questões de proteção patrimonial. O caso analisado neste âmbito, o MAC, mostra que a solução com cobertura e teto de membrana apresenta um comportamento acústico adequado para a emissão de música.

**Q1: Qual a eficiência relativa das soluções de reabilitação com membranas?**

Em média, uma solução alternativa em membrana é aproximadamente 25% (+/-5%) mais eficiente do que as soluções correntemente utilizadas nos cenários de reabilitação com abordagens arquitetónicas de integração, sobreposição e reposição. Com base nos resultados da avaliação dos casos de estudo para cada abordagem, verifica-se que: (a) integração (área de intervenção do caso de estudo = 100 m<sup>2</sup>) – a solução alternativa em membrana é 24 a 45% mais eficiente do que a solução convencional com menor e maior eficiência respetiva; (b) sobreposição (área de intervenção do caso de estudo = 70 m<sup>2</sup>) – a solução alternativa em membrana com menor eficiência é 20 a 44% mais eficiente do que a solução convencional com menor e maior eficiência respetiva; (c) reposição (área de intervenção do caso de estudo = 1500 m<sup>2</sup>) – a solução alternativa em membrana é aprox. 80% mais eficiente do que a solução convencional.

Com os diferentes exercícios demonstrou-se que é possível, no âmbito de uma reabilitação funcional, melhorar diferentes aspetos do edifício de uma só vez. Em particular, não é contraditório visar, simultaneamente, uma abordagem estética coerente, com uma redução do consumo de energia e uma melhoria do conforto, com consequentes vantagens económicas e ambientais. Em síntese, os resultados dos diferentes exercícios/casos de estudo mostraram que o modelo configurado nesta tese constitui uma ferramenta eficaz para apoiar o processo de tomada de decisão.

Com o objetivo de avaliar a qualidade de um edifício, determinando a sua eficiência - através da utilização ótima dos materiais de construção e componentes, ao mesmo tempo que se minimiza o consumo de, por exemplo, energia, e a produção de dióxido de carbono, resíduos materiais, etc. - é necessário realizar uma análise do seu

ciclo de vida. Nesta tese, através dos testes de avaliação realizados, verificou-se que, comparativamente às soluções convencionais, a baixa durabilidade das membranas arquitetônicas não penaliza econômica e ambientalmente as soluções de reabilitação que as integram. Contudo, se a durabilidade fosse superior, a sua eficiência relativa seria ainda maior.

Por fim, adverte-se que a reabilitação com membranas arquitetônicas deve atender a princípios de sustentabilidade e não se pode considerar que seja uma solução universal, uma vez que as condições climáticas, a paisagem urbana, a envolvente edificada e os hábitos dos ocupantes não podem ser negligenciados. Em suma, as soluções construtivas com membranas permitem que os edifícios se adaptem e atualizem segundo aspectos contemporâneos de sustentabilidade, apresentando-se como alternativas eficientes às soluções convencionais, com contributos para uma construção sustentável e inovadora. Esta tese aprofundou métodos de construção que podem ser altamente eficazes, com o emprego mínimo de recursos para cumprir objetivos e requisitos comuns, melhorando o ambiente construído, evitando conflitos com a natureza e garantindo a sobrevivência do Homem através da sustentabilidade - um quarto princípio a ser adicionado à filosofia de Marcus Vitruvius (80/70 AC a 13 AC): *firmitas, utilitas, venustas* - isto é, sólida, útil e bela. Contudo, apesar da crescente evolução dos materiais em membrana no passado recente, ainda existe um longo caminho a percorrer, para que estas possam ser aceites e consideradas sustentáveis, atendendo sobretudo a aspectos sociais e culturais quando envolvem construções destinadas a uso residencial. Verificou-se que a promoção de soluções com membranas, para a melhoria do desempenho funcional de edifícios existentes, encontra-se em desenvolvimento, contudo, são necessários mais estudos comparativos entre estas soluções de reabilitação e as soluções convencionais. Por esse motivo, devem ser construídos e testados mais modelos experimentais (para obter dados funcionais e relativos ao processo construtivo) de modo a aumentar o conhecimento e confiança nos resultados obtidos nesta tese, por ensaios numéricos, e no uso de outras soluções de reabilitação com membranas.

Enquanto, no passado, as membranas eram utilizadas, sobretudo, em sistemas de cobertura, atualmente, com a elevada diversidade de requisitos, múltiplas soluções com membranas arquitetônicas constituem uma resposta significativa a muitas necessidades relativas à proteção e valorização do património edificado. O facto de a opção com membrana requerer menos subestrutura, altera a abordagem arquitetónica, permitindo uma maior liberdade nas opções de desenho de modo a compatibilizar esteticamente com a envolvente construída existente. Os principais líderes mundiais para a proteção do património construído têm apoiado cada vez mais o desenvolvimento de soluções em membrana como forma de proteção do património arquitetónico ameaçado, seguindo altos padrões de proteção, flexibilidade e reversibilidade. Em linha com as conclusões retiradas da análise do estado da arte (capítulo 4), salienta-se que as tecnologias de construção com membranas não substituirão as convencionais em todos os casos. As membranas constituem alternativas interessantes e eficientes nos casos onde o uso das soluções convencionais é limitado pelas dimensões, peso, custo e de proteção ao risco. Para além disso, no futuro, se existir uma solução melhor, as tecnologias de construção com membranas permitirão que sejam substituídas de modo eficaz e sem danos para o existente, ou, alternativamente, facilmente repetíveis, comparativamente à maioria das soluções convencionais.

## 9.2. Limitações

Nesta tese configurou-se um modelo para avaliação da eficiência de soluções de reabilitação que poderá servir de base ao desenvolvimento de outras avaliações; este modelo aplicou-se apenas a casos de estudo nacionais, mas pode ser adaptado para casos internacionais. Apesar dos benefícios das técnicas de avaliação multicritério (AHP e SAW) - como a flexibilidade, consistência e facilidade de entendimento -, a sua aplicação consome muito tempo. Na aplicação da técnica AHP, a dificuldade aumenta à medida que o número de parâmetros a serem comparados por pares aumenta. Não obstante a complexidade do modelo de apoio à decisão adotado, este permite que futuros decisores acelerem o processo de avaliação de diferentes alternativas em cenários de reabilitação similares, servindo de base para futuras avaliações, com a possibilidade de alterar os pesos dos critérios.

Salienta-se que nas avaliações realizadas apenas se compararam soluções predefinidas, que podem não ser as ótimas. Essa limitação pode ser superada por outras abordagens, baseadas em métodos numéricos mais complexos, nos quais o cenário de decisão é alargado e onde se podem utilizar procedimentos de otimização

baseados em algoritmos evolutivos, como os algoritmos genéticos. Esses métodos, quando aplicados a problemas com mais de um objetivo, resultam num conjunto de soluções ótimas, cada uma das quais representa um nível específico de compromisso entre os objetivos. Contudo, como o objetivo deste estudo é avaliar em que medida as soluções alternativas em membrana apresentam potencialidades que as tornam mais eficientes do que as soluções convencionais e tradicionais de reabilitação de edifícios, que são facilmente identificadas no estado do conhecimento, a questão relativa à existência de uma solução ótima não se coloca, pois a comparação é feita apenas com soluções convencionais de referência, que para este estudo, não têm de ser necessariamente as ótimas.

Por outro lado, verifica-se falta de informação técnica detalhada, relativa a parâmetros funcionais (higrotérmicos e acústicos) e ambientais por parte de alguns produtores de membranas, necessária para a realização de ensaios numéricos.

### 9.3. Objetivos futuros

Existem várias oportunidades de aplicação dos resultados desta tese, quer desenvolvendo conceitos, quer realizando estudos originais e/ou mais ensaios experimentais. Alguns desses estudos podem ser conduzidos para os seguintes temas:

- (i) *Desenvolvimento de produtos e ensaios de operacionalidade de obturadores com membranas funcionalizadas para implementar estratégias de zonamento térmico e acústico;*
- (ii) *Construção de protótipos e realização de ensaios experimentais a longo prazo com as quatro soluções construtivas em membrana propostas para ampliação vertical de edifícios;*
- (iii) *Construção de protótipo de teto retráctil em membrana com nervuras pneumáticas e cobertura em membrana para realizar ensaios experimentais;*
- (iv) *Adaptação dos edifícios às mudanças climáticas - contributo das soluções em membrana.*
- (v) *Desenvolver o modelo de avaliação da eficiência.* O modelo de apoio à avaliação da eficiência das soluções de reabilitação com membranas, desenvolvido nesta tese, pode ser melhorado em duas vertentes: ao nível da facilitação da utilização do modelo configurado nesta tese (métodos e ferramentas associadas) e ao nível da metodologia. Os decisores, fora do meio académico, não estão, usualmente, familiarizados com os métodos e ferramentas de análise de decisão. Assim, o desenvolvimento de uma interface de fácil utilização (como p.e. BeSmart2 (Tereso & Amorim, 2015)) tem interesse e potencial para motivar a utilização deste modelo. Isso tornaria mais fácil refazer a avaliação. Também se podem adicionar ligações para fornecer dados de entrada ao modelo proposto, a partir de modelos BIM, BEM, LCA e outros ou bases de dados, de modo a flexibilizar e acelerar o processo de decisão. Em termos de melhorias à metodologia proposta, seria interessante que permitisse que os decisores pudessem acrescentar critérios aos inicialmente pré-definidos (obtidos da literatura), para alcançar uma completa avaliação da eficiência. Isso implicaria que fosse feita mais do que uma ronda para a avaliação dos critérios; caso contrário, não seria possível que todos os critérios fossem avaliados por todos os decisores.
- (vi) *Realizar base de dados on-line com os casos de estudo analisados nesta tese e criar um observatório do sector da arquitetura têxtil em Portugal.* Verificou-se nesta tese que existe alguma resistência por parte das empresas instaladoras e projetistas na preconização de soluções de arquitetura têxtil em Portugal. Por isso, futuros estudos devem incidir na organização de conferências e exposições temáticas sobre reabilitar com membranas e dar continuidade ao inquérito iniciado na presente tese sobre perceção geral dos instaladores e projetistas de soluções de reabilitação com membranas arquitetónicas, de modo a recolher mais participações e analisar quais as forças, fraquezas, ameaça e oportunidades deste sector ao nível nacional.

Transversalmente aos estudos sobre os temas de I a IV, devem realizar-se análises de integração estética/otimização do processo construtivo e de desconstrução, bem como de dimensionamento e ensaios de natureza mecânica/estrutural das referidas soluções. Também se devem realizar mais modelos/protótipos funcionais e ensaios experimentais das soluções em membrana propostas nesta tese, de modo a aumentar a confiança nos resultados. Para completar a avaliação da eficiência das soluções de reabilitação propostas com membranas arquitetónicas, é desejável que se adicione uma avaliação estrutural e que se realizem mais ensaios experimentais. Existem indicadores de aspetos estruturais, apresentados nesta tese, que apontam os benefícios deste tipo de soluções para a reabilitação de edifícios existentes.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarhus (2015).** *Drawing of the year 2014*. Consultado em Setembro 15, 2015, em <http://aarch.dk/info/updates/exhibitions/exhibitions-archive/drawing-of-the-year-2014/>
- Adanur, S. (2001).** *Handbook of Weaving*. CRC Press.
- AEICOPS (2011).** *Uma visão revisitada do futuro: tragédia anunciada?* Portugal: ITIC - Instituto Técnico para a Indústria da Construção.
- Aelenei D. Azevedo Leal, H. & Aelenei, L. (2014).** The use of Attached-sunspaces in retrofitting design: the case of residential buildings in Portugal. In *Proceedings of the 2nd International Conference on solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013)* – Energy Procedia (48) – p.1436-1441).
- Airclad (2016).** *Technical Details*. Consultado em Outubro 15, 2017, em <http://www.airclad.com/structure/> (acedido a 15 de Outubro de 2017).
- Alanne, K. (2004).** Selection of renovation actions using multicriteria “knapsack” model. In *Automation in Construction* 13(3): 377–391. Doi:10.1016/j.autcon.2003.12.004
- Alfano A., Romana F. & Dell’isola (2016).** Experimental Air-Tightness Analysis in Mediterranean Buildings after Windows Retrofit. In *Sustainability Journal* 8(10) 991. DOI = {10.3390/su8100991}
- Almeida, M., Bragança, L. & Mendonça, P. (2005).** Potentialities of Lightweight Construction Solutions for Sustainability. In *PALENC 2005, International conference on passive and low energy cooling for the built environment*. Grécia.
- Alonso, A., Sendra, J., Suárez, R. & Zamarreño, T. (2014).** Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners. *Journal of Building Performance Simulation*, 7:5, 360-378. DOI: 10.1080/19401493.2013.848937.
- Anarchlab (2017).** *Anarchlab – equipa*. Consultado em Fevereiro 23, 2017, em <http://www.anarchlab.pt/pages/anarchlab/>
- Andrade Júnior, N. (2009).** Ampliações de edifícios de valor patrimonial: preservação da matéria... e destruição da imagem? In *Anais do 4º Seminário PROJETAR*. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie.
- Antipova, E., Boer, D., Guillén-Gosálbez, G., Cabeza, L. & Jiménez, L. (2014).** Multi-objective optimization coupled with life cycle assessment for retrofitting buildings. *Energy and Buildings* 82, 92–99.
- Antonini, E., Giurdanella, V. & Zanelli, A. (2010).** Reversible Design: Strategies to Allow Building Deconstruction and a Second Life for Salvaged Materials. In *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 28 a 30 junho 28 - June 30, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Itália.
- Archello (2018).** *Meme meadows experimental house*. Consultado em Fevereiro 23, 2018, em <http://archello.com/project/meme-meadows-experimental-house>
- Archeologicalshelters (2012).** *Paul Andreu Architecte: Bibracte archaeological site*. Consultado em Junho 06, 2016, em <https://archeologicalshelters.wordpress.com/2012/06/24/rfr-group-bibracte>
- Archimixing (2016).** *Fuchun Kosa Zou Ma Lou*. Consultado em Junho 18, 2016, em <http://www.archmixing.com/index.php/Works/shownews/id/363>.
- Architen (2009).** *Thermal*. Consultado em Novembro 30, 2015, em <http://www.architen.com/products/thermal/>.

- Architen (2016a).** *ETFE foil – a guide to design*. Consultado em Outubro 15, 2016, em <http://www.architen.com/articles/etfe-foil-a-guide-to-design/>
- Architen (2016b).** *Camellia House*. Consultado em Junho 18, 2016, em <http://www.architen.com/projects/camellia-house>
- Architen (2016c).** *Imagination headquarters*. Consultado em Março 15, 2016, em <http://www.architen.com/projects/imagination-headquarters/>
- Architen (2016d).** *University of West London*. Consultado em Fevereiro 17, 2016, em <http://www.architen.com/projects/university-west-london/>
- Architen (2017).** *ETFE: an Economical Alternative to Glass*. Consultado em Junho 06, 2016, em <http://www.architen.com/technical/articles/etfe-foil-a-guide-to-design>
- Armijos, S. (2008).** *Fabric architecture, creative resources for shade, signage, and shekter*. China: W.W: Norton & Company.
- Arnault, J. & Fernandes, C. (2005).** *Construindo a Memória: As Coleções do Museu Arqueológico do Carmo*. Lisboa: Associação dos Arqueólogos Portugueses.
- Asadi, E., da Silva, M., Antunes, C., Dias, L. & Glicksman, L. (2014).** Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application, *Energy and Buildings* 81, 444–456.
- ATP (2007).** *Estudo: Um Contributo para um Plano Estratégico para a Indústria Têxtil e do Vestuário Portuguesa*. Consultado em Dezembro 3, 2015, em <http://www.atp.pt/fotos/editor2/Plano%20Estrategico.pdf>.
- Avignon Clouet (2015).** *Un Batiment, combien de vies?* Consultado em Junho 18, 2016, em <http://www.avignon-clouet.com/home.php?p=846>
- Baker, P. (2008).** Improving the thermal performance of traditional windows. In *Technical paper 1*, Historic Scotland Glasgow, Caledonian University. Consultado em Dezembro 10, 2016, em [http://www.historic-scotland.gov.uk/gcu-technical-\\_thermal-efficiency-traditional-windows.pdf](http://www.historic-scotland.gov.uk/gcu-technical-_thermal-efficiency-traditional-windows.pdf)
- Barrisol (2015).** *Microabsorber*. Consultado em Dezembro 3, 2015, em <http://www.barrisolusa.com/arrivals/microsorber-by-barrisol>.
- Barrisol (2016a).** *Ignatus de Loyola church*. Consultado em Janeiro 13, 2016, em <http://ca.barrisol.com/en/architect-canadian-projects-ignatus.htm>
- Barrisol (2016b).** *Barrisol essentials 2014*. Consultado em Janeiro 13, 2016, em [http://www.barrisol-bg.com/cdir/barrisol-bg.com/files/BARRISOL\\_ESSENTIALS\\_2014.pdf](http://www.barrisol-bg.com/cdir/barrisol-bg.com/files/BARRISOL_ESSENTIALS_2014.pdf)
- Barrisol (2016c).** *Technical documentation*. Consultado em Janeiro 13, 2016, em <http://en.barrisol.com/PDF/brochures/technical-documentation.pdf>
- Barrisol (2016d).** *Church projects*. Consultado em Janeiro 11, 2016, em <http://www.barrisolsydney.com.au/our-projects/church-projects/>
- Barrisol (2016e).** *Projet accoustic et chauffant*. Consultado em Janeiro 13, 2016, em <http://barrisol.blogspot.pt/2010/12/projet-accoustique-et-chauffant.html>
- Barrisol (2017).** *Ignatus de Loyola church*. Consultado em Junho 16, 2016, em <http://ca.barrisol.com/en/architect-canadian-projects-ignatus.htm>
- Barrisol (2018).** *Church projects*. Consultado em Junho 16, 2016, em <http://www.barrisolsydney.com.au/our-projects/church-projects/>

**Bat Spain (2016).** *Palacio Igartza*. Consultado em Junho 16, 2016, em <http://www.batspain.com/etfe.html>.

**Beccarelli, P. (2015).** The Design, Analysis and Construction of Tensile Fabric Structures. In *Biaxial Testing for Fabrics and Foils*. Springer Briefs in *Applied Sciences and Technology*, Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-02228-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02228-4_2)

**Bell, L. (2018).** *Seminar lecture series, part II: shelter design and construction*. Consultado em Junho 06, 2016, em: <http://sicsa.egr.uh.edu/sites/sicsa/files/files/lectures/shelter-design-and-construction-part-ii.pdf>

**Benson, J. (2015).** *Airbeam technology evolves from Natick to the field to Carnegie Hall*. Consultado em Janeiro 21, 2018, em [https://www.army.mil/article/141686/airbeam\\_technology\\_evolves\\_from\\_natick\\_to\\_the\\_field\\_to\\_carnegie\\_hal](https://www.army.mil/article/141686/airbeam_technology_evolves_from_natick_to_the_field_to_carnegie_hal)

**Berardia, U. & Manca, M. (2017).** The energy saving and indoor comfort improvements with latent thermal energy storage in building retrofits in Canada. In *Energy Procedia* 111 (2017) 462 – 471.

**Berge, B. (1999).** *The Ecology of Building Materials*. Traduzido do norueguês por Filip Henley. Architectural Press Bath.

**Berger, H. (1996).** *Light Structures, Structures of Light. The Art and Engineering of Tensile Architecture*. Basileia: Birkhäuser Verlag.

**Bergsten, S. (2005).** *Industrialized Building Systems: Vertical extension of existing buildings by use of light gauge steel framing systems and 4D CAD tools*. Dissertação de licenciatura, University of Technology; Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Divisão de estruturas metálicas, Luleå, Suécia.

**Bessey, R. (2012).** *Structural Design of Flexible ETFE Atrium Enclosures Using a Cable-Spring Support System*. All Theses and Dissertations. 3811. Consultado em Dezembro 15, 2012 em: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/3811>

**Bine (2009).** Low-e coatings: Soft coverings for demanding applications. In *Projectinfo 05/09*. Alemanha: FIZ Karlsruhe.

**Birdair (2010).** *Membranes*. Consultado em Novembro 10, 2015, <http://www.birdair.com/tensile-architecture/membrane>.

**Birdair (2010).** *Membranes*. Consultado em Novembro 10, 2015, <http://www.birdair.com/tensile-architecture/membrane>.

**Birdair (2017).** Tensile Membrane Structures – energy use and lighting. Consultado em Junho 15, 2017, em <http://www.birdair.com/system/files/Tensile%20Membrane%20Structures%20-%20Energy%20Use%20and%20Lighting.pdf>

**Birdair (2018).** *Design Details*. Consultado em Abril 06, 2018, em <http://www.birdair.com/resources/design-details>.

**BPIE, (2011).** *Europe's buildings under the microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings*. Bruxelas: Buildings Performance Institute Europe.

**Brand, S. (1994).** *How Buildings Learn – What happens after they're built*. Nova Iorque: Penguin Books.

**Browaeys, C. (2011).** *Les matériaux textiles dans la renovation du bâtiment, atouts et performances*. Consultado em Janeiro 14, 2016, em [http://archives.t3nel.eu/Docs/annales\\_BTP\\_mars\\_2012\\_Browaeys.pdf](http://archives.t3nel.eu/Docs/annales_BTP_mars_2012_Browaeys.pdf)

**Burstrand, H. (2000).** Light-Gauge Steel Framing for Housing. In *International Iron and Steel Institute (IISI)*. Västerвик: AB CO Ekblad&CO.

**Byard, P. (2005).** *The Architecture of Additions: design and regulation*. Nova York: W.W. Norton & Company.

- Byrne, C. (2000).** Technical textiles market – an overview. In *Handbook of Technical Textiles*, Horrocks, R. and Annand, S. (editors). Abington: Woodhead Publishing Ltd – The Textile Institute.
- Byrne, C. (2011).** *Handbook of technical textiles*. Cambridge: The Textile Institute CRC Press & Woodhead publishing limited.
- Campbell, D. (1995).** *Tensioned Fabric Membrane Roofs for "Tensegrity" Domes*. In *Proceedings ASCE Structures Congress XIII '95*, ASCE (editor). Boston, E.U.A.
- Campioli, A., Mangiarotti, A. & Zanelli, A. (2008).** Architecture in the Italian context, designing tensile architecture. In *International Journal of Space Structures* 23(4), 201 e 206.
- Campos, M. (2005).** *Nova Arquitetura sobre a Cidade Antiga: o caso de Viena, Áustria*. Sao Paulo.
- Canobbio (2018).** *COEDI*. Consultado em Dezembro 15, 2018, em: <https://www.canobbio.com/coedi-eng>
- Carvalho, A. (2011).** Research Program in Church Acoustics: obtained results for selected churches. Faculty of Engineering of U. of Porto, Portugal. Retrieved 23 July from [https://web.fe.up.pt/~carvalho/igrej\\_dados.htm](https://web.fe.up.pt/~carvalho/igrej_dados.htm).
- Carvalho, A. (2018).** *Environmental and building acoustic (in Portuguese)* 8.14 edition. Departamento de Engenharia Civil, mestrado integrado em engenharia civil, Setembro, Faculdade de Engenharia da U. do Porto, Porto, Portugal.
- Cast (2009).** *Fabric formwork*. Consultado em Maio 18, 2011, em [http://www.umanitoba.ca/cast\\_building/](http://www.umanitoba.ca/cast_building/)
- CE (Commission European) (2003).** *Integrated product policy, building on environmental life-cycle thinking*. Bruxelas: Comissão Europeia.
- Centexbel (2015).** *Buildtech*. Consultado em Novembro 15, 2015, em [http://www.centexbel.be/files/brochure-pdf/buildtech\\_0.pdf](http://www.centexbel.be/files/brochure-pdf/buildtech_0.pdf).
- Cepezed (2016).** *Second skin facade*. Consultado em Março 10, 2016, em <http://www.cepezed.nl/en/projects/58-second-skin-facade>
- Chantrelle, F., Lahmidi, H., Keilholz, W., Mankibi, M. & Michel, P. (2011).** Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Applied Energy* 88, 1386–1394.
- Charalampous, P. & Economou, P. (2016).** An improved user-independent algorithm for room acoustic parameters calculations. In *23rd International Congress on Sound & Vibration*, 10-14 July, Athens, Greece.
- Charleson, A. (2008).** *Seismic Design for Architects. Outwitting the quake*. Routledge.
- Chemlik, V., Urbán, D., Rychtáriková, M. & Glorieux, C. (2015).** The use of textile membranes in architectural acoustics. An overview. Euro Noise 2015, 31 May – 3 June. EAA-NAG-ABAV. Maastricht.
- Cheng, E. W. L. & Li, H. (2001).** Analytic hierarchy process. *Measuring Business Excellence*, 5(3), 30–37.
- Chilton J., Pezeshzadeh S. & Afrin S. (2013).** Embodied energy in ETFE foil construction. In *Tensinet Symposium 2013 [Re]thinking lightweight structures*, Proceedings, Mimar Sinan Fine-Art University, Istanbul, May, pp. 457-466.
- Chilton, J. & Lau, B. (2015).** Lighting and the visual environment in architectural fabric structures. In *Fabric Structures in Architecture*, J. Llorens (editor) Woodhead Publishing Series in Textiles, 165, pp. 203-219.
- Chilton, J. (2013).** Lightweight envelopes: Ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture. In *ICE-Construction Materials*, proceedings 166(6), 343–357.

- Chilton, J., Pezeshkzadeh, S. A. & Afrin, S. (2013).** Embodied energy in ETFE foil construction. In H. [RE]THINKING *Lightweight Structures, Tensinet Symposium Proceeding*; Bogner-Balz, M. Mollaert, E. Puskas (editores), pp. 457-466.
- Chiu, S., Noble, D. & Valmont, E. (2015).** Acoustic in architectural fabric structures: the case of ETFE pillows. In *Fabric Structures in Architecture*, J. Llorens (editor) Woodhead Publishing Series in Textiles, 165.
- CIE EN12464-1 (2011).** *Light and lighting – Lighting of workplaces; Part 1: Indoor work places.*
- Cirillo, E. & Martellotta, F. (2006).** Worship, Acoustics and Architecture. In *Multi Science Publishing Co Ltd.* DOI 10.1260/135101007781998938.
- Clemen, R. & Reilly, T. (2001).** *Making hard decisions with DecisionTools* (2nd rev.). [Pacific Grove, CA] Duxbury Thomson Learning.
- Clevertex (2005).** State of the art. Consultado em Novembro 15, 2015, em [http://109.2.243.201/documents/State\\_of\\_the\\_art.pdf](http://109.2.243.201/documents/State_of_the_art.pdf).
- Clifford, D. (2012).** Optical and Thermodynamic Relationships of an Emerging Class of Organic Phase Change Materials. In *International Journal of Architecture, Engineering and Construction* Vol.1, No. 1, Março, pp. 55-62; DOI: 10.7492/IJAEC.2012.006
- Coelho A., Cabrita A. (2003).** *Habitação Evolutiva e Adaptável.* Portugal: LNEC.
- Coias, V. & Lourenço, P. (2017).** *Survey and assessment of Portuguese heritage using non-destructive methods, in view of its seismic rehabilitations.* Consultado em Junho 26, 2017 <https://www.researchgate.net/publication/242468380>.
- Conselho da Europa (1975).** *Carta Europeia do Património Arquitectónico (Carta de Amsterdão).* Amsterdão, Holanda.
- Coop Himmelblau (2016).** Rooftop remodelling Falkestrasse. Consultado em Maio 17, 2016, em <http://www.coop-himmelblau.at/architecture/projects/rooftop-remodeling-falkestrasse>
- Craven, C. & Garber-Slaght, R. (2011).** *Evaluating Window Insulation.* Alaska: Cold Climate Housing Research Center, Alaska Housing Finance Corporation.
- Crawley, D., Jon W., Michaël K. & Brent T. (2005).** *Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs.* A Joint report by US Department of Energy, Energy System Research Unit, University of Strathclyde, UK, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin- Madison, National Renewable Energy Laboratory, E.U.A.
- Cremers J. (2013).** Environmental Impact of Membrane Materials and Structures – Status Quo. In *Tensinet Symposium 2013 [Re]thinking lightweight structures*, proceedings, Mimar Sinan Fine-Art University, Istanbul, May 2013, 447-456.
- Cremers, J. & Laush, F. (2008).** Translucent high-performance silica-aerogel insulation for membrane structures. In *Detail* 4:410-412 (English Edition).
- Cremers, J. (2007).** Flexible photovoltaics integrated in transparent membrane and pneumatic foil constructions. In: *Proceedings of the CISBAT 2007 conference*, EPFL Lausanne.
- Cremers, J. (2010).** Textiles for insulation systems, control of solar gains and thermal losses and solar systems. In *Textiles, polymers and composites for buildings* (G Pohl editor), 351-374. Reino Unido: Woodhead Publishing/UK.
- Cremers, J. (2011).** Soft skins: innovative foil and textile architecture. In *Technical transactions – Architecture*, issue 11, 108. Polonia: Wydawnictwo, Politechniki Krakowskiej.

- Crone, J. (2008).** Innovatieve waterstaatsarchitectuur. In *Bouwwereld* 4, p. 46-55.
- CTI Timber (2016).** *Housing crisis in London: BMF proposes to add extra storeys on existing buildings.* Consultado em Maio 17, 2016, em <http://www.cti-timber.org/content/housing-crisis-london-bmf-proposes-add-extra-storeys-existing-buildings>
- Cyclocamping (2018).** *NEMO AirSupported Technology® (Nemo AST).* Consultado em Junho 06, 2016, em [https://www.cyclocamping.com/doc/nemo\\_ast.htm](https://www.cyclocamping.com/doc/nemo_ast.htm).
- Cype (2016).** Gerador de peças [computer software]. Portugal: Top Informática.
- Dascalaki, E. & Balaras, C. A. (2004).** XENIOS – a methodology for assessing refurbishment scenarios and the potential of application of RES and RUE in hotels. In *Energy and Buildings* 36:1091–1105. DOI:10.1016/j.enbuild.2004.03.007
- Decision Tools (2018).** Decision Tools (Industrial student version 7.6) [computer software]. Sam McLafferty, Nova Iorque: Palisade.
- Decreto-Lei n.º 118/2013** de 20 de Agosto. *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH).* In *Diário da República n.º159 – 1.ª série*, pp 4988 a 5005. Lisboa: Ministério da economia e do emprego.
- Decreto-Lei n.º 38 382**, de 7 de Agosto de 1951. *Regulamento Geral Das Edificações Urbanas (RGEU).* Portugal.
- Decreto-Lei n.º 38 382/1951**, de 7 de Agosto. Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU). In *Diário da República*, Lisboa, Portugal.
- Demas, M. (2013).** Protective shelters for archaeological sites. In Mosaics in situ. In *An overview of the literature on conservation of mosaics in situ*, T. Roby, & M. Demas (editores), Capítulo 4. Los Angeles: J. Paul Getty Trust. Consultado em Junho 06, 2018, em [http://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/pdf\\_publications/pdf/lit\\_review.pdf](http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/lit_review.pdf)
- Design Builder (2016).** DesignBuilder (versão 5.0.1.24) [computer software]. EnergyPlus Simulation Documentation.
- Despacho n.º15793-F/2013**, de 3 de Dezembro. Proceda à publicação dos parâmetros para o zonamento climático e respetivos dados. In *Diário da República*, 2.ª série – N.º234, Lisboa, Portugal.
- Devulder, T. (2005).** The thermal response of textile membrane constructions. Tese de doutoramento, University of Nottingham, Reino Unido.
- Diretiva 2010/31/EU, 2010.** *Official European Union Journal.* Bruxelas: European Parliament.
- Dlhy, D. & Minarovicova, K. (2014).** Acoustic quality of interior space – options for its improvement. *Akustika*, 3, s.217-30.
- Douglas, J. (2006).** *Building Adaptation (2ª edição).* Reino Unido Heriot-Watt University,Edinburgh/Elsevier.
- Dowson, M. (2012).** *Novel retrofit technologies incorporating silica aerogel for lower energy buildings.* Tese de doutoramento em engenharia civil, Brunel University, Escola de Engenharia e Design, Londres, Reino Unido.
- Duffie, J. & Beckman, W. (2006).** *Solar Engineering of Thermal Processes.* 3ª edição, Wiley, Hoboken.
- Dupont (2015).** *Tyvek.* Consultado em Novembro 15, 2015, em [http://www2.dupont.com/Tyvek/en\\_US/assets/downloads/Atticwrap.jpg](http://www2.dupont.com/Tyvek/en_US/assets/downloads/Atticwrap.jpg)



**EAA (European Aluminium Association) (2013).** *Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry*. Abril 2013:78.

**Eco Membrane (2014).** *Eco Membrane*. Consultado em Novembro 19, 2015, em <http://www.thefreelibrary.com/Eco+membrane.-a021119079>

**EDP (2016).** *Low to Normal Rates Voltage until 20,7kVA (in Portuguese)*. Consultado em Maio 17, 2016, em <https://www.edpsu.pt/pt/particulares/tarifasehorarios/BTN/Pages/TarifasBTNate20.7kVA.aspx>

**EHA (2008).** *New tricks with old bricks, Empty homes agency*. Consultado em Novembro 14, 2018 em <http://www.emptyhomes.com/documents/publications/reports/new%20tricks%20with%20old%20bricks%20-%20final%2012-03-081.pdf>

**El Croquis (2015).** *Lacaton & Vassal*. In 1993-2015 Post Media Horizon, no 177-178. El Croquis: Spain.

**Elements (2017).** Software LLC.Version 1.0.5; Updated 2015.10.27; Copyright © 2014-2015 Big Ladder Software LLC; Big Ladder Software & Rocky Mountain Institute.

**EN 15804—2012.** *Sustainability of construction works, Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products*.

**EN ISO 14044:2006-10 (2006).** *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)*. English version EN ISO EN ISO 14044.

**Energy Plus (2013).** *The Reference to EnergyPlus Calculations*. Consultado em Junho 20, 2017, em <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

**English Heritage (2004).** *Building Regulations and Historic buildings, balancing the needs for energy conservation with those of building conservation: an interim guidance note on the application of Part L*. Consultado em Outubro 16, 2015, em <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/energy-efficiency-historic-buildings-ptl/heag014-energy-efficiency-partll/>

**ENOB (2015).** *Membrane constructions for building refurbishment*. Consultado em Novembro 19, 2015, em <http://www.enob.info/en/slideshow/bilder/membrane-constructions-for-building-refurbishment/mesg-fassade-bergwacht-bayern//projekte/>

**ENOB (2015).** *Membrane constructions for building refurbishment*. Consultado em Novembro 19, 2015, em <http://www.enob.info/en/slideshow/bilder/membrane-constructions-for-building-refurbishment/mesg-fassade-bergwacht-bayern//projekte/>

**ENOB (2016).** *Children day care center, Wismar*. Consultado em Junho 08, 2018, em <http://www.enob.info/en/refurbishment/projects/details/childrens-day-care-centre-in-wismar/>

**Enterra (2018).** EnTerra Solar Holding. Consultado em Junho 29, 2018, em <http://www.enterra-holding.com/alternative-energies/index.html>

**EPD (2012).** Environmental Product Declaration for the laminated glass. In *Saint Gobain, AFNOR Registration Number 08-260*: 2011, Novembro.

**Euratex, (2006).** *The Future is textiles! Strategic research agenda*. Bélgica: ETP - European Technology Platform for the Future of Textiles and Clothing.

**Euroconstruct (2018).** 85th Euroconstruct Summary Report. European Construction: Market Trends until 2020. In *85th Euroconstruct Conference 7–8 June 2018*, Buildecon, Helsinquia, Finlândia.

**Euroconstruct (2018a).** European Construction: Market Trends until 2020 - Summary Report; *85th Euroconstruct Conference, 7-8 June 2018*, Helsinquia, Finlândia.

- Euroconstruct (2018b).** European Construction: Market Trends until 2020 - Country Report; *85th Euroconstruct Conference*, 7-8 June 2018, Helsinquia, Finlândia.
- Eurostat (2013).** *Electricity and natural gas price statistics - Statistics explained*. Consultado em Maio 17, 2016, em [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Electricity\\_and\\_natural\\_gas\\_price\\_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Electricity_and_natural_gas_price_statistics).
- Evening Standard (2016).** *Zac Goldsmith: Add two storeys on to public buildings to help solve London housing crisis*. Consultado em Fevereiro 26, 2016, em: <https://www.standard.co.uk/news/mayor/zac-goldsmith-add-two-storeys-on-public-buildings-to-help-solve-london-housing-crisis-a3189821.html>
- Ewing, B., Moore, D., Goldfinger, S., Oursler, A., Reed, A. & Wackernagel, W. (2010).** *The Ecological Footprint Atlas 2010*. EUA: Global Footprint Network.
- Extech (2017).** *Extech 42270: Temperature/Humidity Datalogger (online)*. Consultado em Junho 20, 2017, em <http://www.extech.com/display/?id=14242>
- Fabric Architect (2018).** Costs. Consultado em Outubro 08, 2016, em <http://www.fabricarchitect.com/faq.html>
- Faegre, T. (1979).** *Tents, architecture of the nomads*. Londres: John Murray.
- Federal Fabrics (2017).** *Carnegie Hall*. Consultado em Janeiro 21, 2019, em <https://www.federalfabrics.com/carnegie-hall/>
- Ferreira, J. Pinheiro, M. & Brito, J. (2013).** Refurbishment decision support tools: a review from Portuguese user's perspective. *Construction and Building Materials* 49 (2013) 425–447.
- Ferreira, J., Pinheiro, M. & Brito, J. (2013).** Refurbishment decision support tools review—Energy and life cycle as key aspects to sustainable refurbishment projects. In *Energy Policy*, Volume 62.
- Figueiredo, A., Varum, H., Costa, A., Silveira, D. & Oliveira, C. (2012).** Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall. In *Materials and Structures*, RILEM.
- Floret (2017).** *Equipa*. Consultado em Junho 20, 2017, em <https://floret.pt/nos/equipa/>
- Forman, E. & Peniwati, K. (1998).** Aggregating individual judgements and priorities with the Analytic Hierarchy Process. In *European Journal of Operational Research* 108, pp. 165-169.
- Forster, B. & Mollaert, M. (2009).** *Arquitectura Textil: Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas*. Juan Monjo Carrió (co-edito versão espanhola). Espanha: Tensinet/Editorial Munilla-Leria
- Forster, B. (2007).** *Progettare con le membrane*. Maggioli, Rimini, p. 154.
- Forster, B. (2007).** *Progettare con le membrane*. Maggioli, Rimini, p. 154.
- Foster & Partners (2015).** *Free University*. Consultado em Dezembro 02, 2015, em <http://www.fosterandpartners.com/projects/free-university/>
- Foster + Partners (2016).** *Dresden Train Station Redevelopment*. Consultado em Junho 08, 2018, em <http://www.fosterandpartners.com/projects/dresden-station-redevelopment/>
- Fragoso, R. (2015).** Eficiência energética nos edifícios de habitação. In livro de atas *PATORREB 2015 - 5.ª Conferência sobre patologia e reabilitação de edifícios*, FEUP, Porto, Portugal.
- Free Library (2016).** *Eco membrane*. Consultado em Janeiro 11, 2016, em <http://www.thefreelibrary.com/Eco+membrane.-a021119079>

- Freitas, V. & Pinto, P. (1998).** *Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção – Condensações Internas* (2ª edição). Nota de informação técnica 002, LFC. Lisboa: LNEC.
- Freitas, V. (2015).** *Caderno de síntese tecnológica – reabilitação de edifícios - reflexão sobre a estratégia para a reabilitação em Portugal*. Documento elaborado no âmbito do grupo de trabalho de reabilitação da Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção (PTPC).
- Freitas, V.; Ferreira, C.; Vieira, M.; Valentim, N.; Fernandes, E.; Samúdio, M; Craveiro, F. (2010).** "Reabilitação de Edifícios do Centro Histórico do Porto. Guia de Termos de Referência para o Desempenho Energético Ambiental". Porto Vivo, SRU: Porto, Portugal. p. 11
- Futureng (2016).** *Solar do Castelo*. Consultado em Maio 17, 2016, em <http://www.futureng.pt/portfolio:solar-do-castelo>
- Getter, K., Rowe, D., Robertson, G., Cregg, B. & Andresen, J. (2009).** Carbon sequestration potential of extensive green roofs. In *Environmental Science and Technology* 43 (19), 7564e7570.
- GGroup (2017).** *Mini crane and hydraulic lifter*. Consultado em Junho 06, 2018, em <http://www.ggrgroup.com/news/mind-the-gap-unic-mini-crane-and-hydraulic-lifter/>
- Giachi, F. (1991).** *European Patent 0494053A1*.
- Giebler, G., Fisch, R., Krauss, H., Musso, F., Petzinka, K. Rudolphi, A. (2009).** *Refurbishment manual: maintenance, conversions, extensions*. Basileia: Detail/Birkhauser Verlag AG.
- Glaeser, L. (1978).** *The work of Frei Otto and his teams 1955-1076*. Alemanha: Institute of Lightweight Structures.
- Goldsmith, Z. (2017).** *Add two storeys on to public buildings to help solve London housing crisis*. Consultado em Outubro 15, 2017, em <http://www.standard.co.uk/news/mayor/zac-goldsmith-add-two-storeys-on-public-buildings-to-help-solve-london-housing-crisis-a3189821.html>
- Gonçalves, D. (2010).** *Validação de modelos de cálculo por comparação com medições "in situ"- Condições de fronteira*. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Gonçalves, H., Oliveira, M., Patrício, A. & Cabrito, P. (1998).** Passive Solar Buildings in Portugal – Experiences in the Last 20 Years. In *Proceedings of PLEA' 98*. Lisbon: James & James Science Publishers Ltd.
- Gonzales, A., Neila, J. & Monjo, J. (2012).** The Potential Use of Pneumatic Envelopes in Existing Buildings Retrofitting. In *PLEA 2012 – 28<sup>th</sup> Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture*, Lima, Perú; 7 -9 November.
- González, A., Neila, J., Monjo, J. (2011).** Pneumatic skins in architecture. Sustainable trends in low positive pressure inflatable systems. In *Procedia Engineering* 00 (2011) 000–0, pp. 125 – 132. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.1995.
- Grabe, T. (2010).** *Tents, Sails, and Shelter: Innovations in Textile Architecture*. Werner Lang (editor), pp.6. EUA: Aurora McClain, School of architecture of University of Texas at Austin.
- Graça & Mendes Lda (2016).** *Catálogo de cortina vertical PVC*. In *Tolniber*, Portugal.
- Grebe, J. (2015).** *Technical Textiles, Prospects and Challenges*. In press conference Commerzbank, Corporate Sector Analysis Frankfurt Jan. 16.
- Grogolwski, M., Grubb, P. & Lawson, R. (2001).** *Modular construction using light steel framing: design of residential buildings*. SCI-P-272, Ascot: Steel Construction Institute.
- Guedes, J., Costa, A., Arêde, A. & Pauperio, E. (2003).** Conservação e reforço de estruturas património. In *Jornadas Europeias do Património*, Cascais, 19 e 29 setembro.

- Gybe (2018).** Design. Consultado em Junho 06, 2018, em [www.gybe-design.com/business](http://www.gybe-design.com/business)
- Hale, D., Hoover, M. & Oneill, M. (1971).** *Phase change materials handbook*. Consultado em Novembro 19, 2015, em <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19720012306.pdf>
- Hammond, G. & Craig, J. (2008).** *Inventory of carbon & Energy (ICE)*. Reino Unido: Universidade de Bath.
- Harvie, G. (1995).** *An investigation into the thermal behaviour of spaces enclosed by fabric membranes*. Tese de doutoramento. Cardiff: Cardiff University of Wales.
- Haschen (2015).** *Koppen*. Consultado em Novembro 19, 2015, em <http://hanschen.org/koppen/>.
- Heinzelmann, F, Bristogianni, T. & Teuffel, P. (2015).** Functional layered textiles in architecture. In *Fabric Structures in Architecture*, J. Llorens (editor) Woodhead Publishing Series in Textiles, 165.
- Herzog T. (1976).** *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft*. Estugarda: Hatje.
- Herzog, T. (2014).** *Eco Membrane*. Consultado em Janeiro 11, 2016, em [http://www.thomasherzogarchitekten.de/Warehouse\\_english.html](http://www.thomasherzogarchitekten.de/Warehouse_english.html)
- Herzog, T., Krippner, R. & Lang, W. (2005).** Atlante delle facciate. In *Utet*, Torino.
- Herzog, T., Krippner, R. & Lang, W. (2005).** Atlante delle facciate. In *Utet*, Torino.
- Heybroek, V. (2014).** Textile in Architecture. Dissertação de mestrado em arquitetura. Consultado em Dezembro 12, 2015, em Lab Bouwkunde - TU Delft. Disponível em: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Affc472a7-b27a-4405-b623-b4433577e619/>
- Heysea, P., et al. (2015).** MULTITEXCO – High Performance Smart Multifunctional Technical Textiles for the Construction Sector. In *Procedia Engineering* 114, pp 11–17, 1st International Conference on Structural Integrity. Doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.012.
- Hilliaho, K. (2017).** *Energy Saving Potential and Interior Temperatures of Glazed Spaces: Evaluation through Measurements and Simulations*. Consultado em Junho 20, 2017, em [https://tutcris.tut.fi/portal/files/11372696/hilliaho\\_1480.pdf%20pagina%2059](https://tutcris.tut.fi/portal/files/11372696/hilliaho_1480.pdf%20pagina%2059)
- História de Portugal (2011).** *Convento do Carmo*. Consultado em Abril 05, 2018, em <http://www.historiadeportugal.info/convento-do-carmo/>
- Historic Scotland (2015).** Short Guide: Fabric Improvements for Energy Efficiency in Traditional Buildings. Consultado em Julho 10, 2017, em <https://pub-prod-sdk.azurewebsites.net/api/file/f90b9ffe-401f-45fd-a610-a69400be56ca>
- Holscot (2017).** *Holscot Fluoroplastics Ltd*. Consultado em Junho 20, 2017, em [www.holscot.com](http://www.holscot.com).
- Horden, R. (1995).** *Light Tech, towards a light Architecture*. Basileia: Birkhäuser.
- ICOMOS (1994).** *Documento de Nara sobre a Autenticidade do Património Cultural*. Nara, Japão.
- ICOMOS (2003).** *Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico*. Victoria Falls, Zimbabué.
- ICOMOS (2011).** *The Paris Declaration on heritage as a driver of development*. UNESCO headquarters, Dezembro 1, 2011, durante a 17ª Assembleia Geral do Comité Internacional Monumentos e Sítios (ICOMOS). Paris: ICOMOS. Disponível em: [https://www.icomos.org/Paris2011/GA2011\\_Declaration\\_de\\_Paris\\_EN\\_20120109.pdf](https://www.icomos.org/Paris2011/GA2011_Declaration_de_Paris_EN_20120109.pdf)
- IEC 60268-16:2011.** Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index

**IFAI (2008).** *Fabric structures*. Consultado em Janeiro 21, 2019, em [www.ifaijapan.com/secure/2008fa/0908FA\\_DigitalEditionul.pdf](http://www.ifaijapan.com/secure/2008fa/0908FA_DigitalEditionul.pdf)

**INE (2011).** Resultados preliminares do Censur 2011. *Instituto Nacional de Estatística*. Consultado em Março 10, 2015, em [http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011\\_apresentacao](http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011_apresentacao).

**INE (2012).** *Censos 2011: Resultados definitivos*. Consultado em Maio 17, 2016, em [http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011\\_apresentacao](http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011_apresentacao)

**INE (2013).** *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação - Análise e Evolução 2001 a 2011 (edição 2013)*. Consultado em Junho 29, 2018, em [https://www.ine.pt/ngt\\_server/attachfileu.jsp?look\\_parentBoui=165468783&att\\_display=n&att\\_download=y](https://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=165468783&att_display=n&att_download=y)

**INE (2015).** *Estatísticas da Construção e Habitação - 2014*. Consultado em Fevereiro 08, 2017, em [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes&PUBLICACOESpub\\_boui=224786561&PUBLICACOESmodo=2](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=224786561&PUBLICACOESmodo=2)

**INE (2016).** *Estatísticas da Construção e Habitação - 2015*. Consultado em Fevereiro 08, 2017, em [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes&PUBLICACOESpub\\_boui=265140997&PUBLICACOESmodo=2](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=265140997&PUBLICACOESmodo=2)

**INE (2017).** *Estatísticas da Construção e Habitação - 2016 (edição de 2017)*. Consultado em Junho 29, 2018, em [https://www.ine.pt/ngt\\_server/attachfileu.jsp?look\\_parentBoui=298601366&att\\_display=n&att\\_download=y](https://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=298601366&att_display=n&att_download=y)

**Inke, Y. (2018).** *Isoropia*. Consultado em Outubro 20, 2018, em <https://yuliyasinke.com/Isoropia>

**Isbert, A. (1998).** *Diseno acústico de espácios arquitetónicos*. Barcelona: Edicions UPC.

**Iselin, D. & Lemer, A. (1993).** The fourth dimension in building: strategies to minimizing obsolescence. In *Committee on facility design to minimize premature obsolescence, Building Research Board*. Washington: National Academy Press.

**Ishii, K. (1995).** *Membrane structures in Japan*, pp.307 -309. Tóquio: SPS publishing company.

**Isler, H. (1967).** Clear-Transparent roof for a court. In *International Colloquium on Pneumatic Structures*, University of Stuttgart, p. 49.

**ISO 13788:2012-en.** *Hygrothermal performance of building components and building elements; Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation; Calculation methods*. CEN/TC 89 - Thermal performance of buildings and building components.

**ISO 14040/14044 (2006).** Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.

**ISO 3382-1 (2009).** *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces*.

**ISO 3382-2 (2008).** Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.

**ISO 3382-2 (2016).** *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*.

**ISO 3382-3 (2012).** *Acoustics - Measurements of room acoustic parameters - Part 3: Open Plan Offices*.

**Itard L, Meijer F, Vrins E. & Hoiting H. (2008).** Building renovation and modernisation. In *Europe: state of the art review*. Delft: Delft University of Technology, OTB Research Institute for Housing, Urban and Mobility Studies.

**ITE 50.** Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. Editora: LNEC.

**Jeska, S. (2007).** *Transparent plastics – design and technology*. Basileia, Boston, Berlim: Birkhauser.

**Jourda & Perraudin Architects (2017).** *Lyon Vaise (1989)*. Consultado em Junho 11, 2017, em <http://www.jourda-architectes.com/projet.php?code=mava>

**Juan, Y., Kim, J., Roper, K., Castro-Lacouture, D. (2009a).** GA-based decision support system for housing condition assessment and refurbishment strategies. In *Automation in Construction* 18(4): 394–401.

**Juan, Y., Perng, Y., Castro-Lacouture, D., Lu, K. (2009b).** Housing refurbishment contractors' selection based on a hybrid fuzzy-QFD approach. In *Automation in Construction* 18(2): 139–144.

**Kaklauskas, A., Zavadskas, E. & Trinkunas, V. (2007).** A multiple criteria decision support on-line system for construction. In *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 20 (2), pp 163-175.

**Karlsson, S. (2017).** Spontaneous fracture in thermally strengthened glass - A review & outlook. In *Ceramics Silikaty* 61. 188-201.

**Kawaguchi, K. (2000).** New approach for retractable membrane structures. In *IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications*, Simon D. Guest (eds); pp 193-199.

**Kawaguchi, K. (2009).** *Wide-Roof Buildings in Earthquakes*. Consultado em Junho 06, 2018, em [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-4-431-74093-3\\_9#page-2](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-4-431-74093-3_9#page-2)

**Kawaguchi, K. (2015).** Recent developments in architectural fabric structures in Japan. In *Fabric Structures in Architecture*, J. Llorens (editor), Woodhead Publishing Series in Textiles 165, pp. 687–725.

**Kennedy & Violich (2013).** *IBA Soft House*. Consultado em Dezembro 2, 2015, em <http://www.kvarch.net/projects/87>

**Kennedy & Violich (2017).** *Projects*. Consultado em Junho 08, 2017, em <http://www.kvarch.net/projects/88>

**Kibert, C. (2008).** *Sustainable construction: green building design and delivery*. EUA: John Wiley and Sons Inc.

**Kirstein, T. (2013).** The future of smart textiles development: new enabling technologies, commercialization and market trends. In *Multidisciplinary Know-How for smart textiles developers*, T. Kirstein (editor). DOI: 10.15339780857093530.1.

**Knippers J., Cremers J., Gabler M. & Lienhard J. (2011).** *Construction Manual for Polymers + Membranes*. Munique/ Nova Iorque: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, Detail/Birkhäuser. pp 6-7, 10, 24 – 27.

**Koch, K. (2004).** *Bauen mit Membranen*. Munique: Prestel.

**Komatsu Matere (2018).** *Komatsu Matere Fabric Laboratory [Fa-Bo]*. Consultado em Junho 11, 2017, em <https://www.komsumatere.co.jp/cabkoma/en/>

**Kottek, M. (2006).** *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*. In *Meteorol* 15, pp. 259-263.

**Kroersch, S. (2016).** *Graues Haus*. Consultado em Junho 08, 2017, em <http://www.kroetsch.net/architektur/index.php?id=6&art=2&typ=no&>

**Kronenburg, R. (1995).** *Houses in motion: the genesis, history and development of portable building*. Reino Unido: Academy editions.

**Krüger, S. (2009).** *Textile architecture*, p.6, pp.28 & pp.82-83. Berlim: Jovis Verlag



- Krüger, S. (2009b).** *Textile in Architecture*, pp.29: The Last Supper (Segundo Marcos 14, verso 18-20) Dogma do Imperador Henrique II, Biblioteca Municipal de Munique.
- Kugel, N. (2013).** Textile roofing, castle ruins of Thierstein. Consultado em Março 06, 2018, em <http://www.kugel-architekten.com/content.php?n=1&d=28>.
- Kugel, N. (2014).** *Retractable roof in Buchs*. Consultado em Junho 06, 2018, em [http://www.kugel-architekten.com/content/projekt\\_031\\_box/031\\_imgbox\\_bauwerk.php](http://www.kugel-architekten.com/content/projekt_031_box/031_imgbox_bauwerk.php)
- Kugel, N. (2015).** *Retractable roof, fortress Kufstein*. Consultado em Dezembro 03, 2015, em [http://www.kugel-architekten.de/content/projekt\\_001\\_box/001\\_imgbox\\_bauwerk.php?lan=en](http://www.kugel-architekten.de/content/projekt_001_box/001_imgbox_bauwerk.php?lan=en)
- Kunstmuseen (2016).** *Die Künstlergruppe Haus-Rucker-Co installierten eine Traglufttulle. Hier ist sie noch nicht aufgeblasen. Kunstmuseen/Heinz Engelskirchen*. Consultado em Março 13, 2016, em <http://aaa-laboratory.blogspot.pt/p/introduction.html>
- Kvarch (2009).** *Soft Cities*. Consultado em Fevereiro 15, 2017, em <http://www.kvarch.net/projects/88>
- Lam, Y. (2005).** Issues for computer modelling of room acoustics in non-concert hall settings. In *Acoustical Science and Technology* 26, 145-155.
- Lana Di Terzi, F. (1670).** *Prodromo Overo saggio di alcune inventioni nuove premesso all'Arte maestra*. Brescia: Rizzardi.
- Lang, W., Cremers, J., Beck, A. & Manara, J. (2013).** New envelopes for old buildings – the potential of using membrane systems for the thermal retrofitting of existing buildings. In *Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems – Strauss, Frangopol & Bergmeister* (editores). Reino Unido: Taylor & Francis Group.
- Latour, B. (2000).** *Du principe de précaution au principe du bon gouvernement: vers de nouvelles règles de la méthode expérimentale*. Disponível em: <http://www.bruno-latour.fr/poparticles/poparticle/p088.html>
- LCT (2012).** *Razones para construir sobre edificios*. Consultado em Maio 03, 2016, em <http://www.lacasaporeltejado.eu/es/blog/razones-para-construir-sobre-edificios/>
- LCT (2013).** *Construir sobre construído*. Consultado em Maio 03, 2016, em <http://www.lacasaporeltejado.eu/es/blog/construir-sobre-construido/>
- LCT (2016).** *Sobreelevar o reemplazar*. Consultado em Maio 03, 2016, em <http://www.lacasaporeltejado.eu/es/blog/sobreelevar-o-reemplazar/>
- Le Moniteur (2016).** *Grefe habitable*. Consultado em Outubro 10, 2016, em <http://www.lemoniteur.fr/article/un-prototype-d-extension-de-facade-a-l-insa-strasbourg-33521768>
- Lecuyer, A. (2008).** *ETFE Technology and Design*. Berlim: Birkhauser.
- Lee, Y.-& Gilleard, J. (2002).** Collaborative design: a process model for refurbishment. In *Automation in Construction* 11, 535–544.
- Lemken, T. (2008).** New Glory for old sites. In *Daylight & Architecture*, Re-new #10 winter. Velux.
- Lewis, W. (2003).** *Tension structures: form and behaviour*. Londres: Thomas Telford.
- LFC (2017).** *Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)*. Consultado em Abril 01, 2017, em [www: http://paginas.fe.up.pt/~lfcsc/estacao.html](http://www.paginas.fe.up.pt/~lfcsc/estacao.html)
- Lihenard, J. & Knippers, J. (2015).** Bending-Active Textile Hybrids. In *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* (IASS), Março.
- Lizana, J., Barrios-Padura, A., Molina-Huelva, M. & Chacartegui, R. (2016).** Multi-criteria assessment

for the effective decision management in residential energy retrofitting. *Energy and Buildings* 129, 284–307.

**Llorens, J. & Zannelli, A. (2016).** Structural membranes for refurbishment of the architectural heritage. In *International Symposium on "Novel structural skins - Improving sustainability and efficiency through new structural textile materials and designs"*, Procedia Engineering 155 (2016) 18 – 27.

**Llorens, J. (2015).** Preface. In *Fabric Structures in Architecture*, Woodhead Publishing Series in Textiles 165, J. Llorens (editor).

**LNEG (2017).** *Aplicação informática com Anos meteorológicos de referência para simulação dinâmica*. Consultado em Outubro 15, 2017, em <http://www.lneg.pt/divulgacao/noticias-institucionais/278>

**Louro, A., Catarino, J., Pipa, M. & Pontífice, P. (2016).** A nova geração de eurocódigos estruturais. In *2º Encontro Nacional sobre Qualidade e Inovação na Construção - QIC2016*, Lisboa; LNEC; 21 a 23 de novembro.

**Luderwaldt Verhoff Architekten (2016).** *Neo leo vertical living*. Consultado em Junho 05, 2016, em disponível em: [http://www.convertiblecity.de/projekte\\_projekt19\\_en.html](http://www.convertiblecity.de/projekte_projekt19_en.html)

**Ma, J. & Kawaguchi, K. (2016).** Preliminary research on thermal performance and energy saving effect of a void space of a room with a retractable membrane ceiling. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*.

**Ma, Z., Cooper, P., Daly, D. & Ledo, L. (2012).** Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art. In *Energy and Buildings* 55 (0), 889–902.

**Maccarthy, I. (1998).** Prefabricated Building Method using Cold-formed Steel components. In *Journal of Constructional Steel Research*, 417, 46:1-3.

**Macieira, M. (2012).** *Membranas divisórias: potencialidades de utilização no interior de edifícios*. Dissertação de mestrado em arquitetura, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

**Macieira, M., Mendonça, P. & Guedes, J. (2016).** Functional rehabilitation of built industrial heritage with architectural membranes: contextual, climatic and functional aspects. In *III International Congress on Industrial Heritage – Reuse of Industrial sites: a challenge for heritage conservation*, p. 169, Lisbon.

**Macieira, M., Mendonça, P. & Guedes, J. (2017).** Architectural membranes on building's functional refurbishment. In *ICBMM 2017; IOP Publishing; IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 264 (2017)

**Maffei, R. (2012).** *Sheltering in emergency: processes and products, textile kit for immediate response*. Tese de doutoramento em tecnologia e projeto do ambiente construído, Politécnico de Milão, Itália.

**Maile, T., O'Donnell, J., Bazjanac, V. & Rose, C. (2007).** *Building Performance Simulation Tools. A Life Cycle and Interoperable Perspective*. Stanford University. E.U.A.

**Manara, J. et al. (2013).** Lightweight Envelopes for Energy Efficient Buildings: Energy Saving by Covering Courtyards with Membrane Systems. In *SB13 - Sustainable Building Conference*, Munique, Abril 24-26.

**Mansfield, J. (2002).** What's in a name? Complexities in the definition of "refurbishment. In *Property Management* 20 (1):23-30.

**Manso, A., Fonseca, M. & Espada, J. (2004).** *Informação sobre Custos. Fichas de Rendimentos*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

**MAP3 (2017).** *Project*. Consultado em Março 26, 2018, em <http://map3.net/fr/projet.html>

**Markets & Markets (2016).** *Technical textile market - global forecast to 2020*. In REPORT CODE: AD 1528.

**Markets & Markets (2018).** *Smart Textiles Market by Type (Passive, Active, Ultra-smart), Function (Sensing, Energy Harvesting, Luminescence & Aesthetics, Thermo-electricity), Industry (Healthcare, Sports, Architecture, Military, Automotive), & Geography - Global Forecast to 2020.* Consultado em Dezembro 02, 2015, em <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/smart-textiles-market-13764132.html>

**Masera, G. et al. (2017).** Development of a super-insulating, aerogel-based textile wallpaper for the indoor energy retrofit of existing residential buildings. In *International High-Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16)*, IHBE 2016, Procedia Engineering 180 (2017) 1139-1149.

**Mattila, J. (2002).** *Balcony glazing protects the building structures.* Consultado em Abril 10, 2017, em [//okostyle.spb.ru/content/files/balkony-l.pdf](http://okostyle.spb.ru/content/files/balkony-l.pdf)

**Maywald, C. & Reisser, F. (2016).** Sustainability – the art of modern architecture. In *International Symposium on “Novel Structural Skins: Improving sustainability and efficiency through new structural textile materials and designs”*, Procedia Engineering 155 (2016), pp. 238-248.

**McLennan, P., Nutt, P. & Walters, R. (1998).** *Refurbishing occupied buildings: management of risk under the CDM regulations.* Reino Unido: Thomas Telford.

**Meeus, L., et al. (2012).** How to refurbish all buildings by 2050? Final report of the EU FP7 Funded Research project THINK (Topic n° 7/12) Consultado em Outubro 19, 2015, em <https://www.eui.eu/Projects/THINK/Documents/Thinktopic/THINKTopic72012.pdf>

**Ménard, J. (2013).** Lyon, la métamorphose d'un garage en bureaux high-tech. In *Les cahiers techniques du bâtiment*, 323. Consultado em Dezembro 20, 2018, em: <http://www.viguiet.com/en/publication/57/Les-Cahiers-Techniques-du-Batiment-n323>.

**Mendonça, P. & Macieira, M. (2013).** ADjustMEMBRANE: Innovative Lightweight Adjustable Partition Wall System. In *International Journal of Architectonic, Spatial, and Environmental Design*, Vol.7, Issue 2; Common Ground Publisher; University of Illinois Research Park, Champaign, USA, pp 39-50.

**Mendonça, P. (1997).** *Aplicações inteligentes dos têxteis em arquitetura.* Dissertação de mestrado em Têxtil, Design e Marketing, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

**Mendonça, P. (2005).** *Habitar sob uma segunda pele – estratégias solares passivas para a redução do impacto ambiental de construções em climas temperados.* Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

**Mendonça, P. (2010).** Low-span lightweight membranes in housing – environmental and structural potentialities. In *Structures and Architecture*, Paulo Cruz (Editor). Londres: Taylor & Francis Group.

**Mendonça; P. (2014).** ADjustMembrane: Membrana divisória adaptável. *Revista Materiais de Construção* 169.

**Menke, M. (2013).** *Sustainable building with technical textiles.* Consultado em Fevereiro 15, 2016, em <https://www.techtextil-blog.com/en/sustainable-building-with-technical-textiles/>

**Mestre, V. (1997).** *Arquitetura Popular da Madeira.* Portugal: Argumentum.

**Meyer, F. (2009).** Low-e coatings: Soft coverings for demanding applications. In *EGGENSTEIN-LEOPOLDSHAFEN, FIS KARLSRUHE, BINE-projektinfo* 05/09.

**Milwich, M. (2010).** Types and production of textiles used for building and construction. In *Textiles, Polymers and composites for Buildings*, G. Pohl (editor), Woodhead Publishing limited em associação com The Institute of textile, Cambridge, Reino Unido, pp. 14-23.

**Minissi, F. (1985).** Ipotesi di impiego di coperture metalliche a protezione di zone archeologiche. In *Restauro: Quaderni di restauro dei monumenti e di urbanistica dei centri Antichi*, 14 (81), 27e31.

**Mollaert, M., Haase, J., & Hollander, S. (2003a).** Tensile Membrane Buildings and Building Components. In *International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*. CIMNE, Barcelona, 30th June – 3rd July, 2003. pp. 380-385.

**Mollaert, M., Haase, J., Chilton, J., Moncrieff, E., Dencher, M. & Barnes, M. (2003b).** Designing tensile architecture. In *Tensinet Symposium*, Bruxelles.

**Molo Design (2005).** *Softwall*. Consultado em Junho 02, 2010, em <http://www.molodesign.com>

**Monita (2017).** *Grandes montajes y especiales*. Consultado em Junho 06, 2017, em <http://monita.es/carpas/grandes-montajes-y-especiales/>

**Monjo Carrió, J. (1985).** La arquitectura têtil. *Informes de la Construcción*, 36, 367, Madrid.

**Monjo Carrió, J. (2016).** Understanding and overcoming failures associated with architectural fabric structures. In *Fabric Structures in Architecture*, J. Llorens (editor), Woodhead Publishing Series in Textiles 165.

**Monticelli C. (2010).** Environmental assessment of ultralight roof structures built with new materials: the case of the ETFE cushions. In Vegh L. (editores) *Environmentally compatible structures and structural materials (ECS)*, Czech Technical University, Praga, 24-25/09/2009, p. 28-37.

**Monticelli C., Zanelli A. & Campioli A. (2013).** Life cycle assessment of textile facades, beyond the current cladding systems. In H. Bogner-Balz, M. Mollaert, E. Pusat (eds.), *[RE]Thinking Lightweight Structures*, TensiNet, Istanbul, Tensinet Symposium, Istanbul, 08-10/05/2013, pp. 467-476.

**Monticelli, C., Campioli, A. & Zanelli, A. (2009).** Environmental load of ETFE cushions and future ways for their self-sufficient performances. In Domingo A. e Lazaro C. (eds.), *Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009*, Universidad Politecnica de Valencia, Spain, 754-766.

**Monticelli, C. & Zanelli, A. (2016).** Life Cycle Design and efficiency principles for membrane architecture: towards a new set of eco-design strategies. In *International Symposium on "Novel Structural Skins: Improving sustainability and efficiency through new structural textile materials and designs"*, Procedia Engineering 155, pp. 238-248.

**Monumentos (2017).** *Igreja do Convento do Carmo/Museu Arqueológico do Carmo*. Consultado em Abril 02, 2017, em [http://www.monumentos.gov.pt/site/APP\\_PagesUser/SIPA.aspx?id=6521](http://www.monumentos.gov.pt/site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=6521).

**Moritz, K. (2000).** *Membranwerkstoffe im Hochbau*. In Detail 06.

**Morley, D. (2008).** David Morley Architects. In *Daylight & Architecture*, Re-new #10 winter. Velux.

**MRDV (2016).** *Didden village*. Consultado em Junho 05, 2016, em <https://www.mrvd.nl/projects/didden>

**Multitexco (2015).** *Project*. Consultado em Janeiro 13, 2016, em <http://www.multitexco.eu/project-objectives;jsessionid=480669854c5691de43d2beb90346>

**Mumma, T. (1995).** Reducing Embodied Energy of Buildings. In *Home Energy Magazine*, January/ February.

**Mundo, J. (2006).** *Fabric membranes as daylighting control systems in buildings*. Tese de doutoramento, University of Nottingham, Reino Unido.

**Munter, M. (2012).** Lightweight envelopes for old buildings: textiles membranes offers new opportunities for the energy based refurbishments of existing buildings. In *Projektinfo 08/2012*, Detailed information on energy research, BINE information services. Consultado em Dezembro 02, 2015, em <http://www.bine.info/en/publications/publikation/leichte-huellen-fuer-alte-gebaeude/primaerenergiebilanz/#sthash.p0CUKuDs.dpuf>

- Navarro, J., Sendra, J. & Muñoz, S. (2009).** The Western Latin church as a place for music and preaching: An acoustic assessment. *Applied Acoustics* 70, 781–789.
- Nekrasova, A. Kossobokov, V. Parvez, I. & Tao, X. (2015).** Seismic hazard and risk assessment based on the unified scaling law for earthquakes. In *Acta Geodaetica et Geophysica*, 50, 1, 21.
- Neves, J. & Mendonça, P. (2005).** *Utilização de Pigmentos Cromotrópicos pretos em coberturas têxteis brancas com vista à poupança de energia em Edifícios*. Patente Portuguesa 102475.
- Newmat Usa (2016).** *Logan Office*. Consultado em Junho 08, 2017, em <http://newmatusa.com/newmat/2400/projects/corporate/logan.html>.
- Next Big Future (2014).** *Airborne Systems*. Consultado em Junho 06, 2017, em <https://www.nextbigfuture.com/2014/02/inflatable-airbeams-for-aerospace.html>
- Nghna, B. & Tariku, F. (2016).** Phase change material's (PCM) impacts on the energy performance and thermal comfort of buildings in a mild climate. In *Building and Environment* 99, pp. 221-238.
- Nocera, F., Gagliano, A., Evola, G. & Gioia, M. (2014).** Acoustic Quality of a Tensile Membrane Structure used as a Lecture Hall, and Proposals for its Improvement. *Building Acoustics*, 21, 4, 287–304.
- Nocke, C. & Hilge, C. (2004).** Application of micro-perforated stretched ceilings. Consultado em Junho 08, 2017 em [http://www.conforg.fr/cfadaga2004/master\\_cd/cd1/articles/000628.pdf](http://www.conforg.fr/cfadaga2004/master_cd/cd1/articles/000628.pdf)
- Norris, M. & Shiels, P. (2014).** *Regular National Report on Housing Developments in European Countries*. Irlanda: Department of the Environment, Heritage and Local Government.
- Novak, J. (2004).** Bending-wave energy propagation in inhomogeneous thin plates and membranes. *Inter-noise 2004*, Praga, República Checa.
- OECD (2002).** *Glossary of key terms in evaluation and results-based management*. França: OECD Publications.
- OECD (2015).** *Organization for Economic Co-operation and Development*. Consultado em Novembro 10, 2018, em <http://stats.oecd.org/Index.aspx#>.
- Oesterle, E., Lieb, R., Lutz, G., & Heusler, B. (2001).** *Double-Skin Facades: Integrated Planning*. Building Physics, Construction, Aerophysics, Air-Conditioning, Economic Viability. Munique: Prestel.
- Ogi, Y., et al. (2012).** Preliminary study of observed response of suspended ceiling during aftershocks in a large roof building. In bulletin of *ERS*, No. 45, p. 74. Tóquio: Institute of Industrial Science, University of Tokyo.
- Oliveira, E. & Galhano, F. (2003).** *Arquitetura Tradicional Portuguesa (5ª edição)*. Lisboa: Dom Quixote.
- Oliveti, G. Arcuri, N., Bruno, R., Simone, M., Marletta, L. & Evola, G. (2014).** Solar energy. In *Building refurbishment for energy performance: a global approach*, A. Magrini (editor).
- Ollenhauer, C. (2011).** Textiles in Architecture: Materials suppliers for building and construction (1ª edição). In Geoff Fisher (editor), *Textile Media Services*.
- OMHM (2010).** *Guide de reference pour l'integration du developement durable dans la construction et la renovation du bâtiment*. Montreal: OMHM.
- One Click LCA (2015).** Software One Click LCA (versão da base de dados: 7.4; Helsinquia: ©Bionova Ltd.
- Ooshuizen, R., Palit, N., Dove, C., Bergin, R., Mason, D. & Bagnall, V. (2016).** *London's Rooftops: Potential to Deliver Housing*. Consultado em Dezembro 20, 2016, em: <http://www.apexairspace.co.uk/wp-content/uploads/2017/03/HTA-P-Rooftop-Development-Report.pdf>
- Otto, f. (1971).** *Convertible Roofs*. Alemanha: IL5.

- Oztech (2019).** *Zip Channel*. Consultado em Janeiro 21, 2019, em <https://oztech.com/window-awnings/zip-channel/>
- Paiva, J. (2006a).** *Guia técnico de Reabilitação habitacional*. Volume 1. Lisboa: LNEC.
- Paiva, J. (2006b).** *Guia técnico de Reabilitação habitacional*. Volume 2. Lisboa: LNEC.
- Palisade (2018).** PrecisionTree. Palisade. Retrieved from <https://www.palisade.com/precisiontree/>
- Patrício, A., Gonçalves, H. & Saraiva, J. (1998).** The use of sunspaces in Portugal. Environmentally friendly cities. In *Proceedings of PLEA' 98*, pp. 361-364. Lisboa: James & James Science Publishers Ltd.
- Patrício, J. (2010).** *Acústica nos Edifícios* (6ª edição). Portugal: Verlag Dashöfer.
- Património Cultural (2017).** Igreja do Carmo (ruínas). Consultado em Junho 06, 2017, em <http://www.patrimoniocultural.gov.pt/pt/patrimonio/patrimonio-imovel/pesquisa-do-patrimonio/classificado-ou-em-vias-de-classificacao/geral/view/72498/>.
- Pause, B. (2008).** *Improving thermal-regulating properties for membrane structures*. Consultado em Novembro 15, 2015, em [http://fabricarchitecturemag.com/articles/0308\\_f3\\_thermal.html](http://fabricarchitecturemag.com/articles/0308_f3_thermal.html)
- PEMARD (2017).** *Acoustics software and tools, Olive Tree Lab*. Consultado em Outubro 15, 2017, em <https://www.mediterraneanacoustics.com/acoustics-software-tools.html>
- PEMARD (2018).** *Olive Tree Lab Suite Manual, Version 4.2*. Consultado em Março 21, 2018, em <https://www.mediterraneanacoustics.com/help-files.html>
- Pereira, C. (2017).** *A Igreja e o Convento de Santa Maria do Carmo de Lisboa (1389-1755)*. Lisboa: Associação dos Arqueólogos Portugueses e Museu de Arqueologia do Carmo.
- Perret, J. (1995).** *Guide de la maintenance des bâtiments*. Paris: Le Moniteur.
- Pevsner, N. (1976).** *A History of Building Types*. p. 352. Londres: Architectural Press Ltd.
- Phasechange (2017).** *BIO PCM*. Consultado em Novembro 20, 2017, em [phasechange.com.au](http://phasechange.com.au).
- Pohl, G. (2010).** *Textiles, Polymers and Composites for Buildings*. Alemanha: Woodhead Publishing. Leichtbau Institut.
- Poirazis, H., Kragh, M. & Hogg, C. (2009).** Energy modelling of ETFE membranes in building applications. In *Eleventh International IBPSA Conference*, Glasgow, Scotland.
- Pordata (2017).** *Preços da eletricidade para utilizadores domésticos e industriais (Euro/ECU)*. Consultado em Maio 31, 2017, em <http://www.pordata.pt/DB/Europa/Ambiente+de+Consulta/Tabela>
- Portish, A. (2005).** *Yurt*. Consultado em Novembro 19, 2015, em [http://www.aroundtheyurt.com/What\\_is\\_A\\_Yurt/default.aspx](http://www.aroundtheyurt.com/What_is_A_Yurt/default.aspx).
- Porto Vivo (2013).** *Reabilitação de edifícios do Centro histórico do Porto – Guia de termos de referência para o desempenho energético-ambiental* (2ª edição). Porto: Porto Vivo – sociedade de Reabilitação Urbana da Baixa Portuense.
- Portugal Global (2019).** *Sistema Fiscal*. Consultado em Janeiro 15, 2019 em: <https://www.portugalglobal.pt/PT/InvestirPortugal/Sistema%20Fiscal/Paginas/ImpostosTransmissoesOnerosasImoveisIMT.aspx>
- Portzamparc, C. (2012).** Christian de Portzamparc, Architecte. In *Egis contact: L'ingénierie créative*; mai 2012 / N°30, Versailles, p. 6.



**Power, A. (2008).** Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability?. In *Energy Policy* 36 (12), pp. 4487-4501.

**Pyl, L., Wang, X., Smedt, E., Colliers, J. Mollaert, M. & Laete, L. (2016).** Existing Eurocodes Applied to a Membrane Structure. In *Procedia Engineering* 155, pp. 142-151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.015>

**Ravalli, A. (2016).** *Mino*. Consultado em Janeiro 11, 2016, em <http://www.antonioravalli.it/MiNO/>

**Ravetz, J. (2008).** State of the stock - what do we know about existing buildings and their future prospects? In *Energy Policy* 36 (12), pp. 4462-4470.

**REH (2013).** Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH). In *Decreto-lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto*. Consultado em Maio 31, 2017, em <http://data.dre.pt/eli/dec-lei/118/2013/08/20/p/dre/pt/html>.  
[http://www.get.pt/site\\_files/publicaes/portugues/novos\\_regulamentos\\_050320141403110515.pdf](http://www.get.pt/site_files/publicaes/portugues/novos_regulamentos_050320141403110515.pdf) pagina 16

**Renson (2019).** *Fixscreen ® Evo Technology*. Consultado em Janeiro 21, 2019, em <http://www.renson-sunprotection.com/en/product/roof-blinds-topfix%C2%AE>

**Rigby, D. (2005).** *Technical Textiles and Nonwovens: world market forecasts to 2010*. Manchester: David Rigby Associates.

**Robbin, T. (1996).** *Engineering a new architecture*. Massachusetts: Eussy Press, E.U.A.

**Robert, O. (2003).** Institut für Membran- und Schalenttechnologie: BEKAERT Belt System. In *Tensinews*-Newsletter N. 5, Novembro.

**Robinson-Gayles S. Kolokotronia, M & Tanno, S. (2001).** ETFE foil cushions in roofs and atria. In *Construction and Building Materials* 15, 323-327.

**Roos, G. (2011).** *Swissfuture: Wohnen in 20 Jahren (Living in 20 years)*. Consultado em Janeiro 11, 2016, em [www.swissfuture.ch](http://www.swissfuture.ch).

**Rosa, A. (2009).** *Fundamentals of Renewable Energy Processes* (2ª edição). Academic Press.

**Rothoblaas (2018).** Chapas e ligadores para madeira. Consultado em Fevereiro 22, 2018, em [https://issuu.com/rothoblaas/docs/plates-and-connectors-for-wood-pt\\_\\_\\_?e=18207635/32848463](https://issuu.com/rothoblaas/docs/plates-and-connectors-for-wood-pt___?e=18207635/32848463)

**RRAE – Decreto-Lei n.º 129/2002**, de 11 de Maio, com a redação dada pelo Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de Junho. Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Capítulo 2, Artigo 10.º -A1 a)

**Saaty, T. & Vargas, L. (1980).** *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process* (2ª edição). Nova Iorque: Springer.

**Saaty, T. (1990).** How to make a decision: the analytic hierarchy process. In *European journal of operational research* 48 (1), 9-26.

**Saint Gobain (2012).** *Environmental Product Declaration for the laminated glass range of Saint Gobain*. AFNOR Registration Number 08-260: 2011, Novembro.

**Saint-Gobain (2014).** *Climaplust® environmental product declaration (versão V.01.)*. Consultado em Maio 31, 2017, em <http://environdec.com/en/Detail/epd932>.

**Salinas, J. & Hernández, M. (2014).** Fabric membrane structures to cover courtyards of historic buildings. In *SAHC2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, F. Peña & M. Chávez (editores), Mexico, 14–17 October.

- Samco (2006).** *F08a: Guideline for the Assessment of Existing Structures*. Berlin: Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM).
- Santos, A. (2003).** *Desenvolvimento de uma metodologia de caracterização das condições de iluminação natural nos edifícios baseada na avaliação "in situ"*. Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, área de especialização Ambiente em Edifícios, pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa: LNEC.
- Santos, P. & Matias, L. (2006).** *ITE 50 - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- Sastre, R. (2007).** *Removable inflatable roof for Bellver castle court*. Consultado em Março 19, 2017, em <http://tecno.upc.edu/profes/sastre/tensile.php>.
- Sattler (2019).** *Barreiras acústicas e de proteção humana*. Consultado em Janeiro 15, 2019: [https://www.sattler-global.com/ta-site-static\\_files/media/downloads/201108\\_BV\\_Buerogebeaude\\_Frankfurt-en.pdf](https://www.sattler-global.com/ta-site-static_files/media/downloads/201108_BV_Buerogebeaude_Frankfurt-en.pdf)
- Schittich, C. (2003).** *Building in Existing Fabric: refurbishment, extensions, new design*. Berlin: Detail.
- Sefar (2016).** *Lightframe@*. Consultado em Março 16, 2016, em <http://www.sefar.com/pt/609/Product.htm?Product=16869>
- Seidel, M. (2009).** *Tensile surface structures: a practical guide to cable and membrane construction – Materials, design, assembly and erection*. Berlin: Ernest & Sohn.
- Serge Ferrari (2016).** *Uma renovação luminosa*. Consultado em Junho 08, 2018, em <http://pt-br.sergeferrari.com/arquitetura-leve/uma-renovacao-luminosa-membrana-precontraint-1202-s2/>
- Serrano-Jimenez, A., Lizana, J. & Molina-Huelva, M. (2019).** Decision-support method for profitable residential energy retrofitting based on energy-related occupant behaviour. *Journal of Cleaner Production* 222, 622-632.
- Setac (2003).** *Lifecycle assessment in building and construction - a state-of-the-art report*. EUA: SETAC Press (Society of environmental technology and chemistry).
- Shyzip (2019).** *Shyzip technology*. Consultado em Janeiro 21, 2019, em <http://www.shyzip.com/shyzipE.html>
- Simões, F. (2000).** Comportamiento acústico de espacios cubiertos con estructuras textiles. PhD thesis. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. U. de Sevilla.
- Slessor, C. (1997).** *Eco-Tech: Sustainable Architecture and High Technology*. Nova Iorque: Thames & Hudson.
- Smil, V. (2008).** *Energy in nature and society - general energetics of complex systems*. Cambridge: MIT press.
- Solo Power (2018).** *Solo Panel SP1*. Consultado em Março 01, 2018, em <http://solopower.com/wp-content/uploads/DataSheetSolopanelSP1-02042016.pdf>
- Song Feng, W. & Zang Yong (2002).** *The technique of adding extra-floors spanning existing building with steel structure*. Beijing.
- Southern Inflatables (2013).** *Inflatable roof covers*. Consultado em Outubro 17, 2015, em <http://www.southerninflatables.net/applications/2013/3/18/inflatable-roof-covers-in-use-slideshow>
- Spanset (2015).** *Walkabout system*. Consultado em Outubro 17, 2015, em <http://www.spanset.co.uk/products/safety-management/animated-systems-demonstration/walkabout/portuguese.html>

**Sproul, J., Wan, M., Mandel, B. & Rosenfeld, A. (2014).** Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. In *Energy and Buildings* 71, pp. 20-27.

**Sprung (2016).** *Windows*. Consultado em Fevereiro 17, 2016, em <http://www.sprung.com/building-components/accessories/windows/>

**Sprung (2017a).** *Building components*. Consultado em Outubro 15, 2017, em <http://www.sprung.com/building-components/>

**Sprung (2017b).** *Harvard University skylight*. Consultado em Outubro 15, 2017, em <http://www.sprung.com/case-study/harvard-university-skylight/>

**Stewart, J. (2008).** Rapid assessment of shelters over mosaics: methodology and initial results from England. In *Lessons learned: Reflecting on the theory and practice of mosaic conservation*, A. B. Abed, M. Demas, & T. Roby (Eds.), pp. 181e192. Los Angeles: J. Paul Getty Trust.

**Stranghoner, N. & Uhlemann (2016).** Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures. Support to the implementation, harmonization and further development of Eurocodes. In JRC Science and Policy Report, Mollaert, M., Dimova, S., Pinto, A., Denton, S.(editores), Comissão Europeia.

**Stranghöner, N., Uhlemann, J., Mollaert, M., Gosling, P., (2014).** The Development of a Eurocode "Tensile Membrane Structures". In *Proceedings of the 37th IABSE International Symposium*, Espanha, Setembro 3-5, p. 1572-1578.

**Tadeu, S. (2015).** *Rentabilidade da reabilitação energética de edifícios*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal.

**Tao, X. (2001).** *Smart Fibres, Fabrics and Clothing: Fundamentals and applications*. Elsevier.

**Techstyle Haus (2015).** *Passive House, Active Experience. Connecting Everyone to Sustainable Living*. Consultado em Outubro 20, 2015, em: <https://techstylehaus.tumblr.com>

**Teixeira, J. & Povoas; R. (2009).** Tipificação das alterações correntemente introduzidas no sistema construtivo das casas antigas do Porto. In *PATOREB 2009*, Porto, Portugal.

**Teixeira, J. (2004).** *Descrição do sistema construtivo das Casas Burguesas do Porto entre os séculos XVII e XIX. Contributo para uma história da construção arquitetónica em Portugal*. Trabalho de Síntese elaborado no âmbito das Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Porto: FAUP

**Teixeira, J. (2013).** *Salvaguarda e valorização do edificado habitacional da cidade histórica: metodologia de intervenção no sistema construtivo da Casa Burguesa do Porto*. Tese de doutoramento, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

**Tejera, J., Monjo, J. & De La Torre, J. (2010).** Heritage preservation strategies through textiles. In *TensiNet Symposium 2010: Tensile Architecture: Connecting past and future*, H.Bögner-Balz & M.Mollaert (editors), p.329-338.

**Tektoniks (2018).** *Retractable Enclosure*. Consultado em Abril 02, 2018, em <http://www.tektoniks.co.uk/featured-lmuk.php>.

**Tensairity (2016).** *Tensairity solutions*. Consultado em Março 30, 2016, em <http://www.tensairitysolutions.com/#home>

**Tensinet (2010).** *Bellever castle*. Consultado em Março 26, 2018, em <http://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4474>.

**Tensinet (2015).** *Database. project 1*. Consultado em Novembro 30, 2015, em <http://www.tensinet.com/database/projects/1.html>

- Tensinet (2016).** Tensinews 25. Consultado em Janeiro 14, 2016, em [http://www.tensinet.com/files/TensiNet\\_Publications/Tensinews\\_25\\_1-24\\_-1.pdf](http://www.tensinet.com/files/TensiNet_Publications/Tensinews_25_1-24_-1.pdf)
- Tensinet 1 (2015).** *Database project 4335*. Consultado em Novembro 30, 2015, em <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4335.html>
- Tensinet 2 (2015).** *Database project 3758*. Consultado em Novembro 30, 2015, em <http://www.tensinet.com/database/viewProject/3758>.
- Tensinet 3 (2015).** *Eco membrane project*. Consultado em Novembro 30, 2015, em <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4234.html>
- Tereso, A. & Amorim, J. (2015).** *BeSmart2: A Multicriteria Decision Aid Application (701–710)*, Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16486-1\\_69](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16486-1_69)
- Texlon (2011a).** *Environmental Product Declaration Texlon® system*. EPD-VND-2011111-E, Vector Foiltec – Nowofol – Dyneon. Alemanha: Institut Bauen und Umwelt.
- Texlon (2011b).** *KWO Grimselstrom*. Consultado em Junho 06, 2018, em <http://www.texlon.ch/en/etfe-foil-construction/projects/kwo-grimselstrom-etfe-window-reinforcement-at-a-he.htm>
- Texlon (2016).** *Kwo grimselstrom*. Consultado em Julho 08, 2019, em <https://www.texlon.ch/en/etfe-foil-construction/projects/kwo-grimselstrom-etfe-window-reinforcement-at-a-he.htm>
- Texout (2017).** *Texout vision - Cristal Plus*. Consultado em Junho 20, 2017, em [http://www.texout.com/pdf/prodotti/SCHEDA\\_CRISTALPLUS.pdf](http://www.texout.com/pdf/prodotti/SCHEDA_CRISTALPLUS.pdf).
- Têxteis Penedo (2015).** *Cortfee*. Consultado em Outubro 21, 2015, em <http://www.tpenedo.pt/pt/certificados> e <http://www.pofc.qren.pt/media/noticias/entity/texteis-penedo-lanca-novo-produto-no-mercado-de-texteis-lar>
- Textile Institute (1995).** *Textile Terms and Definitions*. 10ª edição. Manchester: Textile Institute.
- Thomsen, A. & Filer, K. (2008).** Replacement or reuse? The sustainable impact of demolition and how to influence life cycle extension. In *XXXVI IAHS World Congress on Housing: National Housing Programmes – New Visions*, 03-07 Nov, Kolkata.
- TIC (2016).** *Jihlava*. Consultado em Março 11, 2016, em [http://tic.jihlava.cz/ES/vismo/o\\_utvar.asp?id\\_org=101078&id\\_u=43239](http://tic.jihlava.cz/ES/vismo/o_utvar.asp?id_org=101078&id_u=43239)
- Tichelmann, K. & Pfau, J. (2007).** *Dry Construction – Principles: details and exemples*, pp. 7-9. Munique: Detail
- Tilner & Willinger (2018).** *Vienna Rathaus*. Consultado em Abril 02, 2018, em <https://www.tw-arch.at/index.php?inc=projectSelection&id=167:3060>.
- Total Solutions (2019).** <http://www.totalsolutionsme.com/index.php/access-solutions/walkabout.htm>
- Transparent Choice® (2018).** *AHP Standard*. Licença obtida a 06/11/2018.
- Tresider, J. & Cliff, S. (1986).** *Living under glass*. Nova Iorque: Clarkson N. Potter, Inc.
- Tronchin L., Manfren M. & Tagliabue L.C. (2016).** Optimization of building energy performance by means of multi-scale analysis – Lessons learned from case studies. *Sustainable Cities and Society*, 27, 296-306.
- Tupenaite, L., Kazimieras, E., Kaklauskas, A., Turskis, Z. & Seniut, M. (2010).** Multiple criteria assessment of alternatives for built and human environment renovation. In *Journal of Civil Engineering and Management* 16:2, 257-266. DOI: <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.30>.

- U.S. Green Building Council (2014).** LEED BD+C: New Construction v4 - LEED v4: Daylight.
- UE (2010).** *Diretiva 2010/31/EU do conselho e parlamento europeu*, de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios. Estrasburgo: Jornal Oficial da União Europeia.
- UE (2011).** *Energy Roadmap 2050*. COM (2011) 885 final. European Commission.
- UNDP, UNEP, World Bank & World Resources Institute (2012).** *World Resources 2010–2011: adaptation challenges and choices*. Consultado em Dezembro 20, 2018, em [https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/pdf/world\\_resources\\_report\\_2010-2011.pdf?\\_ga=2.218301919.790758324.1542804854-1634163353.1542804854](https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/pdf/world_resources_report_2010-2011.pdf?_ga=2.218301919.790758324.1542804854-1634163353.1542804854)
- UNESCO (1972).** *Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage*, adopted by the General Conference at its seventeenth session, Paris, 16 de Novembro. Consultado em Dezembro 20, 2018, em <http://whc.unesco.org/en/conventiontext/>
- UNESCO (2013).** *The operational guidelines for the implementation of the world heritage convention*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Publisher. Consultado em Dezembro 20, 2018, em <http://whc.unesco.org/en/guidelines/>
- UNESCO, ICCROM, ICOMOS, IUCN (2013).** *Managing cultural world heritage*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Publisher. Consultado em Dezembro 20, 2018, em <http://whc.unesco.org/en/activities/827/>
- UNU (2013).** *List of countries by natural disaster risk*. Consultado em Outubro 21, 2015, em [http://www.worldriskreport.com/uploads/media/WorldRiskReport\\_2013\\_fact\\_sheet.pdf](http://www.worldriskreport.com/uploads/media/WorldRiskReport_2013_fact_sheet.pdf)
- UNU (2015).** *United Nations University. Our World at Risk: A Look at WorldRiskReport 2012*. Consultado em Outubro 21, 2015, em <http://unu.edu/publications/articles/our-world-at-risk.html>
- Urban, B. & Roth, K., (2010).** *Guidelines for Selecting Cool Roofs*. Consultado em Dezembro 20, 2017, em [www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/coolroofguide.pdf](http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/coolroofguide.pdf)
- US Census Bureau (2004).** *Global population profile: 2002 – International population reports*. USA: US Census Bureau/US Government Printing.
- Usanov, A., Chivot, E. & Silveira, J., (2013).** *Sustainable (Re)Construction: The Potential of the Renovation Market*. The Hague Center for Strategic Studies (HCSS) & TNO.
- Uwimana, L. (2011).** *Adding stories on top of the existing building by using steel structures. Case study: Dillenburgsingel project in Leidschendam*. Dissertação de mestrado, Technical University of Delft, Holanda.
- Vector Foiltec (2012).** A Comparison Between Glass, Polycarbonate, PTFE, PVC and TEXLON® ETFE. Consultado em Junho 06, 2018, em <http://forum.iai.or.id/index.php?action=dlattach;topic=2401.0;attach=587>
- Vector Foiltec (2016).** *History of ETFE*. Consultado em Dezembro 16, 2016, em <http://www.vectorfoiltec.com/about-us/history-etfe/>
- Veonglass (2017).** *Frameless glazing*. Consultado em Junho 06, 2018, em <https://veonglass.com/veons-latest-glass-installation-frameless-glazing-in-devon/>
- Vgtex (2017).** *Membrana vegetal VGTEX*. Consultado em Outubro 15, 2017, em <http://www.vgtex.com/>
- Vieira, A. (2013).** *Chiado em detalhe*. Lisboa: Verbo.
- Vigon, B., et al. (1993).** Life Cycle Assessment: inventory guidelines and principles. In *EPA/600/R-92/245*, Cincinnati. EUA: U.S. Environmental Protection Agency, Risky Reduction Engineering Laboratory.
- Viollet-Le-Duc, E. (2006).** *Restauração*. Cotia: SP Atelier Editorial.

- Vitruvius (2005).** *Arquitextos*. Consultado em Maio 17, 2016, em [www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp332.asp](http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp332.asp)
- Voss, T. (2018).** *Dom Aquarée*. Consultado em Junho 18, 2018, em <http://www.tchobanvoss.de/projekt.php?id=125&lang=EN>
- Wackernagel, M. & Rees, W. (1996).** *Our Ecological Footprint—Reducing Human Impact on the Earth*. Canadá: New Society Publishers.
- Wald, S., Mahlknecht, H. & Zeumer, M. (2015).** Die ökologische Bilanz energetischer Sanierungen. In *DETAIL green 1/2015*- best of DETAIL Sanierung sowie, Christian Schittich (editor).
- Wall, M. (1998).** Distribution of solar radiation in glazed spaces and adjacent buildings. A comparison of simulation programs. In *Energy and Buildings* 26 (2) 1997, pp. 129-135.
- Wallbaum, H. & Herzog, C. (2001).** Am Anfang war der Mensch. In *Politische Ökologie* 19 (71), 33-36.
- Winser, R. & Thompson, P. (2003).** ETFE Foil Cushions as an Alternative to Glass for Roofs and Atria. In *Document 4*, Department of the Environment, Transport and the Regions.
- Wood, C., Bordass, B. & Baker, P. (2009).** *Research into the thermal performance of traditional windows: timber sash windows*. Consultado em Outubro 10, 2015, em <https://content.historicengland.org.uk/images-books/publications/thermal-performance-traditional-windows/thermal-performance-traditional-windows.pdf>
- Wright, B. (2017).** Airbeam festive tent. Consultado em Janeiro 21, 2018, em <https://fabricarchitecturemag.com/2017/05/01/airbeam-festive-tent/>
- Yatzer (2016).** Gymnasium transformed into concert hall. Retrieved from January 11th from: <https://www.yatzer.com/gym-transformed-concert-hall-pannonhalma-archabbey-hungary>.
- Yohanis Y. & Norton, B. (2002).** Lifecycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK. In *Energy* 27 (1), pp. 77-92.
- Zanakis, S. H., Solomon, A., Wishart, N. & Dublisch, S. (1998).** Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. *European Journal of Operational Research*, 107(3), 507–529.
- Zanelli, A. (2015a).** Architectural fabric structures in the refurbishment of archaeological and cultural heritage areas. In *Fabric Structures in Architecture*; J. Llorens (editor), Woodhead Publishing Series in Textiles 2015, pp. 481-527.
- Zanelli, A. (2015b).** Progress in the convertible tensile structure project: from kinematics to biokinetics. In *Textile Architecture, Tenda International* 2/2015; Maggioli S.p.A, Milão, Itália.
- Zheng, G., Jing, Y., Huang, H., Shi, G. & Zhang, X. (2010).** Developing a fuzzy analytic hierarchical process model for building energy conservation assessment. *Renewable Energy*, 35(1), 78–87.
- Zijlstra, E. (2007).** *Architectural Textiles*. Consultado em Dezembro 02, 2015, em [http://www.materia.nl/583.0.html?&tx\\_ttnews\[tt\\_news\]=17&tx\\_ttnews\[backPid\]=532&cHash=e91f9d3de4](http://www.materia.nl/583.0.html?&tx_ttnews[tt_news]=17&tx_ttnews[backPid]=532&cHash=e91f9d3de4)
- Zimmermann, M. (2012).** *ECBCS Annex 50 (International energy Agency) – Prefabricated systems for low Energy renovation of residential buildings, Project Summary Report*. Hertfordshire: AECOM Ltd.
- Zou, Y. (2010).** *Classification of buildings with regard to Airtightness*. Dissertação de mestrado em engenharia civil e comportamento de edifícios, Chalmers University of Technology; Göteborg, Suécia.



## ANEXO 1

### Categorias consideradas na avaliação do ciclo de vida

O método de cálculo para a etapa de fim de vida (C3-C4) e do potencial de reutilização/ reciclagem (modulo D) do programa One Click LCA (2015) segue a norma EN 15 978 / EN 15804 e baseia-se na informação das fichas DAP quando disponíveis ou segue a categorização dos cenários de fim de vida DGNB (2014) apud One Click LCA (2015).

*Categorização dos cenários de fim de vida segundo DGNB (2014) apud One Click LCA (2015) dos materiais considerados neste exercício.  
Disponível em: <https://www.oneclicklca.com/support/customer-support/premium-calculations/end-life-scenarios/>*

<b>Grupo de materiais</b>	<b>Tipo de processo</b>	<b>Materiais incluídos</b>	<b>C3 – C4, processamento de resíduos e aterro</b>	<b>D, benefícios provenientes da reciclagem</b>
Minerais	Reciclagem para terraplanagens	Betão Cimento Tijolos Porcelana Gesso Produtos cerâmicos Asfalto	C3: Preparação de resíduos da construção para reciclagem	Benefícios provenientes da reciclagem para substituir brita virgem
Metais	Reciclagem de metal	Alumínio Aço Aço inoxidável Cobre Bronze Zinco Pele	C3: Preparação de resíduos metais	Benefícios provenientes da reciclagem para substituir metal virgem
Materiais naturais com valor calorífico	Inceneração e recuperação energética	Madeira Derivados de madeira	C3: Inceneração de resíduos para recuperação de energia	Recuperação de energia (substituição da energia média de produção)
Outros materiais com valor calorífico.	Inceneração e recuperação energética	Polímeros	C3: inceneração de resíduos para recuperação de energia	Recuperação de energia (substituição da energia média de produção)
Outros materiais que possam ir para aterros de resíduos de construção	Eliminação/ Aterro de resíduos inertes	Revestimentos Materiais sintéticos Painéis Materiais de isolamento Vidro Componentes de janelas e fachadas	Eliminação de resíduos inertes da construção	–

## ANEXO 2

*Tabela 2.1. Vantagens e desvantagens do processo de reabilitação (adaptado de Douglas, 2006)*

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Históricas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservação, revalorização e reutilização do património arquitetónico;</li> <li>• Os edifícios foram ao longo do tempo o suporte físico de diversos movimentos estéticos, da arquitetura, da engenharia e da arte; um testemunho vivo da relação contínua do Homem com a arte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intervenções pouco sensíveis podem por em causa a integridade e “veracidade” do património arquitetónico histórico;</li> <li>• Intervenções demasiado sensíveis podem ficar aquém das expectativas técnicas, funcionais e de sustentabilidade.</li> </ul>
<b>Sociais/ culturais e urbanísticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção da imagem urbana e a sua intrínseca identidade sociocultural;</li> <li>• Redução do número de edifícios desocupados e obsoletos e dos espaços urbanos degradados;</li> <li>• Oportunidade para criar espaços comunitários nos edifícios antigos;</li> <li>• Revitalização do centro das cidades;</li> <li>• Aumento da qualidade de vida pela proximidade entre a habitação e os serviços/ equipamentos;</li> <li>• Diminuição dos custos de infraestruturização;</li> <li>• Melhoria da segurança (p.e. diminuição dos riscos de incêndios e derrocadas de imóveis devolutos).</li> <li>• Manutenção da imagem urbana e sua identidade sociocultural;</li> <li>• Aumento da estima pelo património edificado;</li> <li>• Benefício de saúde para os ocupantes, reduzindo a incidência de doenças relacionadas com os espaços construídos degradados;</li> <li>• Valorização dos saberes e técnicas tradicionais e da solidariedade intergeracional;</li> <li>• Aumento do emprego em trabalhos especializados, dado que a reabilitação exige know-how próprio.</li> </ul>	
<b>Técnicas/ Funcionais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnicas e materiais aplicados que já deram provas da sua durabilidade e comportamento específico;</li> <li>• Possibilidade de reintegrar e fazer uma atualização de espaços e técnicas construtivas;</li> <li>• Garante a segurança e a salubridade dos alojamentos, ao mesmo tempo que melhora o conforto, habitabilidade, acessibilidade e eficiência energética dos edifícios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade de acesso e de localização do estaleiro de obra no exterior, quando necessário, sobretudo em edifícios antigos, inseridos muitas vezes em zonas históricas (ruas estreitas e sinuosas) com acesso condicionado;</li> <li>• A extensão do tempo de vida de um edifício reabilitado pode ser, apenas, cerca de metade do tempo de vida de uma construção nova;</li> <li>• Constrangimentos impostos pelo existente – pé-direito muito baixo, disposição estrutural pouco flexível, planta muito profunda (com difícil iluminação e ventilação naturais), etc.;</li> <li>• Incerteza no alcance de um desempenho técnico funcional igual ao de uma construção nova para o mesmo fim.</li> </ul>
<b>Energéticos/ Ambientais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminuição ou eliminação da quantidade de demolições – menor necessidade de transporte, do uso de materiais e respetivas emissões de CO<sub>2</sub>, menos energia consumida, menos poluição sonora e ambiental, melhor qualidade do ar;</li> <li>• Rentabilização do parque construído minimizando a urbanização de terrenos com capacidade agrícola ou florestal;</li> <li>• Rentabilização dos recursos e energia já utilizados;</li> <li>• Possibilidade de otimização de consumos energéticos e de recursos;</li> <li>• Reaproveitamento de produtos de demolição, com a sua integração na própria obra a reabilitar ou noutra de características similares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade em elevar qualitativamente, a níveis aceitáveis de desempenho, um edifício de fraca construção;</li> <li>• Incerteza em garantir um desempenho energético- ambiental igual ao de uma construção nova para o mesmo fim.</li> </ul>
<b>Económicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos matéria-prima necessária (possibilidade de aproveitamento de fundações, estrutura e paredes exteriores);</li> <li>• Possibilidade de otimização dos custos de exploração e manutenção do edifício e aumento da sua vida útil;</li> <li>• Promoção das atividades de proximidade e do emprego local;</li> <li>• Sector mais equilibrado e pouco sensível às flutuações no mercado de construção nova (muito mais vulnerável à ação especulativa);</li> <li>• Aumenta ou mantém o valor de mercado do património imobiliário público e privado;</li> <li>• Redução dos custos com taxas e licenças;</li> <li>• Diminuição prazo aprovação dos projetos;</li> <li>• Redução dos custos de estaleiro;</li> <li>• Mesmo que os preços unitários dos trabalhos de reabilitação possam ser (em alguns casos) mais elevados, muitas vezes, o custo global da intervenção de reabilitação pode ser menor do que demolir e construir de novo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exige mão-de-obra especializada, possivelmente implicando maior custo;</li> <li>• Técnicas de restauro, utilização de materiais e técnicas para maior compatibilidade, ou substituição de elementos antigos, difíceis de encontrar ou fabricar, podem encarecer a obra;</li> <li>• Custos de exploração e manutenção de uma construção reabilitada podem não conseguir igualar os de uma construção nova.</li> </ul>

### ANEXO 3

Tabela A3.1. Lista dos desenvolvimentos associados às membranas arquitetônicas (adaptado de Kuusisto, 2010).

Ano	Desenvolvimento
	Primeiros adesivos derivados de peixes e ossos de animais, cera de abelha, gomas, ovos, arroz e alcatrão.
1500	Descoberta da borracha, índios latino americanos.
1700	Desenvolvimento da Indústria do petróleo, petróleo sobre algodão e seda, Inglaterra e Alemanha.
1823	Material à prova de água com borracha, patente obtida por Charles Machintosh, Inglaterra.
1841	Vulcanização da borracha, Charles Goodyear, E.U.A.
1843	Vulcanização da borracha, Thomas Hancock, Manchester, Inglaterra.
1850	Nitro-celulose.
1855	Primeira patente de seda artificial, químico suíço Audemars, Inglaterra.
1880	Fibras com filamentos de carbono, Sir Joseph W. Swan, Inglaterra.
1889	1ª Fibra regenerada, seda raio, químico francês Count Hilaire de Chardonnet.
1893	Película de acetato em celulose, Arthur D., Boston.
1900	Estudos de materiais crômicos.
1900 - ...	Primeiras observações de nano materiais.
1900-1950	Novos polímeros e borrachas sintéticas para aplicação em revestimentos de tecidos: cloreto de polivinil (PVC), policloroprene (neopreno, Du Pont), acriláteros e poliuretano, fluoropolímeros (PTFE (1938), ETFE (1940), PVDF (1948)).
1920	Subida de 70% do mercado de fibras regeneradas, E.U.A.
1924	1º Uso comercial das fibras de acetato, empresa Celanese, E.U.A.
1930 - ...	Materiais com memória de forma (SMM – shape memory materials).
1931	Primeiras fibras sintéticas, nylon 66 pela química americana Wallace Carothers e Du Pont.
1936	Produção de fibras de vidro nos E.U.A.
1938	Primeiras fibras sintéticas, nylon 6 pelo alemão Paul Schlack e I.G. Farben.
1941	Produção de todo o equipamento para uso militar, 2ª Guerra Mundial, para-quedas, cordas, tendas, pneus, etc.
1945 - ...	Fim da guerra, 15% de quota no mercado das fibras sintéticas, E.U.A., nylon para uso civil: carpetes, indústria automóvel, vestuário, novas fibras (metalizadas, olefinas).
1946	Fibras metálicas, E.U.A.
1950 - ...	Fibras sintéticas, quota de 20%: Du Pont produz acrílico e poliéster.
1953	Triacetato e poliéster.
1960	Desenvolvimento de fibras; Spanex, aramida, fibra de carbono; Programa especial dos E.U.A. e fibras sintéticas: fato de Neil Armstrong em nylon e aramida e bandeira em nylon.
1960-65	Quotas de mercado dos sintéticos nos E.U.A. de 30 -40%.
1970	Desenvolvimentos significativos da membrana de ETFE; normas de flamabilidade, investigação na NASA; Materiais com mudança de fase (PCMs – phase change material).
1980	Fibras de elevado desempenho.
1990	Materiais inteligentes aparecem no domínio comum.
1990 - ...	Fibras óticas.
2000	Aspetos ecológicos dos têxteis.
2000	Células fotovoltaicas flexíveis.
2002 - ...	Rápido aumento da produção de energia fotovoltaica no mundo.
2000	Células fotovoltaicas impressas.
2005 - ...	Película com células fotovoltaicas integradas possível de ser impressa.
...	

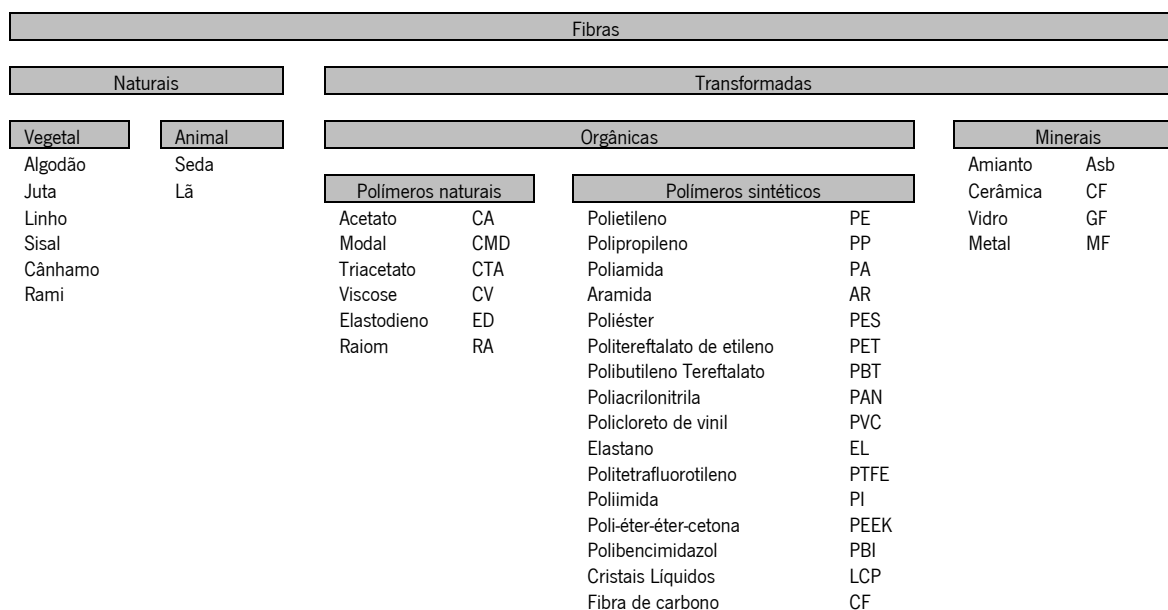


Figura A3.1: Classificação de fibras (adaptado de Byrne (2009)).

### 3.1. Tipos de membranas

Breve descrição dos tipos de membrana mais comuns e de última geração que podem ser usados em edifícios:

- **Membrana de poliéster (PES) revestida a policloreto de vinil (PVC)**

A membrana de poliéster revestida a PVC é bastante utilizada em estruturas tensionadas. A sua elevada resistência mecânica à tração e resistência à fissuração tornam este material adequado para coberturas de membrana permanentes e/ou conversíveis. Possui um custo reduzido, quer nas matérias-primas, quer na produção. É o material de membrana mais acessível disponível no mercado. Estas membranas são reforçadas para fins construtivos com o intuito de melhorar o seu comportamento a longo prazo. É especialmente importante revestir o substrato de poliéster com uma substância de reduzida higroscopicidade, para evitar que a humidade seja absorvida e que as partículas de sujidade adiram à membrana.

No passado, o rápido envelhecimento dos materiais em membrana, devido à debilidade do revestimento em PVC, causou um impacto negativo sobre a imagem das estruturas em membrana. Atualmente, a perda dos estabilizadores de UV e de temperatura pode ser retardada através da laminação de verniz de acrilato e PVDF (fluoreto de polivinilideno) ou FVF (fluoreto de vinilo). Estes sobre-revestimentos, fabricados a partir de laca de fluoreto, permitem criar um acabamento suave e antiaderente que ajuda a impedir que a poeira e sujidade adiram à superfície. No entanto, existem desvantagens que ainda não foram ultrapassadas, como por exemplo: o revestimento de PVC emite poluentes quando exposto à radiação UV, a vida útil do material é limitada e a resistência ao fogo restringe a sua aplicação em certas construções (classe B1).

- **Membrana de poliéster revestida a THV**

A membrana de poliéster revestida a THV é um material de membrana relativamente recente no mercado. THV é um fluoropolímero que, na forma de película, é utilizado como alternativa ao ETFE. As principais vantagens de um revestimento THV sobre um revestimento em PVC são: maior resistência às condições climáticas, autolimpeza da superfície e maior transmissão de luz. As propriedades mecânicas são equiparáveis às da membrana de poliéster revestida a PVC do tipo I e II. Uma das desvantagens é o seu baixo peso próprio quando comparado com a sua resistência. Por outro lado, segundo Knipers *et al* (2011), na prática ainda não existem casos de estudo disponíveis para avaliar o seu comportamento a longo prazo.

- **Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE**

A membrana de fibra de vidro revestida a PTFE (mais conhecido por *Teflon*) é reciclável e é considerada uma das mais duráveis (35 anos) devido às suas propriedades de autolimpeza e à resistência a substâncias químicas e crescimento de fungos. As versões leves (tipo I e II) com um revestimento relativamente fino são incombustíveis (possuem a classe A2 – não inflamável - para materiais de construções). As versões mais pesadas são classificadas apenas como dificilmente inflamável devido ao revestimento mais espesso (Classe B1). O revestimento de PTFE aplicado confere à membrana de fibra de vidro propriedades de auto-limpeza: a superfície deste revestimento é muito lisa e possui elevada resistência a variações climáticas (demonstrada ao fim de muitos anos de utilização em diferentes zonas climáticas). Uma das vantagens do revestimento em PTFE é que este não requiere amaciadores, ou estabilizadores que podem evaporar ao longo do tempo e tornar o revestimento quebradiço. O PTFE permite que as membranas permaneçam elásticas e suaves de modo que, mesmo após vários anos de utilização/ exposição a sujidade e agentes químicos, sejam incapazes de fendilhar. Geralmente, a ação da chuva é suficiente para limpar as coberturas deste tipo, mesmo após muitos anos. No entanto, o material é menos resistente em relação à deformação elástica do que a membrana de PES revestida a PVC. Isto é particularmente importante na fase de pré-montagem. As membranas cortadas sem margem de dilatação podem rasgar facilmente quando pré-tensionadas durante a instalação.

- **Membrana de fibra de vidro revestida a silicone**

Devido à elevada transmissão da luz, boas propriedades mecânicas e resistência à flexão, a membrana de fibra de vidro revestida a silicone representa uma alternativa interessante, quando comparada com a membrana de fibra de vidro revestida a PTFE. A flexibilidade do revestimento de silicone torna a membrana mais fácil de manusear do que a membrana de fibra de vidro revestida a PTFE, e a sua transmissão de luz pode chegar a ser superior à da membrana de poliéster revestida a PVC (considerando as mesmas condições: cor, espessura, etc.). Mesmo com a coloração do revestimento, a transmissão de luz é elevada. A resistência química do revestimento

de silicone torna esta membrana muito resistente a processos de envelhecimento. Uma desvantagem desta membrana é a superfície adesiva do silicone e a sua tendência para atrair eletricidade estática. No entanto, existem sobre-revestimentos recentes com capacidade de melhorar o comportamento de limpeza deste material. Outra desvantagem é que os materiais revestidos com silicone não podem ser soldados e deste modo as juntas entre partes de material devem ser vulcanizadas ou coladas envolvendo processos complexos e dispendiosos.

- **Membrana de rede de fibra de vidro laminada com película de PTFE**

A abertura da malha da membrana de rede de fibra de vidro laminada com película de PTFE permite alcançar uma elevada transmissão de luz, superior a 65%. No entanto, a limitada elasticidade e maleabilidade desta membrana constituem desvantagens na construção, pois dificultam o pré-esforço. A laminação da película de PTFE serve essencialmente para permitir a auto-limpeza. No entanto, a reduzida flexibilidade dificulta a dobragem e a construção (para incluir cabos e outros componentes necessários para a elevação de estruturas em membrana). Uma solução para este problema consiste em aplicar tiras de membrana de fibra de vidro convencional revestida a PTFE soldadas ao longo das extremidades.

- **Membrana em tecido PTFE, com ou sem revestimento**

Interessantes opções no segmento de mercado das membranas de última geração são os tecidos PTFE que têm uma aptidão particular para estruturas móveis. As membranas em tecido PTFE não revestidas são frequentemente utilizadas para coberturas conversíveis com reduzida necessidade de impermeabilização. Caracterizam-se pela elevada resistência à flexão e fendilhação, leveza, elevada transmissão de luz e superfície antiaderente. A membrana densa de PTFE revestida permite alcançar uma estanquidade máxima a 0,02 kg/cm<sup>2</sup> (0,2mca) de pressão de água. A aplicação do revestimento de PTFE ou outro polímero através do método de revestimento por imersão pode aumentar a estanquidade à pressão de água para o máximo de 0,3 kg/cm<sup>2</sup> (3mca) (Knippers *et al*, 2011). Esta membrana só pode ser costurada, mas com a aplicação de adesivos especiais pode aumentar-se a estanquidade nas juntas. Devido à tendência de deformação significativa desta membrana quando sujeita a cargas permanentes, os valores de pré-esforço escolhidos devem ser baixos e os vãos reduzidos. A aplicação de revestimentos de fluoropolímero termoplástico no substrato da membrana através do método de extrusão permitem alcançar membranas PTFE revestidas soldáveis e estanques. A difusão de luz é semelhante à da membrana de ETFE.

- **Membrana em aramida revestida a PVC ou PTFE**

A membrana em aramida revestida a PVC ou PTFE é utilizada em alternativa às membranas de poliéster ou fibra de vidro quando se exige uma elevada resistência à tração. A utilização deste material é reduzida. As membranas de aramida revestidas a PVC podem alcançar resistências à tração de, por exemplo, até 4800 N/cm para cerca de 2 Kg/m<sup>2</sup> (por comparação, membrana de poliéster revestida a PVC Tipo de V = 2000 N/cm) (Knippers *et al*, 2011). As desvantagens desta membrana são o elevado custo e a reduzida resistência contra os raios UV. Só as versões opacas desta membrana apresentam fiabilidade.

- **Membranas em rede (malha aberta), com ou sem revestimento**

São amplamente utilizadas para controlo lumínico ou acústico. Apenas diferem das membranas anteriores pelo grau de permeabilidade (à luz e ar). Para além da utilização convencional das membranas em rede (malha aberta), com ou sem revestimento, em elementos resistentes, as redes podem ser utilizadas em elementos não resistentes e no interior de edifícios, enquanto membranas acústicas, toldos, divisórias ou tetos falsos para aproveitamento da luz natural. As membranas em rede de polietileno de alta densidade apresentam um custo extremamente reduzido, uma vida útil relativamente alta e uma elevada elasticidade.

- **Membranas de Etileno-TetraFluoroEtileno (ETFE)**

O ETFE é um fluoropolímero termoplástico concebido para ser durável, ter alta resistência à corrosão e a elevadas amplitudes térmicas, permitir a autolimpeza e apresentar uma elevada transmissão lumínica. A sua temperatura de fusão, resistência química e elétrica são muito elevadas; foi desenvolvido por Dupont nos anos setenta a partir de um polímero de fluoro-carbono utilizado como material isolante na indústria aeronáutica. Com o tempo, as suas aplicações no âmbito da construção civil aumentaram significativamente. As membranas de ETFE, utilizadas sobretudo em soluções pneumáticas, são muito leves, com cerca de 0.2 mm de espessura e classificadas com resistência ao fogo B1. A sua resistência mecânica é relativamente boa, considerando que o material não é reforçado por nenhum tecido, o que o torna adequado para superfícies com função estrutural, caracterizadas por

vãos pequenos ou suportadas por cabos. Comparado com o vidro, a membrana de ETFE oferece uma elevada transmitância de raios UV (Beccarelli, 2015). A boa capacidade de revestimento, por exemplo com impressão, pode ser usada para limitar a transmissão de radiação solar.

- **Membrana de *nylon* revestida a PU**

Caracteriza-se pela extrema flexibilidade e transmitância de luz. Devido ao desempenho mecânico relativamente baixo, geralmente é utilizada em superfícies de pequenas dimensões. O revestimento é fácil de soldar e fornece um bom nível de estanquidade, o que a torna uma boa opção para soluções pneumáticas. Quando é necessário um maior desempenho mecânico, utiliza-se a membrana de poliéster revestida a PU.

- **Membrana de PVC**

Caracteriza-se por apresentar resistência mecânica muito baixa. As propriedades óticas, que se deterioram rapidamente, apesar do aspeto inicial transparente e claro, são inferiores às da membrana de ETFE (considerando comprimentos de onda específicos). No entanto, a flexibilidade e o custo extremamente baixo desta membrana torna-a uma alternativa interessante para aplicações interiores ou temporárias. Um exemplo de aplicação desta membrana é a fachada do Pavilhão da Finmeccanica concebido pela Farnborough International Air Show.

### 3.2. Propriedades das membranas

- **Resistência à tração**

A resistência à tração é determinada em ensaios de tração uniaxial usando tiras com 5 cm de largura. Muitas vezes, os valores na direção da trama são um pouco menores do que na direção da teia. Como a espessura da membrana é insignificante quando comparada com a largura da tira utilizada para o ensaio, a resistência à tração é especificada na forma de força por unidade de comprimento (por exemplo: N/5cm). A classificação dos materiais de membrana em tipos de acordo com a força de tração foi originalmente introduzida para membranas de poliéster revestidas a PVC, e passou a ser correntemente utilizada noutros materiais de membrana. A classificação é a seguinte (KNNIPERS et al, 2011): Tipo I:  $\pm 3000$  N/5cm; Tipo II:  $\pm 4000$  N/5cm; Tipo III:  $\pm 5000$  N/5cm; Tipo IV:  $\pm 7000$  N/5cm; Tipo V:  $\pm 9000$  N/5cm.

- **Resistência à propagação de rasgo**

A resistência à propagação de rasgo especifica a força máxima que uma membrana rasgada pode suportar. O valor desta força é determinado através de um ensaio normalizado de forma uniaxial (utilizando uma amostra com uma incisão lateral) ou biaxial (utilizando uma amostra com uma incisão no meio). A resistência à propagação de rasgo deve ser a maior possível, a fim de evitar que a superfície de tração entre em colapso devido a uma falha localizada (KNNIPERS et al, 2011).

- **Alongamento à rutura**

O alongamento à rutura representa a percentagem de alongamento de uma amostra de material submetida a tensão uniaxial até atingir a rutura. Quanto menor for o alongamento à rutura, maior a probabilidade de falha abrupta do material (fragilidade). Por outro lado, um valor elevado indica que o material possui um comportamento dúctil – onde as deformações visíveis dão aviso da falha eminente do material.

- **Tensão de rigidez**

A tensão de rigidez é determinada num ensaio de tração biaxial. São feitas várias incisões em quatro lados de uma amostra de material. Em seguida, as tiras individuais são fixadas separadamente para garantir a transferência homogênea de tensões. A membrana é esticada para o nível de pré-esforço e em seguida é carregada em vários ciclos, dependendo das cargas estimadas em projeto, alternando entre a direção de trama e da teia. A força e o alongamento são medidos ao longo de um período de tempo. O alongamento residual que permanece no fim do ensaio é utilizado como o valor de correção para o fabrico da membrana. Atualmente existem métodos especiais no fabrico de membranas (em especial as de poliéster revestidas a PVC) que permitem alcançar características de rigidez iguais nas direções da teia e da trama (Knippers et al., 2011).

### 3.3. Preparação para obra

Nos pontos seguintes apresenta-se uma breve explicação sobre o processo de corte e de soldadura de membranas.



- **Padrão de corte**

Para produzir uma superfície tridimensional curva com materiais em membrana, esta deve ser decomposta em bandas individuais. Quando se pretende aplicar pré-esforço mecânico, as arestas de cada banda devem ser côncavas pelo lado exterior e no caso de pré-esforço pneumático as arestas devem ser convexas. O corte destas bandas é geralmente feito através de uma impressora de corte, diretamente sobre a membrana colocada sobre uma mesa com vácuo.

- **Soldadura**

Os revestimentos termoplásticos podem ser unidos através de colagem e de costura. Contudo, estes métodos já não são utilizados em aplicações exteriores devido aos requisitos de estanquidade à água. Em alternativa utiliza-se um processo conhecido como soldadura (Figura A3.2), sendo que as larguras típicas de sobreposição entre partes de membrana situam-se entre 50 e 100 milímetros. Neste campo, existem diferentes tipos de soldadura:

- Soldadura por alta frequência, também conhecida por soldadura por radio frequência; este tipo de soldadura pode ser usado em termoplásticos com uma estrutura molecular polar (como a do PVC); a vantagem deste método é a rapidez.
- Soldadura por impulso, método usado em membranas revestidas a PTFE que consiste em colocar as juntas a soldar – intermediadas com uma membrana de polímero termoplástico – numa prensa, a uma temperatura aproximada de 340°C.
- Soldadura local, normalmente recorre-se a este processo para executar acabamentos, grampeamento de juntas e detalhes construtivos. Para unir membranas de poliéster revestidas a PVC apenas é necessária uma pistola de ar quente e um rolo para pressionar as superfícies unidas. Contudo, as membranas revestidas a PTFE necessitam de um dispositivo de soldadura especial devido às elevadas temperaturas e pressões necessárias.

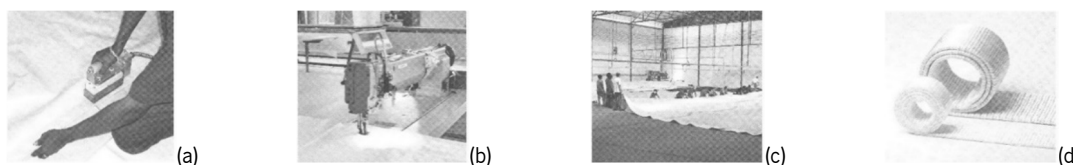


Figura A3.2: (a) Dispositivo manual de soldadura; (b) máquina de costura industrial; (c) dobragem de uma membrana produzida, pronta para ser transportada; (d) cintas feitas de fibra de poliéster (Knippers et al, 2011).

### 3.4. Empresas produtoras de materiais em membrana para o setor *Buildtech*

Tabela A3.2. Empresas produtoras de materiais em membrana destinadas ao setor da construção e respetivas matérias-primas (adaptado de Ollenauer, 2011).

Produtores	Localização	Especialidade	Ano fundação
Aeronautec	Alemanha	Projeto e montagem	1994
Barrisol	França	Tetos tensados	1967
Bekaert	Bélgica	Fibra de aço; malhas metálicas	1880
Dickson-Constant	França	Têxteis técnicos náuticos Proteção solar e decoração de interiores	1836
Serge Ferrari	França	Membranas compostas	1973
Dyneon	Alemanha	Fluoro polímeros; PTFE	1996
Engtex	Suécia	Têxteis técnicos; reforço; retardantes de chama	1939
Fibertech	Canadá	FRP	1990
Gavazzi	Itália	Têxteis técnicos	1885
GKD	Alemanha	Malhas metálicas	1925
Herculite	Pensilvania	Têxteis técnicos	1950
Heytex	Alemanha	Têxteis técnicos	1913
Hightex	Alemanha	Projeto e montagem	1960
Johns Manville	EUA	Têxteis técnicos	1988
Kast	Alemanha	Têxteis técnicos com fibra de vidro	1961
Kobond	China	Revestimentos de membranas	1992
MakMax	Japão	Projeto e montagem	1922
Mehler Technologies	Alemanha	Têxteis técnicos	1837
Nittobo	Japão	Têxteis técnicos	1923
Owens Corning	EUA	Têxteis técnicos	1938
PD FibreGlass	Alemanha	Têxteis técnicos – fibra e vidro	1965
Pongs	Alemanha	Têxteis técnicos	1913
Saint-Gobain Technical Fabrics - Adfors	França	Têxteis técnicos	1965

Produtores	Localização	Especialidade	Ano fundação
Sattles	Austria	Têxteis técnicos	1875
Sefar	Suíça	Têxteis técnicos	1830
Synteen & Luckenhaus	Alemanha	Têxteis técnicos	1913
Taconic	Irlanda	Têxteis técnicos	1961
V. Fraas	Alemanha	Têxteis técnicos	1880
Valmieras	Letónia	Fibra de vidro	1960
Verseidag	Alemanha	Química - Revestimento de tecidos	1920
Vitrulan	Alemanha	Revestimentos em fibra de vidro	1896
Wei&Kai Membrane	China	Membranas PTFE	2010
Yilong	China	Tecidos de algodão	1995
AGY	EUA	Produção fibras vidro	1998
Alphatex	França	Redes e acessórios para proteção de edifícios	2003
Bafatex	Alemanha	Fitas adesivas com fibras	1930
Bobet	França	Revestimentos têxteis	1937
JX Nippon ANCI	Japão	Redes	1977
Vimaplás	Portugal	Têxteis técnicos – rede fibra vidro	1998
Delcotex	Alemanha	Têxteis técnicos	-
Endutex	Portugal	Revestimento de têxteis com PVC/PU	1970
Euronete	Portugal	Redes	1953
Fiberflon	Alemanha	PTFE (Teflon) e revestimentos em silicone	1988
Frenzelit	Alemanha	Revestimentos e isolamentos	1881
Fujian Sijia	China	Membranas	2002
Hailide	EUA	Cordas e membranas poliéster	2008
James Dewhurst	Alemanha	Têxteis em fibra de vidro	1933
Juta	República Checa	Geotêxtis	1946
Kastilo	Alemanha	Têxteis técnicos	1993
Khosla Profil	India	Têxteis técnicos	1985
Kintex	Coreia do Sul	Têxteis técnicos	1986
Lenzing Plastics	Austria	PTFE e termoplásticos	1965
Polotsk- Steklovvolokno	Bielorrússia	Fibra de vidro	1965
Saenal	Coreia do Sul	Têxteis técnicos	2005
Scantarp	Finlândia	Revestimento de têxteis técnicos	1983
Sioen Industries	Bélgica	Têxteis técnicos	1907
SR Webatex	Alemanha	Têxteis avançados	1901
Stradom	Polonia	Têxteis técnicos	1882
Vetrotex, Saint Gobain	França	Fibra de vidro	1665

### 3.5. Resultados do inquérito à perceção geral das empresas instaladoras de soluções construtivas com membranas arquitetónicas (SMC)

O inquérito foi distribuído a 30 empresas nacionais e internacionais, mas apenas 6 empresas nacionais (amostra correspondente a 20% do universo de empresas considerado) e 3 empresas (amostra de 10% do universo de empresas considerado) internacionais deram resposta. Neste inquérito, as soluções construtivas com membranas passam a designar-se pela sigla SCM. De seguida, apresenta-se o resultado, com o número de respostas assinalado a **azul para empresas nacionais** e a **laranja para empresas internacionais**, para cada questão:

#### 1. Que serviços presta a empresa: (selecione uma ou mais opções)

- Arquitetura (3) (1)
- Engenharia (0) (3)
- Gestão de projeto (1) (0)
- Transformação de membranas (2) (3)
- Execução de estruturas de suporte (3) (3)
- Instalação (3) (3)
- Manutenção (3) (3)
- Outro:

#### 2. Número de funcionários da empresa:

- |                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| Comércio e serviços:    | Indústria:      |
| até 9 (micro) (3) (0)   | até 19 (0) (0)  |
| 10-49 (pequena) (2) (3) | 20-99 (0) (0)   |
| 50-99 (média) (1) (0)   | 100-499 (0) (0) |
| + 100 (grande) (0) (0)  | + 500 (0) (0)   |

#### 3. Em que regiões de Portugal aplicam mais SCM?

- (selecione até 3 opções)
- Região do Alentejo (2)
  - Região do Algarve (3)

#### 4. Na sua opinião, quão importante é a reabilitação de edifícios em Portugal?

- Sem importância (0)
- Pouco importante (2)

- Região do Centro (0)  
 Região de Lisboa (2)  
 Região do Norte (2)  
 Região Autónoma dos Açores (0)  
 Região Autónoma da Madeira (1)
- 5. Porque pensa que a reabilitação de edifícios é importante?** (selecione apenas 3 opções)  
 Por questões ambientais (0)  
 Promove a continuidade entre o passado, presente e futuro (1)  
 Promove a identidade nacional (2)  
 Promove as fontes de identidade de uma comunidade (2)  
 Promove desenvolvimento económico (1)  
 Promove valores culturais (0)
- 7. Qual o tipo de construção onde aplicam SCM com maior frequência?**  
 Construção nova (3)  
 Ampliação (2)  
 Alteração/renovação (1)  
 Reconstrução (0)
- 9. Com que frequência?** (responder caso a resposta à pergunta anterior tenha sido sim)  
 Muito frequente (1) (1)  
 Frequente (1) (1)  
 Pouco frequente (1) (1)
- 11. De acordo com a sua opinião, o que pensa ser necessário para promover a aplicação de SCM na reabilitação de edifícios?** (selecione até 3 opções)  
 Marketing (1) (2)  
 Ações de formação (4) (0)  
 Investigação e desenvolvimento (1) (2)  
 Não sei (1) (0)  
 Outro:
- 12. De acordo com a sua opinião, quais as principais desvantagens em aplicar SCM em intervenções de reabilitação?** (selecione até 3 opções)  
 Acabamento superficial (0)  
 Acústicas (1)  
 Ambientais (3)  
 Coloração/impressão gráfica (0)  
 Compatibilidade (0)  
 Custos (2)  
 Durabilidade (1)  
 Economia e eficiência (0)  
 Elasticidade (0)  
 Estéticas (0)  
 Flexibilidade (1)  
 Higrotérmicas (0)  
 Instalação (0)  
 Isolamento (calor/frio/eletricidade) (0)  
 Manutenção (0)  
 Normativas (0)  
 Propriedades mecânicas dos materiais em membrana (0)  
 Resistência à ação do cloreto de sódio (0)  
 Reciclagem/reparação/substituição (0)  
 Relação peso/força (2)  
 Resistência ao fogo (0)  
 Resistência aos raios UV (0)  
 Reversibilidade (0)  
 Translucidez/transparência (1)  
 Outros:
- 14. Quais os materiais em membrana que utilizam com mais frequência:** (selecione até 3 opções)
- Importante (0)  
 Muito importante (4)  
 Importância absoluta (0)
- 6. De acordo com a sua opinião, faz sentido promover a aplicação de SCM para a reabilitação de edifícios?**  
 Sim (4) (3)  
 Não (2) (0)
- 8. Já aplicaram SCM em intervenções de reabilitação de edifícios?**  
 Sim (3) (3)  
 Não (3) (0)
- 10. Em que elementos construtivos?** (selecione uma ou mais opções)  
 Coberturas (2) (3)  
 Fachadas (0) (3)  
 Tetos falsos (0) (1)  
 Paredes divisórias (1) (1)  
 Elementos de proteção solar (2) (1)
- 13. De acordo com a sua opinião, quais as principais vantagens em aplicar SCM em intervenções de reabilitação?** (selecione até 3 opções)  
 Acabamento superficial (0)  
 Acústicas (0)  
 Ambientais (0)  
 Coloração/impressão gráfica (1)  
 Compatibilidade (0)  
 Custos (0)  
 Durabilidade (0)  
 Economia e eficiência (0)  
 Elasticidade (0)  
 Estéticas (1)  
 Flexibilidade (0)  
 Higrotérmicas (0)  
 Instalação (0)  
 Isolamento (calor/frio/eletricidade) (0)  
 Manutenção (0)  
 Normativas (2)  
 Propriedades mecânicas dos materiais em membrana (1)  
 Resistência à ação do cloreto de sódio (0)  
 Reciclagem/reparação/substituição (0)  
 Relação peso/força (1)  
 Resistência ao fogo (0)  
 Resistência aos raios UV (1)  
 Reversibilidade (0)  
 Translucidez/transparência (1)  
 Outros:
- 15. Qual o principal tipo de aplicação das SCM?**  
 Tensadas (6)

Membrana de poliéster revestida a PVC (2) (3)  
Membrana de fibra de vidro revestida a silicone (1) (0)  
Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE (1) (1)  
Membrana de ETFE (1) (2)  
Membrana de PTFE revestida a PTFE (0) (0)  
Membrana de PVC (1) (0)  
Membrana de poliéster (0) (0)  
Membranas elásticas ("stretch fabrics") (0) (0)

Outras:

**16. Qual o principal material utilizado na estrutura/subestrutura das SCM?**

Metal (6)  
Madeira (0)  
Misto (0)  
Outro:

**18. Qual o carater temporal mais frequente das aplicações SCM que aplicam?**

Temporário (3) (0)  
Permanente (3) (3)

**20. Qual o destino final?**

Aterro (4)  
Reutilização (0)  
Reciclagem (2)

**22. De acordo com a sua opinião, que tendências/novidades se podem aproveitar para aumentar a utilização das SCM? (selecione até 3 opções)**

Adaptação às alterações climáticas – para mitigar os riscos associados (1) (1)  
Conceção de estruturas com flexão ativa (0) (0)  
Conceção de unidades modulares e prefabricada em membrana (0) (1)  
Construções transformáveis e adaptativas (0) (0)  
Eficiência energética (0) (3)  
Estruturas têxteis híbridas (0) (0)  
Funcionalização das membranas (0) (0)  
Integração de elementos geradores de energia (2) (1)  
Integração de vegetação - membrana vegetal (0) (0)  
Interatividade (membranas inteligentes) (2) (0)  
Reabilitação de edifícios (0) (1)  
Robótica aplicada à construção (0) (0)  
Utilização de matérias-primas biodegradáveis (2) (0)  
Outras:

**24. O que sente falta para o desenvolvimento desta atividade em Portugal?**

Formação (4)  
Meios humanos (0)  
Meios mecânicos (1)  
Produção nacional de membranas (1)

Pneumáticas (0)

**17. Qual o setor de atividade/tipo de uso dos edifícios onde aplicam mais SCM? (selecione até 3 opções)**

Habituação (1) (0)  
Indústria (2) (0)  
Comércio/serviços (3) (2)  
Agricultura/Agropecuária/Pescas (0) (0)  
Cultural/recreativo (1) (3)  
Educativo (1) (0)  
Militar/defesa (0) (0)  
Saúde (0) (0)  
Desportivo (0) (3)

**19. A empresa adota práticas de reciclagem de membranas?**

Sim (5) (2)  
Não (1) (1)

**21. De acordo com a sua opinião, quais os aspetos em que as SCM têm de melhorar? (selecione até 3 opções)**

Acústicos (3)  
Ambientais/reciclagem (1)  
Custos (0)  
Durabilidade (1)  
Higrotérmicos (1)  
Manutenção (0)  
Mão-de-obra/Transformação (corte, costura, etc...) (0)  
Materiais (0)  
Normativos (0)  
Resistência ao fogo (1)  
Resistência aos raios UV (1)  
Tecnológicos (construção) (1)

**23. Se tivesse acesso a financiamento para investir na sua empresa qual a principal área em que investiria:**

Meios humanos (3) (2)  
Meios mecânicos (2) (3)  
Ferramentas informáticas (0) (1)  
Formação (2) (0)  
Outra:

**25. Na sua opinião, o que limita o desenvolvimento e aplicação de SCM? (selecione 2 opções)**

Aspetos culturais/resistência social (2)  
Aspetos económicos (1)  
Recursos humanos (1)

Limitações em fazer soluções à medida (0)  
 Outro motivo:

Distribuição equitativa da produção mundial de membranas  
 (1)

### 3.6. Distribuição das construções membranas por zonas de vulnerabilidade a desastres naturais

Tabela A3.3. Ranking, por ordem crescente, da percentagem de construções com membranas (CM) por 54 países analisados neste estudo e respetivo índice de risco a desastre natural.

Posição	Localização	CM a nível mundial	Índice de risco de desastre natural (UNU, 2013)	Posição de risco
1 a 30			Ver capítulo 3, item 3.5.2, Tabela 3.4.	
31	Malásia	0,33 %	6,45 %	
32	Noruega	0,33 %	2,35 %	
33	Emirados Árabes Unidos	0,33 %	2,10 %	
34	Albânia	0,17 %	10,01 %	9 <sup>a</sup>
35	Azerbaijão	0,17 %	6,28 %	
36	Bahrein	0,17 %	1,81 %	
37	Dinamarca	0,17 %	3,10 %	
38	Egito	0,17 %	2,34 %	
39	El Salvador	0,17 %	16,85 %	2 <sup>a</sup>
40	Finlândia	0,17 %	2,28 %	
41	Honduras	0,17 %	10,91 %	8 <sup>a</sup>
42	Irão	0,17 %	4,92 %	
43	Kuwait	0,17 %	3,70 %	
44	Libano	0,17 %	5,05 %	
45	Líbia	0,17 %	3,93 %	
46	Malta	0,17 %	0,61 %	53 <sup>a</sup>
47	Maurícias	0,17 %	15,18 %	3 <sup>a</sup>
48	Marrocos	0,17 %	7,13 %	
49	Nicarágua	0,17 %	14,89 %	4 <sup>a</sup>
50	Nigéria	0,17 %	11,62 %	7 <sup>a</sup>
51	Paquistão	0,17 %	7,21 %	
52	Singapura	0,17 %	2,49 %	
53	Tailândia	0,17 %	6,34 %	
54	Ucrânia	0,17 %	3,14 %	

## **ANEXO 4**

### **Pormenorização para reabilitar com membranas: análise e exemplos por elemento construtivo**

Em intervenções de reabilitação, quando se utilizam novas tecnologias e materiais para preservar, estender, ou de alguma forma substituir o edificado construído, existe sempre um confronto com a questão relativa à intrusividade destas novas soluções. Contudo, para que o arquiteto consiga expressar a sua visão sobre a fusão entre o presente e o passado do edifício intervencionado, existem muitos outros fatores, para além dos especificamente arquitetónicos, que necessitam que ser considerados, tais como o estado de conservação da estrutura existente e os tipos de materiais usados.

Para analisar (categorizar e tipificar) o tipo de intervenções de reabilitação funcional com membranas elaborou-se um inventário de obras existentes (70 casos de estudo). Para facilitar a leitura foram elaboradas fichas com uma descrição de cada caso de estudo segundo alguns parâmetros. As fichas dos projetos selecionados encontram-se ordenadas cronologicamente, segundo o ano de construção original do edifício existente. Deste modo é possível ter uma leitura da adequação das tecnologias construtivas com membranas - desde as edificações mais antigas até às mais recentes. Os parâmetros em análise foram escolhidos para constituir uma visão global sobre o estado da arte da aplicação dos materiais em membrana na reabilitação de edifícios. A partir dos projetos selecionados para análise foi possível retirar conceitos, estratégias e lições aprendidas com utilidade para suportar tomadas de decisão em futuros projetos de reabilitação - em que a utilização de membranas arquitetónicas constituam uma alternativa eficiente.

A análise das intervenções e as fichas de cada projeto dividem-se em duas partes. A primeira parte descreve intervenções em elementos construtivos primários e a segunda em elementos construtivos secundários. Ambas as partes incluem pormenores (de costuras, bordaduras, cumes, calhas de drenagem, cantos, pontos altos e baixos, placas de base, cabos, conexões e ancoragens) e processos construtivos. Os casos de estudo selecionados ilustram extensivamente esses pormenores e processos construtivos. A ligação entre todos os detalhes, os requisitos, o contexto e todo o processo de conceção são especialmente enfatizados.



## 4.1 Análise de intervenções com membranas - elementos construtivos primários

### 4.1.1 Cobertura

As coberturas em membrana arquitetônica minimizam a necessidade de estrutura portante, aproveitando as características das membranas pretensadas e com dupla curvatura. Permitem recriar espaços fechados e climatizados, até espaços abertos e confortáveis por oferecerem proteção solar e impermeabilização.

#### • Análise de parâmetros contextuais

Os projetos em análise correspondem a intervenções em coberturas com membranas e encontram-se ordenados cronologicamente, segundo o ano de construção original do edifício existente (Tabela 1). Pela análise cronológica dos projetos em estudo verifica-se que a idade média dos edifícios pré-existentes é de 167 anos. (máximo, superior a 2000 anos - projeto ref<sup>o</sup> C.01. Arena de Nimes - mínimo igual a 8 anos - projeto ref<sup>o</sup> C.32 University of West London). Contudo, fazendo uma análise segundo as categorias de durabilidade definidas Douglas (2006), verifica-se que 50% dos edifícios pré-existentes possuem “vida normal” (entre 60 a 119 anos) (Figura 1) e 22% possuem vida longa (superior a 120 anos). A maioria dos edifícios pré-existentes que sofreram intervenções com coberturas em membrana é antiga (75% foram construídos antes de 1960) (Figura 2).

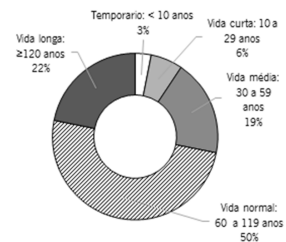


Figura 1. Categoria de durabilidade das construções pré-existentes à data de intervenção com coberturas em membrana.

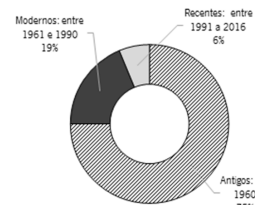


Figura 2. Ano de construção dos edifícios pré-existentes - projetos de reabilitação com coberturas em membrana.

Verifica-se que a maior parte das intervenções de reabilitação com membranas em coberturas é recente, pois realizaram-se entre os anos de 2001 e 2010 (47%) e entre 2011 e 2015 (34%), possuindo em média 10 anos (máximo 28 anos e mínimo 2 anos).

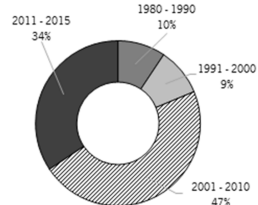


Figura 3. Projetos de reabilitação com coberturas em membrana, segundo o ano da intervenção.

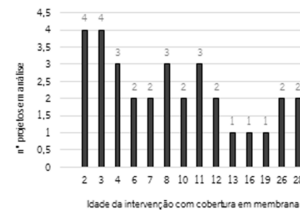


Figura 4. Projetos de reabilitação com coberturas em membrana segundo a idade da membrana após intervenção (até ao ano de 2016).

Tabela 1. Síntese dos parâmetros contextuais analisados nos projetos de reabilitação com membranas em que a cobertura foi intervençcionada.

Projetos de reabilitação com membranas - intervenção na cobertura	Contextuais					
	Ano da construção do pré-existente	Ano da intervenção de reabilitação	Idade do edifício existente quando foi intervençcionado [anos]	Idade da membrana após intervenção até ano de 2017 [anos]	Localização	
					País	Continente
C.01. Arena de Nimes	27 a.C.	1988	2015	29	França	Europa
C.02. Fuchun Kosa Zou Ma Lou	1300	2014	714	3	China	Ásia
C.03. Palácio de Igarza	1800	2009	209	8	Espanha	Europa
C.04. Museu Chileno de Arte Precolombina	1807	2013	206	4	Chile	América
C.05. Palácio das Artes De Mons	1824	2014	190	3	Bélgica	Europa
C.06. Camellia House	1827	2006	179	11	Inglaterra	Europa
C.07. Estação de Comboios de Salzburg	1860	2012	152	5	Áustria	Europa
C.08. Estação de Comboios Sakuragicho	1872	1990	118	27	Japão	Ásia
C.09. Câmara Municipal de Vienna	1884	2000	116	17	Áustria	Europa
C.10. Kapuziner carrée	1889	2003	114	14	Alemanha	Europa
C.11. Estação de Comboios de Dresden	1898	2006	108	11	Alemanha	Europa
C.12. Imagination Headquarters	1900	1990	90	27	Inglaterra	Europa
C.13. Masia Villa Celiana	1920	2010	90	7	Espanha	Europa
C.14. Casa do Pintor Lee Jung Seob	1920	1997	77	20	Coreia Sul	Ásia
C.15. Centro William Rappard, Edifício OMC	1926	2012	86	5	Suíça	Europa
C.16. Atrio do Salão de Exposições do Reno	1928	2008	80	9	Alemanha	Europa
C.17. Câmara Municipal de Saxony-Anhalt	1929	2012	83	5	Alemanha	Europa
C.18. Edifício Johnson	1930	2005	75	12	Inglaterra	Europa
C.19. Burberry Headquarters, Horseferry House	1930	2008	78	9	Inglaterra	Europa
C.20. Fukiya International Villa Hall	1930	1988	58	29	Japão	Ásia
C.21. Estádio Olímpico de Berlim	1936	2004	68	13	Alemanha	Europa
C.22. Dresden Castle Kleiner Schloschof	1945	2009	64	8	Alemanha	Europa
C.23. Igreja de Corbera D'ebre	1948	2013	65	4	Espanha	Europa
C.24. Frac Art Centre	1949	2013	64	4	França	Europa
C.25. Freslio	1963	2005	42	12	Dinamarca	Europa
C.26. Edifício de Habitação Coletiva em Zamora	1970	2014	44	3	Espanha	Europa
C.27. Hartley Library Learning Centre	1970	2004	34	13	Inglaterra	Europa
C.28. Praça Devonshire	1970	2008	38	9	Inglaterra	Europa
C.29. Infantário de Wismar	1972	2005	33	12	Alemanha	Europa
C.30. Tallsman Centre	1983	2010	27	7	Canadá	América
C.31. Clube de Tênis Bourg-La-Reine	1992	2013	21	4	França	Europa
C.32. University Of West London	2006	2014	8	3	Inglaterra	Europa
C.33. Palácio de Minería	1813	2011	198	6	México	América
C.34. Biblioteca Nacional Beyazit	1506	2015	509	2	Turquia	Euro-Ásia
C.35. Estação Comboios Carlisle	1847	2017	170	0	Reino Unido	Europa
C.36. Her Majesty's Treasury	1917	2002	85	15	Reino Unido	Europa
C.37. Colégio Ketteler	1960	2009	49	8	Alemanha	Europa
C.38. Galeria Nacional de Londres	1838	2003	165	14	Reino Unido	Europa
C.39. Sede Jean-Paul Gautier	1900	2004	104	13	França	Europa
C.40. Estação Comboios de Wrocław	1904	2013	109	4	Polónia	Europa
C.41. Claustro da Abadia de Sables D'Olonne	1800	2013	213	4	França	Europa
C.42. Julianus Shopping	1800	2008	208	9	Bélgica	Europa

<sup>1</sup> Categorias de durabilidade definidas por Douglas (2006): Temporária – período mínimo até 10 anos; vida curta – período mínimo de 10 anos; vida média – período mínimo de 30 anos; vida normal – período mínimo de 60 anos e vida longa – período mínimo de 120 anos.

Também se verifica que a maioria dos projetos em análise realizou-se na Europa Central ou em Inglaterra (Figura 5), onde estes sistemas têm sido desenvolvidos e industrializados. Contudo, na última década, o uso desta tecnologia foi aplicada noutras zonas com temperaturas da estação de verão mais elevadas, como é o caso do sul da Europa (13% em Espanha).

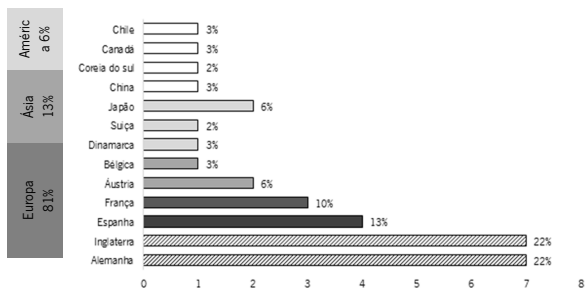


Figura 5. Distribuição dos projetos de reabilitação em análise, com coberturas em membranas, por país e continente.

O primeiro projeto documentado referente à reabilitação com membranas arquitetônicas data de 1938 e foi desenvolvido para a cobertura do pátio de um edifício existente em Londres (Gonzales *et al.*, 2012 apud NAUMER, 1999). Esta cobertura foi projetada para ser suportada por pressão de ar, contudo nunca chegou a ser construída. O uso de membranas com sistemas pneumáticos nas décadas seguintes irá focar-se na construção de novos edifícios. Contudo, nos anos sessenta, com o I Colóquio Internacional de Estruturas Pneumáticas, retoma-se o interesse nestas aplicações para a cobertura de edifícios existentes. Nesse colóquio, Heinz Isler apresentou (Figura 6) os benefícios da substituição de materiais pesados, como o vidro, por membranas. Esta tendência também se verifica no facto da maioria dos projetos em análise serem de intervenções em coberturas de membrana (55%) (Tabela 2). Por outro lado, também se verifica que, no âmbito das intervenções com membranas em coberturas, metade se destinam a coberturas de pátios interiores (onde 75% destas intervenções são com sistemas pneumáticos e 25% são tensadas) (Figura 7).

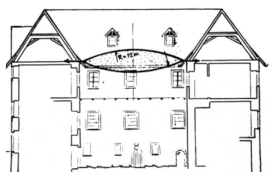


Figura 6. Proposta de uma cobertura pneumática para o pátio interior de um castelo (Gonzales *et al.*, 2012 apud Isler, 1967).

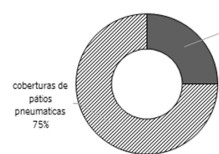


Figura 7. Projetos de reabilitação em análise com aplicação de membranas em coberturas de pátio, através de sistemas pneumáticos ou tensados (entre o ano 2000 e 2015)

Paralelamente a esta proposta (Figura 6), surgem outras propostas com caráter utópico e que tiveram uma grande disseminação. Em 1968, o impacto da proposta “Instant City” desenvolvida pelos Archigram foi elevado. Os Archigram apoiaram-se nas novas tecnologias para propor novas relações entre as pessoas e as cidades existentes, onde surgiu uma linha de investigação sobre envolventes pneumáticas para melhorar essas novas relações sociais. O recurso a construções flexíveis e temporárias iria favorecer a reativação dos espaços urbanos convencionais.

Contudo, a primeira proposta executada e representativa da utilização de membranas em intervenções de reabilitação de edifícios existentes surgiu nos anos 80, quando o desenvolvimento de novos materiais e a melhoria dos processos de produção permitiram a construção de elementos mais resistentes e permanentes. A cobertura do “Anfiteatro de Nimes” (ref<sup>o</sup> C.01), uma grande almofada insuflada com 88 m de comprimento e 57 m de largura, foi projetada por Schlaich, Bergman & Partner em associação com Werner Sobek, em 1988. Nesta década desenvolveu-se a utilização de sistemas pneumáticos para a cobertura de grandes espaços, principalmente em estádios nos EUA e no Japão, para proporcionar conforto sob condições climáticas adversas.

Recentemente, entre os projetos em análise da última década, existem (Figura 8): o projeto da cobertura do pátio interior da “Câmara Municipal de Vienna” (projeto ref<sup>o</sup> C.09 – com membrana tensada sem pressão de ar com

um vão livre de 33m); a cobertura pneumática do “Kapuzinerkarrée” (projeto ref<sup>o</sup> C.10 (Figura 8) que data de 2003; destaca-se também a cobertura pneumática do “Kleiner Schlosshof” em Dresden (ref<sup>o</sup> C.22, Figura 8c), projetado pelo arquiteto Peter Kulka e o gabinete de engenharia Form-TL, em 2009; e o antigo “Rhein Halle” em Köln (ref<sup>o</sup> C.16, Figura 8), projetado em 2008 por HPP com almofadas pneumáticas com 26m de comprimento.

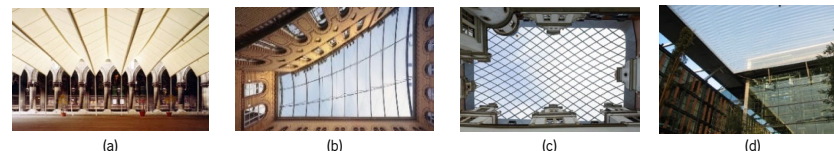


Figura 8. Exemplos de intervenção com membranas em coberturas de pátios: (a) “Câmara Municipal de Vienna” (Áustria), (b) “Kapuzinerkarrée” em Aachen (Alemanha), (c) “Kleiner Schloss” em Dresden (Alemanha), (d) “Rhein Halle” de Köln (Alemanha).

No ano de 2012 realizou-se a primeira aplicação de uma estrutura pneumática contínua, numa intervenção de reabilitação na cobertura do edifício da Câmara Municipal de Saxony-Anhalt (ref<sup>o</sup> C.17.). A ideia de uma estrutura pneumática contínua tem mais de 10 anos. O *Institute of Membrane Structures (IMS)* desenvolveu e patenteou o sistema *Bekaert-Belt* que usa cintas/correas de aço embebidas em poliuretano, resistentes a raios UV, para permitir a execução de grandes vãos com estruturas em membranas de ETFE. Depois da primeira cobertura experimental em Bobingen, os investigadores do IMS aplicaram aqui, pela primeira vez, o sistema *Bekaert-Belt* a um edifício de grande escala (Tensinet, 2016). A vantagem de utilizar cintas/correas em vez de cabos reside no facto destas criarem uma superfície plana (que não se desloca sobre a superfície da membrana) ao contrário dos cabos. Localizadas dentro de mangas, as cintas/correas podem suportar forças de carga e descarga, cruzando-se através elementos de união e tornando possível criar grandes vãos sem o uso de perfis de apoio intermédios.

• **Relação entre parâmetros construtivos e climáticos**

Os projetos em análise localizam-se entre 24°- 55° de latitude Norte (Figura 9) e em média nos 46,5°. A maioria localiza-se entre 50°- 52° de latitude Norte (50%). Numa análise mais detalhada (Figura 10), observa-se que a maioria dos projetos encontra-se na zona Cfa/Cfb (62%) – clima temperado marítimo – de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (Kottek, 2006); seguindo-se a zona Dfb (25%) – clima continental húmido, onde predomina a utilização de coberturas com membranas tensadas.

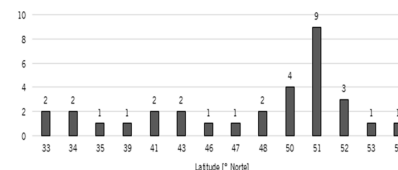


Figura 9. Distribuição dos projetos de reabilitação com coberturas de membrana em análise, segundo a latitude.

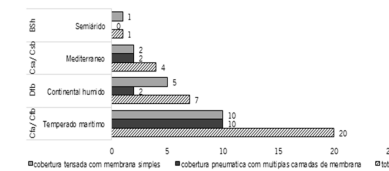


Figura 10. Distribuição dos projetos de reabilitação com coberturas de membrana em análise, segundo zonas climáticas de Köppen-Geiger.<sup>o</sup>

Um clima com temperaturas amenas e elevados níveis de humidade favorece o uso de coberturas com membranas transparentes e pneumáticas (Figura 10), beneficiando dos ganhos de radiação solar no inverno. Além disso, permite que, através sistemas de ventilação passivos ou ativos (com reduzido consumo energético) seja possível atingir bons desempenhos em parâmetros de conforto interior. No entanto, a utilização de tecnologias com

<sup>o</sup> Clima temperado marítimo – Cfa, Cfb: nas regiões com clima temperado marítimo as chuvas são abundantes e bem distribuídas ao longo do ano, sendo o verão bastante fresco e húmido.

<sup>o</sup> Clima mediterrâneo – Csa, Csb: caracteriza-se por ter um verão quente e seco, e inverno instável e húmido. Clima desértico – BWh: caracteriza-se por ter reduzida quantidade de chuvas e grande amplitude térmica. Devido à aridez, de dia a temperatura chega a 45 °C e à noite -5 °C. O clima desértico geralmente ocorre em latitudes entre 15° e 30°. Clima semiárido – BSh: tipo de clima caracterizado pela baixa humidade e pouco volume pluviométrico.

coberturas pneumáticas tem aumentado noutros climas, como o Mediterrâneo, com temperaturas mais elevadas no verão.

Os principais parâmetros climáticos que afetam o comportamento das coberturas em membrana são: temperaturas máximas e mínimas, humidade relativa, precipitação, vento e radiação solar. De acordo com esses parâmetros, os principais problemas destas coberturas estão relacionados com as descontinuidades e pontes térmicas entre a membrana e a estrutura - principalmente nos sistemas pneumáticos onde as condensações superficiais podem surgir. Esta patologia pode diminuir a durabilidade da membrana, e a presença de água pode aumentar o crescimento de fungos e, nos elementos metálicos, corrosão.

Tabela 2. Síntese dos parâmetros climáticos e de riscos naturais analisados nos projetos de reabilitação com membranas em que a cobertura foi objeto de intervenção.


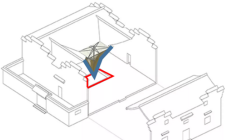

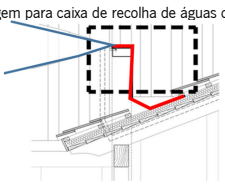
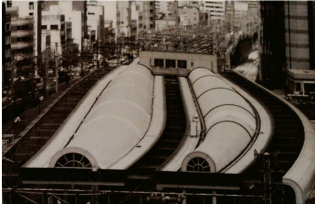
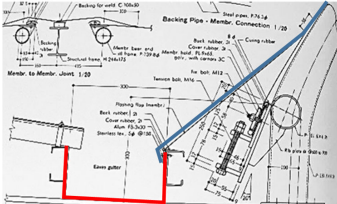



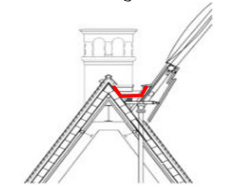
Projetos de reabilitação com membranas - Intervenção na cobertura	Climáticos						
	Latitude [° Norte]	Zona climática (Classificação Köppen-Geiger)	Temperatura média anual [°C]	Radiação solar média [kWh/m <sup>2</sup> /dia] <sup>1</sup>	Precipitação média anual [mm]	Velocidade do vento, média anual [m/s]	
C.01. Arena de Nimes	43	Csa	13,8	3,5	731	3,9	
C.02. Fuchun Kosa Zou Ma Lou	34	Cfa	16,5	4,0	1455	4,4	
C.03. Palácio de Igarza	43	Cfb	14,0	3,8	1400	6,2	
C.04. Museu chileno de arte precolombina	33	Csb	14,6	5,0	359	5,3	
C.05. Palácio das artes de Mons	50	Cfb	10,2	2,8	781	6,0	
C.06. Camellia House	52	Cfb	9,8	2,5	648	6,4	
C.07. Estação de comboios de Salzburg	47	Dfb	8,9	3,1	1191	6,0	
C.08. Estação de comboios Sakuragicho	35	Cfa	15,6	3,7	1554	5,8	
C.09. Câmara Municipal de Viena	48	Dfb	9,9	3,1	623	5,4	
C.10. Kapuzinerkarrée	50	Cfb	9,8	2,7	854	6,4	
C.11. Estação de comboios de Dresden	51	Dfb	9,0	2,8	592	6,4	
C.12. Imagination Headquarters	52	Cfb	9,8	2,5	648	6,4	
C.13. Masia Villa Celiana	39	Csa	17,0	4,9	454	5,2	
C.14. Casa do Pintor Lee Jung Seob	33	Cfa	15,2	4,1	1356	5,8	
C.15. Centro William Rappard, Edifício OMC	46	Cfb	10,3	3,3	934	4,3	
C.16. Atrio do Salão de Exposições do Reno	50	Cfb	10,1	2,7	774	6,6	
C.17. Câmara Municipal de Saxony-Anhalt	52	Dfb	9,1	2,6	570	5,7	
C.18. Edifício Johnson	51	Cfb	11,1	2,7	621	7,1	
C.19. Burberry Headquarters, Horseferry House	51	Cfb	11,1	2,7	621	7,1	
C.20. Fukiya International Villa Hall	34	Cfa	16,2	3,7	952	6,5	
C.21. Estádio Olímpico de Berlim	52	Dfb	9,1	2,6	570	5,7	
C.22. Dresden Kleiner Schlosshof	51	Cfb	9,0	2,8	592	6,4	
C.23. Igreja de Corbera D'ebre	41	Csa	15,0	4,2	518	4,5	
C.24. Frac Art Centre	51	Cfb	10,4	3,2	673	7,9	
C.25. Freslio	55	Cfb	8,4	2,8	621	4,3	
C.26. Edifício de Habitação Coletiva em Zamora	41	Bsk	12,3	3,9	359	5,6	
C.27. Hartley Library Learning Centre	50	Cfb	10,4	2,7	774	6,7	
C.28. Praça Devonshire	51	Cfb	11,1	2,7	621	7,1	
C.29. Infantário de Wismar	53	Dfb	8,5	2,6	608	5,8	
C.30. Talisman Centre	51	Dfb	3,4	3,3	428	5,0	
C.31. Clube de Ténis Bourg-La-Reine	48	Cfb	11,2	2,9	650	7,5	
C.32. University of West London	51	Cfb	11,1	2,7	621	7,1	
<b>Média</b>	<b>46,5</b>		<b>11,4</b>	<b>3,2</b>	<b>758</b>	<b>5,9</b>	
	<b>Riscos de desastres naturais<sup>2</sup></b>						
	Sismos [%]	Inundações [%]	Secas [%]	Desloca mento de terras [%]	Erupção vulcânica [%]		Ciclones [%]
<b>Média</b>	<b>32</b>	<b>57</b>	<b>13</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>		<b>11</b>

Além disso, em climas com elevadas temperaturas e em edifícios sem sistemas de ventilação e ar condicionado, são frequentes os problemas de efeito de estufa - principalmente com membranas transparentes sem estratégias de sombreamento. A precipitação e a queda de neve influenciam o desenho das coberturas em membrana e por

<sup>1</sup> Dados obtidos em: <http://www.gaisma.com>, NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center; New et al. 2002  
<sup>2</sup> Dados obtidos em: <http://www.chinici.com/>

isso devem ser consideradas estratégias de drenagem de águas e de isolamento acústico para minimizar o ruído de impacto provocado pela chuva.

Tabela 3. Pormenores de ligação entre cobertura em membrana e edifício pré-existente - desenhados especificamente para a drenagem de águas pluviais em intervenções de reabilitação.

Exemplo de projeto de reabilitação em análise	Intervenção com cobertura de membrana Pormenores de drenagem de águas pluviais
 <p>C.02 Fuchun Kosa Zou Ma Lou</p>	 <p>Drenagem para caixa de recolha de águas central.</p>
 <p>C.03 Palácio de Igarza</p>	 <p>Drenagem com calha perimetral executada na interseção entre a cobertura existente e a cobertura em membrana</p>
 <p>C.08 Estação de comboios Sakuragicho</p>	 <p>Drenagem para calha através do prolongamento da membrana</p>
 <p>C.09 Câmara Municipal de Viena</p>	 <p>Drenagem através de "mangueiras" de membrana.</p>
 <p>C.22 Dresden - Kleiner Schlosshof</p>	 <p>Drenagem com calha perimetral executada na interseção entre a cobertura existente e a cobertura em membrana.</p>

**Exemplo de projeto de reabilitação em análise**

**Intervenção com cobertura de membrana  
Pormenores de drenagem de águas pluviais**



C.11 Estação de comboios de Dresden



Drenagem combinada entre a criação de pendentes e os níveis mais baixos da estrutura metálica pré-existente



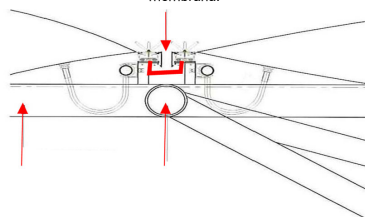
C.13 Masia Villa Celiana



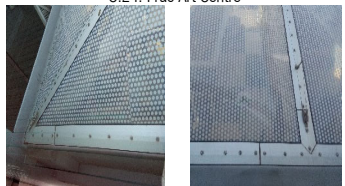
Drenagem pontual através de tubos flexíveis. Bocal soldado à membrana.



C.24. Frac Art Centre



Drenagem através de perfis extrudidos para fixação das almofadas pneumáticas, com caleiras integradas entre as pendentes criadas pelas almofadas. Estrutura metálica tubular com sistema de recolha de águas pluviais e de insuflação integrados.



**• Parâmetros programáticos**

Os materiais em membrana têm tido uma expressiva aplicação em edifícios com categoria de uso não residencial, como se pode observar na (Figura 11). Os projetos em análise realizam-se maioritariamente sobre edifícios com usos (inicial) residencial (22%), de escritórios (16%), desportivos e educacionais (13%). No uso final, após intervenção com coberturas em membranas, os edifícios passam a ter uso maioritariamente cultural (31%) e de escritórios (22%). O principal uso, na maioria dos edifícios intervencionados com coberturas de membrana, destina-se a tipologias de uso permanente (91%), como a cobertura de pátios em edifícios culturais (31%) ou de escritórios (22%). A leveza dos sistemas pneumáticos em relação ao vidro tem favorecido a promoção desta tecnologia.

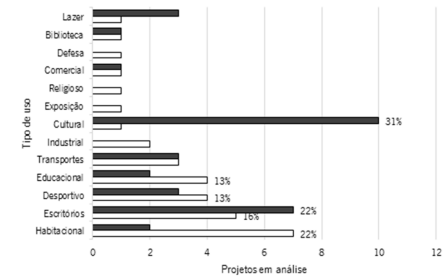


Figura 11. Relação entre uso inicial e uso após intervenção com cobertura em membrana.

Em relação ao tipo de intervenção com coberturas de membrana em edifícios existentes, verifica-se que a maioria são ampliações (41%) e com conversão de uso (53%) (Figura 12).

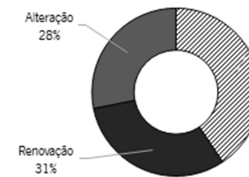


Figura 12. Tipos de intervenções nos edifícios reabilitados com cobertura em membrana.

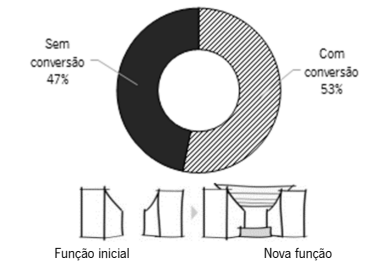


Figura 13. Existência de conversão de uso nos edifícios reabilitados com cobertura de membrana.

Tabela 4. Síntese dos parâmetros programáticos analisados nos projetos de reabilitação com membranas em que a cobertura foi objeto de intervenção.

Projetos de reabilitação com membranas - Intervenção na cobertura	Uso inicial	Uso final após intervenção	Programáticos		
			Com conversão de uso [● = sim; ○ = não]	Tipo de utilização [P=Permanente ou T=temporária]	Tipo de intervenção de reabilitação
C.01. Arena de Nimes	Desportivo	Cultural	●	T	Ampliação
C.02. Fuchun Kosa Zou Ma Lou	Habitacional	Lazer	●	P	Ampliação
C.03. Palácio de Igarza	Defesa	Cultural	●	P	Ampliação
C.04. Museu chileno de arte precolombina	Museológico	Museológico	○	P	Ampliação
C.05. Palácio das artes de Mons	Educacional	Cultural	●	T	Alteração
C.06. Camellia House	Lazer	Lazer	○	P	Alteração
C.07. Estação de comboios de Salzburg	Transportes	Transportes	○	P	Renovação
C.08. Estação de comboios Sakuragicho	Transportes	Transportes	○	P	Renovação
C.09. Câmara municipal de Vienna	Escritórios	Cultural	●	T	Alteração
C.10. Kapuziner carrée	Escritórios	Comercial	●	P	Ampliação
C.11. Estação de comboios de Dresden	Transportes	Transportes	○	P	Renovação
C.12. Imagination Headquarters	Habitacional	Escritórios	●	P	Ampliação
C.13. Masia Villa Celiana	Habitacional	Lazer	●	P	Alteração
C.14. Casa do Pintor Lee Jung Seob	Habitacional	Cultural	●	P	Renovação
C.15. Centro William Rappard, Edifício Omc	Educacional	Escritórios	●	P	Ampliação
C.16. Atrio do Salão de Exposições Do Reno	Exposição	Escritórios	●	P	Alteração
C.17. Câmara Municipal de Saxony-Anhalt	Escritórios	Escritórios	○	P	Ampliação



Projetos de reabilitação com membranas - Intervenção na cobertura	Programáticos				
	Uso inicial	Uso final após intervenção	Com conversão de uso (● = sim, ○ = não)	Tipo de utilização (P=Permanente ou T=temporária)	Tipo de intervenção de reabilitação
C.18. Edifício Johnson	Escritórios	Escritórios	○	P	Alteração
C.19. Burberry Headquarters, Horseferry House	Escritórios	Escritórios	○	P	Alteração
C.20. Fukiya International Villa Hall	Habitacional	Comunitário	●	P	Ampliação
C.21. Estádio Olímpico de Berlim	Desportivo	Desportivo	○	P	Alteração
C.22. Dresden Castle Kleiner Schlosshof	Habitacional	Cultural	●	P	Ampliação
C.23. Igreja de Corbera D'ebre		Religioso	●	P	Renovação
C.24. Frac Art Centre	Industrial	Cultural	●	P	Ampliação
C.25. Frasillo	Industrial	Habitacional	●	P	Alteração
C.26. Edifício de Habitação Coletiva em Zamora	Habitacional	Habitacional	○	P	Renovação
C.27. Hartley Library Learning Centre	Biblioteca	Biblioteca	○	P	Renovação
C.28. Praça Devonshire	Comercial	Escritórios e restauração	●	P	Ampliação
C.29. Infantiário de Wismar	Educacional	Educacional	○	P	Ampliação
C.30. Talisman Centre	Desportivo	Desportivo	○	P	Renovação
C.31. Clube de Ténis Bourg-la-Reine	Desportivo	Desportivo	○	P	Renovação
C.32. University Of West London	Educacional	Educacional	○	P	Renovação
<b>Maiores</b>	<b>Habitacional</b>	<b>Cultural</b>	<b>Sim</b>	<b>Permanente</b>	<b>Ampliação</b>
<b>Porcentagem</b>	<b>22</b>	<b>31</b>	<b>53</b>	<b>91</b>	<b>53</b>

**Parâmetros construtivos**

Os projetos em análise encontram-se ordenados cronologicamente na Tabela 2, segundo o ano de construção do edifício pré-existente. Deste modo, é possível ter uma leitura das soluções adotadas e da adequação das tecnologias construtivas com membranas às construções pré-existentes - desde as mais antigas até às mais recentes. No que toca à graduação das intervenções, dos projetos em análise, verifica-se que maioritariamente são ligeiras (35%) e médias (31%) (Figura 14).

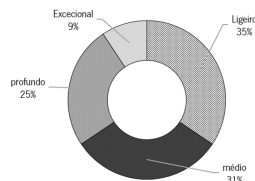
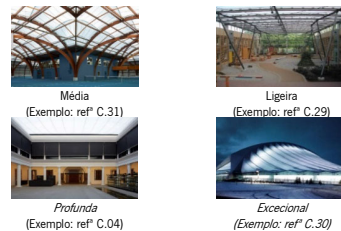


Figura 14. Graduação das intervenções de reabilitação dos projetos onde foram realizadas intervenções com cobertura em membrana.



Verifica-se que a maioria dos projetos em análise apresenta cobertura com sistema construtivo de membrana tensionada perimetralmente (56%) e com estrutura pneumática (44%) (Figura 15).

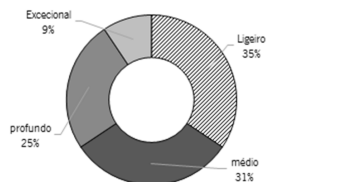


Figura 15. Intervenção com membrana em cobertura - a) distribuição por tipos de aplicação presentes nos projetos em análise.

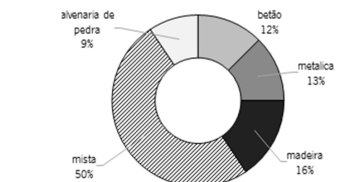


Figura 16. Pré existente - tipo de estrutura sobre a qual é feita a intervenção com cobertura de membrana nos projetos em análise.

O planeamento de uma intervenção de reabilitação inicia-se com a análise do pré-existente. Verifica-se que o tipo de estrutura pré-existente nos projetos em análise é maioritariamente misto (50%) (Figura 16). Também se verifica que 84% das pré-existências não necessitaram de reforço estrutural para acolherem as intervenções com coberturas em membranas arquitetónicas.

Verifica-se que os sistemas construtivos das coberturas de membrana em análise transmitem cargas para a estrutura pré-existente através dos seguintes tipos de subestrutura: perimetral, pontual e linear (Figura 17). A maioria das subestruturas perimetrais são armações, caixilhos e anéis; enquanto as subestruturas lineares são vigas, arcos, treliças e subestruturas verticais. Relativamente às subestruturas pontuais, só se registam mastros e ganchos.

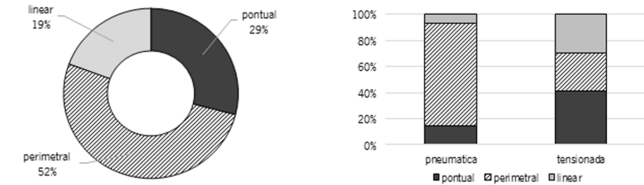


Figura 17. Intervenção com coberturas de membranas - tipos de elementos através dos quais é feita a transmissão de cargas da cobertura em membrana para o pré-existente.

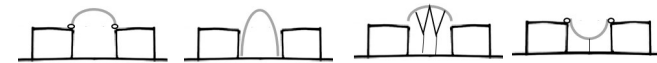


Figura 18. Esquemas da relação entre a cobertura de membrana e o edifício pré-existente.

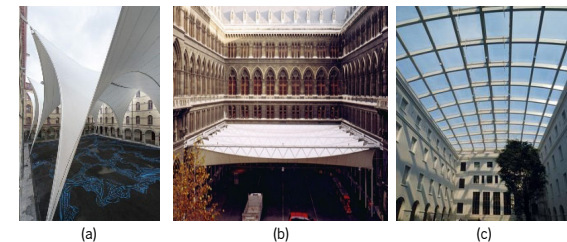


Figura 19. Exemplos de pormenores de coberturas em membrana com os diferentes tipos de transmissão de carga em análise: (a) Pontual - exemplo projeto ref° C.05 - Palácio das Artes de Mons; (b) Linear - exemplo projeto ref° C.09 Câmara Municipal de Viena; (c) perimetral - exemplo projeto ref° C.15 Centro William Rappard, OMC.

Os materiais dos elementos da subestrutura foram analisados de acordo com os diferentes sistemas construtivos de coberturas em membranas (Figura 20). A maioria dos projetos é construída com subestruturas metálicas (81%). Contudo, em sistemas tensionados, as subestruturas em madeira e em betão são frequentemente utilizadas (aproximadamente 30% e 15% respetivamente).

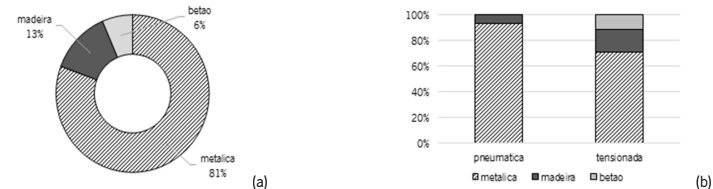


Figura 20. Intervenção com membrana - a) material da subestrutura; b) tipo de aplicação de membrana segundo o material da subestrutura.

Verifica-se que as soluções com materiais em membrana são utilizadas de forma independente ou complementar a outros materiais. Relativamente aos materiais em membrana utilizados nos projetos em análise, verifica-se que a maioria das coberturas é feita em membrana ETFE (53%) (Tabela 5). A autolimpeza, durabilidade e elevada transmissão de luz têm promovido a sua utilização em muitas soluções com caráter permanente. Outras membranas, como o tecido de poliéster ou de fibra de vidro revestidos com policloreto de vinil (PVC) ou PTFE, também são utilizadas com frequência em situações que requerem maior resistência. Também se regista que os sistemas pneumáticos analisados apresentam, maioritariamente, soluções com duas ou mais membranas (Figura 21). Estes sistemas têm um desenvolvimento interessante, e têm sido utilizados nas últimas décadas para substituir as tecnologias de construção com vidro.

Tabela 5. Materiais em membrana utilizados nas coberturas dos projetos em análise.

Material da membrana	Porcentagem
Tetrafluoroetileno de etileno (ETFE)	53%
Tecido fibra vidro revestido politetrafluoretileno (PTFE)	16%
Tecido poliéster revestido PVC	9%
Tecido Poliéster revestido PVC + Fluoreto de polivinilideno (PVDF)	6%
Policloreto de vinil (PVC)	3%
Tecido fibra vidro revestido PTFE + manta aerogel	3%
Tecido e revestimento PTFE	3%
Rede de sisal e polietileno	3%
Betuminosa + fibra de vidro	3%

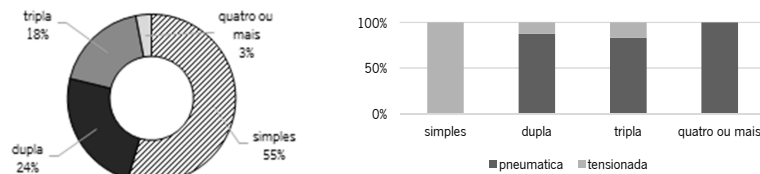


Figura 21. Análise do número de camadas em função do sistema adotado nas intervenções com cobertura em membrana.

Os projetos em análise apresentam vários tipos de intervenção: **independentes** - autoportantes, com estrutura própria; **parcialmente dependentes/ adossadas** - aproveita parte da estrutura dos edifícios existentes; **totalmente dependentes** - sem estrutura própria; apenas 16% apresentam soluções modulares.

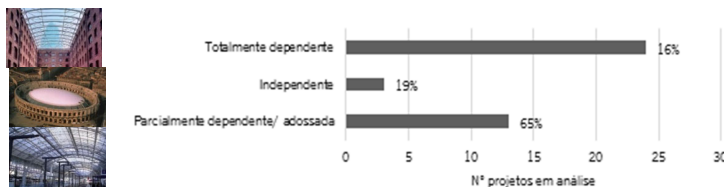


Figura 22. Classificação dos tipos de intervenção com coberturas de membrana, relativamente à ligação ao edifício existente.

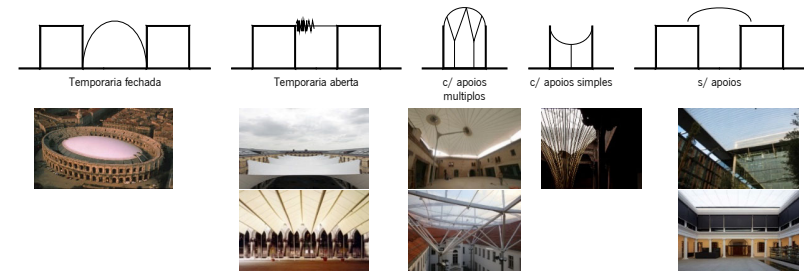
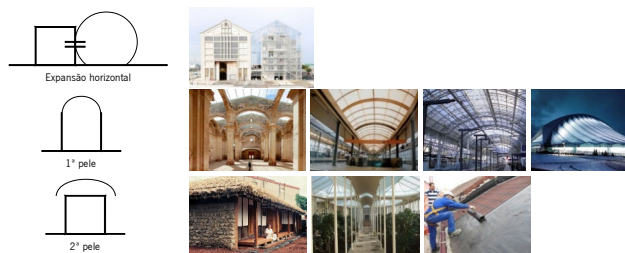


Figura 23. Conceitos de aplicação de membranas arquitetônicas em coberturas - intervenções de reabilitação.

#### • Tendência para utilização da variante pneumática

As tecnologias de construção pneumática de coberturas e fachadas pertencem ao domínio das estruturas tensadas; baseiam-se no uso de membranas arquitetônicas que são estabilizadas pelo diferencial de pressão entre o ar interior e exterior, de modo a adquirir a rigidez para manter uma posição de equilíbrio capaz de suportar forças externas (GONZALES et al, 2012). Existem diferentes tipologias de sistemas pneumáticos; a maioria das classificações foi feita de acordo com o tipo de pressão e propriedades morfológicas. Os sistemas mais desenvolvidos são estabilizados com pressão positiva (insufláveis), enquanto os sistemas de pressão negativa (vacuum) ainda se encontram em desenvolvimento.

De acordo com a configuração formal, enquanto os sistemas suportados por ar se baseiam na utilização de uma única membrana que encerra o espaço interior, os sistemas insuflados baseiam-se no uso de estruturas fechadas com várias camadas de membrana cujo interior é pressurizado e inacessível. Embora as primeiras tenham experienciado um importante desenvolvimento nos anos sessenta e setenta, os sistemas insuflados têm sido melhorados na última década, permitindo alcançar novas estratégias sustentáveis para edifícios através de envolventes adaptáveis ao clima.

Tabela 6. Sistemas pneumáticos com pressão positiva utilizados em arquitetura (valores de pressão para condições normais) (NAUMER, 1999).

Suportados por ar	200-300 Pa
Insuflados com baixa pressão positiva	200-300 Pa
Insuflados com alta pressão positiva	Até 100.000 Pa

Os sistemas insuflados foram desenvolvidos pela primeira vez na área de engenharia aeronáutica, com o primeiro protótipo de balão de ar quente de Francesco Lana di Terzi em 1670 (LANA, 1670), contudo a sua aplicação na arquitetura só começou a ser desenvolvida três séculos depois, com projetos como "Boston Arts Center Theater", projetado por Carl Koch em 1960, ou "Brass Rail Refreshment Pavilion" em Nova Iorque, projetado por Victor Lundy em 1963 (HERZOG, 1976).

A seguinte análise cronológica mostra o volume de projetos de reabilitação com coberturas insufláveis documentados no presente estudo, onde se verifica uma especial ênfase na última década (Figura 24). No total de 32 projetos de reabilitação com coberturas em membrana em análise neste estudo, 44% destes possuem coberturas pneumáticas. Este fato revela uma tendência de aplicação destes sistemas na reabilitação de edifícios

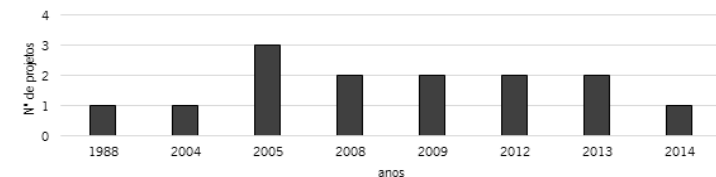


Figura 24. Estudo cronológico de projetos de reabilitação com coberturas em membrana.

• **Sistemas suportados pelo ar de baixa pressão**

Embora possuam uma reduzida percentagem de aplicação, existem alguns usos com grande potencial para a reabilitação de edifícios, como o de coberturas provisórias para utilizar em grandes períodos de trabalho (permitindo otimizar as condições de trabalho e protegerem o edifício das variações climáticas). Um exemplo interessante de uma aplicação é a cobertura temporária para a casa de Mies, do Kunstmuseum de Krefeld (Figura 25) projetada pelo grupo de artistas Haus-Rucker-Co em 1971.

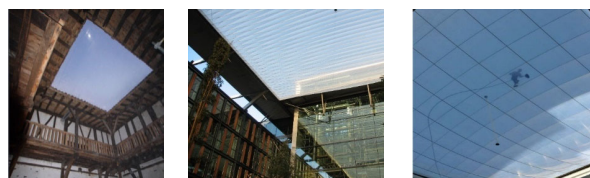


Figura 25. Exposição temporária in Krefeld, Alemanha. (autoria: Haus-Rucker-Co) (KUNSTMUSEEN, 2016).

• **Sistemas insuflados de baixa pressão**

Embora os sistemas insuflados sejam maioritariamente utilizados na construção de novos edifícios, as suas propriedades adaptativas possuem grande potencial para a reabilitação de edifícios existentes. O desenvolvimento de novos materiais com maior resistência a ataques físicos, químicos e biológicos, como o ETFE ou outros revestimentos de membranas, têm favorecido a aplicação destes sistemas sobretudo na cobertura de pátios de edifícios históricos.

Verifica-se que são utilizadas maioritariamente duas estratégias para intervir com sistemas insuflados em edifícios existentes: (1) o uso de grandes unidades “almofadas” pneumáticas que perfazem o vão da cobertura na totalidade (Figura 26 (a)); (2) e a combinação de múltiplas “almofadas” suportadas por uma subestrutura metálica, em aço ou alumínio (Figura 26 (b)). As almofadas com grandes dimensões necessitam de reforços auxiliares, como cabos de aço que fazem a transmissão de cargas (Figura 26 (c)).



(a) Vão aprox. 5m (b) Vão aprox. 26m (c) Vão aprox. 14m

Figura 26. (a) Palácio de Igratza, Espanha; (b) Salão de exposições do Reno, Alemanha; (c) Museu de Arte Precolombina, Chile.

• **Sistemas insuflados de alta pressão**

A patente de Franco Giachi, desenvolvida em 1991, é um bom exemplo das possibilidades que os sistemas insuflados de alta pressão podem alcançar para a cobertura de grandes espaços (Figura 27). Numa investigação recente a empresa Airlight Ltd desenvolveu o sistema estrutural Tensairity®. Estas estruturas podem cobrir grandes vãos através da otimização entre os efeitos de tensão e compressão em vigas insufladas, com a ajuda de elementos auxiliares (Figura 28).

O projeto de reabilitação do navio “Cutty Sark” em Londres (projetado por Grimshaw em 2004) é um bom exemplo do que esta tecnologia pode alcançar. Foi projetado um abrigo temporário que protegesse o navio durante os trabalhos de restauro. Para além disso, devido à facilidade de montagem e desmontagem, estas soluções têm um grande potencial para futuras utilizações em projetos. A Figura 28 compara o comportamento de uma viga “Tensairity” com o de uma viga com treliça convencional – mostra que o comportamento é muito similar mas a viga “Tensairity” substitui as treliças por tubos de ar. Estas vigas podem ser utilizadas para criar coberturas permanentes como a do parque de estacionamento de Montreal (Suiça) onde foram utilizados 12 vigas “Tensairity” para executar um vão de 27 metros.

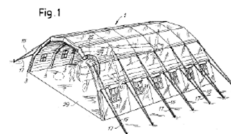


Figura 27. Pavilhão temporário em Krefeld (Alemanha) (GIACHI, 1991).

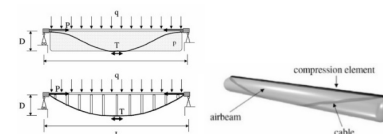


Figura 28. Funcionamento do sistema Tensairity (TENSAIRITY, 2016).



Figura 29. Cobertura do parque de estacionamento de Montreal com as vigas “tensairity” (AIRLIGHT Ltd, 2016).



Figura 30. Festo Pavillion, 2011 – rede pneumática “Plusminus” (STUDIO LT, 2011).

Em 2012 realizou-se a primeira aplicação de uma estrutura pneumática contínua, numa intervenção de reabilitação na cobertura do pátio do edifício da Câmara Municipal de Saxony-Anhalt (ref° C.17. anexo 4) com o sistema Bekaert (Figura 31).

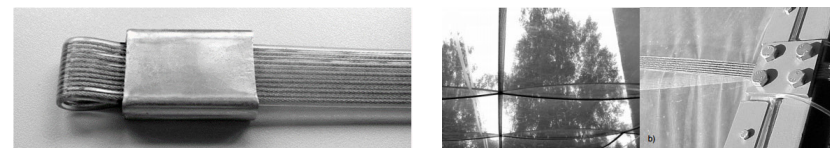


Figura 31. Sistema BEKAERT (ROBERT, 2003).



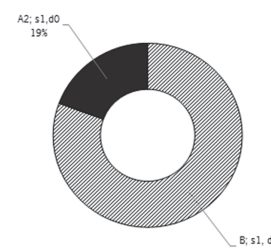
Tabela 7. Síntese dos parâmetros construtivos e económicos analisados nos projetos de reabilitação com coberturas em membrana.

Projetos de reabilitação com membranas - Intervenção na cobertura	Construtivos													Economico	
	Área superficial [m <sup>2</sup> ]	Número de camadas	Membrana					Subestrutura				Pré-existente			
Materiais membrana			Tipo de aplicação (T= tensionada, P= pneumática, C=colada)	Peso próprio da membrana [kg/m <sup>2</sup> ]	Transmissão de luz visível [%]	Reação ao fogo [EN 13501-1]	Tipo de transmissão de cargas da membrana para a estrutura (PO=pontual, PE=perimetral, L= linear)	Apóios intermédios (●=sim)	Vão livre [m]	Materiais da subestrutura (ME=metal, MA=madeira, BE=betão)	Peso próprio sistema de ancoragem [kg/m <sup>2</sup> ]	Tipo de estrutura pré existente (BE=betão, MA=madeira, ME=metal, MI=mistura, F=ferro)	Necessidade de reforço da estrutura pré-existente para fazer a intervenção? (S=sim, N=não)	Custo global (material+ instalação) [€/m <sup>2</sup> ]	
C.01. Arena de Nimes	5000	2	Poliéster Rev. PVC	P	1,30	78	B; s1, d0	PO	não	60	ME	4,25	PE	N	1068
C.02. Fuchun Kosa Zou Ma Lou	50	1	PVC	T	0,50	90	B; s1, d0	PE	●	5	MA	4,25	MA	N	50
C.03. Palácio de Igartza	40	2	ETFE	P	1,00	90	B; s1, d0	PE	não	5	ME	4,25	MA	N	450
C.04. Museu chileno de arte precolombina	211	2	ETFE	P	1,00	90	B; s1, d0	PE	não	14	ME	4,25	MI	N	450
C.05. Palácio das artes de Mons	1750	1	Poliéster Rev. PVC	T	0,70	78	B; s1, d0	PO	não	25	BE	1,00	MI	S	86
C.06. Camellia House	220	1	ETFE	T	0,30	95	B; s1, d0	PE	não	5	ME	0,90	ME	S	900
C.07. Estação de comboios de Salzburg	1700	1	PTFE tecido e rev	T	1,08	38	B; s1, d0	PO	não	25	ME	1,00	ME	N	220
C.08. Estação de comboios Sakuragicho	3573	1	Fibra vidro rev PTFE	T	0,90	75	A2;s1,d0	L	não	15	ME	1,00	ME	N	300
C.09. Câmara municipal de Viena	1000	1	Poliéster Rev. PVC	T	0,70	78	B; s1, d0	L	não	33	ME	1,00	MI	S	220
C.10. Kapuziner carrée	500	1	ETFE	T	0,50	90	B; s1, d0	PE	não	16	ME	3,00	MI	N	300
C.11. Estação de comboios de Dresden	32000	1	Fibra vidro rev PTFE	T	1,20	75	A2;s1,d0	PO	●	50	ME	3,00	ME	N	265
C.12. Imagination Headquarters	100		Fibra vidro rev PTFE	T	1,20	75	A2;s1,d0	L	não	10	ME	3,00	MI	N	220
C.13. Masia Villa Celiana	550	1	Poliéster Rev. PVC + PVDF	T	0,70	78	B; s1, d0	PO	●	26	BE	1,50	MI	S	220
C.14. Casa do Pintor Lee Jung Seob	50	1	Rede de sisal e polietileno	T	1,50	0	A2;s1,d0	PO	não	6	MA	0,9	MI	N	50
C.15. Centro William Rappard, Edifício Omc	525	3	ETFE	P	1,50	90	B; s1, d0	PE	não	25	ME	4,25	MI	N	625
C.16. Atrio do Salão de Exposições Do Reno	4000	5	ETFE	P	1,00	90	B; s1, d0	PE	não	26	ME	4,00	MI	N	900
C.17. Câmara Municipal de Saxony-Anhalt	375	2	ETFE	P	1,00	90	B; s1, d0	PO	●	15	ME	2,00	MI	N	450
C.18. Edifício Johnson	300	2	ETFE	P	1,00	90	B; s1, d0	PE	não	15	ME	3,00	MI	N	450
C.19. Burberry Headquarters, Horseferry House	410	3	ETFE	P	1,50	90	B; s1, d0	PE	não	16	ME	3,00	MI	N	625
C.20. Fukiya International Villa Hall	180	1	Fibra vidro rev PTFE	T	0,90	70	A2;s1,d0	PE	●	12	MA	4,00	MA	N	110
C.21. Estádio Olímpico de Berlim	27000	1	Fibra vidro rev PTFE	T	1,20	75	A2;s1,d0	PO	●	25	ME	4,25	BE	N	220
C.22. Dresden Castle Kleiner Schlosshof	1400	2	ETFE	P	1,00	90	B; s1, d0	PE	não	25	ME	5,00	PE	S	600
C.23. Igreja de Corbera D'ebre	700	1	ETFE	T	0,50	90	B; s1, d0	L	●	15	ME	0,90	PE	N	220
C.24. Frac Art Centre	3362	2	ETFE	P	1,00	90	B; s1, d0	PE	não	20	ME	4,00	BE	N	450
C.25. Frasilio	9800	2	ETFE	P	1,00	90	B; s1, d0	L	não	25	ME	4,00	BE	N	450
C.26. Edifício de Habitação Coletiva em Zamora	5000	1	Betuminosa + fibra vidro	C	4,7	0	B; s1, d0	-	-	-	0,00	MI	N	100	
C.27. Hartley Library Learning Centre	96	3	ETFE	P	1,50	90	B; s1, d0	PE	não	6	MA	5,00	MA	N	600
C.28. Praça Devonshire	1452	1	ETFE	T	0,50	90	B; s1, d0	PE	não	20	ME	1,00	MI	N	400
C.29. Infantário de Wismar	976	3	ETFE	P	1,50	90	B; s1, d0	PE	●	20	ME	4,25	MI	N	120
C.30. Talisman Centre	15000	2	Fibra vidro rev PTFE + aerogel	T	1,80	1,8	A2;s1,d0	L	●	40	ME	4,00	BE	N	2600

Projetos de reabilitação com membranas - intervenção na cobertura	Construtivos													Economico	
	Área superficial [m <sup>2</sup> ]	Número de camadas	Membrana					Subestrutura				Pré-existente			
Materiais membrana			Tipo de aplicação (T= tensionada, P= pneumática, C=colada)	Peso próprio da membrana [kg/m <sup>2</sup> ]	Transmissão de luz visível [%]	Reação ao fogo [EN 13501-1]	Tipo de transmissão de cargas da membrana para a estrutura (PO=pontual, PE=perimetral, L= linear)	Apóios intermédios (●=sim)	Vão livre [m]	Materiais da subestrutura (ME=metal, MA=madeira, BE=betão)	Peso próprio sistema de ancoragem [kg/m <sup>2</sup> ]	Tipo de estrutura pré existente (BE=betão, MA=madeira, ME=metal, MI=mistura, F=ferro)	Necessidade de reforço da estrutura pré-existente para fazer a intervenção? (S=sim, N=não)	Custo global (material+ instalação) [€/m <sup>2</sup> ]	
C.31. Clube de Ténis Bourglà-Reine	3800	1	Poliéster Rev. PVC + PVDF	T	1,05	10	B; s2, d0	PO	●	25	ME	1,00	MI	N	258
C.32. University Of West London	155	3	ETFE	P	1,22	56	B; s1, d0	PE	não	5	ME	4,25	MI	N	380
<b>Valor médio</b>	<b>3789</b>	<b>1</b>	<b>ETFE</b>	<b>T</b>	<b>1,16</b>	<b>72</b>	<b>B; s1, d0</b>	<b>PEI</b>	<b>não</b>	<b>21</b>	<b>ME</b>	<b>2,84</b>	<b>MI</b>	<b>N</b>	<b>449</b>
<b>Valor médio [%]</b>		55		52	56			52	67		81		50	84%	
<b>Mínimo</b>	<b>50</b>	<b>1</b>			<b>0,30</b>	<b>0</b>	<b>B; s1, d0</b>								<b>2600</b>
<b>Máximo</b>	<b>32000</b>	<b>5</b>			<b>1,80</b>	<b>90</b>	<b>A2; s1, d0</b>								<b>50</b>

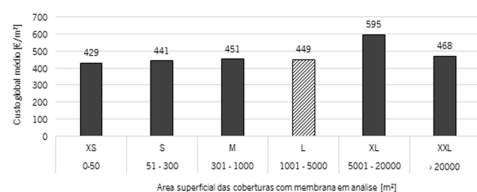
Tabela 8. Classificação europeia da reação ao fogo dos materiais de construção (adaptado de KNIPPERS, 2011).

Requisitos legais	Requisitos adicionais		Norma europeia EN 13501-1
	Sem fumo	Sem gotejamento	
Incombustível	●	●	A1
<b>Requisito mínimo</b>	●	●	A2 s1, d0
Não combustível de imediato	●	●	B, C
		●	A2
		●	A2, B, C
	●	●	A2, B, C s1, d1
<b>Requisito mínimo</b>		●	A2, B, C s1, d2
Combustível		●	D
			s1, d0
			s2, d0
			s3, d0
		E	
		D	
		s1, d2	
		s2, d2	
		s3, d2	
<b>Requisito mínimo</b>			E
Altamente combustível			F



Distribuição dos projetos de reabilitação com coberturas em membrana em análise segundo a reação ao fogo [EN 13501-1].

Verifica-se que a maioria das coberturas possui uma área superficial entre 1001 e 5000m<sup>2</sup> com um custo médio de 449€/m<sup>2</sup>. O custo global das intervenções com coberturas em membrana tende a aumentar à medida que a área de intervenção aumenta com a exceção do custo médio das áreas L e XXL.



Área [m²]	Tamanho*	Percentagem de projetos analisados com cobertura em membrana
0-50	XS	9%
51-300	S	22%
301-1000	M	25%
1001-5000	L	31%
5001-20000	XL	6%
>20000	XXL	6%

Figura 32. Relação entre o custo médio da intervenção e área superficial de membrana aplicada.

Verifica-se que em média, as coberturas em membrana analisadas possuem 21m de vão livre e a maioria possui entre 21 a 25 metros (25%). Projetos mostram a mais-valia das coberturas em membrana para a execução de grandes vãos como: a Arena de Nimes (ref<sup>a</sup> C.01) – com vão de 60m; a Camara municipal de Vienna (ref<sup>a</sup> C.09) – com 33m e a Estação de Comboios de Dresden (ref<sup>a</sup> C.11) - com 50m. Verifica-se também que o custo global médio não se altera em função da dimensão do vão, mantem-se entre 400 e 500€/m<sup>2</sup>.

Tabela 9. Vão livre dos projetos com cobertura de membrana em análise.

Vão livre [m]	Percentagem de projetos analisados com cobertura de membrana
0 a 10	22%
11 a 15	19%
16 a 20	16%
21 a 25	25%
26 a 30	6%
31 a 35	3%
36 a 40	3%
≥ 41	6%

#### • Parâmetros funcionais

Ao longo da elaboração das fichas individuais de cada projeto registaram-se as principais motivações para utilizar as soluções de cobertura com membranas arquitetónicas em intervenções de reabilitação funcional (Figura 33).

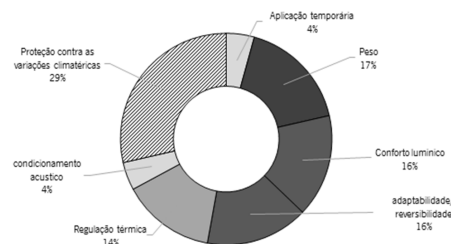


Figura 33. Principais motivações identificadas nos projetos em análise para utilizar coberturas em membranas nas intervenções de reabilitação em análise.

\* Considera-se a classificação da área superficial definida por Gonzales et al (2011).

A proteção contra as variações apresenta-se como a principal motivação (em 29% dos casos) para a utilização de cobertura com membranas arquitetónicas. Em segundo lugar, apresenta-se o peso/leveza (17%) e em terceiro lugar a adaptabilidade (16%) e o controlo lumínico (16%).

De acordo com Tejera e Monjo (2010), a incorporação dos pátios na estratégia de reabilitação funcional dos edifícios antigos (mesmo os que são classificados como património), pode ser resolvida através de soluções com membranas.

Com o uso de diferentes técnicas, estratégias e materiais, problemas semelhantes foram resolvidos em diferentes condições climáticas. Por exemplo, no projeto de reabilitação de um antigo palácio-fortaleza (projeto ref<sup>a</sup> C.03 Palácio de Igratza), localizado na costa atlântica espanhola (com um clima frio e chuvoso), incorporou-se um novo uso através da colocação de uma cobertura estanque e pneumática (com membrana dupla de ETFE) que permite a entrada de luz natural e a melhoria das condições acústicas sem causar distúrbios visuais. Outro caso, é o do projeto de reabilitação de uma casa rural (projeto ref<sup>a</sup> C.13 Masia Vila Celiana) localizado num clima mediterrânico (com elevadas temperaturas e precipitação intensa pontualmente), onde se incorporou uma cobertura tensionada com membrana simples sobre o pátio existente, permitindo desta forma dar um novo uso funcional a este espaço, protegendo-o contra o sol e a chuva, e promover a ventilação necessária para reduzir o efeito causado pelas elevadas temperaturas.

Com o projeto de reabilitação da Estação de comboios de Dresden (ref<sup>a</sup> C.11) – foi possível reabilitar uma cobertura sem interromper os serviços de transporte, manter a estrutura existente (alterando e reforçando o necessário) e maximizar os ganhos lumínicos. A estação de comboios de Dresden foi construída em 1898 e ficou danificada durante a 2<sup>a</sup> Guerra Mundial. Posteriormente, devido à fraca manutenção durante o período pós-guerra, este edifício foi-se deteriorando cada vez mais e a cobertura existente (parcialmente envidraçada) foi sendo substituída por uma cobertura de madeira, que reduzia a entrada de luz natural. Para restaurar a integridade do desenho existente do edifício foram removidas as várias adições e alterações, feitas no edifício durante os 60 anos anteriores. Executou-se uma nova cobertura (em membrana de fibra de vidro revestida a PTFE) suportada pela estrutura existente em arcos de ferro forjado (do século XIX) com o mínimo de reforços. Devido ao reduzido peso da membrana aplicada (1,2kg/m<sup>2</sup>), foi possível manter os elementos estruturais existentes e só foram substituídos os componentes danificados (Foster + Partners, 2016). A cobertura em membrana transmite 31% de luz natural, reduzindo assim a necessidade de consumo de iluminação artificial.

A cobertura em membrana foi conectada a uma sub-estrutura de tubos metálicos, na direção longitudinal e transversal aos arcos existentes. Para evitar sobrecarregar a estrutura existente, em caso de colapso de uma faixa de membrana, formou-se uma rede de cabos que une cada arco treliçado para formar um conjunto estável. Os componentes para a fixação de membranas foram selecionados tendo em consideração a facilidade de instalação e o menor custo. Por sua vez, os componentes selecionados não permitem o retensionamento ou ajuste *in situ*, pelo que a faixa de membrana teve de ser cortada com precisão. Em projeto, este aspeto foi respeitado considerando as tensões superficiais e o comportamento da membrana sob reduzido pré-tensionamento. Pensando no futuro, a cobertura em membrana pode ser ampliada para cobrir as linhas destinadas a comboios de alta velocidade (que necessitam do dobro do comprimento das plataformas existentes).

#### • Cobertura transparente/translúcida de pátios

Foram identificados as seguintes 15 intervenções de encerramento de pátios com coberturas transparentes em membrana – que correspondem a 21% da amostra de projetos selecionados. O peso por metro quadrado da solução de cobertura em membrana, dos projetos apresentados na Figura 35, varia entre 2 a 5 kg (membrana + subestrutura).

Segundo Manara et al (2013), a cobertura de pátios de edifícios existentes com coberturas em membrana (sobretudo as pneumáticas) têm um contributo positivo para a regulação térmica do edifício existente, promovendo melhorias funcionais e ambientais (energéticas) no mesmo.

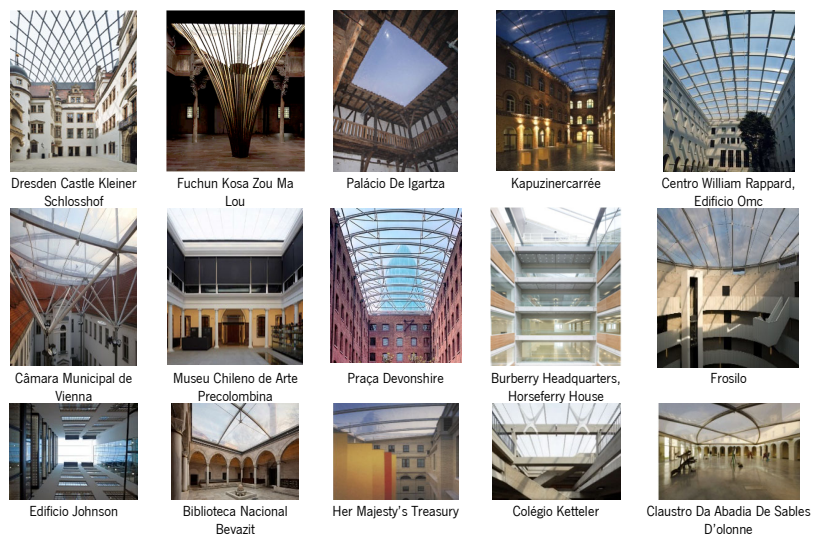


Figura 34. Exemplos de intervenções de reabilitação com coberturas transparentes para encerramento de pátios de edifícios.

A investigação de Manara et al (2013) focou-se na avaliação numérica das condições de fluxo térmico e de iluminação natural no átrio e nos compartimentos adjacentes a este. Os resultados mostram que a ventilação deve ser promovida através da cobertura em membrana, uma vez que a temperatura interna sobe constantemente com a altura (efeito da estratificação do ar) na estação de verão. Os átrios comportam-se de maneira semelhante aos coletores de ar, em que as temperaturas do ar variam consideravelmente de acordo com a troca de ar e a irradiação solar. A ventilação natural através de aberturas adequadas na cobertura e as entradas de ar perto do solo não são adequadas para todas as situações climáticas (Manara et al., 2013). Por isso recomenda-se a utilização de ventilação mecânica com uma taxa de renovação de ar entre 2.5 e 4 h-1.

As temperaturas ambiente desejadas são um critério importante. A tecnologia usada deve ser capaz de lidar com condições em constante mudança. A distribuição e quantidade de sensores de temperatura, o movimento do ar, etc, devem ser projetada para esse fim. Um bom exemplo de aplicação deste conceito é a intervenção no pátio do edifício “Dresden Castle Kleiner Schlosshof” (refª C.22) (na Figura 35) encerrado com uma cobertura em membrana. O espaço interior do pátio coberto oferece um vestíbulo, onde se localiza a recepção ao espaço de exposições. Caso o átrio seja utilizado como espaço de trabalho, os requisitos de conforto térmico são diferentes, é necessário aquecê-lo; esta utilização pressupõe que a cobertura em membrana seja bem isolada. Esse aquecimento, no entanto, pode anular os efeitos de economia energética obtidos com o encerramento do pátio. Por este motivo, os projetistas desenvolveram um modelo que permite calcular a temperatura do ar no átrio a partir da qual se deixa de ter poupança energética. O modelo proposto combina a ativação de um sistema de climatização para aquecimento. O ar aquecido também pode ser insuflado para o átrio a uma altura superior, quando necessário, através de jatos. Este sistema também pode ser usado para arrefecimento no verão (ver exemplo na Figura 36(b)).

No âmbito do projeto "Membrane Structures for Thermal Retrofitting of Buildings (MESG)" foram realizadas simulações para estimar a possível poupança de energia em edifícios com cobertura em membrana. Uma estratégia de aplicação com bons resultados é a cobertura de pátios, a fim de melhorar a aumentar o desempenho térmico dos edifícios adjacentes e aumentar a utilização do espaço. O fluxo de calor é parcialmente transmitido ao interior dos edifícios através das fachadas que limitam o pátio. Ao cobrir o pátio, a cobertura irá oferecer isolamento térmico adicional, o que aumenta a temperatura no pátio e, posteriormente, diminui as perdas de calor dos edifícios limítrofes através das fachadas. Embora se tenha verificado a existência de perdas de calor pela membrana, também se verificou um aumento de energia devido à radiação solar

transmitida pela membrana transparente. Embora no inverno a radiação solar tenha um impacto energético positivo, isso pode levar a um sobreaquecimento durante o verão. A influência sobre a temperatura no pátio foi quantificada e a possível redução das perdas de calor de um edifício através de fachada para um pátio situa-se entre 20% e 60%, se o pátio for coberto por um sistema de membrana (Manara et al., 2013). A redução das perdas de calor durante o inverno depende do coeficiente de transferência de calor da cobertura de membrana, bem como da geometria (superfície e altura) do pátio. Contudo, durante o verão, as temperaturas no pátio podem aumentar significativamente e por isso é necessário sombreamento para evitar o sobreaquecimento.

Relativamente ao alcance das condições de iluminação natural desejáveis, estas dependem da geometria e das dimensões do pátio coberto (Figura 36(a)).

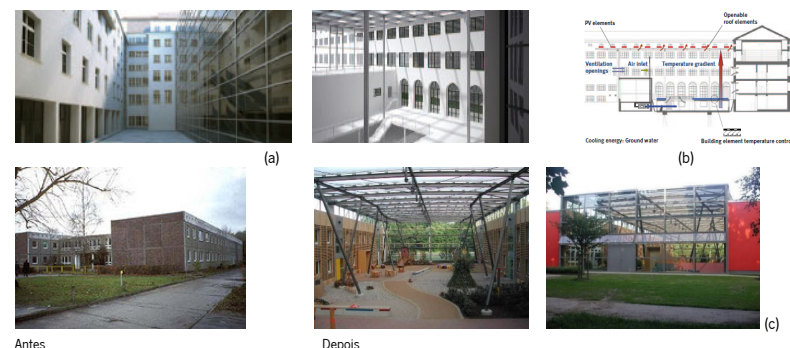


Figura 35. (a) Simulação do desempenho luminoso de um pátio coberto por membrana transparente (MANARA et al, 2013). (b) Representação de modo operacional de cobertura de pátio com membrana no modo de Verão. Autoria de Ebert Ingenieure e Land Hugger Rappm GmbH (MANARA et al, 2013). (c) Infantário de Wismar (antes e após a intervenção).

No projeto do Infantário de Wismar (refª C. 29) (Figura 36c) também se registaram melhorias no conforto térmico, conseguindo-se alcançar uma redução significativa das perdas de calor. Particularmente, as perdas de calor por ventilação foram significativamente reduzidas devido à redução do volume de ar a ser aquecido e ao pré-aquecimento do ar no átrio. Após a reabilitação, o consumo de energia foi reduzido em 65% (aprox.) (ENOB, 2018). Este projeto de reabilitação tornou-se um modelo de desempenho energético. A melhoria da qualidade e temperatura do ar aumentou significativamente a salubridade do espaço e consequentemente, a saúde dos seus ocupantes.

#### 4.1.2 Fachada

##### • Análise de parâmetros contextuais

Os projetos em análise correspondem a intervenções de reabilitação em fachadas com membranas arquitetónicas e encontram-se ordenados cronologicamente, segundo o ano de construção original do edifício existente (Tabela 10).

Pela análise cronológica dos projetos em estudo (Tabela 10), verifica-se que a idade média dos edifícios pré-existent, até ao ano de intervenção, é de 100 anos (máximo, 436 anos; mínimo 32 anos). Contudo, fazendo uma análise segundo as categorias de durabilidade definidas Douglas (2006), verifica-se que 83% dos edifícios pré-existent possuem “vida média” (entre 30 a 59 anos) (Figura 37) e 17% possuem vida normal (entre 60 a 119 anos). Os edifícios pré-existent dos projetos em análise são antigos (50%) ou modernos (50%) (Figura 38).

Tabela 10. Síntese dos parâmetros contextuais analisados nos projetos em que a fachada foi intervençada.

Projetos de reabilitação com membranas - intervenção na fachada	Contextuais					
	Ano da construção do pré-existente	Ano da intervenção de reabilitação	Idade do edifício existente quando foi intervençado [anos]	Durabilidade da membrana após intervenção (até ano de 2017) [anos]	Localização	
					País	Continente
F.01. Centro de Gerontologia	1940	2003	63	14	Alemanha	Europa
F.02. Casa em Munique	1956	2012	56	5	Alemanha	Europa
F.03. Edifício EDF	1958	2011	53	6	França	Europa
F.04. Biblioteca Nacional King Fahad	1970	2013	43	4	Arabia Saudita	Ásia
F.05. Westraven	1975	2007	32	10	Holanda	Europa
F.06. Shishiodoshi House	1980	2013	33	4	França	Europa
F.07. Edifício em Basileia	-	-	-	-	Suíça	Europa
F.08. San Michele Arcangelo	1580	2016	436	1	Itália	Europa
F.09. KWO Grimselstrom	1925	2013	88	4	Suíça	Europa
<b>Média</b>			<b>100</b>	<b>6</b>	-	<b>85% Europa</b>

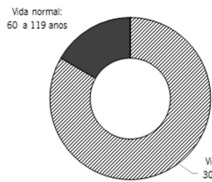


Figura 36. Categoria de durabilidade das construções pré-existentes à data de intervenção com fachadas em membrana.

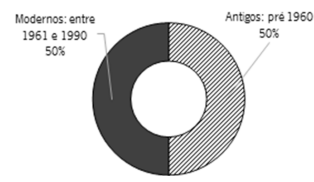


Figura 37. Ano de construção dos edifícios pré-existentes - projetos de reabilitação com fachadas em membrana.

Verifica-se que a maioria das intervenções de reabilitação com membranas em fachadas são recentes – possuem em média 6 anos e a maioria têm 3 anos (33%) (Figura 38). Também se verifica que estas intervenções têm vindo a aumentar: entre o ano de 2000 e 2010 realizaram-se 33% de intervenções e entre 2011 e 2016 registam-se 67% do total de intervenções (Figura 39).

Relativamente à localização dos projetos em análise, verifica-se que a maioria se realizou na Europa Central (Figura 40), onde estes sistemas têm sido desenvolvidos e industrializados.

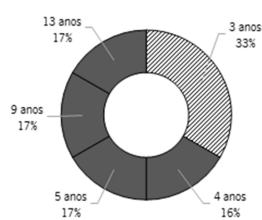


Figura 38. Projetos de reabilitação com fachadas em membrana segundo a idade da membrana após intervenção (até ao ano de 2016).

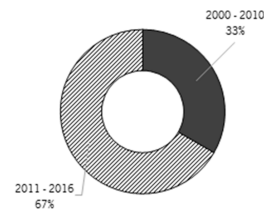


Figura 39. Projetos de reabilitação com fachadas em membrana, segundo o ano da intervenção.

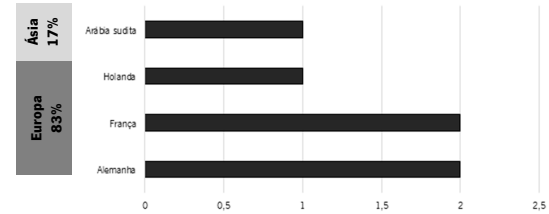


Figura 40. Distribuição dos projetos de reabilitação em análise, com fachadas em membranas, por país e continente.

#### • Relação entre parâmetros construtivos e climáticos

Os projetos em análise localizam-se entre 24° - 52° de latitude Norte (Tabela 11) e em média nos 45°. Numa análise mais detalhada (Figura 10), observa-se que a maioria dos projetos localiza-se na zona Cfa/Cfb (50%) – clima temperado marítimo<sup>5</sup> - de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (Kottek, 2006); seguindo-se a zona Dfb (33%) – clima continental húmido<sup>6</sup>. Os principais parâmetros climáticos que afetam o comportamento das fachadas em membrana são os seguintes: temperaturas máximas e mínimas, humidade relativa, precipitação, vento e radiação solar. De acordo com esses parâmetros, os principais problemas destas fachadas estão relacionados com as descontinuidades e pontes térmicas entre a membrana e o substrato existente onde as condensações superficiais podem surgir. Esta patologia pode diminuir a durabilidade da membrana e a presença de água pode aumentar o crescimento de fungos e corrosão dos elementos metálicos.

Tabela 11. Síntese dos parâmetros climáticos e de riscos naturais analisados nos projetos de reabilitação com membranas em que a fachada foi objeto e intervenção.

Projetos de reabilitação com membranas - intervenção na fachada	Climáticos					
	Latitude [° Norte]	Zona climática (Classificação Köppen-Geiger)	Temperatura média anual [°C]	Radiação solar [kWh/m <sup>2</sup> /dia]	Precipitação média anual [mm]	Velocidade do vento, média anual [m/s]
F.01. Centro de Gerontologia	48	Dfb	7,9	2,8	981	6,4
F.02. Casa em Munique	48	Dfb	8	2,8	930	6,4
F.03. Edifício EDF	48	Cfb	11,6	2,9	763	7,5
F.04. Biblioteca Nacional King Fahad	24	BWh	25,4	8,4	111	4,9
F.05. Westraven	52	Cfb	9,4	3,0	802	6,9
F.06. Shishiodoshi House	48	Cfb	11,7	2,9	783	7,5
<b>Média</b>	<b>45</b>	<b>?</b>	<b>3,8</b>	<b>3,8</b>	<b>728</b>	<b>6,6</b>
Projetos de reabilitação com membranas - intervenção na fachada	Riscos de desastres naturais <sup>7</sup>					
	Sismos [%]	Inundações [%]	Secas [%]	Deslocamento de terras [%]	Erupção vulcânica [%]	Ciclones [%]
F.01. Centro de Gerontologia	40	70	0	0	0	0
F.02. Casa em Munique	20	80	0	0	0	0
F.03. Edifício EDF	20	100	10	0	0	0
F.04. Biblioteca Nacional King Fahad	20	10	0	0	0	0
F.05. Westraven	20	40	10	0	0	0
F.06. Shishiodoshi House	20	10	0	0	0	0
<b>Média</b>	<b>23</b>	<b>52</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

O risco de desastre natural dominante nos projetos em análise é o de inundações (52%) e de sismos (23%).

<sup>5</sup> Clima temperado marítimo – Cfa, Cfb: nas regiões com clima temperado marítimo as chuvas são abundantes e bem distribuídas ao longo do ano, sendo o verão bastante fresco e húmido.  
<sup>6</sup> Clima continental húmido – Dfb: caracteriza-se pela ocorrência de chuvas no verão ou ao longo de todo o ano e temperatura média do ar no mês mais frio inferior a -3 °C e no mês mais quente superior a 10 °C.  
<sup>7</sup> Dados obtidos em: <http://www.gaisma.com>, NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center; New et al. 2002  
<sup>8</sup> Dados obtidos em: <http://www.chinici.com/>

A precipitação, a velocidade do vento e a radiação solar influenciam o desenho das fachadas em membrana e por isso devem ser consideradas estratégias de minimização dos efeitos provocados pelas variações climáticas.

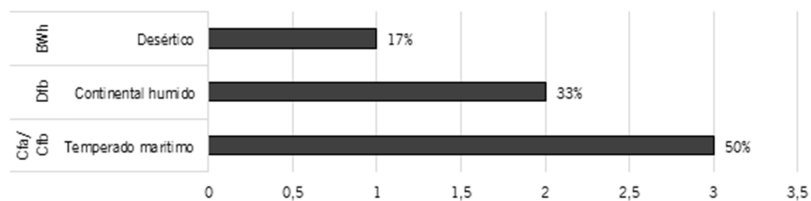


Figura 41. Distribuição dos projetos de reabilitação em análise, com fachadas em membrana segundo zonas climáticas de Köppen-Geiger.<sup>11</sup>

### • Parâmetros programáticos

Os materiais em membrana apresentam uma expressiva aplicação em fachadas de edifícios com categoria de uso residencial, como se pode observar na Figura 42. As intervenções em análise realizam-se maioritariamente sobre edifícios com uso (inicial) habitacional (50%) (Figura 42). Estes projetos apresentam um uso final maioritariamente habitacional (33%) e de escritórios (33%).

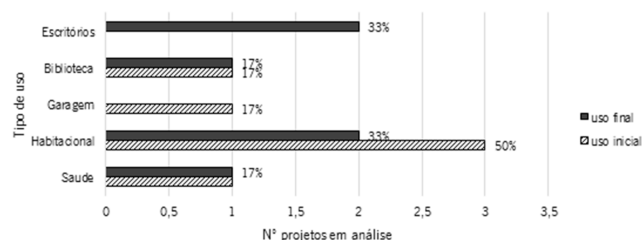


Figura 42. Relação entre uso inicial e uso após intervenção com fachada em membrana.

Também se verifica que a maioria das intervenções em análise são renovações (50%) e ampliações (33%) (Figura 43) e sem conversão de uso (67%) (Figura 13). Todos os projetos em análise destinam-se a um tipo de utilização permanente (100%).

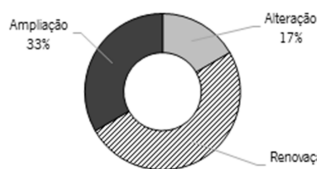


Figura 43. Tipos de intervenções nos edifícios reabilitados com fachada em membrana.

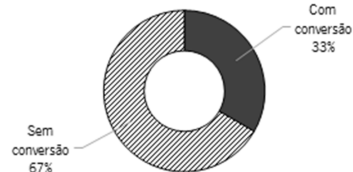


Figura 44. Existência de conversão de uso nos edifícios reabilitados com fachada em membrana.

<sup>11</sup> Clima mediterrâneo – Csa, Csb: caracteriza-se por ter um verão quente e seco, e inverno instável e húmido. Clima desértico – BWh: caracteriza-se por ter reduzida quantidade de chuvas e grande amplitude térmica. Devido à aridez, de dia a temperatura chega a 45 °C e a noite -5 °C. O clima desértico geralmente ocorre em latitudes entre 15° e 30°. Clima semiárido – BSh: tipo de clima caracterizado pela baixa humidade e pouco volume pluviométrico.

Tabela 12. Síntese dos parâmetros programáticos analisados nos projetos de reabilitação com membranas em que a fachada foi objeto de intervenção.

Projetos de reabilitação com membranas - Intervenção na fachada	Programáticos				
	Uso inicial	Uso final após intervenção	Com conversão de uso (● = sim)	Tipo de utilização (● = Permanente ou T = temporária)	Tipo de intervenção de reabilitação
F.01. Centro de Gerontologia	Saúde	Saúde	N	●	Alteração
F.02. Casa em Munique	Habitacional	Habitacional	N	●	Renovação
F.03. Edifício EDF	Garagem	Escritórios	●	●	Renovação
F.04. Biblioteca Nacional King Fahad	Biblioteca	Biblioteca	N	●	Ampliação
F.05. Westraven	Habitacional	Escritórios	●	●	Renovação
F.06. Shishiodoshi House	Habitacional	Habitacional	N	●	Ampliação
<b>Maioria</b>	<b>Habitacional</b>	<b>Hab. ou Esc.</b>	<b>Não</b>	<b>Permanente</b>	<b>Renovação</b>

### • Parâmetros construtivos

Os projetos em análise encontram-se ordenados cronologicamente na tabela 2, segundo o ano de construção do edifício pré-existente. Deste modo, é possível ter uma leitura das soluções adotadas e da adequação das tecnologias construtivas com membranas às construções pré-existentes - desde as mais antigas até às mais recentes.

No que toca à graduação das intervenções dos projetos em análise, verifica-se que maioritariamente são médias (50%) e ligeiras (33%) (Figura 46). O planeamento de uma intervenção de reabilitação inicia-se com a análise do pré-existente. Verifica-se que o tipo de estrutura pré-existente nos projetos em análise é maioritariamente mista (83%) (Figura 46) e que nenhuma das pré-existências necessita de reforço estrutural para acolher as intervenções com fachadas de membrana.



Figura 45. Graduação das intervenções de reabilitação dos projetos onde foram realizadas intervenções com fachada em membrana.

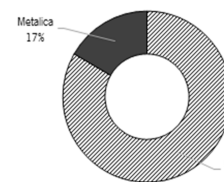
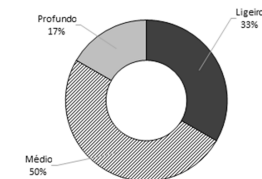


Figura 46. Pré-existente - tipo de estrutura sobre a qual é feita a intervenção com fachada de membrana nos projetos em análise.

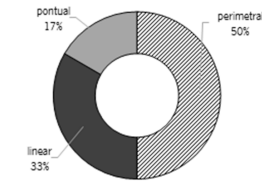


Figura 47. Intervenção com fachada de membranas - tipos de transmissão de cargas da fachada em membrana para o pré-existente.



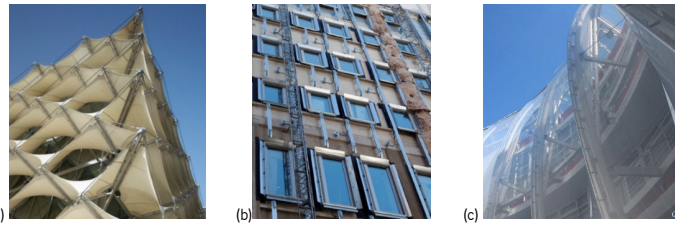


Figura 48. Exemplos de projetos de fachadas em membrana com os diferentes tipos de transmissão de carga em análise: (a) pontual – exemplo projeto refº F.04 – Biblioteca Nacional King Fahad; (b) linear – exemplo projeto refº F.03 Edifício EDF; (c) perimetral – exemplo projeto refº F.01. Centro de Gerontologia.

As subestruturas para aplicar as fachadas em membrana, de acordo com os projetos em análise, são maioritariamente metálicas (67%) (Figura 50).

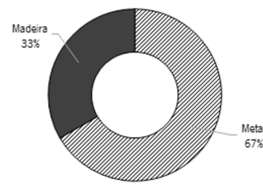


Figura 49. Intervenção com membrana material da subestrutura.

Verifica-se que as soluções com materiais em membrana são utilizadas de forma simples e independente, ou complementar a outros materiais (como mantas de isolamento térmico, etc). Relativamente aos materiais em membrana utilizados nos projetos em análise, a maioria das fachadas é feita em membrana de tecido de fibra de vidro revestida a PTFE (33%) (Tabela 5). A durabilidade, a resistência mecânica e ao fogo têm promovido a sua utilização em muitas soluções com caráter permanente.

Tabela 13. Materiais em membrana utilizados nas fachadas dos projetos em análise.

Material da membrana	Percentagem
Tecido de fibra de vidro revestido politetrafluoretileno (PTFE)	33%
Rede de polietileno	17%
Polioleфина (TPO)	17%
Tecido de poliéster revestido a PVC	17%
Tetrafluorotileno de etileno (ETFE)	16%

Os projetos em análise apresentam vários tipos de intervenção com fachada em membrana: **independentes** (33%) - autportantes, com estrutura própria; **adossadas** (50%) - ancoradas a edifícios existentes aproveitando a sua estrutura; **modulares** (17%) - compostas por componentes modulares (possui vários tamanhos, desenhos e configurações).

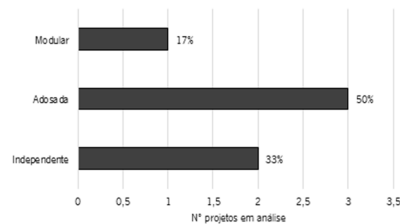
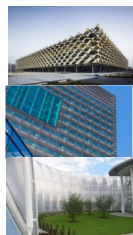


Figura 50. Classificação dos tipos de intervenção com fachadas em membrana em relação à ligação ao edifício existente.

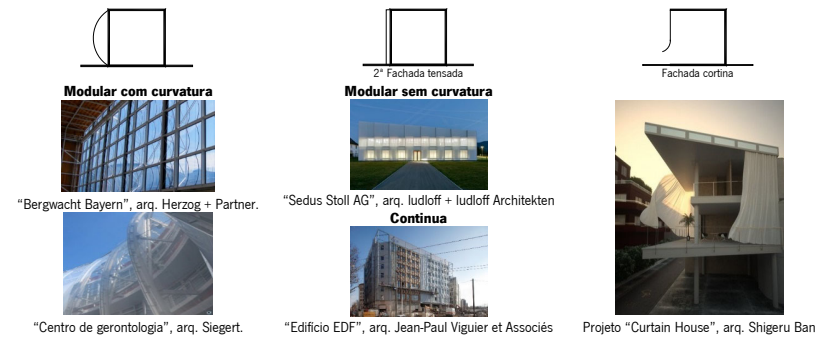


Figura 51. Conceitos de aplicação de membranas arquitetónicas em fachadas.

De seguida apresenta-se um quadro síntese, elaborado com base nos projetos em análise, com detalhes das soluções construtivas adotadas nas intervenções de reabilitação de fachadas com membranas (Figura 52).

O projeto refº F.01 (Figura 52) foi o primeiro a adotar uma fachada em ETFE simples e tensionada. O edifício existente possui passagens pedonais ao longo dos três pisos da sua fachada e necessitava de melhorias higrotérmicas e de proteção contra as condições climáticas. O critério adotado para esta intervenção foi promover uma fachada com elevada transparência e uma estrutura mínima para oferecer uma visão ininterrupta desde os corredores existentes para o exterior. Segundo este critério, optou-se por uma solução de fachada em membrana ETFE transparente que permite a passagem de luz natural para o interior do edifício existente e, devido à sua extrema leveza, é possível aplicá-la em grandes panos de fachada. Os raios ultra violeta são efetivamente refletidos permitindo uma eficiente regulação térmica. Devido às propriedades repelentes desta membrana, é possível minimizar os custos de manutenção com a limpeza da fachada. Se a fachada for desenhada e instalada corretamente, a sujidade acumulada pode ser removida apenas através da água da chuva. Assim a membrana ETFE fica livre de manutenção. Contudo requer inspeções para detetar eventuais defeitos (causados por exemplo pelo impacto de objetos afiados) e repará-los logo que possível. Também se recomenda que o perímetro de tensão e da estrutura de suporte seja inspecionado regularmente.

O objetivo da intervenção no projeto refº F.02 (Figura 52) foi reabilitar o edifício existente para alcançar o máximo de eficiência e conforto com um orçamento reduzido. Este apresentava a seguinte patologia: fraco desempenho térmico da fachada, com pontes térmicas, e reduzida estanquidade ao ar e à água. Para resolver este problema na fachada, optou-se pela aplicação de manta em lã de rocha (12 cm espessura) revestida com uma membrana de polietileno fixa a uma subestrutura de madeira sobre a parede existente. Comparativamente ao reboco armado delgado utilizado no sistema ETICS – correntemente utilizado na reabilitação de edifícios – no caso de o revestimento em membrana de polietileno se rasgar, este pode ser facilmente substituído e reciclado.

O projeto refº F.03 (Figura 52) consiste na conversão de um edifício com função de garagem num edifício para escritórios. Com a finalidade de aumentar o desempenho térmico do edifício, fornecendo ao mesmo tempo um aspeto contemporâneo (de acordo com a renovação urbana em decurso no bairro onde se insere o edifício), foi aplicado isolamento térmico sobre as paredes exteriores existentes. Para revesti-lo optou-se por uma membrana impermeabilizante de polioleфина. Esta foi fixada através de cantoneiras e de fixações pontuais (com função de luminárias) criando um efeito de capitoné.

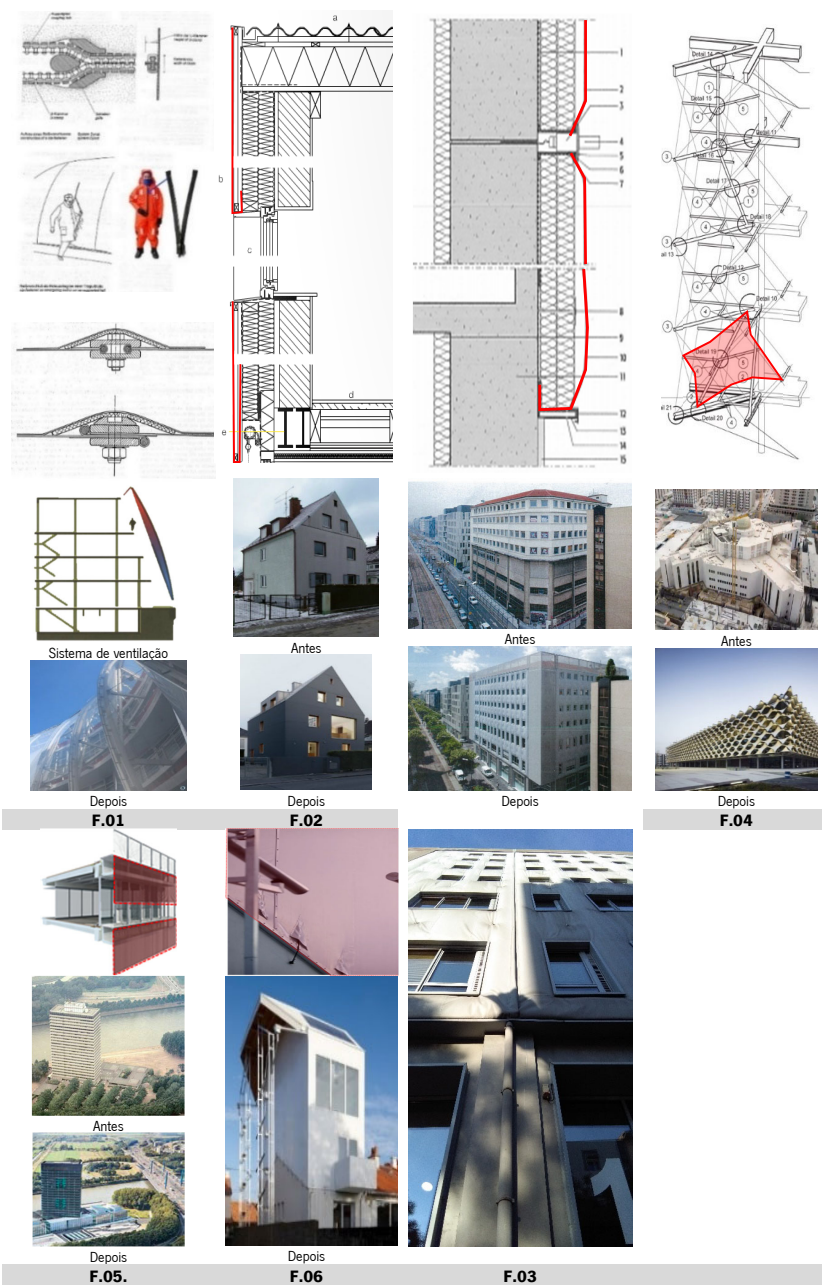


Figura 52. Pormenores de ligação entre a fachada em membrana e o edifício pré-existente.

Este sistema foi desenvolvido pela empresa Blanchet. Foram desenvolvidos vários protótipos deste sistema para a realização de testes experimentais (estanquidade, resistência ao vento, etc.), junto do CSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment) e emissão de um certificado de fiabilidade – ATEX (Application Technique Experimentale). O sistema consiste num tipo de “estofa” que combina dois tipos de isolamento: um rígido (colocado sobre a parede existente) e outro menos denso, colocado sobre o anterior e revestido por uma membrana impermeável. Esta membrana é tensionada pelos aros especificamente desenvolvidos para as janelas e pelas iluminárias Led que pontuam a fachada. Esquemáticamente, uma das inovações deste sistema consiste em permitir a execução de 24 metros de fachada (em altura) sem nenhuma junta horizontal. A estanquidade das juntas verticais (existentes a cada 1,2m de largura) é assegurada por soldagem térmica da membrana. No eixo dos algerozes o recobrimento dos mesmos é feito sem juntas. A tensão da membrana é obtida por fixações mecânicas nas partes superior, inferior e laterais (nas quatro direcções) e pelas iluminárias encastradas no meio.

Para suportar grandes esforços, as janelas foram reforçadas por cantoneiras em aço. O corte final da membrana, em torno das janelas foi executado com uma ferramenta de corte *in situ*. A colocação da membrana nos cantos revelou-se uma operação delicada devido à assimetria no posicionamento das janelas (MENARD, 2013). No projeto refº F.04 (Figura 52) o edifício existente foi submetido a uma reabilitação energética. Para tal, foi construído um novo edifício com que incorpora o edifício existente dos anos 70. A nova construção forma um perímetro cubico em torno do edifício existente conferindo-lhe proteção permanente (a todos os níveis: contra as condições climáticas, etc.). Para conferir proteção solar, foi construído um revestimento composto por membranas romboides suportadas por estruturas de cabos tensados, que reinterpretam estruturas das tradicionais tendas árabes (com a tecnologia contemporânea) bem como a “filigrana” tradicional da arquitetura do médio Oriente, com um jogo de zonas opacas e transparentes. Estes elementos de proteção solar, no conjunto têm apenas um fator de penetração da luz solar de 7% e permitem que ao mesmo tempo seja possível ter contacto visual do interior para o exterior e vice-versa. Dadas as temperaturas exteriores acima dos 50°C, a fachada em membrana foi otimizada em relação ao percurso solar local mediante a refração tridimensional da luz, combinando proteção solar requerida com o máximo de penetração e transparência. Contudo, foi necessário adicionar a esta fachada um sistema de ventilação e de arrefecimento (pelo pavimento) para alcançar o aumento do conforto térmico e a redução do consumo energético.

No projeto F.05 (Figura 52) após uma análise exaustiva, entre construir um novo edifício ou renovar o edifício existente que possuía o “síndrome do edifício doente”, a RWS concluiu que a renovação era a melhor opção. À fachada norte da torre foi aplicada uma 2ª fachada de vidro, para bloquear a poluição sonora. Às restantes fachadas foi aplicada uma alternativa ao vidro: uma membrana têxtil mais leve e mais económica (mas sem capacidade de isolamento acústico). A estrutura da membrana, com trama aberta oferece proteção contra o vento e faz com que seja possível trabalhar com as janelas abertas, mesmo nos andares superiores. Deste modo, a cavidade entre a fachada existente e a fachada têxtil torna-se numa zona amortecedora (“buffer zone”) e a trama da membrana permite que se gerem pequenos “reminhoes de vento” por trás do tecido de modo a neutralizar o efeito do vento. Por outro lado, este efeito permite que os escritórios sejam ventilados diretamente pelo exterior. Para além disto funciona como protetor solar, sem bloquear a visão do interior para o exterior. A membrana foi tensada entre balaustres metálicos através de tubos de alumínio, fazendo uso das instalações existentes para ancoragem dos equipamentos de limpeza de vidros. Uma vez que esta solução foi aplicada pela 1ª vez, no âmbito de uma intervenção de reabilitação de um edifício, foram realizados testes para todos os requisitos técnicos e funcionais. Os testes demonstraram que esta 2ª pele em membrana reduz suficientemente as forças do vento e a ação dos raios UV (Cepezed, 2016).

O projeto refº F.06 (Figura 52) consiste numa ampliação de um edifício residencial existente. Com uma altura de 11 metros, esta ampliação foi construída com uma estrutura de madeira totalmente revestida em membrana de PVC cor branca. A seleção deste material para revestimento de fachada foi feita tendo em conta o seu reduzido custo económico, leveza e propriedades de estanquidade.



Tabela 14. Síntese dos parâmetros construtivos e económicos analisados nos projetos de reabilitação com fachadas em membrana.

Projetos de reabilitação com membranas - Intervenção na fachada	Construtivos							Reação ao fogo [EN 13501-1]
	Área superficial [m²]	Número de camadas	Material membrana	Tipo de aplicação (T= tensionada, P= pneumática, C=colada)	Peso próprio da membrana [kg/m²]	Transmissão de luz visual [%]		
F.01. Centro de Gerontologia	1550	1	ETFE	T	0,50	90	B; s1, d0	
F.02. Casa em Munique	240	1	Rede de polietileno	T	0,20	10	B; s1, d0	
F.03. Edifício EDF	3400	1	Polioléfinas (TPO)	T	1,52	0	B; s1, d0	
F.04. Biblioteca Nacional King Fahad	12000	1	Fibra vidro Rev. PTFE	T	1,08	75	B; s1, d0	
F.05. Westraven	3500	1	Fibra vidro Rev. PTFE	T	0,45	40	B; s1, d0	
F.06. Shishiodoshi House	250	1	Poliéster Rev. PVC	T	0,70	70	B; s1, d0	
<b>Valor médio</b>	<b>3490</b>	<b>1</b>	<b>Fibra vidro Rev. PTFE</b>		<b>0,74</b>	<b>48</b>	<b>B; s1, d0</b>	
<b>Mínimo</b>	<b>240</b>				<b>0,20</b>	<b>0</b>		
<b>Máximo</b>	<b>12000</b>				<b>1,52</b>	<b>90</b>		

	Construtivos				Pré-existente		Económicos
	Tipo de transmissão de cargas da membrana para a estrutura (PO=pontual, PE=perimetral, A=apoios intermédios (●=sim))	Vão livre [m]	Material da subestrutura (ME=metal, MA=madeira, BE=betão)	Peso próprio sistema de ancoragem [kg/m²]	Tipo de estrutura pré-existente (MA=madeira, ME=metal, MI=mistura)	Necessidade de reforço da estrutura pré-existente para fazer a intervenção? (S=sim, N=nao)	
F.01. Centro de Gerontologia	PE	● 2,0	ME	3,00	MI	N	225
F.02. Casa em Munique	L	● 1,9	MA	3,50	MI	N	30
F.03. Edifício EDF	L	● 1,2	ME	1,50	MI	S	140
F.04. Biblioteca Nacional King Fahad	PO	● 3,0	ME	3,00	ME	N	930
F.05. Westraven	PE	● 3,0	ME	-	MI	N	60
F.06. Shishiodoshi House	PE	● 1,5	MA	1,00	MI	N	60
<b>Valor médio</b>		<b>2,1</b>	<b>2,40</b>				<b>240</b>
<b>Mínimo</b>		<b>1,2</b>	<b>1</b>				<b>30</b>
<b>Máximo</b>		<b>3,0</b>	<b>3,5</b>				<b>930</b>

Verifica-se que em média, as fachadas em membrana analisadas possuem 2,1 m de vão livre (variando entre 1.2m a 3.0m).

Relativamente ao custo global das intervenções em análise, que engloba o custo da membrana e dos acessórios e mão-de-obra para a sua instalação, verifica-se que a maioria das fachadas possui uma área superficial entre 1001 e 5000 m² (tamanho L) com um custo global médio de 240€/m² (sendo que 83% dos casos são inferiores ao valor médio) (Figura 53).

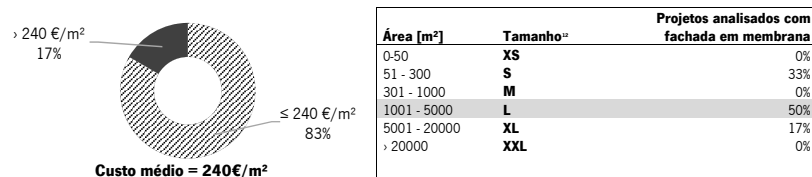


Figura 53. Distribuição dos projetos em análise em relação ao custo global médio. Relação entre o custo global da intervenção e área superficial de membrana aplicada.

\* Considera-se a classificação da área superficial definida por Gonzales et al (2011).

### • Parâmetros funcionais

Ao longo da elaboração das fichas individuais de cada projeto registaram-se as principais motivações para utilizar as soluções de fachada com membranas arquitetónicas em intervenções de reabilitação funcional. Nestes projetos existe uma motivação comum de reforçar o desempenho funcional das fachadas existentes. (sobretudo a nível higrotérmico e estético). A motivação predominante é a de proteção contra as variações climáticas (40%) seguindo-se da regulação térmica (27%) (Figura 33).

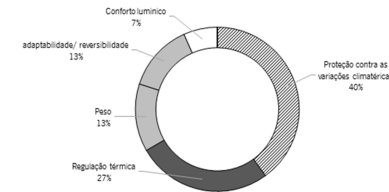


Figura 54. Principais motivações identificadas nos projetos em análise para utilizar membranas nas intervenções de reabilitação de fachadas<sup>1</sup>.

#### ○ Aspectos de proteção contra as variações climáticas:

- Em climas com temperaturas elevadas a fachada em membrana pode ser otimizada em relação ao percurso solar local (mediante a refração tridimensional da luz) combinando a proteção solar requerida com o máximo de penetração e transparência.
- Uma instalação de uma membrana (com trama aberta) sobre uma fachada existente oferece proteção contra o vento e faz com que seja possível ter boas condições de utilização do interior do edifício mesmo com as janelas abertas e em pisos muito elevados do solo. A cavidade entre a fachada existente e a fachada têxtil torna-se numa zona amortecedora ("buffer zone") e a trama da membrana permite que se gerem pequenos "remoinhos de vento" por trás do tecido de modo a neutralizar o efeito do vento (Figura 55). Para além disto funciona como protetor solar, sem bloquear a visão do interior para o exterior. No âmbito do projeto de reabilitação do edifício ref<sup>o</sup> F.05 – Westraven – foram realizados testes que demonstraram que esta 2ª pele em membrana reduz suficientemente as forças do vento e a ação dos raios UV (Cepezed, 2016).

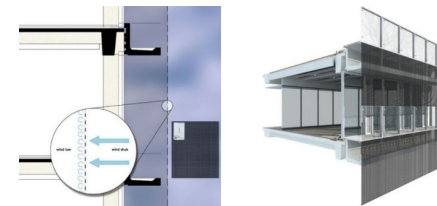


Figura 55. Esquema de funcionamento da fachada do projeto refº F.05.

#### ○ Aspectos de regulação térmica/higrotérmica:

- Segundo Cremers (2011) a impressão de um padrão de pontos prateados sobre a membrana transparente ETFE atua como dispersor da luz e protege contra os raios ultravioleta (UV). Os raios UV são efetivamente refletidos permitindo uma eficiente regulação térmica do interior do edifício.
- Na fachada em membrana aplicada na intervenção de reabilitação do Centro de Gerontologia (projeto ref<sup>o</sup> F.01) foi adotada uma estratégia de ventilação que permite a regulação higrotérmica dos espaços interiores em função da variação de temperatura exterior (Figura 56).
- Quando a membrana é combinada com um material de isolamento térmico como nos projetos ref<sup>o</sup> F.02 e F.03, as melhorias são significativas.

<sup>1</sup> Considera-se que cada projeto pode apresentar mais do que uma motivação para a intervenção de reabilitação funcional.

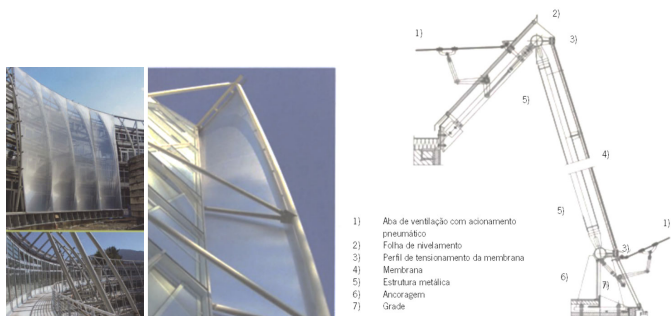


Figura 56. Dispositivo de ventilação aplicado no desenho da fachada do projeto refª F.01 (JESKA, 2007).

o **Aspetos de controlo luminico:**

Uma fachada em membrana transparente permite a passagem de luz natural para o interior do edificio existente e devido à sua extrema leveza é possível aplicá-la em grandes panos de fachada. Existe uma enorme oferta de membranas para otimizar o controlo luminico do interior de um edificio - a transmissão de luz visível pode variar entre 0 a 95%.

Tabela 15. Vantagens e desvantagens das intervenções com membranas em fachadas de edificios existentes.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>Durabilidade acima dos 20 anos.</li> <li>Retardância à chama (classificação B1) de acordo com a norma DIN 4102 e outras normas internacionais. Troitzsch (2004) demonstrou que o risco de queda desta membrana num incendio é reduzido devido ao reduzido peso específico deste material (1/40 menos do que o vidro, 1750kg/m<sup>3</sup>, utilizado com espessuras que variam entre 0,08 e 2,5mm).</li> <li>Se for desenhada e instalada corretamente, a sujidade acumulada pode ser removida apenas através da água da chuva. Assim esta membrana fica livre de manutenção.</li> <li>Devido às propriedades repelentes da membrana ETFE (por exemplo), é possível minimizar os custos de manutenção com a limpeza da fachada.</li> <li>Comparativamente ao reboco armado delgado utilizado no sistema ETICS – correntemente utilizado na reabilitação de edificios – caso o revestimento em membrana de polietileno seja rasgado, este pode ser facilmente substituído e reciclado.</li> <li>Existem sistemas de instalação de membranas em fachadas (exemplo projeto refª F.03) que permitem a execução de 24m de fachada (em altura) sem nenhuma junta horizontal. A estanquidade das juntas verticais (existentes a cada 1,2m de largura) é assegurada por soldagem térmica da membrana. No eixo dos algerozes o recobrimento dos mesmos é feito sem juntas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta de opções modulares em membrana (por exemplo, unidades modulares para fachadas, claraboias, tetos falsos, etc em membrana podem favorecer a sua aplicação, pelo fato da aquisição por parte do consumidor final ficar facilitada).</li> <li>Requisição de inspeções para detetar eventuais defeitos (causados por exemplo pelo impacto de objetos afiados) e repará-los logo que possível. Recomenda-se que o perímetro de tensão e da estrutura de suporte seja inspecionado regularmente.</li> <li>Existem dificuldades operacionais para fazer a ligação entre as membranas e os aros das janelas existentes. Muitas vezes é necessário recorrer ao reforço dos aros para que estes consigam suportar grandes esforços. A colocação da membrana nos cantos das fachadas tem-se revelado uma operação delicada devido à assimetria no posicionamento das janelas (Menard, 2013).</li> </ul>

**4.2 Análise de intervenções com membranas - elementos construtivos secundários**

Os projetos apresentados segundo intervenção em fundações, tetos e paredes divisórias correspondem apenas a amostras do universo de aplicação de membranas em intervenções de reabilitação. Contudo, como já foi referido no Capítulo 4, estima-se que a quantidade de projetos executados no âmbito de reabilitações funcionais seja muito superior. Por exemplo, uma das empresas pioneiras na aplicação de tetos tensados com membranas em 45 anos já instalou mais de 30.000.000 m<sup>2</sup>.

**4.2.1 Tetos suspensos**

• **Análise de parâmetros contextuais**

Como referido no tópico 4.1 do presente capítulo, as intervenções de reabilitação com membranas em tetos suspensos ocupam 23% do total dos projetos em análise, sendo o segundo elemento construtivo mais intervencionado com membranas. Contudo, entre os elementos construtivos secundários ocupa uma posição maioritária.

Os projetos em análise correspondem a intervenções de reabilitação em tetos suspensos com membranas arquitetónicas e encontram-se ordenados cronologicamente, segundo o ano de construção original do edificio existente (Tabela 16).

Tabela 16. Síntese dos parâmetros contextuais analisados nos projetos de reabilitação com membranas em que o teto foi intervencionado.

Projetos de reabilitação com membranas - Intervenção em tetos	Ano da construção do pré-existente	Ano da intervenção de reabilitação	Idade do edificio existente quando foi intervencionado [anos]	Durabilidade da membrana após intervenção (até ano de 2017) [anos]	Contextuais	
					Localização	
					País	Continente
T.01. Abadia beneditina de Pannonhalma	996	2012	1016	5	Hungria	Europa
T.02. Igreja de St. Petri-pauli	1483	2012	529	5	Alemanha	Europa
T.03. Igreja em Versailles	1700	2010	310	7	França	Europa
T.04. Museu da História Alemã	1706	2003	212	5	França	Europa
T.05. Sala de reuniões de Vallée Doller e Soutzbach	1800	2010	210	7	França	Europa
T.06. Cantina de Convento Franciscano	1908	2014	212	5	Itália	Europa
T.07. Museu em Bolonha	1800	2010	212	5	Itália	Europa
T.08. Igreja da Elevação de Santa Cruz	1871	2011	140	6	República Checa	Europa
T.09. St. Edwards University	1878	2014	136	3	EUA	América
T.10. Escritórios Logan	1900	2012	112	5	EUA	América
T.11. Eco Membrane	1936	1997	61	20	Alemanha	Europa
T.12. Igreja de Agnese de Modena	1970	2003	33	14	Itália	Europa
T.13. Igreja de St-Ignatus-de-Loyola	1982	2011	29	6	Canadá	América
T.14. Biblioteca Nacional King Fahad	1970	2013	43	4	Arabia Saudita	Asia
T.15. Abadia de Dragun	1940	2014	74	3	Alemanha	Europa
<b>Média</b>	-	-	<b>208</b>	<b>6</b>	<b>Alemanha e França</b>	<b>Europa</b>
<b>Percentagem</b>	-	-	-	-	<b>22% cada</b>	<b>72%</b>

Pela análise cronológica dos projetos em estudo (Tabela 16) verifica-se que a idade média dos edificios pré-existentes, até ao ano de intervenção, é de 233 anos (máximo, 1016 anos; mínimo 33 anos). Contudo, fazendo uma análise segundo as categorias de durabilidade definidas Douglas (2006), verifica-se que 65% dos edificios pré-existentes possuem “vida longa” (superior a 120 anos) (Figura 57). Os edificios pré-existentes, dos projetos em análise, são maioritariamente antigos (79%) e em menor número são modernos (21%) (Figura 58).

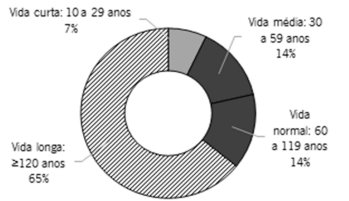


Figura 57. Categoria de durabilidade das construções pré-existentes à data de intervenção com tetos em membrana.

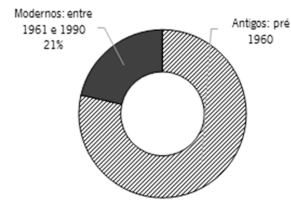


Figura 58. Ano de construção dos edifícios pré-existentes - projetos de reabilitação com tetos em membrana.

Verifica-se que a maioria das intervenções de reabilitação com membranas em tetos são recentes – possuem em média 6 anos (máximo 19 anos e mínimo 1 anos) e a maioria têm 4 anos (36%) (Figura 59). Projetos de reabilitação com tetos em membrana segundo a idade da membrana após intervenção (até ao ano de 2016). Também se verifica que estas intervenções têm vindo a aumentar significativamente na última década: entre o ano de 1997 e 2010 realizaram-se 29% de intervenções e entre 2011 e 2016 registam-se 71% do total de intervenções (Figura 60).

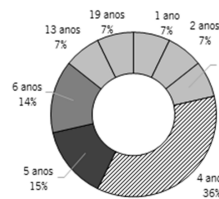


Figura 59. Projetos de reabilitação com tetos em membrana segundo a idade da membrana após intervenção (até ao ano de 2016).



Figura 60. Projetos de reabilitação com tetos em membrana, segundo o ano da intervenção.

A primeira intervenção de reabilitação com um teto suspenso em membrana ocorreu em 1997, com o projeto ref<sup>a</sup> T11 Eco Membrane, projetado por Thomas Herzog. Esta intervenção resultou numa solução arquitetónica inovadora, em que a reutilização de edifícios industriais se tornou um ato de sustentabilidade na medida em que se evitaram resíduos de demolição, e se reduziu o consumo de novos materiais de construção e de energia.

Relativamente à localização dos projetos em análise, verifica que a maioria se realizou na Europa (72%) e com maior expressão na Europa Central – França (22%), Itália (22%) e Alemanha (14%) (Figura 40), onde estes sistemas têm sido desenvolvidos e industrializados (Figura 61).

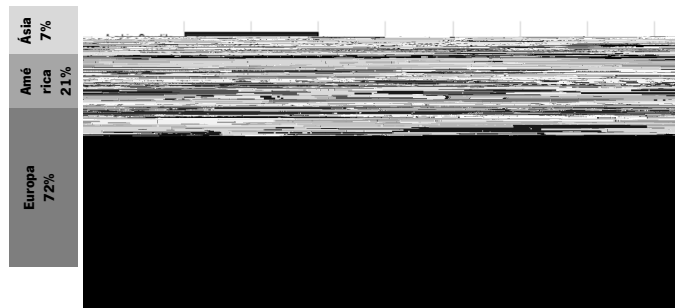


Figura 61. Distribuição dos projetos de reabilitação em análise, com tetos em membrana, por país e continente.

### • Parâmetros programáticos

Os materiais em membrana apresentam uma expressiva aplicação em tetos de edifícios com categoria de uso religioso, como se pode observar na Figura 62. As intervenções em análise realizam-se maioritariamente sobre edifícios com uso inicial religioso (65%) e apresentam um uso final maioritariamente religioso (57%) e de escritórios (15%).

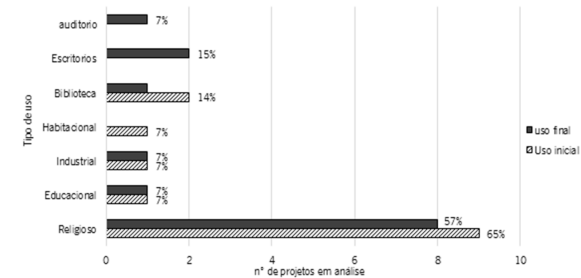


Figura 62. Relação entre uso inicial e uso após intervenção com tetos em membrana.

Também se verifica que a maioria das intervenções em análise são renovações (93%) (Figura 63) e sem conversão de uso (79%) (Figura 64). A maioria dos projetos em análise destina-se a um tipo de utilização permanente (93%) (Tabela 17).

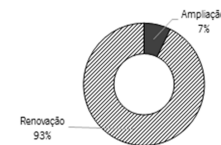


Figura 63. Tipos de intervenções nos edifícios reabilitados com teto em membrana.

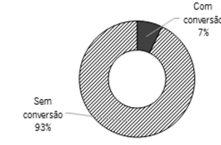


Figura 64. Existência de conversão de uso nos edifícios reabilitados com teto em membrana.

Tabela 17. Síntese dos parâmetros programáticos analisados nos projetos de reabilitação com membranas em que o teto foi objeto de intervenção.

Projetos de reabilitação com membranas - Intervenção no teto	Programáticos					
	Uso inicial	Uso final após intervenção	Com conversão de uso =sim  não	Tipo de utilização =Permanente ou T=	Tipo de intervenção de reabilitação	
T.01. Abadia beneditina de Pannonhalma	Biblioteca	Auditorio	•	T	Renovação	
T.02. Igreja de St. Petri-pauli	Religioso	Religioso		P	Renovação	
T.03. Igreja em Versalhes	Religioso	Religioso		P	Renovação	
T.04. Museu da História Alemã	Cultural	Cultural		P	Renovação	
T.05. Sala de reuniões de Vallée Doller e Soultzbach	Religioso	Escritórios	•	P	Renovação	
T.06. Cantina de Convento Franciscano	Religioso	Religioso		P	Renovação	
T.07. Museu em Bolonha	Religioso	Cultural	•	P	Renovação	
T.08. Igreja da Elevação de Santa Cruz	Religioso	Religioso		P	Renovação	
T.09. St. Edwards University	Educacional	Educacional		P	Renovação	
T.10. Escritórios Logan	Residencial	Escritórios	•	P	Alteração	
T.11. Eco Membrane	Industrial	Industrial		P	Renovação	
T.12. Igreja de Agnese de Modena	Religioso	Religioso		P	Renovação	
T.13. Igreja de St-Ignatus-de-Loyola	Religioso	Religioso		P	Renovação	
T.14. Biblioteca Nacional King Fahad	Biblioteca	Biblioteca		P	Ampliação	
T.15. Abadia de Dragun	Religioso	Cultural	•	P	Renovação	
<b>Maioria</b>	<b>Religioso</b>	<b>Religioso</b>	<b>não</b>	<b>Permanente</b>	<b>Renovação</b>	

• **Parâmetros construtivos**

Os projetos em análise encontram-se ordenados cronologicamente na Tabela 10, segundo o ano de construção do edifício pré-existente. Deste modo é possível ter uma leitura das soluções adotadas e da adequação das tecnologias construtivas com membranas às construções pré-existentes - desde as mais antigas até às mais recentes. No que toca à graduação das intervenções, dos projetos em análise, verifica-se que maioritariamente são ligeiras (72%) (Figura 65).

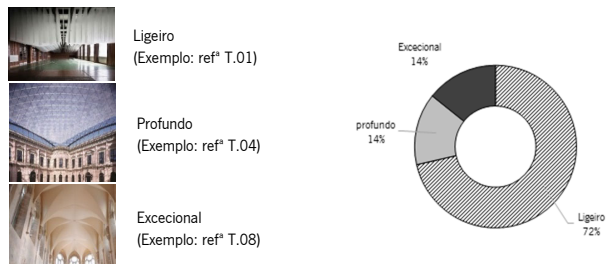


Figura 65. Grau das intervenções de reabilitação dos projetos onde foram realizadas intervenções com teto em membrana.

O planeamento de uma intervenção de reabilitação inicia-se com a análise do pré-existente. Verifica-se que o tipo de estrutura pré-existente nos projetos em análise é maioritariamente misto (64%) (Figura 66) e que nenhuma das pré existências necessita de reforço estrutural para acolher as intervenções com tetos de membrana.

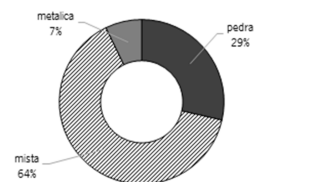


Figura 66. Pré existente - tipo de estrutura sobre a qual é feita a intervenção com teto de membrana nos projetos em análise.

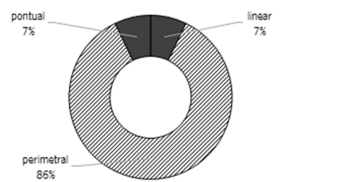


Figura 67. Intervenção com tetos de membranas - tipos de transmissão de cargas do teto em membrana para o pré-existente.

Os sistemas construtivos de tetos em membrana em análise transmitem cargas para a estrutura pré-existente através dos seguintes tipos de subestrutura: perimetral (86%), linear (7%) e pontual (7%) (Figura 47). Os tetos tensados exercem uma tensão de 18kg/m linear nos perfis de ancoragem e ligação à estrutura existente (BARRISOL, 2016). A maioria das subestruturas perimetrais são armações, caixilhos e anéis; enquanto as subestruturas lineares são vigas, arcos, treliças e subestruturas verticais. Relativamente às subestruturas pontuais, só se registam mastros e ganchos.

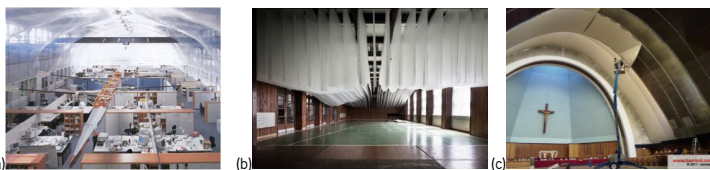


Figura 68. Exemplos de projetos de tetos em membrana com os diferentes tipos de transmissão de carga em análise: (a) Pontual - exemplo projeto refª T.11. Eco Membrane (b) Linear - exemplo projeto refª T.01 Abadia Beneditina de Pannonhalma (c) perimetral - exemplo projeto refª T.13. Igreja de St-Ignatus-De-Loyola

As subestruturas para aplicar os tetos em membrana, de acordo com os projetos em análise, são maioritariamente poliméricas (79%).

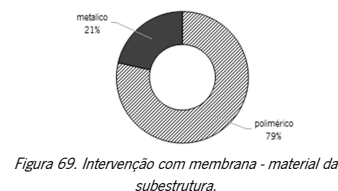


Figura 69. Intervenção com membrana - material da subestrutura.

Material da membrana	Porcentagem
PVC microperfurada	36%
PVC	36%
Não tecido polipropileno (PP)	7%
ETFE	7%
Tecido Poliéster Rev. Poliuretano (PU)	7%
PVDF	7%

Tabela 18. Materiais em membrana utilizados nos tetos dos projetos em análise.

Verifica-se que as soluções com materiais em membrana são utilizadas de forma simples e independente ou complementar a outros materiais (como mantas de isolamento térmico, etc). Relativamente aos materiais em membrana utilizados nos projetos em análise, a maioria dos tetos suspensos é feita em membrana de PVC (com memória de forma) e com ou sem microperforação (72%) (Tabela 18). A resistência mecânica e a flexibilidade deste material têm promovido a sua utilização em muitas soluções com caráter permanente.



Figura 70. Conceitos de aplicação de membranas arquitetónicas em tetos. "Eco Membrane", arq. Thomas Herzog. "Escritórios Logan", executado por Newmat. "Biblioteca Nacional King Fahad", arq. Gerber

De seguida apresenta-se um quadro síntese, elaborado com base nos projetos em análise, com detalhes das soluções construtivas adotadas nas intervenções de reabilitação de tetos com membranas (Figura 71). A maioria dos tetos suspensos tensados insere-se dentro de uma técnica de tensionamento através de calor. Outra técnica existente utiliza uma membrana de poliéster revestida a poliuretano. O princípio de tensionamento de ambas as técnicas passa por inserir a membrana entre perfis (que pode ser superior a 5m). No entanto, na primeira técnica a membrana vem previamente cortada (com menor dimensão do que a área de instalação e através da ação do calor expande-se; na segunda técnica a membrana é cortada no local da obra - ao colocá-la entre perfis corta-se o excedente.

O objetivo da intervenção no projeto com refª T.09 (Figura 72) foi renovar o interior de uma biblioteca para melhorar o conforto luminoso interior. Com uma solução de armadura modular com membrana translúcida, foi possível melhorar a qualidade luminosa do espaço existente (Sefar, 2016). As juntas entre módulos são mínimas e praticamente livres de sombras, o que fornece uma distribuição de luz uniforme. Para além disso, se forem inseridas duas camadas de membrana nos módulos, é possível criar atenuadores acústicos. Os módulos de membrana tensionada possuem uma instalação fácil e rápida. A membrana em PVDF utilizada nesta solução não apresenta compostos orgânicos voláteis e possui uma boa classificação de reação ao fogo (não apresenta gotejamento e produz pouco fumo). As armaduras modulares com membrana dupla permitem melhorar a qualidade de difusão da luz e ao mesmo tempo melhorar as condições acústicas. Para além disto, o sistema com a opção de membrana dupla é estanque e previne a penetração de poeiras e insetos que inibem a transferência de luz e causam um impacto visual negativo.

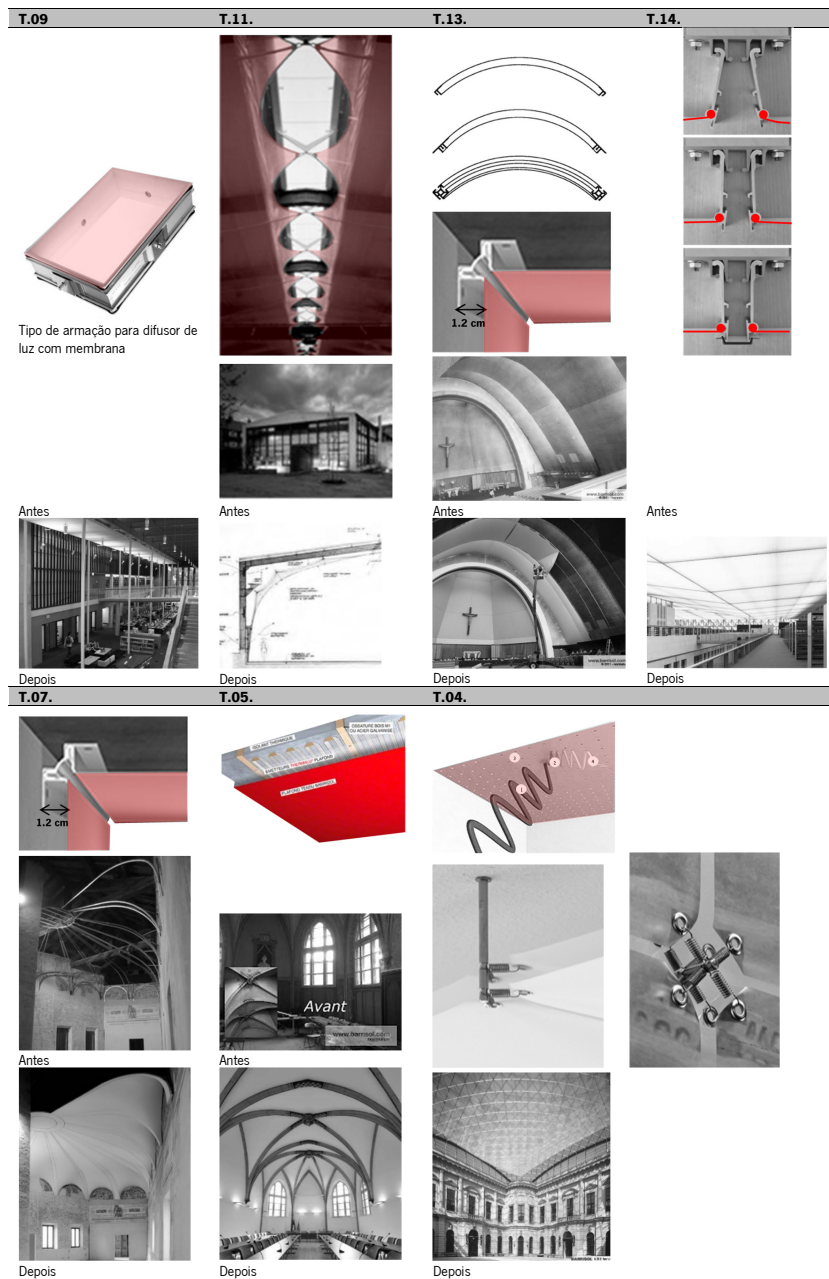


Figura 71. Pormenores de ligação entre o teto em membrana e o edifício pré-existente. Sistemas para tensionar tetos suspensos em membrana.

No projeto de intervenção com ref<sup>o</sup> T.11 (Figura 72) o edifício existente, com 1400 m<sup>2</sup>, apresentava: estrutura metálica, cobertura metálica sem isolamento, fachadas com fenestranças compostas por vidro simples e caixilharia de ferro e um interior com reduzida iluminação natural. Estas condições estavam longe de proporcionar um espaço confortável para a instalação do novo departamento de *design* da empresa. Contudo, existiram alguns constrangimentos no processo de reabilitação pois a empresa pretendia que a aparência exterior e interior permanecesse inalterada para manter a ideia de conjunto com os outros edifícios da empresa - a intervenção teria de ser mínima, os custos com a obra deviam ser reduzidos e a intervenção devia proporcionar um baixo consumo de energia na fase de utilização do edifício (Herzog, 2014). Procurava-se assim uma solução funcional com o máximo aproveitamento da luz natural para conforto dos utilizadores do espaço.

Foram feitas as intervenções funcionalmente necessárias: inseriu-se uma claraboia ao longo do cumeeiro do telhado para se obter uma faixa de luz contínua e janelas que abrem ao nível dos olhos para assegurar ligações visuais ao exterior. Estas modificações melhoraram as condições de iluminação natural no interior do edifício de modo a reduzir o consumo de iluminação artificial. Contudo, a intervenção principal relaciona-se com a otimização das condições térmicas no interior do edifício. Esta otimização foi conseguida através da inserção de duas membranas (com ar entre si). Com ar comprimido entre duas membranas criou-se uma solução isolante que melhorou consideravelmente o desempenho térmico do interior do edifício. Com esta membrana (extremamente fina e com reduzido impacto ambiental) conseguiu-se reduzir o volume útil de aquecimento sem ocultar a envolvente do edifício existente. O espaço interior adquiriu uma nova tensão através do contraste entre a geometria existente, com superfícies planas, e as formas suaves e curvas da solução com membrana. Esta solução construtiva com membrana também traz outras vantagens, como a reduzida sobrecarga estrutural (Free Library, 2016).

Um aspeto notável deste caso de estudo é que as mudanças necessárias não resultaram apenas na modernização do edifício nem numa abordagem ecologicamente correta, mas ocorreram através da utilização inovadora de materiais simples e económicos, que permitiram alcançar qualidades que tornaram a reutilização deste edifício mais lógica do que a demolição e construção nova. Para além das preocupações ambientais e de redução do consumo energético desta solução, também foram reinterpretados os princípios históricos de transparência. Assim, os funcionários deste novo departamento, os *designers*, teriam uma constante visualização das tecnologias construtivas passadas e presentes.

No projeto ref<sup>o</sup> T.13 (Figura 72) foi feita uma intervenção num edifício que necessitava ser reabilitado para eliminar os efeitos nocivos da exposição às partículas de amianto. A solução passou pelo revestimento do teto com uma membrana tensada com sistema de perfis (Figura 52) instalados de forma fácil e rápida (sem recurso a muitos meios auxiliares e humanos). O custo desta solução é reduzido, quando comparado com o processo de eliminação do amianto (Barrisol, 2016a). A membrana utilizada quando tensionada, devido à sua resistência à prova de água e barreira ao vapor, cria uma barreira contra substâncias indesejáveis como o amianto.

A intervenção realizada no projeto ref<sup>o</sup> T.14 (Figura 72) teve como objetivo otimizar os ganhos de iluminação natural adequados à atividade de leitura. Para tal, optou-se por instalar um teto tensado com uma membrana de cor branca (15000 m<sup>2</sup>), abaixo da cobertura de vidro existente, que filtra a intensa luz solar e difunde-a pelo espaço interior. Durante as horas sem luz solar o mesmo efeito é reproduzido através de pontos de iluminação artificial instalados acima do teto tensado.

A intervenção realizada no projeto ref<sup>o</sup> T.05 (Figura 52 e anexo 4) teve como objetivo melhorar as condições térmicas e acústicas de uma antiga capela convertida em sala de reuniões de uma comunidade. A solução passou pela aplicação de uma membrana microperfurada combinada com aquecimento radiante no teto e paramentos verticais. Um relevante desta solução é que deste modo as formas originais da superfície do teto existente não foram alteradas (Barrisol, 2016b).

A intervenção realizada no projeto ref<sup>o</sup> T.04 (Figura 52) mostra que, com recurso a solução de membrana microperfurada e translúcida, é possível garantir melhorias das condições acústicas sem comprometer o desempenho luminoso do espaço existente.



• **Parâmetros morfológicos e estéticos**

O sistema de tensionamento de membrana através de calhas entalhadas permite que estas se adaptem às linhas curvas existentes de modo a tensar a membrana na superfície a intervir. Existem soluções no mercado para reconstrução de formas complexas - arcos simples, abóbadas, cúpulas, etc. - como por exemplo o sistema representado na Figura 72. Para além disso também existem membranas com vários tipos de acabamento (mate, acetinado, brilho) e cores.

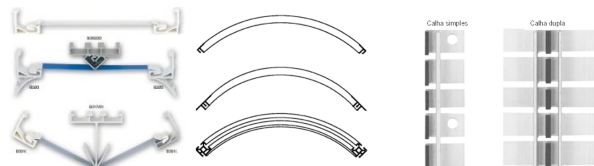


Figura 72. Sistemas de calhas para tensionar membranas – “Barrisol Tracks” (BARRISOL, 2016).

A maioria dos tetos das igrejas encontra-se a cotas muito elevadas, sendo por isso difíceis de trabalhar e manter (pelos meios auxiliares que requerem). Nos casos em que não existam elementos patrimoniais relevantes, os tetos em membrana tensionada constituem uma solução de instalação fácil, económica e durável (os custos de manutenção do reboco desaparecem), com a vantagem de proporcionar melhorias acústicas a estes espaços. Deste modo é possível alcançar melhorias funcionais e preservar as formas originais.

Os revestimentos antigos requerem manutenção frequente, que envolve custos, devido à facilidade em se danificarem. O projeto ref<sup>o</sup> T.03 (Figura 73) apresenta uma solução de reabilitação para um edifício que necessitava de um restauro das suas superfícies superiores e laterais. Foi aplicado um revestimento em membrana sob o teto existente. A opção recaiu sobre uma membrana com acabamento mate por ser semelhante ao acabamento do material existente, o gesso. Com esta solução foi possível reforçar os limites das superfícies deterioradas e reter partículas suscetíveis de cair do teto existente. Esta solução, como não adere à superfície do teto existente, permite a instalação de mantas de isolamento térmico e acústico, e evita o aparecimento de manchas causadas pela presença de humidade (Barrisol, 2016c).



Figura 73. Exemplos de adaptação morfológica de tetos feitos com membranas tensionadas.

A Igreja da Elevação de Santa Cruz (em checo - Kostel Povýšení sv. Kříže) - projeto ref<sup>o</sup> T.08 (Figura 75) - foi construída no ano de 1247 sob influência do estilo gótico francês; as abobadas foram construídas na oitava década do século XIV, sob influência da oficina do famoso arquiteto Petr Parléř. Após os incêndios ocorridos no século XVI, a igreja foi reconstruída ao estilo renascentista. No ano de 1871 a igreja foi desconsagrada e entregue ao exército que a utilizou como quartel e armazém até ao ano de 1947. Devido às adaptações desta época, quase todo o espaço original foi destruído.

Em 2005, após a aquisição do edifício por parte do município, deu-se início ao projeto<sup>14</sup> para restaurar o aspeto original da igreja. Na 1ª etapa de intervenção eliminou-se a humidade presente nas paredes, reconstruiu-se o

telhado e os rebocos exteriores; e na 2ª etapa realizou-se uma reconstrução do teto abobadado do presbitério (que tinha sido destruído) em membrana tensada para melhoria do desempenho acústico (TIC, 2016).

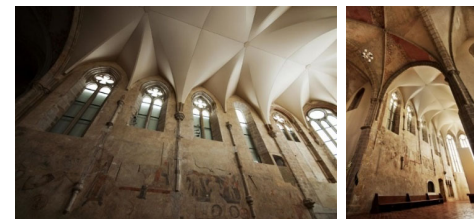


Figura 74. Igreja da Elevação de Santa Cruz (Kostel Povýšení sv. Kříže): vista do interior do presbitério com teto abobadado (reconstrução do teto original, mas com recurso a membrana para melhoria do desempenho acústico do presbitério).

Segundo Waern & Wingardh (2015) os tetos deixaram de ser o centro das atenções de um espaço e passaram a ser uma zona para colocar equipamento mecânico" (Figura 76). Quando se experiencia um espaço arquitetónico pela primeira vez existe a tendência para o observar de cima para baixo. No passado, o olhar do utilizador do espaço encontrava tetos abobadados, estruturas treliçadas e com tratamentos decorativos distintos. Contudo, atualmente o utilizador vê tetos com painéis acústicos, tubagens e iluminação. O teto deixou de ser uma tela para a criatividade com o avanço da era tecnológica. Atualmente é difícil integrar todos os equipamentos mecânicos, em tetos falsos tensados com membranas e reversíveis, que permitem ter impressão gráfica (Figura 77).



Figura 75. Imagem alusiva à evolução dos tetos (imagem da autoria de Nico Saiegh).

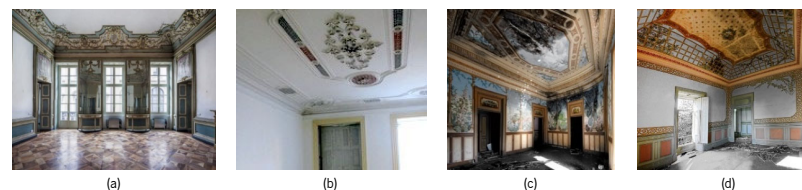


Figura 76. Exemplos de tetos: (a) vista do teto do Palácio Valperga Galleani, em Torino, Itália (DESIGN MAG, 2016). (b) vista de teto de uma casa burguesa em reabilitação na Rua do Rosário, Porto (acesso ao local facultado pela empresa NCREP) (c) (d) vistas dos tetos pintados do Palácio da Fonte da Pipa, Loulé (com presença de fungos).

Relativamente às dimensões das membranas, fazendo uma consulta a várias empresas produtoras de membranas para utilização em tetos suspensos, verifica-se que estas possuem no máximo 2,40m de largura e 50m de comprimento. Estas membranas podem ser soldadas entre si para perfazerem vãos superiores a 2,40m e quando são instaladas com os sistemas de tensionamento com perfis perimetrais e com a ação de uma fonte de calor podem atingir uma superfície com 50m<sup>2</sup> sem apoios intermédios de reforço. Verifica-se que os riscos de desastres naturais dominantes nos projetos em análise são: os sismos (44%) e as inundações (42%).

<sup>14</sup> O município comprou a igreja por 6 milhões de coroas checas e conseguiu um apoio financeiro no valor de 249.999 euros, de um Fundo para o projeto de “Renovação da Herança cultural de Jihlava”. Motivo pelo qual os custos de reabilitação deste edifício tiveram de ser reduzidos.

Tabela 19. Síntese dos parâmetros construtivos e económicos analisados nos projetos de reabilitação com tetos em membrana.

	Construtivos						
	Membrana						
	Área superficial [m <sup>2</sup> ]	Número de camadas	Materiais membrana	Tipo de aplicação (T= tensionada, P= pneumática, S= Suspensa)	Peso próprio da membrana [kg/m <sup>2</sup> ]	Transmissão de luz visível [%]	Reação ao fogo [EN 13501-1]
<b>Projetos de reabilitação com membranas - intervenção em tetos</b>							
T.01. Abadia beneditina de Pannonhalma	200	1	Não tecido polipropileno	S	0,20	20	B; s1, d0
T.02. Igreja de St. Petri-Pauli	36	1	PVC microperfurada	T	0,18	10	B; s1, d0
T.03. Igreja em Versalhes	400	1	PVC microperfurada	T	0,18	10	B; s1, d1
T.04. Museu da História Alemã	1800	1	PVC microperfurada	T	0,18	90	B; s1, d2
T.05. Sala de reuniões Vallée Doller, Soultzbach	500	1	PVC microperfurada	T	0,18	10	B; s1, d3
T.06. Cantina de Convento Franciscano	350	1	PVC	T	0,20	10	B; s1, d0
T.07. Museu em Bolonha	60	1	PVC	T	0,20	10	B; s1, d0
T.08. Igreja da Elevação de Santa Cruz	250	1	PVC	T	0,20	10	B; s1, d0
T.09. St. Edwards University	43	1	ETFE	T	1,00	70	B; s1, d0
T.10. Escritórios Logan	20	1	Tecido Poliéster Rev. PU	T	0,70	78	B; s1, d0
T.11. Eco Membrane	1400	2	PVC	T	0,20	90	B; s1, d0
T.12. Igreja de Agnese de Modena	90	1	PVC microperfurada	T	0,18	10	B; s1, d0
T.13. Igreja de St-Ignatus-de-Loyola	1500	1	PVC	T	0,20	10	B; s1, d0
T.14. Biblioteca Nacional King Fahad	15000	1	PVDF	T	1,08	75	B; s1, d1
T.15. Abadia de Dargun	300	1	Poliéster	P	0,62	7	B; s2, d0
<b>Média</b>	<b>1422</b>	<b>1</b>	<b>PVC c/s microperurações</b>	<b>T</b>	<b>0,35</b>	<b>36</b>	<b>B; s1, d0</b>
<b>Mínimo</b>	<b>20</b>	<b>1</b>			<b>0,18</b>	<b>10</b>	
<b>Máximo</b>	<b>15000</b>	<b>2</b>			<b>1,08</b>	<b>90</b>	

	Construtivos							Económicos
	Subestrutura				Pré-existente			
	Tipo de transmissão de cargas da membrana para a estrutura (PO= pontual, PE= perimetral, L= linear)	Vão livre [m]	Material da subestrutura (ME= metal, MA= madeira, PO= polimérico)	Peso próprio sistema de ancoragem [kg/m <sup>2</sup> ]	Tipo de estrutura pré-existente (PE= pedra, ME= metal, MI= mista)	Necessidade de reforço da estrutura pré-existente para fazer a intervenção? (S=sim, N= não)	Custo global estimado (material+ instalação) [€/m <sup>2</sup> ]	
T.01. Abadia beneditina de Pannonhalma	L	5	ME	s.i.	PE	N	6	
T.02. Igreja de St. Petri-Pauli	PE	3	PO	0,10	PE	N	200	
T.03. Igreja em Versalhes	PE	s.i.	PO	0,10	PE	N	200	
T.04. Museu da História Alemã	PE	27	PO	0,10	MI	N	60	
T.05. Sala de reuniões Vallée Doller, Soultzbach	PE	s.i.	PO	0,10	PE	N	250	
T.06. Cantina de Convento Franciscano	PE	s.i.	PO	0,10	MI	N	100	
T.07. Museu em Bolonha	PE	s.i.	PO	0,10	MI	N	120	
T.08. Igreja da Elevação de Santa Cruz	PE	s.i.	PO	0,10	MI	S	100	
T.09. St. Edwards University	PE	s.i.	PO	0,10	MI	N	120	
T.10. Escritórios Logan	PE	s.i.	PO	0,10	MI	N	30	
T.11. Eco Membrane	PO	s.i.	ME	0,10	ME	N	30	
T.12. Igreja de Agnese de Modena	PE	s.i.	PO	0,10	MI	N	100	
T.13. Igreja de St-Ignatus-de-Loyola	PE	s.i.	PO	0,10	MI	N	100	
T.14. Biblioteca Nacional King Fahad	PE	s.i.	ME	s.i.	MI	N	220	
T.15. Abadia de Dargun	PO	10	ME	2,00	PE	N	60	
<b>Média</b>	<b>PE</b>	<b>11</b>	<b>PO</b>	<b>0,24</b>	<b>MI</b>	<b>Não</b>	<b>120</b>	
<b>Mínimo</b>		<b>3</b>		<b>0,10</b>			<b>30</b>	
<b>Máximo</b>		<b>27</b>		<b>2,00</b>			<b>250</b>	

Tabela 20. Síntese dos parâmetros de riscos naturais analisados nos projetos de reabilitação com membranas em que o teto foi objeto de intervenção.

	Riscos de desastres naturais <sup>15</sup>					
	Sismos [%]	Inundações [%]	Secas [%]	Deslocamento de terras [%]	Erupção vulcânica [%]	Ciclones [%]
<b>Projetos de reabilitação com membranas - Intervenção nos tetos</b>						
T.01. Abadia Beneditina de Pannonhalma	20	10	0	0	0	0
T.02. Igreja de St. Petri-Pauli	20	80	0	0	0	0
T.03. Igreja em Versalhes	20	10	0	0	0	0
T.04. Museu da História Alemã	20	10	0	0	0	0
T.05. Sala de reuniões de Vallée Doller e Soultzbach	20	10	0	0	0	0
T.06. Cantina de Convento Franciscano	40	10	0	0	0	0
T.07. Museu em Bolonha	40	40	0	0	0	0
T.08. Igreja da Elevação de Santa Cruz	20	40	0	0	0	0
T.09. St. Edwards University	20	90	10	0	0	50
T.10. Escritórios Logan	80	0	70	0	0	0
T.11. Eco Membrane	20	80	0	0	0	0
T.12. Igreja de Agnese de Modena	40	40	0	0	0	0
T.13. Igreja de St-Ignatus-de-Loyola	80	10	0	0	0	10
T.14. Biblioteca Nacional King Fahad	20	10	0	0	0	0
T.15. Abadia de Dargun	20	10	0	0	0	0
<b>Média</b>	<b>33</b>	<b>31</b>	<b>5,7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4,3</b>
<b>Percentagem relativa</b>	<b>44%</b>	<b>42%</b>	<b>8%</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6%</b>

Devido à resistência, flexibilidade e estanquidade de algumas membranas utilizadas em tetos suspensos, estes materiais podem participar positivamente na diminuição dos efeitos provocados por desastres naturais que afetam os edifícios. Por exemplo, em países sísmicos, onde o colapso de tetos suspensos é frequentemente reportado, existe um problema relacionado com o perigo de queda de tetos suspensos e pesados. Segundo Kawaguchi (2015) no ano de 2011, no seguimento de um terramoto em Tohoku (Japão) (Figura 77 (a)), colapsaram milhares de tetos suspensos; e por esse motivo estão a ser utilizados materiais de membrana para substituir materiais pesados em tetos suspensos (mas sem a finalidade de reforço estrutural). No caso de infiltrações de água os tetos tensados com membranas podem suportar massas de vários litros de água (Figura 77b) - sem perfurações da membrana e com uma fixação dos periféricos dos perfis de 30kg/m (Barrisol, 2016).

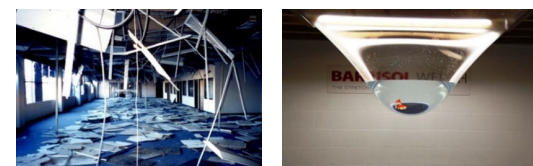


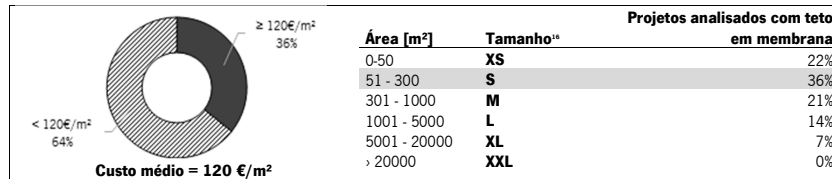
Figura 77. (a) Projeção de componentes de teto suspenso para fora do plano após ocorrência de sismo (Kawaguchi, 2015) – os tetos suspensos em membrana podem oferecer proteção contra estes incidentes; (b) imagem ilustrativa da capacidade de contenção de membrana tensionada, integrada em sistema construtivo para executar teto suspenso (Barrisol, 2016).

Relativamente ao custo das intervenções em análise, que engloba o custo da membrana, dos acessórios e da mão-de-obra para a sua instalação, verifica-se que o custo médio global é de 120 €/m<sup>2</sup> e que em 64% dos casos o custo é inferior a este valor. A maioria dos tetos suspensos possui uma área superficial entre 51 e 300m<sup>2</sup> (tamanho S) (Tabela 21).

<sup>15</sup> Dados obtidos em: <http://www.chincci.com/>



Tabela 21. Distribuição dos projetos em análise em relação ao custo médio e distribuição das percentagens de áreas superficiais de membrana aplicadas.



#### • Parâmetros funcionais

Ao longo da elaboração das fichas individuais de cada projeto registaram-se as principais motivações para utilizar as soluções de tetos suspensos, com membranas arquitetónicas, em intervenções de reabilitação funcional. A Figura 79 mostra as principais motivações ordenadas no sentido de predominância. Nestes projetos existe uma motivação predominante de adaptabilidade/ reversibilidade morfológica ou estética (33%), seguindo-se da motivação para alcançar conforto luminoso (19%).

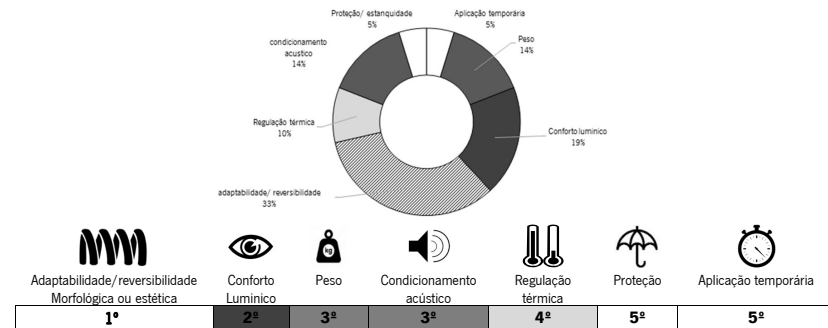


Figura 78. Principais motivações identificadas nos projetos em análise para utilizar membranas nas intervenções de reabilitação de tetos\*.

No seguimento da análise sobre as motivações mais frequentes (presentes nos projetos em análise) para utilizar membranas em intervenções de reabilitação de tetos, apresenta-se uma breve descrição sobre as mesmas.

- *Aspetos de adaptabilidade/reversibilidade morfológica ou estética da solução de tetos em membrana tensada:*
  - Podem constituir uma solução para ocultar os defeitos de construção ou anomalias aparentes nas superfícies existentes;
  - Permitem que os cabos elétricos possam ser colocados no forro do teto;
  - Sem sobrecarga para vigamentos existentes;
  - Evitam as pontes térmicas (diminuição de perfis de apoio);
  - Podem ser montados e desmontados inúmeras vezes - são reversíveis; desmontagem tem de ser realizada por um profissional;
  - Adaptam-se a várias formas;
  - O acesso às instalações elétricas e equipamentos fica facilitado;

\* Considera-se a classificação da área superficial definida por Gonzales et al (2011).

\*\* Considera-se que cada projeto pode apresentar mais do que uma motivação para a intervenção de reabilitação funcional.

- Montagem rápida e limpa, sem desperdícios, nem deslocação de móveis; é possível realizar intervenções em sítios ocupados.

- *Aspetos de conforto luminico da solução de tetos em membrana:*
  - Supressão de manchas e efeitos de espetros, etc.;
  - Atua como difusor luminico, tanto da luz natural como da artificial (vários tipos acabamento da superfície);
  - Possibilidade de integrar sistemas de iluminação, e outros equipamentos elétricos;
  - Possibilidade de integração de iluminação artificial (existem membranas com fibras óticas integradas e encontra-se em desenvolvimento a integração de leds em membrana);
  - Membrana translúcida retro iluminada permite a difusão de luz artificial sem criação de sombras.

- *Aspetos de higratérmicos da solução de tetos em membrana:*
  - A opção de teto suspenso permite a criação de uma caixa-de-ar isolante que impede a formação de condensações sobre a membrana; diminuição das perdas de calor pela cobertura do edifício existente e o volume a aquecer;
  - Pode ser necessário associar materiais de isolamento térmico para atingir um bom desempenho térmico;
  - Existem soluções de aquecimento com membrana radiante para estratégias ativas e soluções com materiais de mudança de fase + membrana para estratégias passivas.

- *Aspetos de proteção da solução de tetos em membrana:*
  - Retenção de líquidos (1m² de membrana tensada pode suportar 100 litros de água) e outros materiais/partículas que podem cair do teto existente (como o amianto, por exemplo);
  - Classificação de reação ao fogo B-s2, d0;
  - Material sem cádmio e sem liberação de compostos orgânicos voláteis;
  - Material lavável (recomendado para espaços com elevado grau de salubridade) e não tóxico (conforme às normas europeias e internacionais).

- *Aspetos acústicos da solução de tetos em membrana:*
  - Na Europa, o mercado da acústica de tetos suspensos pertence essencialmente às fibras minerais (Browaey, 2011). Contudo é possível obter um bom desempenho acústico quando se associa uma membrana microperfurada a um material de isolamento acústico (por exemplo, uma manta de lã de rocha).
  - Por exemplo, no projeto refº T.12 Igreja de Agnese de Modena foi realizada uma intervenção num edifício existente, construído nos anos 70, que apresentava problemas acústicos. A maioria dos materiais que constituía as superfícies deste edifício (gesso, vidro, mármore e madeira) é refletora de som. O vidro e a madeira absorvem apenas ondas sonoras de baixa frequência por isso o desempenho acústico do edifício estava desequilibrado com níveis anormais de ressonância de ondas sonoras de alta frequência. Em estudos realizados (Nocke & Hilge, 2004) o tempo de reverberação medido *in situ* apresentou valores acima de 7 segundos para frequências inferiores a 1000Hz (ver Figura 79). O objetivo desta intervenção foi reduzir significativamente o tempo de reverberação e suavizar a curva de frequências. Uma das vantagens desta membrana microperfurada é que o grau de absorção pode ser ajustado de forma precisa para cada espaço de intervenção. Através da seleção da distância certa entre a membrana e o teto acima existente, pode-se alcançar a quantidade ótima de absorção do som. Para esta aplicação em particular, a dimensão ótima para a caixa-de-ar entre a membrana e o teto existente foi determinada para ser inferior a 20cm.
  - Os princípios de intervenção no projeto refº T.02 Igreja de St. Petri-Pauli são iguais aos do projeto refº T.02. Contudo, para esta aplicação em particular, a dimensão ótima determinada para a caixa-de-ar entre a membrana e o teto existente foi de 7cm (Figura 80). Para além da intervenção no teto também se adicionaram 3 painéis com 12m² cada e com material de isolamento acústico (lã de rocha).

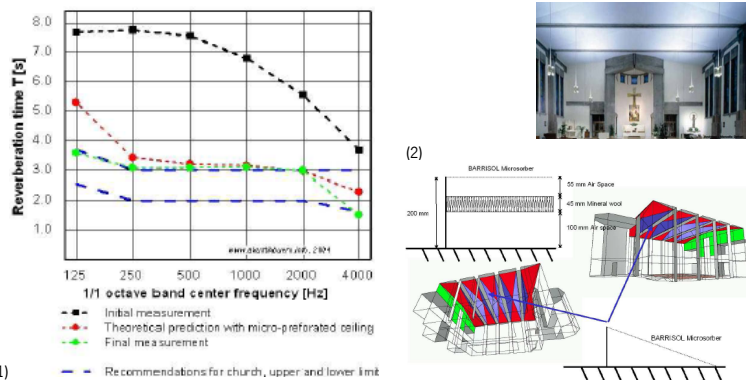


Figura 79. Resultados do projeto com ref. T.12 – Igreja de Agnese de Modena: (1) medição do tempo de reverberação antes e depois da reabilitação do edifício (LISYS, 2016); (2) duas configurações para a aplicação da membrana microperfurada no edifício (as áreas assinaladas a cor azul representam membranas microperfuradas sem material absorvente e as áreas assinaladas a cor vermelha apresentam o material poroso aplicado na caixa-de-ar acima da membrana microperfurada) (Barrisol, 2016) (Nocke & Hilge, 2004).

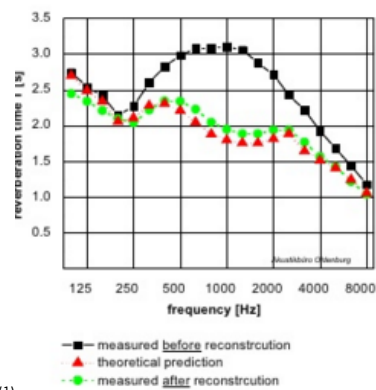


Figura 80. Resultados do projeto com ref. T02 – Igreja de St. Petri-Pauli (1) medição do tempo de reverberação antes e depois da reabilitação do edifício; (2) Vistas do teto e paramentos verticais com membrana tensionada (Barrisol, 2016).

#### 4.2.2 Paredes interiores

Uma parede interior tem a finalidade de separar ou dividir compartimentos em si ou entre si e criar zonas de privacidade. A aplicação de tecido entre colunas foi difundida na Europa até à época medieval (Figura 82). Segundo Kruger (2009) apud Heinrich (1958) as instruções do Papa Leo IV para a celebração das homilias dão uma visão da quantidade de cortinas usadas (cerca de 1000) para criar absorção acústica em igrejas, particularmente no século oitavo e nono. Assim, os têxteis tiveram um papel significativo na organização do espaço interior medieval. Os espaços entre as colunas e pilares eram igualmente fechados com cortinas. A compartimentação com cortinas - de lã pesada ou de veludo – eram utilizadas como encerramento flexível de portas e espaços até o século XIX (Semper, 1977) (Figuras 83, 84 e 85) e sobre as frias paredes de pedra para tornar os espaços mais confortáveis.



Figura 81: Tecido franzido entre colunas (cerca de 1000 d.C.) (KRUGER2, 2009).

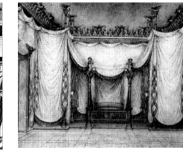


Figura 82: Quarto da rainha Luísa da Prússia (1809) (Karl Schinkel citado em (Kruger, 2009).



Figura 83: Cortina divisória, quarto de Annette von Droste Hulshoff, Meersburg, (1841) (Krüger, 2009).



Figura 84: Quarto no Palácio de Charlottenhof, (1826-29), (Kruger, 2009).

As tradicionais paredes deslizantes japonesas shoji com membrana papel translúcido (Figura 86) são um exemplo de paredes divisórias flexíveis utilizadas para proporcionar um desenho variável do espaço interior e ainda hoje são utilizadas. O conceito original de shoji surgiu na China, e foi importado para o Japão entre os séculos VII e VIII. Estas paredes móveis são usadas para proteção solar e visual em fachadas de habitações.



Figura 85: esquema de montagem da shoji e vista interior de um compartimento com paredes shoji (ODATE, 2000).

Em 2011, os canadenses Molo Design projetaram um sistema de divisórias de papel destinadas a proporcionar privacidade em abrigos de emergência, na sequência de um desastre mas também podem ser integradas em projetos de reabilitação onde exista a necessidade de uma solução leve para reorganizar o espaço interior. Este sistema denomina-se “Softshelter”. Com a forma de um acordeão, as paredes de papel kraft podem expandir e contrair. As paredes são unidas por peças amovíveis e magnéticas e requerem apenas algumas pessoas para a sua montagem com instruções mínimas e sem ferramentas (Figura 87(a)). Um simples cabo de alimentação elétrica com 12 volts pode atravessar a parede e chegar a todas as unidades adjacentes (Figura 87(b)).

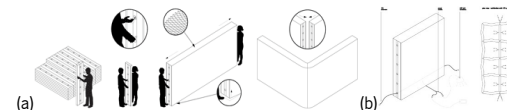


Figura 86: (a) esquema inicial de montagem; (b) atravessamento de instalação elétrica de 12 volts (Molo Design, 2010).

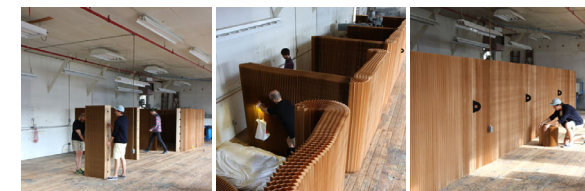
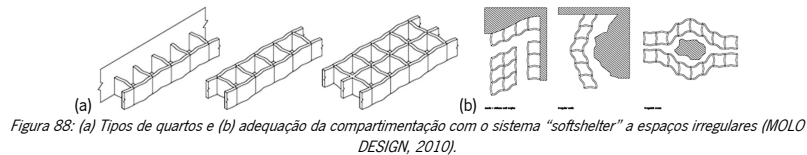


Figura 87: Vista interior da montagem do sistema “softshelter” num edifício industrial existente (Molo Design, 2010).

Os compartimentos criados podem ser isolados ou agrupados de forma a criar corredores, quartos conjugados e salas comuns (Figura 88). A natureza flexível das paredes permite a sua montagem mesmo em espaços irregulares (Figura 89(b)).



• **Parâmetros funcionais**

Devido ao reduzido número de projetos recolhidos com intervenções específicas em paredes interiores, e por estas intervenções possuírem muitas semelhanças técnicas com as intervenções sobre tetos suspensos, estes elementos só serão analisados em relação aos parâmetros funcionais.

A Figura 89 mostra as principais motivações ordenadas no sentido de predominância nos projetos em análise. Nestes projetos existe uma motivação predominante de adaptabilidade/reversibilidade morfológica ou estética (60%), seguindo-se da motivação para alcançar conforto lumínico (20%) e acústico (20%).

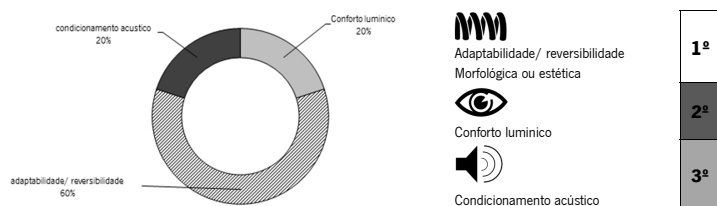
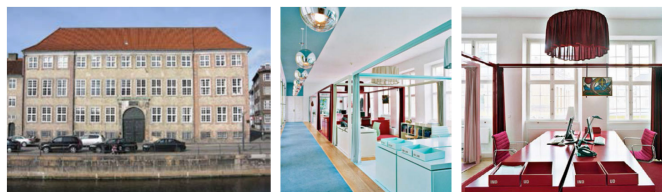


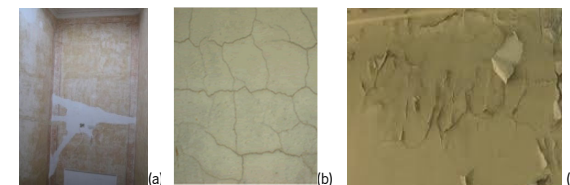
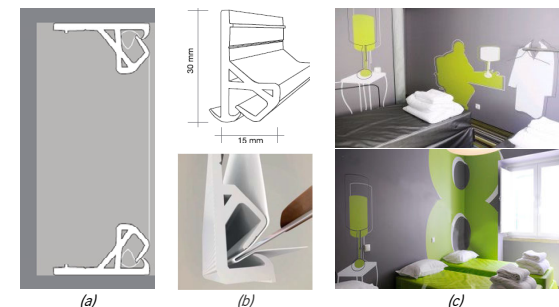
Figura 89. Principais motivações identificadas nos projetos em análise para utilizar membranas nas intervenções de reabilitação de paredes interiores<sup>8</sup>.

O projeto ref<sup>a</sup> PI.01 - Danish Cultural Ministry (Figura 91) – foi projetado por Louise Campbell & Marianne Britt Jorgensen. Este edifício é classificado como monumento protegido e alberga o escritório do Ministério da Cultura Dinamarquês. Era necessário criar uma série de gabinetes para os membros da equipa. A solução passou por compartimentar o espaço existente no piso de entrada existente. Foi necessário garantir a reversibilidade da solução pois esta não podia alterar permanentemente o aspeto do edifício (devido ao seu estatuto). Por isso foram construídos cinco cubos modulares (em estrutura metálica) independentes do edifício existente. Foram aplicadas cortinas com tecido opaco nas faces dos cubos para atuarem como: dispositivo de proteção solar (nas faces voltadas para as janelas existentes); e divisórias para separar a área de trabalho das áreas comuns e proporcionar um ambiente de trabalho mais concentrado.



O projeto ref<sup>a</sup> PI.02 - Hotel Evidencia Light (Figura 92) - constitui um exemplo de como as membranas permitem criar ambientes graficamente personalizados. Existia a necessidade de converter o edifício existente num hotel. Devido à reduzida dimensão dos quartos do espaço a intervir optou-se por uma solução de revestimento em membrana que, para além de ocultar imperfeições (Figura 93) e permitir ganhos de área útil devido à reduzida espessura da membrana, também permitiu que a mesma fosse impressa com grafismos que incluem imagens de mobiliário, ajudando a dar escala e algum conforto visual ao espaço interior (Figura 91(c)).

<sup>8</sup> Considera-se que cada projeto pode apresentar mais do que uma motivação para a intervenção de reabilitação funcional.



Os objetivos do projeto ref<sup>a</sup> PI.03 são atingir um custo de construção e consumo energético reduzidos. O projeto está localizado num centro multiusos, resultante da reabilitação dos edifícios de uma antiga indústria de transformação de cânhamo. Pretende-se converter o edifício existente num alojamento turístico.

Os principais desafios para a reabilitação funcional deste edifício prenderam-se com aspetos de iluminação e renovação do ar. O espaço de dormitório apresenta uma compartimentação semelhante à de um acampamento através da inserção de células autónomas (Figura 93), delimitadas por uma membrana translúcida de poliéster. Esta foi a solução encontrada para proporcionar conforto lumínico e de ventilação devido ao fato de só existirem fontes de luz e ar numa única fachada do edifício intervencionado. Dado que o edifício será utilizado durante a primavera/ verão, optou-se pela ventilação passiva do espaço do dormitório. A ventilação passiva ficou facilitada devido à localização de aberturas existentes a norte e de duas torres de ventilação que foram adicionadas no telhado.



Figura 93. Vistas do interior do edifício existente com as paredes interiores em membrana – projeto da autoria do arquiteto Antonio Ravalli (RAVALLI, 2016).

### 4.3 Exemplos de projetos de investigação - soluções de reabilitação funcional c/membranas

Projeto	Início do projeto:	Final do projeto:	Áreas científicas	Aspetos chave:
SOFT CITIES	2009	Em curso	Urbanismo, arquitetura, engenharia civil, energias renováveis	Armazenamento de energia adaptável



Localização: Porto, Portugal  
Arquitetura: Kennedy & Violich Architecture, Ltd;  
Arquiteto associado: Agência Arquitectura Thenasie & Valentim, Porto  
Suporte académico: Agência de Energia do Porto (AdE); Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP); MIT Energy Initiative (MITEI)

O projeto SOFT CITIES cria um sistema têxtil adaptável para a recolha de energia, que opera entre a escala urbana de infraestruturas e pequena escala residencial. Urbanismo, arquitetura, engenharia e ciência dos materiais cruzam-se à medida que o projeto explora o desempenho técnico e estético de uma infraestrutura têxtil, o espaço doméstico e urbano e um modelo de fornecimento de energia que envolve processos de produção em massa para criar instalações com significativas vantagens económicas relativamente à integração de dispositivos fotovoltaicos convencionalmente utilizados em edifícios.

Os protótipos para uma infra-estrutura de co-geração têxtil com reduzida pegada de carbono foram financiados pelo MITEI para reduzir o impacto ambiental e facilitar a re-ocupação de 25.000 casas geminadas (típicas Casa Burguesas) na cidade do Porto, em Portugal. Estimam-se alcançar poupanças energéticas diárias de mais de 60% com 15 metros quadrados de membranas, ou cerca de 10% da área convencional de cobertura. A adaptabilidade e repetibilidade do modelo SOFT CITIES pode ser estendida a densos centros urbanos em muitas áreas do mundo.

Projeto	Início do projeto:	Final do projeto:	Áreas científicas	Aspetos chave:
EASEE	2012	2016	Arquitetura, têxtil, física das construções-	Desenvolvimento de revestimento de parede super isolante (com base têxtil e aerogel) para a reabilitação energética, pelo interior, de edifícios residenciais

O projeto EASEE (2013) consiste numa solução de reabilitação inovadora que usa uma membrana (têxtil compósita) como suporte e revestimento de um material de isolamento térmico de elevado desempenho e com reduzida espessura (manta de aerogel) sobre o paramento interior de paredes exteriores. Esta solução também integra aquecimento ativo, iluminação e sistemas de transferência de dados, utilizando o conceito de "papel de parede multisensorial", que pode ser aplicado em edifícios classificados como património. Esta solução é reversível e devido à sua reduzida espessura permite maximizar o potencial de ocupação, ao mesmo tempo que incrementa o desempenho energético do edifício intervenção. O isolamento térmico/acústico convencionalmente aplicado no paramento interior de fachadas/ tetos, normalmente é instalado com argamassa adesiva. E por isso, elementos característicos dos edifícios património, incluindo estucados ou pinturas decorativas, são destruídos quando forem removidos. Com a solução EASEE, os elementos decorativos existentes também ficam ocultos, como nas soluções convencionais, contudo, dado a reversibilidade e a baixa intrusividade desta solução, estes não ficarão danificados (como acontece com as soluções de argamassa convencionais). No futuro, se existir uma solução melhor, a solução de membrana pode ser facilmente substituída. Projeto financiado pela União Europeia. Fonte: Masera *et al.* (2017).

Projeto	Início do projeto:	Final do projeto:	Áreas científicas	Aspetos chave:
MULTITEXCO	01-10-2013	30-09-2016	Têxtil e engenharia civil	Monitorização, prevenção de riscos, têxteis técnicos.

O objetivo deste projeto é promover a competitividade das médias e pequenas empresas europeias do setor têxtil e da construção civil, com soluções para os seguintes sub-setores: têxteis técnicos para reforço sísmico de paredes de alvenaria; estruturas têxteis multifuncionais para aplicações geotécnicas e têxteis de elevado desempenho para estruturas tensionadas. Para cada um dos sub-setores, foram desenvolvidas membranas com sensores incorporados. Estes sensores não fornecem apenas estabilidade estrutural, mas também oferecem informações privilegiadas sobre a integridade estrutural da construção, que funciona como um sistema de alerta. Exemplos das membranas desenvolvidas com sensores incorporados: (1) rede de reforço com sensor de propagação de fissuras, na reabilitação de paredes exteriores ou interiores, suscetíveis a deformações para fora do plano (o sensor desenvolvido é impresso no tecido Eq-Top®); (2) geotexteis para alerta de deslizamento de terra iminente em vias e aterros; (3) nova geração de membranas com sensores incorporados para estruturas tensionadas. A investigação desenvolvida neste projeto focou-se na monitorização de temperatura<sup>19</sup>, pressão e deteção química de gases nocivos. Projeto co-financiado pelo 7º Programa Quadro da União Europeia segundo a bolsa 606411. Fonte: MULTITEXCO (2015), CORDIS (2015) e Heyse *et al.* (2015).

Projeto	Início do projeto:	Final do projeto:	Áreas científicas	Aspetos chave:
CORTFEE	2014	2015	Têxtil e física das construções	Regulação térmica, isolamento térmico, mudança de fase, cortina.

Um exemplo nacional de funcionalização de membranas foi obtido através de uma parceria entre os centros de investigação CITEVE e CENTI e da empresa Têxteis Penedo no âmbito do projeto "CORTFEE". Deste projeto resultou o desenvolvimento de um produto -

cortinados funcionalizados e energeticamente eficientes para alcance de uma redução do consumo de energia entre 2 a 3% (TEXTEIS PENEDO, 2015). Esta membrana funcionalizada possui as seguintes características: controlo da inércia térmica (redução de carga térmica no Verão e aumento da retenção de calor no Inverno); redução das trocas de calor; reflexão significativa da radiação incidente; contribuição para a eficiência energética e conforto térmico; maleabilidade e leveza. Fonte: CITEVE (2015)

Projeto	Início do projeto:	Final do projeto:	Áreas científicas	Aspetos chave:
STOFFWECHSEL TexLining TexCoat	-	2014	Têxtil, arquitetura, construção civil, física das construções.	Reabilitação térmica de grandes paramentos interiores e exteriores de edifícios industriais.

Nos anos 60 e 70, muitos edifícios industriais foram construídos sem ou com insuficiente isolamento térmico. Como alternativa à destruição destes edifícios, procuram-se cada vez mais soluções de isolamento sustentáveis. O projeto "Stoffwechsel" aborda este problema desenvolvendo materiais de isolamento exclusivos: o subprojeto 'TexLining' foca-se no isolamento multicamada para grandes paredes interiores, enquanto o subprojeto 'TexCoat' desenvolveu isolamento para fachadas exteriores. Fonte: HSLU (2014)

Projeto	Início do projeto:	Final do projeto:	Áreas científicas	Aspetos chave:
ADJustMEMBRANE	2010	2014	Arquitetura, polímeros, têxtil, engenharia civil.	Reversibilidade, modularidade, estruturas tensionadas

O projeto ADJustMembrane consiste numa solução leve e inovadora de paredes divisórias que usa uma membrana (têxtil compósita) como suporte e revestimento com um núcleo em isolamento térmico com reduzida espessura. Com a vantagem de ser reversível, pode ser aplicada na reabilitação de edifícios. Resultado do projeto: Patente PT 106412 - "Sistema de divisórias em painéis adaptáveis e respetivo método de construção". Disponível a 07-01-2019 em: [http://servicosonline.inpi.pt/pesquisas/GetFasciculo?bole\\_ano=2013&bole\\_num=249&proc\\_moda=01&proc\\_num=106412](http://servicosonline.inpi.pt/pesquisas/GetFasciculo?bole_ano=2013&bole_num=249&proc_moda=01&proc_num=106412)

Projeto	Início do projeto:	Final do projeto:	Áreas científicas	Aspetos chave:
WALL INTEX	2001	2013	Têxtil e física das construções	Revestimento de paredes, reversibilidade, isolamento térmico, mudança de fase.

Resultado do projeto: estruturas multicamada patenteada para revestimento multifuncional de paredes interiores. Consórcio do projeto nacional (Portugal): CITEVE, CeNTI, Termolan – isolamentos acústicos, S.A. e Domingos de Sousa e Filhos. Fonte: CITEVE (2013)

Projeto	Início do projeto:	Final do projeto:	Áreas científicas	Aspetos chave:
MESG	02 - 2008	01 - 2012	Física construções	Isolamento térmico, sistemas de fachada, átrios, armazenamento térmico, iluminação, automação.

"Construções de Membrana para a Reabilitação Energética de Edifícios" (MESG) apresenta novos conceitos para obter significativas economias no consumo energético (térmico de iluminação) em edifícios antigos através do uso de membranas. As estratégias definidas também são extensíveis à otimização energética de novos edifícios. Projeto financiado no Quadro "Energy Optimized Building" (EnOB) pelo Ministério Federal Alemão da Economia e Energia. Fonte: ENOB (2015)

<sup>19</sup> A monitorização da temperatura em estruturas tensionadas é de particular interesse para as membranas revestidas a PVC. Os sensores de temperatura podem ser montados após a execução da estrutura. No entanto, os locais indicados são muitas vezes difíceis de alcançar e, além disso, a adição de cablagens compromete esteticamente este tipo de construções. Para superar esses problemas, são integrados micro sensores de temperatura em tecidos híbridos – tecido convencional combinado com cabos elétricos e revestido a PVC.

**FICHAS INDIVIDUAIS DE INTERVENÇÕES COM MEMBRANAS  
EM ELEMENTOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS**



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

## MM C.01

Conceito de intervenção:

Reversibilidade. Preservação do existente.



Título: **Arena de Nîmes**  
 Ano de construção existente: 27 a.C. (cerca de)  
 Ano de intervenção: 1988  
 Tipo/ função do edifício: Cultural  
 Especialidades: Arquitetura: Finn Geipel, Nicolas Micheli; Schlaich Bergermann  
 Engenharia civil: Stromeier Ingenieurbau, Konstanz



Localização: Nîmes, França; Europa  
 Latitude/ longitude: 43°51'N / 4°24'E  
 Altitude: 62 m  
 Temperatura média anual: 13,8 °C  
 Precipitação média anual: 731 mm  
 Contexto climático: Mediterrâneo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa



Tipo de intervenção: Alteração  
 Requisitos funcionais: Uso programático, proteção solar, iluminação natural e regulação térmica



Membrana (tipo): Dupla. Membrana de poliéster revestida a PVC. 1300g/m²  
 Área: 5000 m²



Tempo de execução: 3 semanas



Custo global (material + instalação): 1068 €/m² (estimativa)



Descrição: Construído no ano 27 a.c., o anfiteatro de Nîmes é um dos monumentos do Império Romano em França, que se encontra bem conservado. Nos tempos Romanos, a arena tinha capacidade para 24000 espectadores e um engenhoso sistema de circulação. Para promover a utilização deste monumento, como espaço cultural, ao longo de todo o ano, era necessário proceder à sua reabilitação para o dotar de condições adequadas à realização de eventos na estação de inverno. As soluções a adotar teriam de ser pouco intrusivas e reversíveis.

### Solução

As limitações funcionais e de conservação determinaram a conceção da cobertura. A cobertura não podia ser visível pelo lado exterior da arena, não se podiam fazer alterações na estrutura existente da arena e tinha de ser montável e desmontável em 3 semanas. Para além disso, era necessário encontrar uma solução que conferisse grande intensidade de luz e que permitisse a regulação da térmica do espaço interior (aquecimento/ arrefecimento).

A solução encontrada teve como referência os elementos de proteção solar originais da arena - lúbeis tensados (denominados de "velas") que conferiam sombra às bancadas. Com base nesse registo, foi projetada uma cobertura tétil (pneumática e amovível) feita em membrana de poliéster revestida a PVC - fixada a uma viga metálica suportada por 30 pilares com 10 m de altura. Entre a viga e o pavimento de uma das bancadas colocaram-se chapas de policarbonato inclinadas. O enchimento da cobertura demora 5 horas.

Atualmente, a arena possui uma nova configuração: 85 m de comprimento, 60 m de largura e capacidade para 7.000 lugares. Com esta solução, este monumento passou de um simples marco histórico a um espaço vivido, com as suas características originais e integridade histórica.

Fonte: TENSINET (2016). "Nîmes Arena", disponível em: <http://www.tensinet.com/database/viewProject/3764.html> [Acedido a 03 de Fevereiro de 2016]  
[http://www.architectemporaine.org/RMA/p-8-IgO-Couverture-des-Arenes-de-Nimes.htm?fiche\\_id=177](http://www.architectemporaine.org/RMA/p-8-IgO-Couverture-des-Arenes-de-Nimes.htm?fiche_id=177)



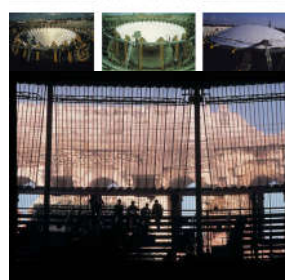
Figuras:



Antes (século I)



Depois (ano 1998)



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

## EE C.02

Conceito de intervenção:

Combinação de materiais modernos com tecnologias tradicionais.



Título: **Fuchun Kosa Zou Ma Lou**  
 Ano de construção existente: 1300  
 Ano de intervenção: 2014  
 Tipo/ função do edifício: Serviços/ Hotel  
 Especialidades: Arquitetura: Atelier Archmixing



Localização: Fuchunjiang, China; Ásia  
 Latitude/ longitude: 34°43'N / 116°35'E  
 Altitude: 6 m  
 Temperatura média anual: 16,5 °C  
 Precipitação média anual: 1455 mm  
 Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfa



Tipo de intervenção: Alteração/ ativação de uso  
 Requisitos funcionais: Acústica, iluminação natural, estagnidade, ventilação.



Membrana (tipo): Tensada, estrutura em bambu  
 Área: Simples membrana de PVC transparente 50 m²



Custo global (material + instalação): 50 €/m² (estimativa)



Descrição: "Zou ma lou" é uma construção vernacular - casa pátio típica de Huizhou (localidade chinesa) - localizada próximo do Delta do Rio Pearl. Pretendia-se tornar o edifício existente num espaço de receção com galeria inserido num conjunto turístico habitacional. O edifício existente possui dois pisos e a área interior coberta é reduzida. Por outro lado, o pátio existente é amplo e encontra-se rodeado por vigas de madeira esculpidas.

### Solução

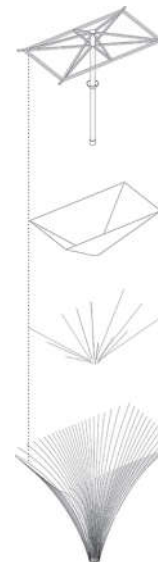
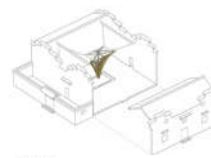
De modo a conseguir aumentar a área útil, e tirar partido estético da decoração existente nos elementos construtivos, optou-se por cobrir o pátio existente com uma estrutura tipo "guarda-chuva" em bambu para conferir proteção e permitir o uso deste espaço.

A estrutura de bambu criada é independente e foi coberta com uma membrana de PVC transparente que pode ser parcialmente aberta para promoção da ventilação do espaço e regulação térmica. Esta solução permitiu dar resposta aos requisitos funcionais - iluminação natural, ventilação, impermeabilização - para além de promover a recolha de águas pluviais para o posterior reaproveitamento.

Fontes: ARCHIMIXING (2016). "Fuchun Kosa Zou Ma Lou", disponível em: <http://www.archmixing.com/index.php/Works/shownews/id/363> [Acedido a 14 de janeiro de 2016].  
 DIVISARE (2016). "Fuchun Kosa Zou Ma Lou", disponível em: <http://divisare.com/projects/287945-atelier-archmixing-fuchun-kosa-zou-ma-lou> [Acedido a 14 de janeiro de 2016].  
 KOSA RESORTS (2016). "Fuchun Kosa Zou Ma Lou", disponível em: <http://www.kosaresorts.com/fuchun/keshe/> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]



Figuras:



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA



Solução de baixa intrusividade



Conceito de intervenção:



Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidades:

**Palácio de Igartza**  
1800 (cerca de)  
2009  
cultural  
Arquitetura: Zulueta; Instalador: BAT Spain



Localização:  
Latitude/ longitude:  
Altitude:  
Temperatura média anual:  
Precipitação média anual:  
Contexto climático:

Beasin, Guipuzcoa, Espanha; Europa  
43° 2' 50" N / 2° 12' 17" O  
160 m  
14°C  
1400 mm  
Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb



Tipo de intervenção:  
Requisitos funcionais:

Alteração, Ativação de uso com cobertura de pátio  
Impermeabilização, iluminação natural, regulação térmica e acústica



Membrana (tipo):  
Área:

Dupla membrana de ETFE, espessura 250 µ  
40 m²



Custo global  
(material + instalação)

450 €/m²



Descrição:

O edifício existente é uma pequena fortaleza construída no século XIII que se encontra num clima com precipitação abundante (50% do ano). Devido ao elevado nível de proteção deste património cultural, foi necessário cobrir o pátio central com uma solução de baixa intrusividade. O projeto de reabilitação existente contemplava uma solução pesada - com estrutura metálica de suporte para uma claraboia de vidro - que iria sobrecarregar a estrutura de madeira existente, provocar danos e reduzir as condições luminicas originais.

**Solução**

Como alternativa à proposta inicial, propôs-se uma solução de cobertura leve em membrana ETFE pneumática. Esta solução não afeta as condições luminicas originais nem a estrutura de madeira existente (pois as cargas permanentes são mínimas).

A cobertura de membrana foi desenhada com uma almofada pneumática, suportada apenas por uma nova estrutura coincidente com os limites perimetrais da abertura do pátio. De acordo com o regulamento local, foi considerada uma sobrecarga de neve de 0,3 KN/ m². As sobrecargas ao vento foram difíceis de estimar devido à forma da cobertura (diferente das coberturas normalizadas nos regulamentos) e à posição da cobertura em membrana, protegida pela cobertura existente. Realizou-se uma análise de Dinâmica dos fluidos para obter com mais precisão as cargas provenientes dos ventos, determinada para uma pressão interna de 300/ 500 Pa sem/com cargas externas. Foi ancorado à estrutura de madeira um coroamento de tubos de aço com secção quadrangular através de uma estrutura secundária de separadores de aço e um complexo sistema de perfis de alumínio extrudido e de EPDM para assegurar a correta instalação e estanquidade da cobertura em membrana.

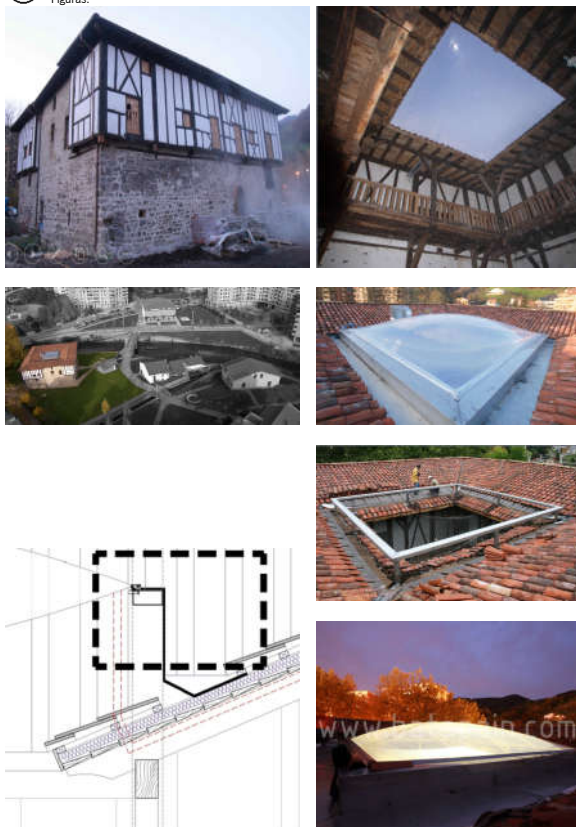
Este projeto constitui um exemplo de como a incorporação de novas funções, mesmo as de proteção cultural, nos pátios de edifícios antigos, podem ser conseguidas com membranas arquitetónicas, pois permitem a sua reabilitação (conversão) sem causar distúrbios visuais.

Fonte:

BAT SPAIN (2016). "Palacio Igartza", disponível em: <http://www.batspain.com/etfe.html> [Acedido a 08 de Fevereiro de 2016]  
TEJERA, J. MONJO, J. & LA TORRE, J. (2010). "Heritage preservation strategies through textiles". Tensinet Symposium 2010 Tensile Architecture. Sofia: Tensinet.



Figuras:



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA



Renovação e ampliação da área útil para utilização do espaço existente. Cobertura de patio leve e sem apoios intermédios



Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidades:

**Museu Chileno de arte Precolombina**  
1807  
2013  
Cultural/ museu  
Arquitetura: Smiljan Radic  
Engenharia civil: B y B Ingeniería Estructural



Localização:  
Latitude/ longitude:  
Altitude:  
Temperatura média anual:  
Precipitação média anual:  
Contexto climático:

Santiago, Chile; América.  
33° 25' S / 70° 33' O  
520 m  
14,6 °C  
359 mm  
Mediterraneo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Csb



Tipo de intervenção:  
Requisitos funcionais:

Alteração  
Aumento da área útil; Ganhos luminicos e regulação térmica e acústica



Membrana (tipo):  
Área:

Dupla membrana de ETFE, espessura 200 µ  
211 m²



Fabricante:  
Custo global  
(material + instalação):

s/ dados  
Aprox. 450 €/m² (estimativa)



Descrição

Existente:

O edifício existente, construído em 1807, organiza-se em volta de pátios e necessitava de ser renovado e sofrer uma ampliação para aumentar a área de exposição e acolhimento de um maior número de visitantes.

**Solução**

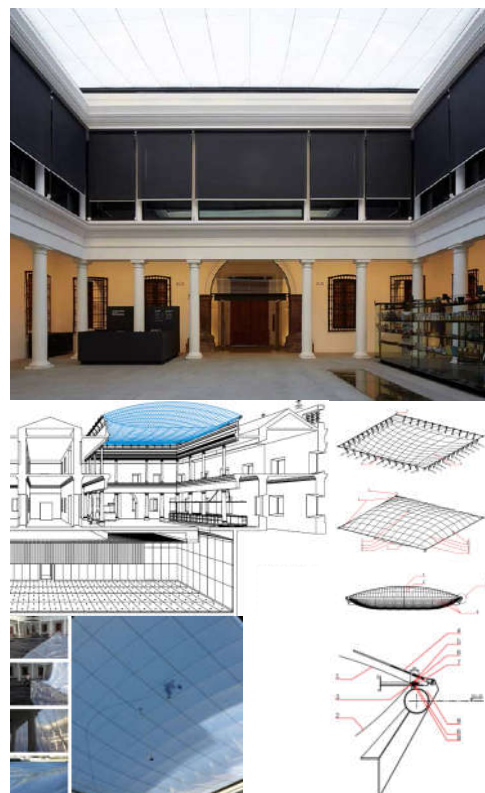
A intervenção passou pelo aumento de 1000 m² de área de construção nova (subterrânea) e extensão de área útil através da cobertura de um dos pátios (para apoio ao espaço de cafeteria e de vendas). Esta cobertura em Membrana de ETFE é translúcida, leve, autoportante e cobre um vão de 14 metros sem apoios intermédios. Esta foi fixada a uma estrutura em aço sobre o nível superior da cornija existente no perímetro do pátio.

Fonte:

RADIC, S; (2014). Cubierta para el Museo Chileno de Arte Precolombino, Santiago, Chile. ARQ.(87), pp. 72-76. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37532094011> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]



Figuras:





**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Reversibilidade e modularidade

**C.05**

Conceito de intervenção:

Título: **Palácio das artes de Mons**  
 Ano de construção existente: 1824  
 Ano de intervenção: 2014  
 Tipo/ função do edifício: Cultural  
 Especialidades: Arquitetura: AgwA, Ney & Partners  
 Engenharia civil: AgwA + Ney & Partners

Localização: Mons, Bélgica; Europa  
 Latitude/ longitude: 50°27'N / 03°58'E  
 Altitude: 59 m  
 Temperatura média anual: 10,2 °C  
 Precipitação média anual: 781 mm  
 Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Alteração  
 Requisitos funcionais: Acústica; Proteção contra variações climáticas  
 Tensada e foldável.

Membrana (tipo): Simples membrana de poliéster revestida a PVC.  
 Área: 1750m²  
 Fabricante: Serge Ferrari  
 Custo global (material + instalação): Aprox. 86 €/m² (estimativa)

Descrição:

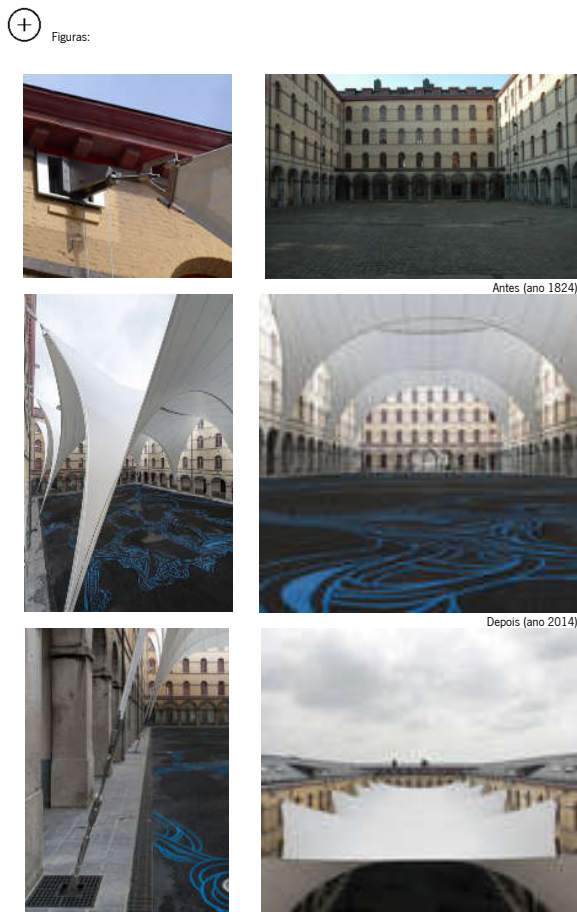
Desde 1995 que o uso do edifício se destina ao ensino artístico que acolhe muitos eventos culturais. Para tal, era necessário criar uma cobertura no espaço central exterior existente que permitisse albergar 1200 pessoas e uma variedade de usos, independentemente das condições climáticas.

**Solução**

A cobertura criada para o espaço exterior central (área aprox. 60 m x 25 m) consiste em cinco abobadadas modulares e independentes em membrana. A geometria criada pelas arcadas de membrana promove um bom desempenho acústico do espaço exterior e a translucidez da membrana utilizada permite obter a máxima luminosidade no espaço exterior coberto sem comprometer os ganhos de luz natural dentro o edifício existente. A cobertura em membrana fixa-se na parte inferior (junto ao solo) através de pequenas fundações de betão assentes em micro estacas, e transfere as suas forças internas para a parte superior (que coincide com o nível da laje de abaixo da cobertura do edifício existente) através de uma treliça metálica.

A cobertura em membrana pode ser removida parcialmente ou na totalidade (adaptando-se às necessidades de cada evento) mantendo o edifício existente intacto. Foi desenhada uma estrutura especial que permitisse operar a cobertura, de forma fácil e rápida (sem mecanismos de elevação), desde o solo. Todos os reforços estruturais estão integrados na espessura da estrutura de betão existente.

Fonte:  
 NEY (2016). "Carré des Arts", Disponível em: [http://www.ney.be/en/projects\\_details/391.html](http://www.ney.be/en/projects_details/391.html) [Acedido a 14 de janeiro de 2016]  
 ARCHDAILY (2016). "Carré des Arts", Disponível em: <http://www.archdaily.com/555329/covering-of-the-courtyard-of-the-carre-des-arts-in-mons-agwa-ney-and-partners> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Melhoria da Impermeabilização, transmissão de luz e proteção contra ações de impacto, redução da transmissão de sobrecargas de neve para a estrutura existente.

**C.06**

Conceito de intervenção:

Título: **Camellia House**  
 Ano de construção existente: 1827  
 Ano de intervenção: 2006  
 Tipo/ função do edifício: Jardim de inverno  
 Arquitetura: Purcell Miller Tritton; Construtor: Dorothea Restorations; Engenharia: Morton Partnership

Localização: Nottingham, Londres, Inglaterra  
 Latitude/ longitude: 52°58'N e 01°10' O  
 Altitude: 61 m  
 Temperatura média anual: 9,8 °C  
 Precipitação média anual: 648 mm  
 Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Alteração  
 Requisitos funcionais: Melhoria da Impermeabilização, transmissão de luz e proteção contra ações de impacto, redução da transmissão de sobrecargas de neve para a estrutura existente.

Membrana: Sistema de ancoragem metálico em alumínio  
 Membrana simples de ETFE: 95% de transmissão de luz  
 Área: 220 m²  
 Peso: ETFE: 0.30 kg/m²  
 ETFE + sistema de ancoragem em alumínio: 1.2 kg/m²

Fabricante/ instalador: Architen Landrell  
 Tempo de instalação: 1 semana  
 900 €/ m²

Custo global (material + instalação): (fonte: Architen Landrell gentilmente cedido por Amy Wilson)  
 Inclui estrutura metálica

Descrição:

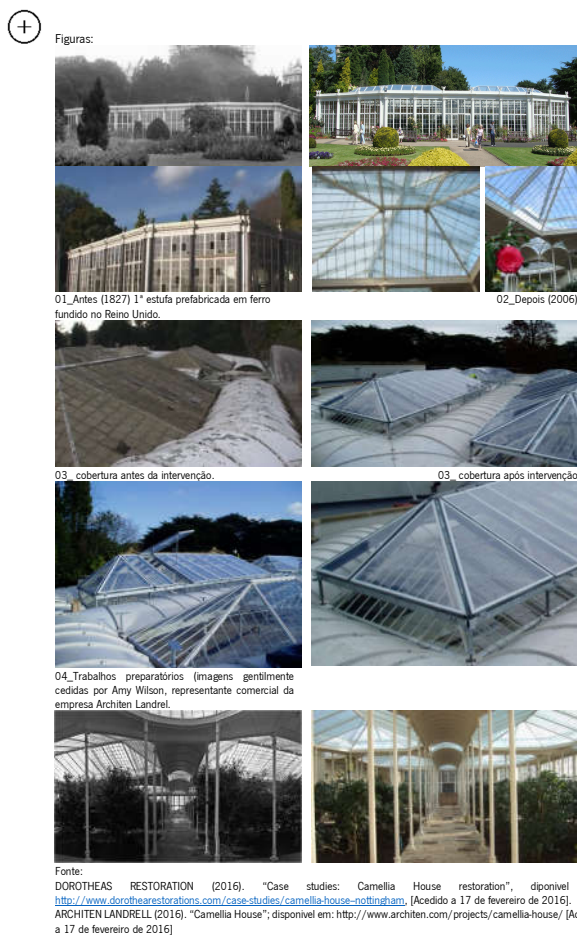
Localizado no Parque Wollaton Hall (distinguido como sítio histórico da cidade de Nottingham) este edifício é considerado uma das construções em ferro fundido mais antigas do Reino Unido (ARCHITEN LANDRELL, 2016). Devido aos vários problemas estruturais e às ações de vandalismo era necessário encontrar uma medida de proteção que mantivesse o desempenho funcional do edifício. Este projeto de reabilitação foi financiado pelo Fundo Europeu para o Desenvolvimento Regional.

**Solução**

Para proteger a estrutura de futuros atos de vandalismo e de sobrecargas decorrentes das variações climáticas, foi desenhada uma segunda cobertura em membrana ETFE que encaixa sobre a cobertura existente em vidro. A membrana ETFE é suficientemente resistente para suportar cargas de neve e não é frágil, tornando-a mais segura do que o vidro. De modo a assegurar que o edifício possa manter a sua função, a membrana translúcida de ETFE assegura a transmissão de luz necessária; reduzida sobrecarga para estrutura existente existente; a incorporação de painéis com abertura para permitir a manutenção da cobertura.

A geometria da cobertura é complexa e foi difícil de modelar. Por isso foi necessário executar alguns protótipos para ultrapassar algumas dificuldades.

Uma das falhas do projeto pre-existente consiste na reduzida pendente da cobertura de vidro que não resistiu a sobrecargas de neve e vento. Uma inspeção ao edifício revelou que a estrutura em ferro se encontrava debilitada para suportar uma variedade de sobrecargas como a neve ou vento.



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA



Conceito de intervenção:

Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidades:



Localização:  
Latitude/ longitude:  
Altitude:  
Temperatura média anual:  
Precipitação média anual:  
Contexto climático:



Tipo de intervenção:  
Requisitos funcionais:



Membrana (tipo):  
Área:  
Fabricante:



Custo global (material + instalação):



Descrição:

A estação de caminhos-de-ferro de Salzburg, construída em 1860, necessitava de ser reabilitada segundo as novas exigências de tráfego e de segurança. A reabilitação da cobertura existente (com estrutura metálica e revestimento em chapas metálicas onduladas) foi intervencionada – com reforço longitudinal do sistema estrutural da cobertura devido ao facto de existir um aumento significativo de sobrecargas provocadas pelo vento e neve. O registo deste aumento foi feito através da análise de observações meteorológicas ocorridas nos últimos anos.

### Solução

Para reabilitar a cobertura existente optou-se por manter a estrutura metálica existente e substituir o revestimento em chapas metálicas onduladas por uma cobertura em membrana com subestrutura metálica. Com esta solução, as cargas externas - neve e vento – apenas seriam transferidas para a estrutura existente através de determinados pontos. A membrana em PTFE foi escolhida pela sua durabilidade, resistência ao fogo, resistência à água, resistência mecânica, translucidez e leveza.

A cobertura em membrana é composta por 24 painéis individuais dispostos longitudinalmente (da cumieira para o beiral), e transversalmente ocupam o espaço entre caibros. No beiral, existe um sistema de coleta de neve fixo à membrana.

Com esta solução foi possível preservar a aparência dos elementos arquitetónicos centenários.

Fonte:  
TENSINET (2016). “Salzburg Train station”, disponível em:  
<http://www.tensinet.com/database/viewProject/4536.html> [Acedido a 03 de Fevereiro de 2016]



Manter os elementos estruturais originais

**Estação de comboios de Salzburg**  
1860  
2012  
Serviços / Transportes  
Arquitetura: kadawittfeldarchitektur  
Engenharia: Tichelmann & Barillas Ingenieure

Salzburg, Áustria; Europa  
47°48'N / 13°2'E  
450 m  
8,9 °C  
1191 mm  
Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb

Renovação  
Diminuição de sobrecargas, proteção contra as ações climáticas, Impermeabilização e Resistência ao fogo Tensionada.

Simplex membrana PTFE, TENARA® fabric 4T40HF  
1700 m²  
SEFAR

220 €/m² (estimativa)



Figuras:



Antes (construído em 1860)



Depois (ano 2012)



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA



Conceito de intervenção:

Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidades:



Localização:  
Latitude/ longitude:  
Altitude:  
Temperatura média anual:  
Precipitação média anual:  
Contexto climático:



Tipo de intervenção:  
Requisitos funcionais:



Membrana (tipo):  
Área:



Tempo de execução:  
Custo global (material + instalação):



Descrição:

A estação de comboios “Sakuragicho”, construída pela Companhia Ferroviária Japonesa em 1872, denominava-se por “Yokohama”. O edifício existente possuía 2 pisos, com cobertura, lajes e pavimentos em madeira, assentes sobre pilares de alvenaria de tijolo e necessitava de ser renovado para dar resposta a novas necessidades.

### Solução

Os arquitetos das estações japonesas de comboios escolhiam materiais de construção com pior qualidade para a execução de plataformas do que para a execução de outras instalações. Estas plataformas eram correntemente cobertas com chapas onduladas de fibrocimento ou metal.

As plataformas tradicionais eram pesadas e não permitiam a entrada de luz natural. De modo a superar estes defeitos, foi escolhido um revestimento em membrana de fibra de vidro revestida a PTFE. A membrana escolhida possui translucidez e uma suave difusão de luz adequadas para iluminar naturalmente este espaço público. Deste modo, o consumo de luz artificial foi reduzido durante o dia.

Na altura, no Japão, não existiam registos de construções de estações de comboio com este material. Por isso, foram verificados aspetos relacionados com a durabilidade, resistência a objetos aéreos e à sujidade. Da pesquisa efetuada na época, foram encontrados registos de durabilidade de construções em membrana nos Estados Unidos da América com 15 anos. O problema relacionado com a acumulação de sujidade foi resolvido através da limpeza e pulverização periódica de água. Sobre a cobertura.

Fonte:  
ISHII, K. (1995). “Membrane structures in Japan”, SPS publishing company, Tóquio, Japão.



Manter os elementos estruturais originais

**Estação de comboios Sakuragicho**  
1872  
1990  
Serviços / transportes  
Arquitetura: Koken Arcitects  
Engenharia civil: JR Higashi – Nippon

Nakaku, Yokohama, Japão; Ásia  
35°27'3"N / 139°37'51"E  
84 m  
15,6 °C  
1554 mm  
Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfa

Renovação  
Iluminação natural  
proteção contra a humidade e condições climáticas Tensada sobre estrutura metálica

Simplex membrana de fibra de vidro revestida a PTFE  
3573 m²

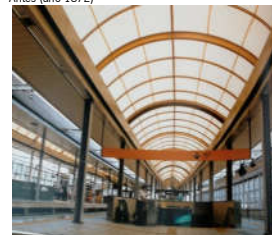
16 semanas  
300 €/m² (estimativa)



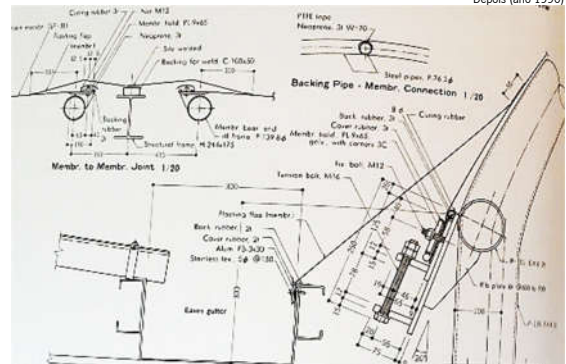
Figuras:



Antes (ano 1872)



Depois (ano 1990)



A mão-de-obra no local foi reduzida através da soldagem, em fábrica, de faixas em membrana à cobertura (no sentido longitudinal, para encaminhar as águas pluviais até à calha de drenagem das mesmas).



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

## C.09

Ativação de uso, flexibilidade e reversibilidade.



Figuras



Conceito de intervenção:

**Título:** Câmara Municipal de Viena  
**Ano de construção existente:** 1884  
**Ano de intervenção:** 2000  
**Tipo/ função do edifício:** Cultural/ Escola  
**Especialidades:** Arquitetura: Tilner & Willinger Zt GmbH  
Enenharia: Schlaich Bergemann & Partner Vasko + Partner



**Localização:** Viena, Austria; Europa.  
**Latitude/ longitude:** 48° 15' N / 16° 22' E  
**Altitude:** 200 m  
**Temperatura média anual:** 9,9 °C  
**Precipitação média anual:** 623 mm.  
**Contexto climático:** Continental Húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb



**Tipo de intervenção:** Alteração  
**Requisitos funcionais:** Acustica, Proteção contra as condições climáticas.



**Membrana (tipo):** Membrana de poliéster revestida a PVC. Transmissão de luz de 15%.  
**Área:** 1000 m<sup>2</sup>  
**Fabricante:** ISOVER



**Custo global (material + instalação):** 220 €/m<sup>2</sup> (estimativa)



**Descrição:**

Os critérios adotados no projeto da cobertura foram: considerações históricas (edifício construído entre 1872-1884); criação de uma estrutura simples, sem apoios verticais intermédios; económica; manter a leitura espacial e estética das arcadas.

### Solução

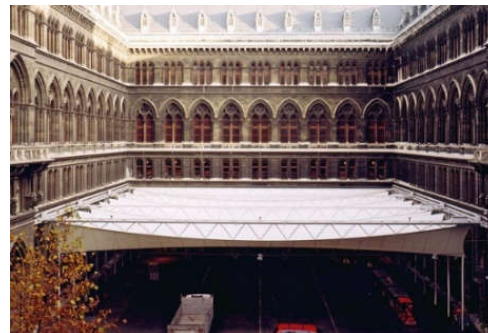
Para conferir, quando necessário, proteção contra as ações climáticas e permitir a realização de eventos culturais foi desenhada e executada uma cobertura retrátil em membrana de poliéster revestida a PVC para cobrir o pátio existente no edifício da Camara Municipal de Viena. Esta membrana é auto lavável e permite a transmissão de 15% de luz natural.

As treliças adoladas possuem duas vias alternativas para distribuição das forças de tensão (sistema tipo "Bypass") de modo a minimizar concentração de forças nas extremidades. As treliças apoiam-se e deslocam-se entre duas vigas/ calhas laterais (colocadas sobre o friso horizontal existente). Esta solução inovadora permitiu reduzir o impacto da cobertura sobre o edifício existente.

A abertura e fecho desta cobertura ao longo da calha demora 5 minutos. As dobras da cobertura em membrana permitem uma vista desimpedida da fachada das arcadas. Esta forma da cobertura é conseguida pela ligação às treliças com cabos de aço. Para além disso, a superfície ondulada da cobertura contribui para uma distribuição otimizada do som em eventos musicais.

A drenagem das águas pluviais é feita ao longo das pendentes criadas pelo fole entre treliças. As águas pluviais descem pelos pontos mais baixos da cobertura através de mangueiras (com 10 cm de diâmetro) e entram no sistema de recolha de águas existente no pavimento.

Fonte: TW ARCH (2016), "Überdachung Rathaus", disponível em: <http://www.twarch.at/index.php?id=61> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

## C.10

Conceito de intervenção:

**Título:** Kapuzinerarrée  
**Ano de construção existente:** 1889  
**Ano de intervenção:** 2003  
**Tipo/ função do edifício:** Serviços  
**Especialidades:** Arquitetura: ingenhoven architects



**Localização:** Aachen, Alemanha; Europa  
**Latitude/ longitude:** 50°45'N / 6°06'E  
**Altitude:** 176 m  
**Temperatura média anual:** 9,8 °C  
**Precipitação média anual:** 854 mm  
**Contexto climático:** Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb



**Tipo de intervenção:** Conversão e ampliação  
**Requisitos funcionais:** Resistência ao fogo, regulação térmica e iluminação natural



**Membrana (tipo):** Simples membrana de ETFE  
**Área:** 500 m<sup>2</sup>  
**Fabricante:** Vector Foiltec



**Custo global (material + instalação):** 450 €/m<sup>2</sup> (estimativa)



**Descrição:**

O edifício existente, estação de correios de Aachen entre 1889 a 1925, foi convertido num espaço comercial. Para a conversão funcional do edifício, era necessário cobrir o pátio existente de modo a que este possa ser utilizado durante todo o ano.

### Solução

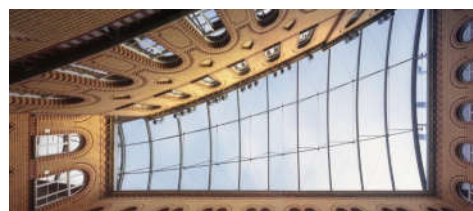
Para permitir que o pátio existente pudesse ser utilizado, era necessário encontrar uma solução de cobertura leve, com máxima transmissão de luz natural, boas características térmicas e resistente ao fogo.

O esquema estrutural desta cobertura consiste numa série de cabos ligados a tubos em forma de arco, através de sensores. Esta solução foi utilizada para reduzir o peso global da estrutura – diminuindo a rigidez necessária para o sistema de apoio.

Fonte: KKK ING (2016), "Kapuzinerarrée", disponível em: <http://www.kkk-ing.de/referenzen/schauspielhaeuser-kinos-messen/kapuziner-karree-aachen/index.html> [Acedido a 07 de Fevereiro de 2016]  
VECTOR FOILTEC (2016), "Kapuzinerarrée", disponível em: <http://www.vector-foiltec.com/projects/kapuzinerarree/> [Acedido a 07 de Fevereiro de 2016]



Figuras



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

## C.11

Conceito de intervenção:

Reabilitação da cobertura sem interromper os serviços de transporte  
Manter a estrutura existente, alterando e reforçando o necessário e maximizar os ganhos luminicos.



Título: **Estação de comboios de Dresden**  
Ano de construção existente: 1898  
Ano de intervenção: 2006  
Tipo/ função do edifício: Serviços/ transportes  
Especialidades: Arquitetura: Norman Foster + Partners; Engenharia: Buro Appold



Localização: Dresden, Alemanha; Europa  
Latitude/ longitude: 51° 3' 0" N / 13° 44' 0" E  
Altitude: 117 m  
Temperatura média anual: 9.0 °C  
Precipitação média anual: 592 mm  
Contexto climático: Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb.



Tipo de intervenção: Reconstrução  
Requisitos funcionais: Impermeabilização, melhoria condições luminicas e acusticas  
Patologia: Cobertura degradada, fraco desempenho luminoso e acustico



Membrana (tipo): Tensada. Simples membrana de fibra de vidro revestida a PTFE  
Transmite 13% da luz natural  
Área: 32 000 m²  
Fabricante: Verseidag-Indutex GmbH



Custo global (material + instalação): 265 €/m²



Descrição:

A estação de comboios de Dresden foi construída em 1898 e ficou danificada durante a 2ª Guerra Mundial. Posteriormente, devido à pobre manutenção durante o período pós-guerra, este edifício foi-se deteriorando cada vez mais e a cobertura existente (parcialmente envidraçada) foi sendo substituída por uma cobertura de madeira, que reduzia a entrada de luz natural.

**Solução**

Para restaurar a integridade do desenho existente do edifício foram removidas as várias adições e alterações, feitas no edifício durante os 60 anos anteriores. Executou-se uma nova cobertura (em membrana de fibra de vidro revestida a PTFE) suportada pela estrutura existente em arcos de ferro forjado (do século XIX) com o mínimo de reforços. Os elementos estruturais existentes mantiveram-se e só foram substituídos os componentes danificados. A cobertura em membrana transmite 13% de luz natural, reduzindo assim a necessidade de consumo de iluminação artificial.

A cobertura é composta por faixas individuais de membrana, instaladas entre os arcos treliçados. Cada faixa individual de membrana possui uma largura média de 10 metros (variando entre 5 a 14 metros). A cobertura em membrana foi conectada a uma sub estrutura de tubos metálicos, na direção longitudinal e transversal aos arcos existentes. Para evitar sobrecarregar a estrutura existente, em caso de colapso de uma faixa de membrana, formou-se uma rede de cabos que une cada arco treliçado para formar um conjunto estável. Os componentes para a fixação de membranas foram selecionados tendo em consideração uma aplicação simples e custo reduzido. Por sua vez, os componentes selecionados não permitem o re-tensionamento ou ajuste in situ, pelo que a faixa de membrana teve de ser cortada com precisão. Em projeto, este aspeto foi respeitado considerando as tensões superficiais e o comportamento da membrana sob reduzido pré-tensionamento.

Pensando no futuro, a cobertura em membrana pode ser ampliada para cobrir as linhas destinadas a comboios de alta velocidade (que necessitam do dobro do comprimento das plataformas existentes).



Figuras:



Antes (ano 1905)



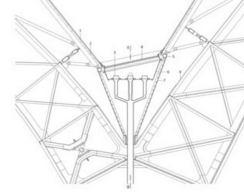
Antes (ano 1905)



Vista interior



Depois (ano 2006)



Pormenor de recolha de águas pluviais.



Pormenor de ligação entecadeira e estrutura existente.



Fase de construção com membrana de 10 m de largura



Fase de construção: ligação da nova treliça secundária com o arco de suporte existente.



Fonte:

FOSTER + PARTNERS (2016). "Desden Train Station Redevelopment", disponível em: <http://www.fosterandpartners.com/projects/dresden-station-redevelopment/>. [Acedido a 14 de Janeiro de 2016]

## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

## C.12

Conceito de intervenção:

Título: **Imagination Headquarters**  
Ano de construção existente: 1900 (estimativa)  
Ano de intervenção: 1990  
Tipo/ função do edifício: Escritórios  
Especialidades: Arquitetura: Ron Herron; Engenharia civil: Buro Happold  
Instalador: Architen Landrell



Localização: Londres, Inglaterra; Europa  
Latitude/ longitude: 51° 30' N / 0° 7' O  
Altitude: 25 m  
Temperatura média anual: 11.1 °C  
Precipitação média anual: 621 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb.



Tipo de intervenção: Alteração  
Requisitos funcionais: Proteção solar, iluminação natural e regulação térmica



Membrana (tipo): Membrana fibra de vidro revestida a PTFE  
Área: 590 m²



Custo global (material + instalação): Aprox. 220 €/m² (estimativa)



Descrição:

Uniram-se dois edifícios existentes através de uma cobertura em membrana e pontes para transformar dois edifícios num só - a sede da empresa multi-media "Imagination". Esta intervenção foi projetada pelo arquiteto Ron Herron, um dos líderes do movimento da cultura pop dos anos 60 conhecido por Archigram.

O engenheiro Buro Happold desenvolveu uma solução estrutural intrincada para unificar as alturas, formas e alinhamentos irregulares, dos dois edifícios existentes em alvenaria de tijolo maciço. A cobertura de membrana cobre o pátio entre os edifícios existentes e forma um espaço de galeria iluminada através da passagem de luz natural pela membrana.

A membrana foi tensada em duas direcções para alcançar estabilidade e foi executada uma estrutura de hastes tensionadas entre a membrana e uma armadura tipo "guarda-chuva".

Fonte: ARCHITEN (2016). "Imagination headquarters"; disponível em: <http://www.architen.com/projects/imagination-headquarters/>. [Acedido em 15 Março 2016].  
PENTAXFORUM (2016); imagem de Imagination London; Disponível em: <http://www.pentaxforums.com/gallery/photo-imagination-london-uk-2-1973/>. [Acedido em 15 Março 2016].



Figuras:



04\_ Vista interior do hall com cobertura em membrana.



01\_ Secção transversal.



02\_ Fachada principal e original do edifício.



03\_ Vista exterior da cobertura entre edifícios.



05\_ Vista das ligações entre os dois edifícios.



06\_ Vista exterior da cobertura em membrana durante a noite.



07\_ Vista exterior da cobertura em membrana durante o dia (ano 2016).



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

Conceito de intervenção:



Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidades:



Localização: Valencia, Espanha; Europa  
Latitude/ longitude: 39°29'N / 0°28'E  
Altitude: 62 m  
Temperatura média anual: 17 °C  
Precipitação média anual: 454 mm  
Contexto climático: Mediterrânico. Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa



Tipo de intervenção: Conversão de uso, cobertura de pátio  
Requisitos funcionais: Impermeabilização e proteção solar  
Tensada. Simples.



Membrana (tipo): Membrana poliéster revestida a PVC e sobre-revestida a PVDF  
Área: 650 m<sup>2</sup>  
Fabricante: Serge Ferrari



Custo global (material + instalação): 220 €/m<sup>2</sup>



Descrição:  
O edifício existente, uma casa de campo mediterrânica, necessitava de ser convertido em hotel. Para tal, o pátio existente necessitava de ser coberto para acolher a realização de eventos em qualquer altura do ano.

### Solução

Foi projetada uma solução de cobertura em membrana de poliéster revestida a PVC e sobre-revestida a PVDF. Esta solução constitui um exemplo de como a incorporação de coberturas com membranas arquitetónicas em pátios de edifícios existentes podem contribuir para a acomodação de novos usos. Permitindo que ao mesmo tempo, a sua reabilitação e manutenção possa realizar-se sem causar distúrbios com impacto visual. A cobertura em membrana protege o edifício contra o aquecimento no verão pela promoção da ventilação natural. A geometria da cobertura foi projetada com oito pontos de ancoragem, sobrepostos à cobertura existente, e quatro mastros em forma de "V" ancorados às fundações existentes no pavimento do pátio. Estes mastros foram desenhados com alturas diferentes, permitindo a criação de uma geometria anticlasticasica, para permitir a drenagem de águas pluviais e bem como a estabilidade face às ações do vento.

Para prevenir que se acumulassem águas pluviais nos cantos inferiores da cobertura em membrana foi incorporado um novo sistema de drenagem de águas conectado entre a membrana e os tubos de queda existentes. Para desenhar e procurar a forma da cobertura foi utilizada a ferramenta informática Mpanel

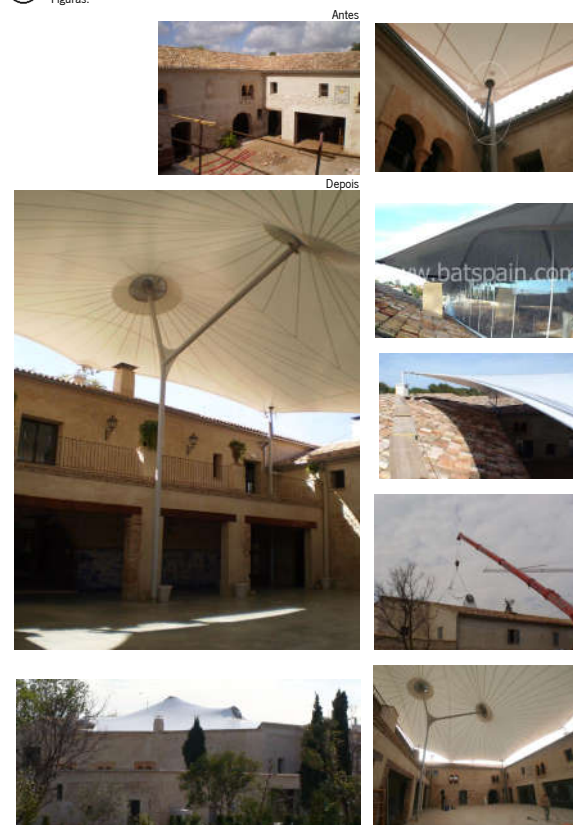
Fonte:  
ESPAZIO (2016). "New uses for old buildings" disponível em: <http://www.editorialespazio.com/proyectos/detalle/61> [Acedido a 08 de Fevereiro de 2016]  
BAT SPAIN (2016). "Masía Villa Celliana", disponível em: [http://www.batspain.com/arquitectura\\_textil.html](http://www.batspain.com/arquitectura_textil.html) [Acedido a 08 de Fevereiro de 2016]  
TEJERA, J. MONJO, J. & LA TORRE, J. (2010). "Heritage preservation strategies through textiles". Tensinet Symposium 2010 Tensile Architecture. Sofia: Tensinet.

## C.13

Solução de baixa intrusividade



Figuras:



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

Conceito de intervenção:



Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:



Localização: Jeju island, Coreia do Sul; Ásia  
Latitude/ longitude: 33°29'N / 126°34'E  
Altitude: 8 m  
Temperatura média anual: 15,2 °C  
Precipitação média anual: 1356 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfa



Tipo de intervenção: Restauro  
Requisitos funcionais: Proteção contra os efeitos do vento



Membrana (tipo): Rede de sisal e rede de polietileno  
Área: 50 m<sup>2</sup>



Custo global (material + instalação): 50 €/ m<sup>2</sup> (estimativa)



Descrição:  
O edifício existente é uma casa tradicional da ilha de Juju na Coreia do Sul. A cobertura tradicional destas casa é feita em colmo e tem a particularidade de ser coberta e pressionada com cordas de sisal cruzadas para formar uma rede e presas a canas de bambu (fixadas ao perímetro do edifício) para proteção contra as ações do vento. Tipicamente, estas coberturas possuem pendentes reduzidas para minimizar as ações dos ventos (predominantes nesta zona).

### Solução

Para melhorar a estanquidade deste tipo de cobertura aplicou-se um forro em rede de polietileno com malha muito apertada (para permitir a ventilação da mesma (e evitar condensações ou desenvolvimento de fungos). Atualmente utilizam-se lonas ou redes de pesca em polietileno para cobrir as coberturas existentes deste tipo de construções e nesta ilha em particular.

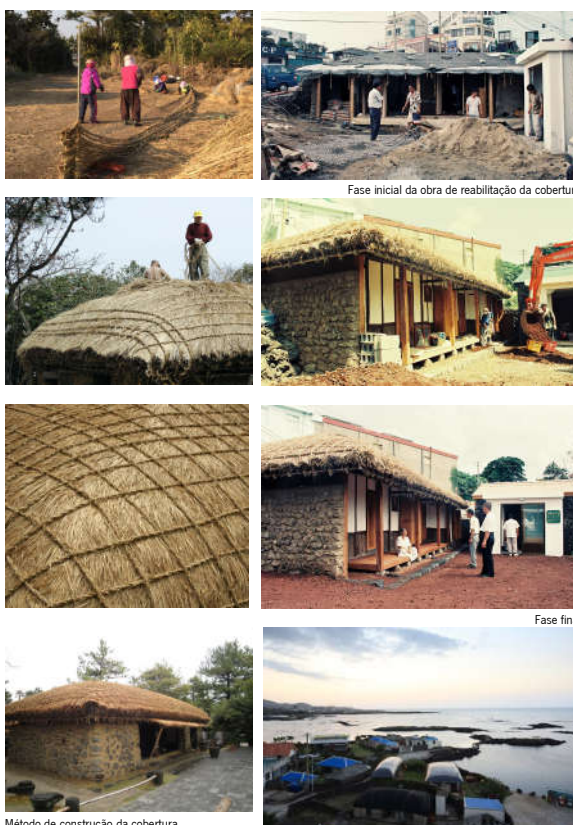
Fonte:  
HEAD LINE JEJU (2016). Disponível em: <http://www.headlinejeju.co.kr/news/articleView.html?idxno=233916> [Acedido a 13 de Fevereiro de 2016]  
DAUM (2016). Disponível em: [http://blog.daum.net/\\_blog/ BlogTypeView.do?blogId=09E0S&articleNo=15969490](http://blog.daum.net/_blog/ BlogTypeView.do?blogId=09E0S&articleNo=15969490) [Acedido a 13 de Fevereiro de 2016]

## C.14

Solução de baixa intrusividade



Figuras:



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

### C.15



Figuras:



Conceito de intervenção:

#### Centro William Rappard, Edifício da Organização Mundial do Comércio

Título: 1926  
Ano de construção existente: 2012  
Ano de intervenção: 2012  
Tipo/ função do edifício: Serviços  
Especialidades: Arquitetura: Wittfoh



Localização: Genebra, Suíça; Europa  
Latitude/ longitude: 46° 12' N / 06° 09' E  
Altitude: 400 m  
Temperatura média anual: 10,3 °C  
Precipitação média anual: 934 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb



Tipo de intervenção: Renovação e ampliação  
Requisitos funcionais: Regulação térmica, ganhos luminicos e impermeabilização



Estrutura: Estrutura metálica e pneumática  
Membrana: Tripla membrana de ETFE  
Área: 525 m²  
Fabricante: Dayenon, Texlon



Custo global (material + instalação): 450 €/m² (estimativa)



Descrição:

Existente:

O edifício William Rappard foi construído nos anos 20. A Organização Mundial do Comércio (OMC) sediou-se neste centro em 1995 e em 2008, a OMC, em conjunto com as autoridades Suíças, decidiram renovar e ampliar o edifício existente.

#### Solução

Como em todos os projetos das Nações Unidas, este projeto obedeceu a rigorosos requisitos de eficiência energética. Uma das soluções para melhorar o desempenho energético do edifício existente, passou pela criação de uma cobertura para um pátio exterior. A solução de cobertura selecionada é composta estrutura pneumática com membrana transparente e tripla de ETFE.

A cobertura em membrana é formada por 104 almofadas pneumáticas, das quais 22 possuem um mecanismo de abertura para promover a ventilação natural. Devido à estrutura composta por perfis metálicos especiais foi possível dimensionar 26 tipos de almofadas com cerca de 3m x 3,5m. Estes perfis permitiram que os instaladores fizessem re-tensionamento, ajustes e corte das membranas in situ. Esta solução construtiva, em membrana, pesa menos 95% do que uma solução construtiva em vidro.

A membrana ETFE, da família dos fluoropolímeros, possui elevada resistência química e uma classe de resistência o fogo B1 (de acordo com a norma DIN 4102). A força de tensão pode alcançar acima de 50N/mm² e a rutura ao alongamento pode ser superior a 300%. As almofadas pneumáticas foram dimensionadas de acordo com as sobrecargas para a ação do vento e queda de neve expectáveis em Genebra, 100 kg/m².

Fonte:

TENSINET (2016). "Tensinews", n° 25, disponível em: [http://www.tensinet.com/files/Tensinet\\_Publications/Tensinews\\_25\\_1-24\\_-1.pdf](http://www.tensinet.com/files/Tensinet_Publications/Tensinews_25_1-24_-1.pdf) [Acedido a 14 de janeiro de 2016]



Antes (ano 1926)



Depois (ano 2012)



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

### C.16



Figuras:



Conceito de intervenção:

#### Atrio do salão de exposições do Reno

Título: 1928  
Ano de construção existente: 2008  
Ano de intervenção: 2008  
Tipo/ função do edifício: Escritórios  
Especialidades: Arquitetura: Hentrich-Petschnigg & Partner  
Engenharia civil: sbp  
Instalação: Ceno Tec GmbH



Localização: Colónia, Alemanha; Europa  
Latitude/ longitude: 50° 56' 35.00" N / 6° 58' 16.00" E  
Altitude: 58 m  
Temperatura média anual: 10,1 °C  
Precipitação média anual: 774 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb



Tipo de intervenção: Conversão + ampliação  
Requisitos funcionais: Acústicos e térmicos, Resistência ao fogo  
Pneumática com estrutura de cabos



Membrana (tipo): Quintupla membrana de ETFE. Espessura de 250µm  
Área: 4000 m²  
Peso próprio: 1000 g/m²  
Fabricante: NOWOFOL Kunststoffprodukte GmbH & Co.KG



Custo global (material + instalação): 450 €/m² (estimativa)



Descrição:

O edifício existente, construído em 1928, funcionava como salão de exposições e em 2008 foi convertido num complexo de escritórios para a emissora de Televisão RTL e para a empresa de seguros Gerling Insurance.

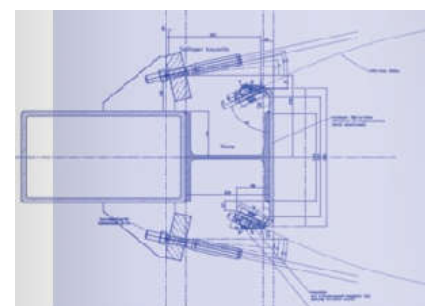
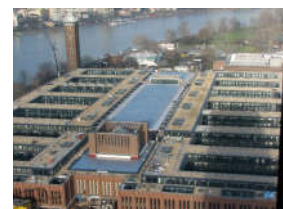
#### Solução

No projeto de conversão foi considerada a construção de uma cobertura, para três atrios existentes, em membrana pneumática ETFE composta por cinco camadas. O atrio maior possui 150 m de comprimento e 26 m de largura. As almofadas em membrana ETFE têm uma dimensão 26 m largura e 33,7 m de comprimento e encontram-se suspensas através de uma estrutura de cabos (colocados a cada 0,60 m)

Esta solução de cobertura distingue-se de outras devido a: elevada transmissão de luz (cerca de 90% do espectro visível); proteção total contra as radiações ultra violeta; capacidade de execução de vão com 26 m sem apoios intermédios; força de tensão de 11,5 kN/m com peso próprio de 1 a 1,5 kg/m²; são extremamente resistentes ao rasgo e a perfurações pontuais (como às ações do granizo); reduzida inflamabilidade, classe de resistência ao fogo B1 e boas propriedades térmicas e acústicas. Para além disto, a extrema suavidade superficial da membrana evita o desenvolvimento de fungos ou bactérias e pode ser limpa através da ação da chuva.

Fonte:

TENSINET (2016). "Exhibition Halle Reine", disponível em: <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4415.html> [Acedido a 07 de Fevereiro de 2016]



Detalhe de ligação estrutura e almofadas em membrana



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA



Conceito de intervenção:

Ativação de uso



Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidades:

**Câmara Municipal de Saxony-Anhalt**  
1929  
2012  
Serviços/ Câmara Municipal  
Arquitetura: Institute for Membrane Structures – Prof. Dr. Robert Off  
Engenharia: Gerry D'Anza & Wolfgang Warich



Localização  
Latitude/ longitude:  
Altitude:  
Temperatura média anual:  
Precipitação média anual:  
Contexto climático:

Berlim, Alemanha/Europa  
52°31'27" N / 13°24'37" E  
43 m  
9,1 °C  
570 mm  
Continental Húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb



Tipo de intervenção:  
Requisitos funcionais:

Alteração  
Acústica, térmica e proteção, ganhos luminosos  
Estrutura pneumática com sistema "Bkaert-belt"



Membrana:  
Área:  
Fabricante:  
Custo global  
(material + instalação):

Dupla. Membrana ETFE  
375 m²  
Novum Membranes GmbH  
450 €/m² (estimativa)



Descrição:

O edifício existente necessitava de uma cobertura transparente e económica para um espaço exterior.

### Solução

A definição da solução para a cobertura estava condicionada por muitos requisitos: 1º a cobertura não podia tocar no edifício existente, considerado histórico; 2º devia funcionar como um simples elemento de proteção contra a chuva para permitir que decorressem eventos ao ar livre; 3º tinha de ser transparente para que todos os compartimentos do edifício existente pudessem receber luz natural desde o espaço central (pátio). Para além disto, era necessário garantir a ventilação natural e a proteção térmica do espaço central que se passaria a estar encerrado.

A solução definida foi uma cobertura em forma de asa, sobre o pátio e sobreposta à cobertura existente com um afastamento vertical de 0,5 metros. A cobertura é composta por uma série de treliças paralelas. Entre os arcos superiores colocaram-se almofadas pneumáticas unidas através de cintas/correias inferiores. Cada almofada possui em média 5,50 m e 15 metros de largura. Entre os perfis curvos inferiores introduziu-se uma membrana simples antilástica e tensada mecanicamente com as cintas/correias Bekaert. Desta forma, produziram-se cinco volumes selados e paralelos. A forma de asa permite aumentar a ventilação natural do pátio sem necessidade de utilizar nenhum dispositivo mecânico.

A ideia de uma estrutura pneumática continua tem mais de 10 anos. O *Institute of Membrane Structures* (IMS) é detentor da patente do sistema "Bekaert-Belt" que usa cintas/ correias de aço embebidas em poliuretano resistente a raios UV para suportar estruturas em membranas de ETFE com grandes vãos. Depois da primeira cobertura experimental em Bobingen, os investigadores do IMS aplicaram pela primeira vez a um edifício de grande escala. A vantagem de utilizar cintas/ correias em vez de cabos reside no facto destas criarem uma superfície plana (que não se desloca sobre a superfície da membrana) ao contrário dos cabos. Localizadas dentro de mangas, as cintas/ correias, podem suportar forças de carga e descarga. Elas podem cruzar-se através de uma peça de fixação. Deste modo, torna-se possível criar grandes vãos sem o uso de perfis de apoio.



Fonte:  
TENSINET (2016). "Tensinews", n.º 25, disponível em: [http://www.tensinet.com/files/Tensinet\\_Publications/Tensinews\\_25\\_1-24\\_-1.pdf](http://www.tensinet.com/files/Tensinet_Publications/Tensinews_25_1-24_-1.pdf) [Acedido a 14 de janeiro de 2016]  
ESPAZIO (2016). "A membrane result of university research" disponível em: <http://www.editorialespazio.com/proyectos/detalle/122> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA



Conceito de intervenção:

Ligação entre o novo e o antigo



Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidades:

**Edifício Johnson**  
1930  
2005  
Serviços/ escritórios  
Arquitetura: Allford Hall Monaghan Morris  
Engenharia civil: ARUP



Localização  
Latitude/ longitude:  
Altitude:  
Temperatura média anual:  
Precipitação média anual:  
Contexto climático:

Hatton Garden, Londres, Reino Unido; Europa  
51° 30' N / 0° 7' O  
25 m  
11,1 °C  
621 mm  
Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb



Tipo de intervenção:  
Requisitos funcionais:

Alteração/ Conversão e ampliação  
Iluminação natural e impermeabilização



Membrana (tipo):  
Área:  
Fabricante:  
Custo global  
(material + instalação):

Pneumática.  
Dupla membrana de ETFE  
300 m²  
Hightex, ISG Interior/Exterior  
450 €/m² (estimativa)



Descrição:

**Solução**  
A para unir o edifício existente, dos anos 30, com o novo edifício passou pela criação de um pátio que foi coberto por uma membrana ETFE. Deste modo foi possível impermeabilizar o pátio com 300m² e permitir a entrada de luz natural de forma maximizada. Comparativamente a uma cobertura com vidro, a cobertura com membrana ETFE apresenta uma menor sobrecarga estrutural.

Fonte:  
BIZLEY, G. (2010). "Architecture in detail", Elsevier, Oxford, Inglaterra.



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

**C.19**

Conceito de intervenção: Ativação de espaço sem uso – maximização de área útil

**Burberry Headquarters, Horseferry House**

Título: 1930  
 Ano de construção existente: 2008  
 Ano de intervenção: 2008  
 Tipo/ função do edifício: Serviços/ escritórios  
 Especialidades: Arquitetura: Allford Hall Monaghan Morris  
 Engenharia civil: Akera

Localização: Londres, Inglaterra; Europa  
 Latitude/ longitude: 51° 30' N / 0° 7' O  
 Altitude: 25 m  
 Temperatura média anual: 11.1 °C  
 Precipitação média anual: 621 mm  
 Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Alteração/ Conversão/ ativação  
 Requisitos funcionais: Iluminação natural, impermeabilização, proteção às variações climáticas, isolamento térmico e acústico  
 Pneumática.

Membrana (tipo): Tripla membrana de ETFE  
 Área: 410 m²  
 Fabricante: Hightex; ISG Interior/Exterior  
 Custo global (material + instalação): 450 €/m² (estimativa)

**+** Descrição:  
 O edifício existente, construído nos anos 30, era configurado por um pátio e possuía estrutura metálica. O projeto de reabilitação envolveu trabalhos de demolição e alterações estruturais.

**Solução**

Com a solução de cobertura pneumática em membrana tripla de ETFE foi possível ativar o poço de luz e o átrio existentes e subutilizados. Ao tornar o piso térreo habitável, estes novos espaços converteram-se em zonas centrais, em torno das quais todos os espaços interiores do edifício se encontram conectados.

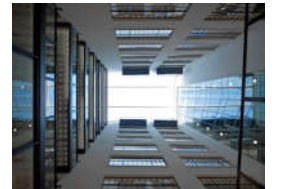
Com esta solução não foi necessário incluir estrutura de apoio intermédia no vão de 11 m (aprox.). Para além disso foi possível assegurar isolamento térmico, ganhos de luminosidade natural e proteção contra os efeitos das variações meteorológicas. A impressão de um padrão de pontos com cor metalizada, na camada de membrana exterior confere proteção solar, permite evitar o encadeamento nos espaços de trabalho e área de receção abaixo da cobertura. Para além de que as propriedades de auto limpeza desta membrana reduzem a necessidade de limpeza periódica da cobertura e ajudando a manter os níveis ideais de transmissão de luz.

Fonte: MORRIS, A. (2016). "Horseferry House", disponível em: [http://www.ahmm.co.uk/resources/res.aspx?n=/CC780DC6A72CBB91561736C60DFECB696C562C377FBA302496C9025E9F750D/Horseferry%20House\\_Info%20Pack\\_For%20email.pdf](http://www.ahmm.co.uk/resources/res.aspx?n=/CC780DC6A72CBB91561736C60DFECB696C562C377FBA302496C9025E9F750D/Horseferry%20House_Info%20Pack_For%20email.pdf) [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

**+** Figuras:



Antes (vistas do átrio existente)



Depois



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

**C.20**

Conceito de intervenção: integração e camuflagem

**Fukiya International Villa Hall**

Título: 1930 (cerca de)  
 Ano de construção existente: 1988  
 Ano de intervenção: 1988  
 Tipo/ função do edifício: Cultural/ junta de freguesia  
 Especialidades: Arquitetura: Kazuo Ishii & assoc.  
 Engenharia civil: Hamazu Structural Engineers

Localização: Fukuya, Okayama, Japão; Ásia  
 Latitude/ longitude: 34°39'42" N / 133°56'06" E  
 Altitude: 50 m  
 Temperatura média anual: 16, 2°C  
 Precipitação média anual: 951.5 mm  
 Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfa

Tipo de intervenção: Ampliação  
 Requisitos funcionais: Impermeabilização e proteção contra as variações climáticas  
 Estrutura de madeira + membrana tensada

Membrana (tipo): Simples membrana de fibra de vidro revestida a PTFE  
 Área: 180 m²  
 Custo global (material + instalação): 110 €/m² (estimativa)

**+** Descrição:  
 O edifício da Junta de freguesia do município de Fukiya necessitava de ser renovado e aumentar a sua capacidade para realizar reuniões. Para tal, foi feita uma ampliação da sala de reuniões para aumentar a área útil e poder acolher mais pessoas.

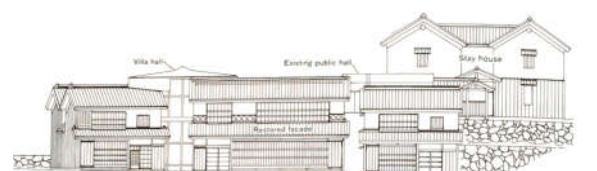
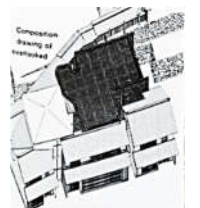
**Solução**

Pretendia-se construir um espaço amplo, com vão único (sem apoios intermédios). A fachada desta ampliação era a do edifício existente, que apenas foi renovada.

A ligação entre o novo e o existente era inevitável, por isso a nova cobertura tinha de ser compatível com o desenho estrutural do edifício existente e com os traços arquitetónicos das edificações circundantes. Naturalmente, a primeira opção recaiu sobre a solução de cobertura revestida a telhas cerâmicas, mas os moradores do município tinham outra opinião. Eles achavam que as adições feitas ao edifício existente deveria ter um estilo diferente deste, para se distinguir. Achavam que o telhado novo deveria ser revestido a cobre, mas, devido aos custos associados, optaram por um revestimento em membrana. Para além do fator económico, também se optou-se pela membrana devido ao facto de permitir executar grandes vãos sem apoios intermédios, e ser possível produzi-la em qualquer cor. Pois o que à primeira vista parece uma cobertura metálica é uma cobertura em membrana de fibra de vidro revestida a PTFE tingida a vermelho indiano (semelhante à cor da telha – presente nas coberturas das casas circundantes).

Fonte: ISHII, K. (1995). "Membrane structures in Japan", SPS publishing company, Tóquio, Japão, pp.307-309

**+** Figuras:



Vista da cobertura, integrada entre as coberturas das casas existente sem Fukiya.



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA



C.21

Conceito de intervenção:

Manter ao máximo a leitura do edifício existente



Título:

**Estádio Olímpico de Berlim**

Ano de construção existente:

1936

Ano de intervenção:

2004

Tipo/ função do edifício:

Desporto

Especialidades:

Arquitetura: Gerkan, Marg und Partner  
Engenharia: Schlaich, Bergemann and Partners



Localização:

Berlim, Alemanha; Europa

Latitude/ longitude:

52°31'27" N / 13°24'37" E

Altitude:

43 m

Temperatura média anual:

9,1 °C

Precipitação média anual:

570 mm

Contexto climático:

Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb



Tipo de intervenção:

Alteração

Requisitos funcionais:

Iluminação natural, proteção à chuva, vento e sol, definição espacial



Membrana (tipo):

Tensada com subestrutura metálica.

Área:

27 000 m<sup>2</sup>

Fabricante:

Hightex GmbH



Custo global

(material + instalação):

220 €/m<sup>2</sup> (estimativa)



Descrição:

A construção de uma cobertura para o Estádio Olímpico de Berlim possuiu os seguintes requisitos/ desafios: toda a estrutura da cobertura tinha de ficar dentro dos limites da planta de rés-do chão do edifício existente; por ser um edifício classificado como monumento histórico, a sua aparência existente tinha de ser mantida, com o mínimo de alterações possível; os espectadores tinham de visualizar o campo de jogo de forma desobstruída (com o mínimo possível de elementos de suporte/ colunas, etc.). Para além destes requisitos, todos os trabalhos tinham de ser executados sem interromperem os regulares jogos sazonais.

### Solução

Foi projetada uma cobertura leve em consola e em forma de U sobre as bancadas existentes. Esta cobertura não forma um anel fechado, pois é interrompida no troço onde se localiza entrada principal do estádio, para preservar ao máximo a imagem do edifício. Na zona superior das bancadas foram colocados 132 colunas de aço exteriores e 20 colunas de aço (com diâmetro de 250 mm na base) no meio das bancadas. Estas colunas são os únicos elementos de apoio da cobertura em membrana que parece flutuar sobre o edifício existente.

O sobre-revestimento de PTFE aplicado sobre a membrana de fibra de vidro confere a esta, propriedades de auto-limpeza devido à sua superfície lisa e elevada resistência a variações climáticas. O PTFE, devido ao facto de não possuir amaciadores ou estabilizadores que evaporam ao longo do tempo, permite que as membranas permaneçam elásticas e suaves de modo a que, mesmo após vários anos de utilização/ exposição a sujidade e agentes químicos sejam incapazes de fendilhar. Geralmente, a ação da chuva são é suficiente para limpar as coberturas deste tipo. Para além destas vantagens, a translucidez desta membrana garante as condições luminicas ideais para os espectadores e jogadores. Também foi projetado um forro, em rede de fibra de vidro revestida a PTFE, para o lado interior da cobertura - tipo esteira - para servir de corredor de manutenção do sistema de iluminação artificial instalado sob a cobertura, bem como do sistema de som. Esta técnica de instalação elimina a necessidade de criar mastros com sistemas de som e luz em torno do campo de jogo que iriam perturbar a visão dos espectadores. Por outro lado, a rede em malha aberta para além de permitir a passagem de luz e som, garante a compensação de pressão ideal através da membrana superior sob ações de vento (contribuindo assim para reduzir a carga estática na estrutura metálica da cobertura).



Figuras:

Antes (ano 1936)



Depois (ano 2004)



Fonte:

TENSINET (2016). "Berlin Stadium", disponível em:

<http://www.tensinet.com/database/viewProject/4335.html> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA



C.22

Conceito de intervenção:

Reproporcionar as simensões do pátio existente com uma cúpula executada com tecnologia e material contemporaneos.



Título:

**Castelo de Dresden - pátio Kleiner Schloßhof**

Ano de construção existente:

1945

Ano de intervenção:

2008

Tipo/ função do edifício:

Cultural

Especialidades:

Arquitetura: Peter Kulka Architektur  
Engenharia civil: Form TL GmbH; Ahw Ingenieure



Localização:

Dresden, Alemanha; Europa

Latitude/ longitude:

51°03'03" N / 13°44'17" E

Altitude:

116 m

Temperatura média anual:

9,0 °C

Precipitação média anual:

592 mm

Contexto climático:

Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb



Tipo de intervenção:

Renovação e ampliação.

Requisitos funcionais:

Iluminação natural, regulação térmica e acústica



Membrana:

Estrutura metálica e pneumática

Área:

1420m<sup>2</sup>

Fabricante:

Sattler, Cenotec



Custo global

(material + instalação):

600 €/m<sup>2</sup> (estimativa)



Descrição:

O Castelo de Dresden é um dos mais importantes do período renascentista alemão. No decurso da sua história, este foi ampliado, reestruturado e alterado para acomodar mudanças funcionais e de estilo. Este processo continuou com a sua reconstrução após a sua destruição em 1945. O pátio, denominado de Kleiner Schloßhof irá passar a funcionar como átrio para os museus existentes na envolvente e por isso necessitava de ser coberto.

### Solução

A solução proposta teve como objetivo restaurar as proporções do pátio e cobri-lo com uma cúpula executada com tecnologia e materiais contemporaneos. A solução definida, uma estrutura leve revestida com dupla membrana de ETFE, permite curvar a cúpula sobre a cobertura existente de modo a que a fachada e os elementos arquitetónicos com decoração renascentista possam permanecer completamente visíveis. As conexões, entre a cúpula e a cobertura existente, foram desenhadas de modo a ficarem escondidas (para quem observa a cobertura pelo interior). Esta cúpula cobre uma área de 1420 m<sup>2</sup> (aprox.) sem apoios adicionais. Na totalidade, a cúpula em membrana, pesa apenas 84 toneladas. As almofadas de membrana mantêm-se insufladas sob uma pressão constante de 800 Pascal. O ar é fornecido através das tubulações metálicas de secção quadrada (18 por 18 cm) integradas na estrutura metálica de suporte.

Fonte:

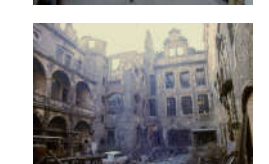
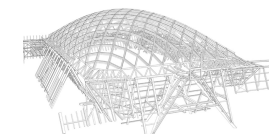
GERMAN ARCHITECTS (2016). "Dresden Castle", disponível em: <http://www.german-architects.com/en/projects/27406-Dresden-castle-Kleiner-Schlosshof-small-inner-courtward-roofing> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

KULKA, P (2016). "Dresden Castle", disponível em: <http://www.peterkulka.de/likecms/likecms.php?site=site.html&dir=&nav=1&p=1&thema=list&pid=2> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

SATTLER (2016) "Residenzschloss of Dresden", disponível em: <https://www.sattler-global.com/textile-architecture/air-structure-1286.jsp> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]




Figuras:



Antes (após incendio em1945)

Depois (ano 2009)

**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**  **C.23**

Conceito de intervenção: Reativação de uso público. Solução de baixa intrusividade com nova tecnologia e material de construção.

**Título: Igreja de Corbera d'Ebre**

Ano de construção existente: 1827 - 1948  
 Ano de intervenção: 2013  
 Tipo/ função do edifício: Cultural / religiosa  
 Especialidades: Arquitetura: Ferran Vizoso e Núria Bordas

Localização: Corbera d'Ebre, Tarragona, Espanha; Europa.  
 Latitude/ longitude: 41° 4' 39" N / 0° 28' 41" E  
 Altitude: 337 m  
 Temperatura média anual: 15,0 °C  
 Precipitação média anual: 518 mm  
 Contexto climático: Mediterrâneo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa

Tipo de intervenção: Restauro  
 Requisitos funcionais: Proteção contra os agentes atmosféricos, iluminação natural, leveza, acústica

Membrana (tipo): Tensada. Membrana simples de ETFE transparente  
 Área: 700 m²  
 Fabricante: IASO  
 Custo global (material + instalação): 220 €/m² (estimativa) - cobertura 792 €/m² - total da obra

**Descrição**  
 O edifício existente, símbolo cultural do município de Corbera de Ebre e da Guerra Civil Espanhola, foi parcialmente destruído durante a Batalha de Ebro e necessitava de ser reabilitado para permitir o uso do espaço interior para atividades culturais. Este edifício encontrava-se em ruína e sem cobertura.

**Solução**  
 Quando se utilizam novas tecnologias e materiais para preservar, ampliar, ou por outro lado substituir um edifício existente, é inevitável o confronto com a questão acerca do grau de intrusividade da solução a adotar. O conceito de intervenção de baixa intrusividade aliado à necessidade de consolidação do edifício, para que este fosse reativado como espaço para atividades culturais pela comunidade, resultou numa solução de cobertura leve em membrana de ETFE transparente e tensada.



Esta solução permite selar o edifício para o proteger de deteiorizações futuras para que este permaneça com um novo caráter (adquirido na sequência de um episódio histórico - genius loci): um espaço aberto, com entrada de luz natural (onde antes existia um espaço interior e escuro). Conhecida pelas suas propriedades de longa durabilidade, impermeabilidade, resistência aos raios UV, eficiência térmica e propriedades luminicas, os painéis em membrana ETFE conferem proteção às partes em ruína sem sobrecarregar a estrutura existente.

Atualmente, o edifício possui as condições necessárias para ser utilizado pela comunidade.

Fonte:  
 IASO (2016). "ETFE church", disponível em: <http://www.iaso.es/proyectos/efte-church-of-st-peter/95> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]  
 DESIGNBOOM (2016) "Ferran Vizoso frames a derelict church", disponível em: <http://www.designboom.com/architecture/ferran-vizoso-architecture-frames-a-derelict-church/> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

 Figuras:



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**   **C.24**

Conceito de intervenção: Duplicação + Conversão de estaleiro naval em centro cultural

**Título: Frac Art Centre**

Ano de construção existente: 1949  
 Ano de intervenção: 2013  
 Tipo/ função do edifício: Cultural  
 Especialidades: Arquitetura: Lacaton & Vassal  
 Engenharia civil: Secotrap e Cesma;  
 Gui Jourdan (acústica), Cardonnel (térmica)

Localização: Dunquerque, França; Europa  
 Latitude/ longitude: 51°1.9782' N / 2°22.62' E  
 Altitude: 10 m  
 Temperatura média anual: 10,4 °C  
 Precipitação média anual: 673 mm  
 Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Conversão + Ampliação  
 Requisitos funcionais: Aumento de área útil; proteção contra as ações do cloreto de sódio; iluminação natural, isolamento térmico

Membrana (tipo): Estrutura metálica e pneumática  
 Propriedades: Dupla membrana de ETFE  
 Transmissão de luz 92 %; valor de U de 2,5 W/m²K; classe M2 de resistência ao fogo (norma NF P 92)

Área: 3362 m²  
 Fabricante: Talyo Europa  
 Custo global (material + instalação): 450 €/m² (estimativa)

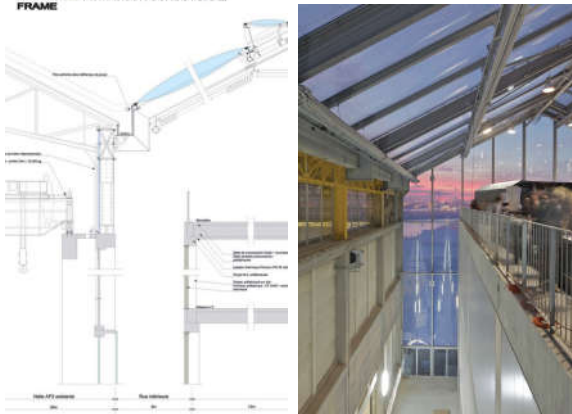
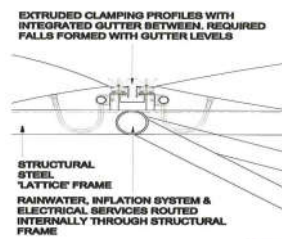
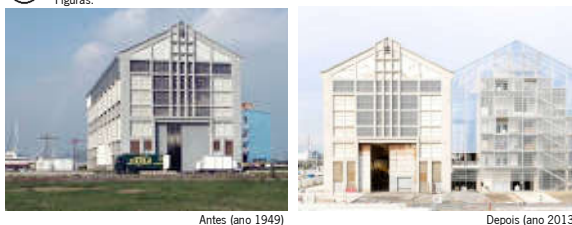
**Descrição:**  
 O edifício existente, um antigo estaleiro naval (devoluto em 1988), situa-se numa zona portuária. O seu espaço interior é amplo e possui potencialidades para acolher novos usos. Um dos novos usos propostos foi para acolher um espaço museológico do coletivo de arte FRAC.

**Solução**  
 A conversão funcional do espaço existente passou por manter o edifício existente e criar uma extensão, através de uma duplicação mimetizada - criamos um novo edifício com a mesma dimensão e aspeto formal. Esta nova extensão, adjacente ao edifício existente, justapõem-se sem perturbar a aparência deste. O novo edifício possui uma envolvente transparente, que permite visualizar o opaco edifício existente.

Sob o ponto de vista económico, a solução adotada para a construção do novo edifício e a reabilitação do edifício existente (totalidade 11.129 m²) custou 12.000.000 € - menos 1.000.000 € do que o orçamento fornecido para recuperar o edifício existente.

Fonte:  
 DESIGN CURIAL (2016). "Frac Art Center", disponível em: <http://designcurial4.rssing.com/browser.php?indx=24516303&item=41> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]  
 LACATON & VASSAL (2016). "Frac art center", disponível em: <http://www.lacatonvassal.com/?idp=61> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]  
 LE MONITEUR (2016). "Coussin inflatable pour le Frac de Dunkerque", disponível em: <http://www.lemoniteur.fr/article/alex-7-7-coussin-inflatable-en-etfe-pour-le-frac-de-dunkerque-25216465> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

 Figuras:





**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção: Considerar os silos como núcleo estrutural

**FRÖSILO**

Título: 1963  
 Ano de construção existente: 2005  
 Ano de intervenção: 2005  
 Tipo/ função do edifício: Habitação  
 Especialidades: Arquitetura: MRDV  
 Consultor: JIW Arkitekt ABT, Arnheim

Localização: Copenhaga, Dinamarca; Europa  
 Latitude/ longitude: 55° 41' N / 12° 34' E  
 Altitude: 9 m  
 Temperatura média anual: 8,4 °C  
 Precipitação média anual: 621 mm  
 Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Alteração/ conversão  
 Requisitos funcionais: Leveza, iluminação natural e regulação térmica  
 Pneumática

Membrana: Dupla membrana de ETFE  
 Área: 9.800 m²  
 Fabricante: Vector Foiltec  
 Custo global (material + instalação): 450 €/ m² (estimativa)

Descrição:

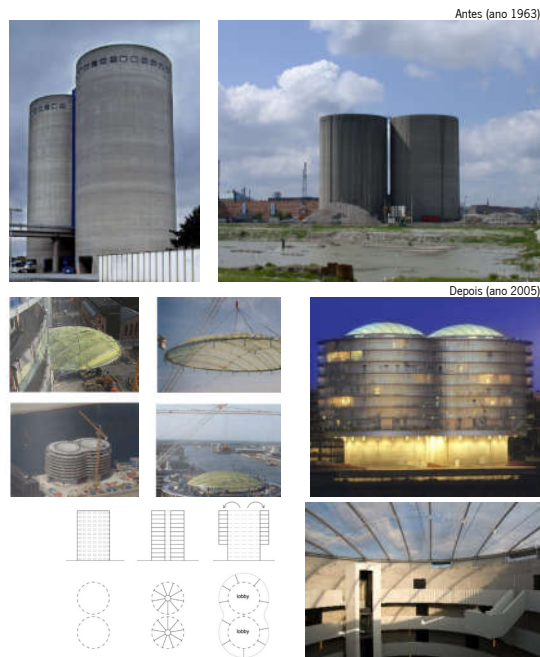
Por toda a Europa existem zonas portuárias com construções devolutas que têm sido convertidas em áreas habitacionais. A envolvente natural, a localização e proximidade ao centro das cidades, contrinuem para o sucesso destas conversões. Existentemente construídos em 1963, os dois silos de sementes "Frösilos" pertenciam à fábrica "Soya Bean Cake". Os silos existentes são construções cilíndricas de alvenaria mista com anéis/cintas e nervuras de betão.

**Solução**

É nas limitações estruturais dos silos que reside o conceito de intervenção deste projeto de reabilitação. As restritas e complicadas possibilidades de realizar aberturas nos anéis de betão, aliadas à intenção de manter as qualidades espaciais e do interior dos silos – a verticalidade e o vazio – levaram os projetistas a localizar as unidades habitacionais no exterior dos silos. Deste modo conseguiu-se maximizar vistas panorâmicas e alcançar flexibilidade no desenho dos apartamentos. Com esta solução, o interior dos silos converteram-se em dois grandes átrios.

Apesar da complexidade, foi possível fazer a abertura de portas num limitado número de localizações. A localização de unidades habitacionais no interior dos silos podia implicar a realização de aberturas com vistas para o interior do silo. Isto resultaria num contrassenso, pois os silos encontram-se isolados e consequentemente com vistas desimpedidas. No caso da conversão de um armazém isto podia ser aceitável, devido às suas dimensões e envolvente, mas no caso de um silo, este tipo de solução reduz o potencial aproveitamento das vistas panorâmicas. Adicionalmente, se o interior do silo fosse preenchido com lajes e paredes, isto poderia destruir a sua qualidade espacial no estado em que foi encontrado: o vazio. De modo a acentuar esta qualidade espacial dos silos optou-se por uma solução de cobertura em membrana transparente para preencher o núcleo do silo (onde se localizam os acessos a cada unidade habitacional, com o máximo de iluminação natural. As razões que levaram à seleção desta solução de cobertura foram as seguintes: leveza (sem necessidade de estrutura de suporte a meio vão); transparência da membrana e regulação térmica.

Figuras:



Fonte: MVRDV (2016). "Frösilo", disponível em: <http://www.mrvd.nl/en/projects/frösilo>. [Acedido a 14 de janeiro de 2016]  
 POLIMI (2016). "Frösilos", disponível em: <http://www.textilearchitecture.polimi.it/database/fr%C3%B8silos>. [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção: Inovação na redução do impacto visual

**C.26**

Título: Edifício de habitação coletiva em Zamora  
 Ano de construção existente: 1970 (cerca de)  
 Ano de intervenção: 2014  
 Tipo/ função do edifício: Habitação  
 Aplicação: Bruma SA, empresa de impermeabilização.

Localização: Zamora, Espanha; Europa  
 Latitude/ longitude: 41°30'22" N / 5°44'40" O  
 Altitude: 662 m  
 Temperatura média anual: 12,3 °C  
 Precipitação média anual: 359 mm  
 Contexto climático: Semi árido. Classificação climática de Köppen-Geiger: BSk

Tipo de intervenção: Renovação  
 Requisitos funcionais: Leveza; impermeabilização; redução de impacto visual

Membrana (tipo): Simples membrana betuminosa com impressão (efeito visual 3D)  
 Área: 5000 m²  
 Fabricante: Icopal, intalador Siplast  
 Custo global (material + instalação): 100 €/ m² (estimativa)

Descrição:

Existente: O conjunto de edifícios de habitação coletiva intervenido foi construído nos anos 70 e foi renovado em 2014 com uma membrana betuminosa com efeito visual 3D.

**Solução**

A cobertura do edifício existente encontrava-se revestida com telhas betuminosas coladas com argamassa. Para preservar o caráter histórico do centro da cidade de Zamora, os donos de obra procuravam uma solução leve, que pudesse substituir as telhas betuminosas existentes e que ao mesmo tempo possuísse a aparência das telhas de cerâmica convencionais. A solução escolhida para melhorar a estanquidade à água da cobertura existente combina eficiência e cuidado estético (para reduzir o impacto visual da intervenção). Esta solução é leve (7,5 kg/m² (já com argamassa)) e possui uma durabilidade considerável. Este projeto constitui um exemplo de integração de uma solução inovadora sem alterar o caráter tradicional das coberturas revestidas com telhas cerâmicas (uma solução de revestimento de coberturas correntemente utilizada em Espanha).

Fonte: SIPLAST (2016). "Membrane 3D", disponível em: <http://www.siplast-international.com/references/membrane-irt-3d-zamora-spain>. [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

Figuras:



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

   **C.27**

 Figuras:

Conceito de intervenção:

**Hartley Library Learning Centre**  
1970 (cerca de)  
2004  
Biblioteca  
Arquitetura: Wilson Mason Architects



Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidades:



Localização: Southampton, Inglaterra; Europa  
Latitude/ longitude: 50°54'N/ 1°23'W  
Altitude: 20 m  
Temperatura média anual: 10,6 °C  
Precipitação média anual: 774 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb



Tipo de intervenção: Renovação e ampliação  
Requisitos funcionais: Isolamento térmico, iluminação natural, acústica, proteção solar



Membrana: Tripla. Membrana ETFE  
Área: 96 m²  
Fabricante: Buitnik tecnologia



Custo global (material + instalação): 600 €/ m² (estimativa)



Descrição:

A instalação de duas claraboias faz parte do projeto de renovação desta biblioteca. Estas claraboias são feitas em membrana ETFE e fornecem iluminação natural ao interior do edifício com tecnologia contemporânea. Cada claraboia é composta por duas almofadas pneumáticas com dimensões de 4 x 6 m.

As almofadas pneumáticas são compostas por três camadas de membrana ETFE, impressas com padrão metalizado (para impedir a passagem de raios UV), com espessuras distintas: a camada exterior possui 200 µ e as camadas intermédia e interior 150 µ.

Fonte:

BUITHINK (2016). "Air cushion roof", disponível em: <http://www.buitnik-technology.com/uk/projects/air-cushion-roof-southampton/> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]



## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

   **C.28**

 Figuras:

Conceito de intervenção:

solução de baixa intrusividade



Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidades:

**Praça Devonshire**  
1800 e remodelado em 1970  
2008  
Escritórios e restauração  
Arquitetura: Fletcher Priest Architects Limited



Localização: Londres, Inglaterra; Europa  
Latitude/ longitude: 51°30'30" N / 0°07'32" O  
Altitude: 25 m  
Temperatura média anual: 11,1 °C  
Precipitação média anual: 621 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb



Tipo de intervenção: Alteração/ Conversão de uso  
Requisitos funcionais: Impermeabilização, iluminação natural



Membrana (tipo): Tensionada com estrutura metálica  
Área: 1452 m²  
Fabricante: Vector foiltec



Custo global (material + instalação): 400 €/m² (estimativa)



Descrição:

O edifício existente, construído no século XVIII, albergava os armazéns de especiarias da histórica empresa "East India Trading" é composto de doze prédios auto-suficientes em uma propriedade de cinco acres. Este edifício foi remodelado no final dos anos 70 e sofreu uma modelação recente em 2008.

Solução

A cobertura em membrana ETFE simples, suportada por uma estrutura de aço leve, permite que o espaço possa ser utilizado durante todo o ano, promovendo ao mesmo tempo a ventilação natural.

Esta solução oferece aos usuários um maior conforto mantendo a integridade visual deste edifício histórico.

Fonte:

VECTOR FOILTEC (2016). "Devonshire Square", disponível em: <http://www.vector-foiltec.com/projects/devonshire-square/> [Acedido a 08 de Fevereiro de 2016]





## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

**C.29**  
Unidade

Conceito de intervenção:

**Infantário de Wismar**  
1972  
Ano de construção existente: 2005  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício: Serviços/ Educação  
Especialidades: Arquitetura: IGEL - Institut für Gebäude- Energie und Lichtplanung  
Física das construções: Universidade Rostock  
Engenharia: Ingenieurbüro Frank Barkowski

Localização: Wismar, Alemanha; Europa  
Latitude/ longitude: 53°53'35" N / 11°27'10" E  
Altitude: 15 m  
Temperatura média anual: 8,5 °C  
Precipitação média anual: 608 mm  
Contexto climático: Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb

Tipo de intervenção: Renovação  
Requisitos funcionais: Iluminação natural; melhoria térmica e acústica; redução do consumo energético; reorganização espacial

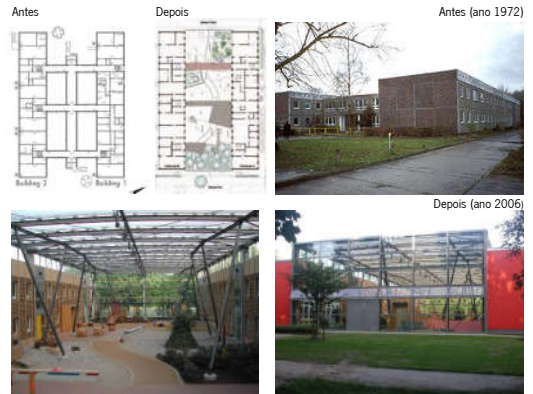
Membrana: Estrutura metálica de suporte com almofadas pneumáticas.  
Tripla. Membrana ETFE. Painéis de isolamento por vácuo.  
Área: 976 m<sup>2</sup>  
Custo global (material + instalação): 120 €/ m<sup>2</sup> (estimativa)

Descrição:  
O edifício existente era constituído por dois corpos principais conectados por percursos exteriores de acesso. Este edifício necessitava de uma atualização do desempenho térmico e energético bem como de reorganização espacial. Foram desenvolvidas soluções integradas para obter melhorias em termos de eficiência energética e da utilização do edifício.

**Solução**  
Este projecto baseia-se na ideia de incorporar toda a zona entre os dois edifícios principais sob o mesmo teto (onde anteriormente só existiam passagens pedonais para fazer a ligação entre si). Para tal, a zona entre edifícios foi encerrada com uma cobertura em membrana ETFE tripla. A cobertura é composta por uma estrutura metálica e almofadas pneumáticas que vencem o vão de 20 m sem necessidade de apoios a meio vão. O ático pode ser sombreado através do ajuste da pressão de ar das almofadas em membrana ETFE. Esta solução proporcionou um aumento de área útil, e, simultaneamente, uma nova área social e de recreio com proteção contra as variações climáticas. O encerramento de área entre os dois corpos do edifício permitiu criar uma zona tampão que favorece a regulação térmica e a ventilação do eifício. Deste modo, não foi necessário reabilitar as fachadas que faceavam o ático criado, e a inércia térmica destas paredes manteve-se inalterada. Adicionalmente, estas fachadas foram revestidas por painéis de madeira que sombreiam as paredes do ático no verão e melhoram o desempenho acústico do ático (área de recreio). Para isolar termicamente as fachadas existentes optou-se por colocar painéis de isolamento por vácuo com espessura e peso reduzidos.

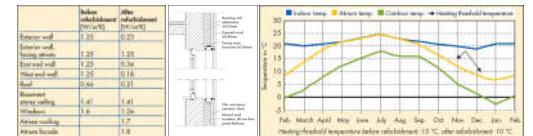
**Desempenho**  
Este edifício tornou-se um modelo de desempenho energético. A melhoria da qualidade e temperatura do ar reduziu significativamente os casos de doenças dos utilizadores deste edifício. Após a reabilitação, o consumo de energia foi reduzido em 65% (aprox.). Particularmente, as perdas de calor por ventilação foram significativamente reduzidas devido à redução do volume de ar a ser aquecido e ao pré-aquecimento do ar no ático.

Figuras



Year	Before refurbishment	2001	After refurbishment <sup>1</sup>
Period	06/07/1999-03/07/2000	04/07/2000-11/07/2001	14/02/2005-14/02/2006
Total electricity	56,835 kWh	37,020 kWh	25,350 kWh
Natural gas <sup>1</sup>	499,853 kWh	506,073 kWh	139,594 kWh
Total final energy	556,688 kWh	543,093 kWh	164,944 kWh

<sup>1</sup> Natural gas consumption in 2006: 12,775 m<sup>3</sup>; calorific value 11.3 kWh/m<sup>3</sup>; conversion factor f = 0.967  
<sup>2</sup> Measurement data after one year



Fontes:  
ENOB (2016). "Children day care center, Wismar", disponível em: <http://www.enob.info/en/refurbishment/projects/details/childrens-day-care-centre-in-wismar/>  
[Acedido a 14 de janeiro de 2016]  
BINE (2016). "Gebäude-sanieren-kindertagesstaette", disponível em: <http://www.bine.info/en/publications/projektinfos/publikation/gebaeude-sanieren-kindertagesstaette/>  
[Acedido a 14 de janeiro de 2016]  
ISSU (2016) "Portfolio", disponível em: [http://issuu.com/studentengesicht/docs/portfolio\\_igel\\_planung\\_?e=3107614/2641360](http://issuu.com/studentengesicht/docs/portfolio_igel_planung_?e=3107614/2641360) [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

## ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA

**C.30**  
Reposição

Conceito de intervenção:

**Talisman Centre**  
1983  
Ano de construção existente: 2010  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício: Desportivo  
Especialidades: Arquitetura: Neil Jaud Architect  
Engenharia civil: Cabot Corporation, Geiger Engineering

Localização: Calgary, Canada; América  
Latitude/ longitude: 51° 06' N / 114° 07' W  
Altitude: 1084 m  
Temperatura média anual: 3,4 °C  
Precipitação média anual: 428 mm  
Contexto climático: Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb

Tipo de intervenção: Renovação  
Requisitos funcionais: Isolamento térmico, acústicos, redução de condensações e iluminação natural  
Tensada.

Membrana: Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE com material isolante intermédio em manta de aerogel. "Tensotherm Lumira Nanogel"  
Área: 15000 m<sup>2</sup>  
Fabricante: Birdair e Cabot  
Cobertura existente custou 1400 €/ m<sup>2</sup>  
Custo global (material + instalação): Substituição da cobertura - 2600 €/ m<sup>2</sup>; Manta aerogel 8mm - 225€/ m<sup>2</sup>; Tensotherm c/ aerogel aprox 300 €/ m<sup>2</sup>

Descrição:  
O edifício existente foi construído em 1983 e necessitava de ser reabilitado para melhorar o seu desempenho energético. Possui uma cobertura, em forma de V invertido, composta por uma espinha de aço e um perímetro em betão. O revestimento da cobertura existente era em membrana de fibra de vidro, com uma permeabilidade à luz de 4%, reduzindo a necessidade de iluminação artificial. Adding to the abundance of features, the facility is one of only two locations in the world with the ability to host international synchronized swimming competitions.

**Solução**  
A nova membrana dupla de fibra de vidro revestida a PTFE com manta de aerogel intermédia foi a opção selecionada para substituir a membrana simples de fibra de vidro revestida a PTFE instalada em 1983. Esteticamente, a nova membrana possui a mesma aparência da membrana existente, enquanto funcionalmente fornece cinco vezes mais isolamento do que a membrana existente, promove a passagem de luz natural, reduz o risco de condensações e evita perdas de calor decorrentes do aquecimento da água das piscinas. O aerogel (90% composto por ar) isola quatro vezes mais do que as mantas de fibra de vidro e não é combustível.

Fonte:  
WILLIAM ENGINEERING (2016). "Talisman Centre", disponível em: [http://www.williamsengineering.com/sectors/social\\_infrastructure/TalismanCentre](http://www.williamsengineering.com/sectors/social_infrastructure/TalismanCentre) [Acedido a 14 de janeiro de 2016]  
BIRDAIR (2016). "Talisman Centre", disponível em: <http://www.birdair.com/projects/talisman-centre> [Acedido a 14 de janeiro de 2016]

Figuras:



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.31**  
Leveza e luminosidade

**Clube de Tênis Bourg-la-Reine**

Título: 1992  
Ano de construção existente: 2013  
Ano de intervenção: 2013  
Tipo/ função do edifício: Desportivo  
Especialidades: Arquitetura: Yves Mahieu, Spoutnik Architecture & Asteo BE Structure

Localização: Hauts-de-Seine, França, Europa  
Latitude/ longitude: 48°46'43" N / 2°19'04" E  
Altitude: 55 m  
Temperatura média anual: 11,2 °C  
Precipitação média anual: 650 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Renovação  
Requisitos funcionais: Regulação térmica, acústica e iluminação natural  
Estrutura existente de madeira+ reforço metálico + mem. tensada  
Membrana: Simples membrana de poliéster revestida a PVC e PVDF, pretensada  
Área: 3600 m<sup>2</sup> (36 módulos de 100 m<sup>2</sup>)  
Fabricante: Serge Ferrari  
Tempo de execução: 8 semanas  
Equipa de instalação: 8 pessoas

€ Custo global (material + instalação): 258 €/ m<sup>2</sup> (estimativa)

Descrição:  
O edifício existente possuía fraca iluminação natural e possuía uma cobertura em chapa metálica ondulada e chapas de policarbonato translúcidas que se encontravam degradadas.

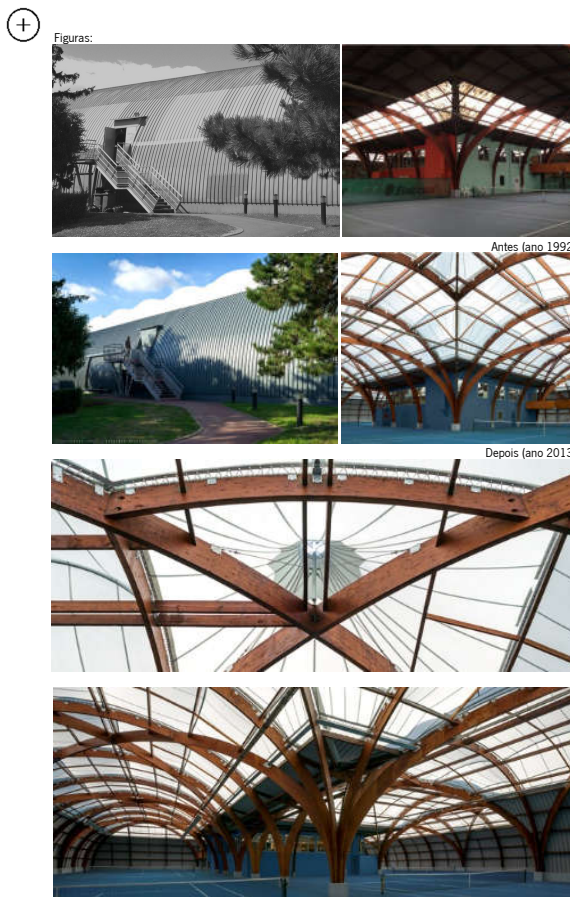
**Solução**

A solução passou por remover o material de revestimento existente no local e substituí-lo por uma membrana leve e translúcida que oferece impermeabilização e iluminação natural para a prática de atividades desportivas. Com esta solução foi possível adaptar o revestimento em membrana à estrutura existente a fim de evitar a sua demolição. Assim, foi possível conservar a estrutura de origem - com arcos de madeira laminada e colada, acrescentando arcos metálicos a fim de obter uma geometria compatível para tensar a o revestimento em membrana com dupla curvatura.

A membrana selecionada, fabricada através de um sistema de pretensionamento, foi instalada com amarração dupla e fixada a tubos metálicos interligados à estrutura existente. Esta membrana apresenta propriedades inovadoras que permitem alcançar as seguintes vantagens:

- mesmo sem reforço, a membrana resiste a rasgos (a sua estrutura composta por fios de poliéster de alta tenacidade garante sua solidez);
- o tratamento da superfície com Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) otimiza o desempenho das fibras e limita a aderência de sujidades;
- apresenta uma vida útil de 30 anos e é 100% reciclável.

Fonte:  
SERGE FERRARI (2016). "Uma renovação luminosa", disponível em: <http://pt.br.sergeferrari.com/arquitetura/leve/uma-renovacao-luminosa-membrana-precontraint-1202-s2/>. [Acedido a 14 de janeiro de 2016]



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.32**

**University of West London**

Título: Edifício de 1960, Instalação da membrana existente 2006  
Ano de construção existente: 2014  
Ano de intervenção: 2014  
Tipo/ função do edifício: Educacional

Localização: Londres, Inglaterra  
Latitude/ longitude: 51° 30' N / 0° 7' O  
Altitude: 25 m  
Temperatura média anual: 11,1 °C  
Precipitação média anual: 621 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Renovação  
Requisitos funcionais: Aumentar a transmissão de luz natural, reduzir os ganhos solares, melhoria acústica e desempenho térmico  
Sistema de ancoragem metálico

Membrana: Tripla de ETFE  
Área: 155 m<sup>2</sup>  
Peso: ETFE: 1.22 kg/m<sup>2</sup>  
ETFE + sistema de ancoragem: 5.47 kg/m<sup>2</sup>

Fabricante: Architen Landrell  
Tempo de instalação: 1 semana (para remover a cobertura antiga e instalar a nova)

€ Custo global (material + instalação): 380 €/ m<sup>2</sup> (fonte: Architen Landrell por Amy Wilson)

Descrição:  
Os motivos que levaram à substituição da cobertura existente em membrana ETFE por outra membrana em ETFE foram os seguintes: aumentar a transmissão de luz; reduzir os ganhos solares, melhorar o desempenho térmico e acústico.

**Solução**

O padrão impresso na membrana existente só permitia uma transmissão de luz de 32%. Mas com a nova membrana em ETFE foi possível alcançar uma transmissão de 56% (com padrão com pontos de 16mm de diâmetro).


Também foi instalada uma membrana de poliéster revestida a PVC mas com malha aberta sobre a camada de membrana exterior da cobertura peneumatica. A adição desta membrana permitiu reduzir o ruído de impacto provocado pela ação da queda de chuva em 10 decibéis. Adicionalmente, esta membrana também permitiu reduzir os ganhos solares, evitando deste modo o sobreaquecimento do espaço interior. A utilização de um sistema composto por 3 camadas de membrana permitiu melhorar as condições térmicas do espaço interior. Pois comparativamente com o sistema de 2 camadas de membrana existente era possível atingir um valor de U de 2.94 enquanto o sistema de 3 camadas permite atingir um valor de U de 1.96.

Foi possível manter todas as unidades de insuflação de ar, tubagens e perfis de aço existentes. Após a instalação das almofadas, estas foram seladas com silicone em torno do seu perímetro e instalaram-se cabos de arame para proteção contra a ação de pássaros.





Fonte:  
ARCHITEN LANDRELL (2016). "University of West London"; disponível em: <http://www.architen.com/projects/university-westlondon/> [Acedido a 17 de fevereiro de 2016]





**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**    **C.33**

Conceito de intervenção:

	<b>Título:</b> Ano de construção existente: Ano de intervenção: Tipo/ função do edifício: Especialidades:	<b>Palacio de Minería</b> 1813/ 2002 2011 Multiusos/ Cultural Arquitetura: J.G. Oliva, M. Ontiveros & I. Ortiz Transformação e instalação: Carpas y Lonas El Carrusel
	<b>Localização:</b> Temperatura média anual: Precipitação média anual: Contexto climático:	México, América 15.9 °C 625 mm Sub-tropical. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dwb
	<b>Tipo de intervenção:</b> Requisitos funcionais:	Renovação Reversibilidade, controlo luminoso e peso
	<b>Membrana:</b> Área: Fabricante:	Membrana de poliéster revestida a PVC 1225 m² Précontraint 705 e 1102 T2/ Serge Ferrari

**Descrição:**  
O Palacio de Minería localiza-se no centro histórico da cidade do México e foi projetado pelo arquiteto Manuel Tolsá; é considerado uma obra de referência do neoclassicismo da América Latina e como tal é classificado como património que deve ser preservado. Este edifício acolhe várias instituições e o seu pátio com 26x26m é frequentemente utilizado para diversos usos sociais, culturais, comerciais e académicos.

**Solução**  
De modo a fornecer proteção às variáveis climáticas, em 2002 projetou-se e construiu-se uma cobertura em membrana para este pátio (um ícone da arquitetura têxtil no México. Contudo, nove anos depois, apesar da estrutura structure se encontrar em boas condições mecânicas, a aparência da membrana estava muito danificada devido ao elevado nível de poluição e falta de manutenção regular. Por isso, a cobertura foi substituída em 2011, por uma membrana de poliéster revestida a PVC.

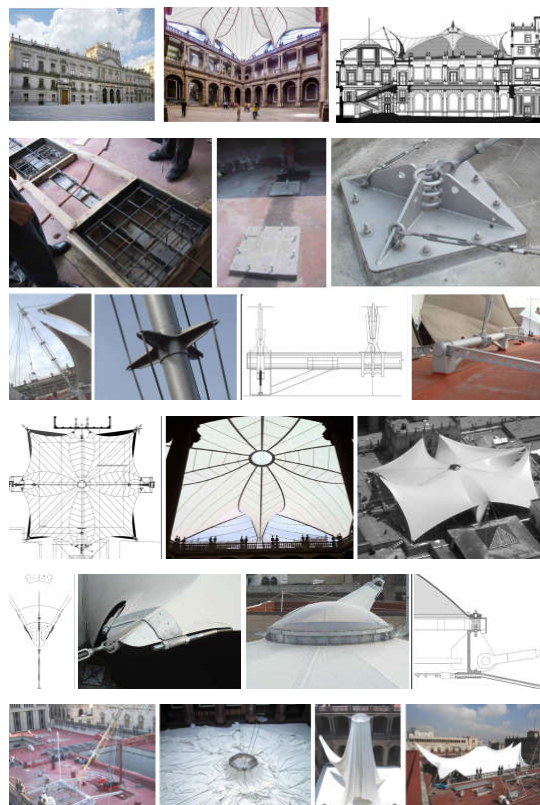
O requisito de não alterar a estrutura existente ou a aparência externa, significa que nenhum elemento estrutural da cobertura em membrana pode ser visto da rua. Isto implicava que a intervenção deveria ser muito leve. Além disso, a fim de reduzir ao mínimo o impacto, as placas de ancoragem dos mastros foram embutidas na laje de betão (construída em 1973 durante um trabalho de reabilitação para substituir as a cobertura com estrutura de madeira e revestido a telhas cerâmicas). Os mastros, com 9 m de altura, são pré-esforçados com cintas para reduzir a flexão e sua seção transversal; presos na CHS, atuando como vigas que se estendem entre as placas de ancoragem.

A cobertura em membrana translúcida, com 35 x 35 m, foi produzida numa só peça de modo a evitar a execução de ligação entre juntas in situ, para reduzir a mão de obra, e garantir mais estanqueidade. A pormenorização da cobertura em membrana é reduzida às suas extremidades e à articulação com a claraboia. Para a instalação, a membrana e a claraboia foram estendidas no pavimento do pátio, e os mastros foram erguidos desde a cobertura existente. O levantamento foi auxiliado por motores elétricos, cabos e polias.

Este edifício histórico foi melhorado o suficiente através de uma solução com membrana, concebida de acordo com os princípios de reabilitação em edifícios património, de modo a preservar a sua configuração arquitetónica e integridade estrutural. Como tal, a cobertura em membrana foi concebida para ser facilmente montada e desmontada; é leve e flexível o suficiente para se sobrepor à estrutura existente sem reforços especiais. Adicionalmente, se a cobertura for removida, todos os seus elementos podem desaparecer, e o pátio pode retomar o seu estado original.






Fonte: Llorens & Zannelli (2016)

 Figuras:



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**    **C.34**

Conceito de intervenção:

	<b>Título:</b> Ano de construção existente: Ano de intervenção: Tipo/ função do edifício: Especialidades:	<b>Biblioteca Nacional Beyazit</b> 1506 2015 Biblioteca e cultural Arquitetura: Tabanlıoğlu Instalação: ONART
	<b>Localização:</b> Temperatura média anual: Precipitação média anual: Contexto climático:	Istanbul, Turquia, Europa-Ásia 11.6°C 383 mm Temperado continental. Classificação climática Köppen-Geiger: Csa
	<b>Tipo de intervenção:</b> Requisitos funcionais:	Ampliação Reversibilidade, proteção, visual
	<b>Membrana:</b> Área:	Membrana dupla de ETFE 260m²
	<b>Custo global (material + instalação):</b>	Aprox. 600 €/m² (estimativa)

**Descrição:**  
Cobertura do claustro de um edifício classificado como património para ampliar a área útil. A estrutura metálica que divide esta grande cobertura, é suportada por mastros suspensos inferiormente.






Fonte: <http://www.etferoof.com/projects/>

 Figuras:



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA e FACHADA**    **C.35**

Conceito de intervenção:

	<b>Título:</b> Ano de construção existente: Ano de intervenção: Tipo/ função do edifício: Especialidades:	<b>Estação Carlisle</b> 1847 2016 Transportes Arquitetura: Jefferson Sheard Instalação: Vector Foiltec
	<b>Localização:</b> Temperatura média anual: Precipitação média anual: Contexto climático:	Ingloterra, Europa. 11.1 °C 621 mm Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb
	<b>Tipo de intervenção:</b> Requisitos funcionais:	Renovação Proteção e visual/ luminoso
	<b>Membrana:</b> Área:	Membrana simples de ETFE 10500 m²
	<b>Custo global (material + instalação):</b>	Aprox. 300 €/m² (estimativa)

**Descrição:**  
A Estação de Comboios de Carlisle é um edifício classificado como património. A estação tinha uma cobertura original em vidro, mas encontrava-se deteriorado e numa condição frágil. Isso representava um risco de queda do vidro sobre os ocupantes e as áreas operacionais, abaixo da cobertura. A reparação da cobertura foi categorizada como obras de emergência. A preservação do edifício exigia uma solução de reabilitação que não alterasse as características arquitetónicas originais, e que permitisse que a sua função não fosse interrompida.

**Solução:** "Manter a estética de uma cobertura de vidro"  
Parte da solução constituiu em reduzir as sobrecargas impostas à estrutura original, através da substituição da pesada cobertura de vidro por uma cobertura leve em membrana de ETFE (sistema Texlon®). Em cada painel em membrana de ETFE é soldado um "keder" ao longo do seu perímetro para formar uma aresta que pode ser dobrada sobre um perfil. A montagem perimetral permite uma conexão estrutural entre o painel de ETFE e a estrutura perimetral de alumínio. Para o elemento de fachada do edifício, os montantes verticais espaçados ao longo dos painéis ETFE apresentam superfícies côncavas (nas quais são fixas tampas convexas, encaixando e tensionando deste modo o perímetro da membrana de ETFE).  
Os aspectos de inovação conceitual desta intervenção consiste em usar a membrana de ETFE de um modo que garanta que a estação seja renovada o mais física e esteticamente semelhante ao estado original. Tradicionalmente, o ETFE não é usado para replicar o vidro, mas com a utilização do sistema Texlon® ETFE, concebido como um painel simples, a mantém-se a estética de uma cobertura de vidro.  
Fonte: <http://www.vector-foiltec.com/projects/carlisle-train-station-texlon-etfe/>

 Figuras:



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.36**  
Integração

**Her Majesty's Treasury**

Título: 1917  
Ano de construção existente: 2002  
Ano de intervenção: 2002  
Tipo/ função do edifício: serviços  
Especialidades: Arquitetura: Foster + Partners

Localização: Inglaterra, Europa  
Temperatura média anual: 11 °C  
Precipitação média anual: 621 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação Köppen-Geiger: Cfb

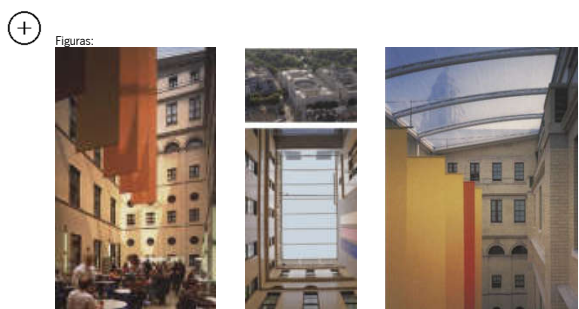
Tipo de intervenção: Alteração  
Requisitos funcionais: Proteção, regulação térmica e luminica

Membrana: Membrana dupla de ETFE  
Área: 620 m²

€ Custo global (material + instalação): Aprox. 450 €/m² (estimativa)

+ Descrição: Encerramento de desvãos com cerca de 20m de altura, com coberturas pneumáticas em membrana de ETFE – enquanto estratégia de regulação térmica passiva dos espaços subjacentes.

Fonte: Le Cuyet (2008)



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.37**  
Integração

**Colégio Ketteler**

Título: Anos 60  
Ano de construção existente: 2009  
Ano de intervenção: 2009  
Tipo/ função do edifício: Educativo  
Especialidades: Arquitetura: Hirschmüller + Schmidt  
Instalação: Temme Obermeier

Localização: Mainz, Alemanha, Europa  
Temperatura média anual: 9.1 °C  
Precipitação média anual: 570 mm  
Contexto climático: Continental húmido. Classificação Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Alteração  
Requisitos funcionais: Proteção, regulação térmica e luminica

Membrana: Membrana tripla de ETFE  
Área: 620 m²

€ Custo global (material + instalação): Aprox. 600 €/m² (estimativa)

+ Descrição: O Colégio Ketteler foi projetado pelo arquiteto Hans-Joachim Lenz. Este edifício está associado ao estilo brutalista da arquitetura dos anos 60. O edifício é construído em betão armado e funciona atualmente como escola. Apresentava necessidades de modernização/ melhoria do desempenho térmico da cobertura, que se encontrava danificada.

**Solução**  
Optou-se por encerrar o pátio existente com uma cobertura em membrana pneumática de ETFE, que deu ao edifício não apenas uma nova imagem, mas também uma considerável melhoria ao seu desempenho energético.

Fonte:  
<http://www.to-experts.com/en/projects/ketteler-kolleg-mainz-pneumatisches-etfe-dach>  
<http://architectuul.com/architecture/ketteler-college>



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.38**  
Sobreposição

**Galeria Nacional de Londres**

Título: 1823  
Ano de construção existente: 2003  
Ano de intervenção: 2003  
Tipo/ função do edifício: Museu  
Especialidades: Arquitetura: Purcell Miller Tritton

Localização: Londres, Inglaterra, Europa  
Temperatura média anual: 11 °C  
Precipitação média anual: 621 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Renovação  
Requisitos funcionais: Proteção, redução de peso e melhoria das condições luminicas

Membrana: Membrana dupla de ETFE

€ Custo global (material + instalação): Aprox. 450 €/m² (estimativa)

+ Descrição: Colocação de cobertura pneumática de membrana (tipo 2ª pele) sobre as claraboias originais.

Fonte: LeCuyet (2008)



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.39**  
Reposição/ Substituição

**Sede Jean-Paul Gaultier**

Título: Século XIX  
Ano de construção existente: 2004  
Ano de intervenção: 2004  
Tipo/ função do edifício: Serviços  
Especialidades: Arquitetura: Moatti - Rivière

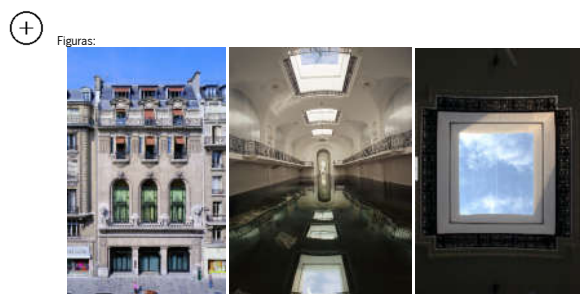
Localização: Paris, França, Europa.  
Contexto climático: Temperado. Classificação Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Renovação  
Requisitos funcionais: Visual, iluminação natural

Membrana: Membrana dupla de ETFE

€ Custo global (material + instalação): Aprox. 450 €/m²

+ Descrição: Restauração e conversão de um edifício do século XIX, com a criação de salões de moda, salões de beleza, oficinas de alta costura e escritórios. As claraboias originais em vidro foram substituídas por claraboias pneumáticas, em membrana dupla de ETFE.



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.40**  
Reposição

**Estação Comboios Wrocław**

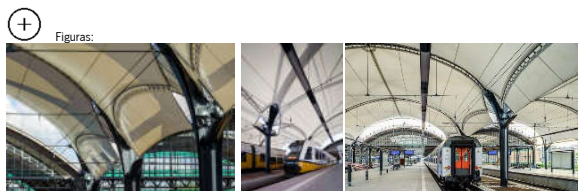
Título: 1904  
Ano de construção existente: 2013  
Ano de intervenção: 2013  
Tipo/ função do edifício: Transportes  
Especialidades: Arquitetura: Grupa 5  
Engenharia: K2 engineering

Localização: Polónia, Europa  
Temperatura média anual: 8.4 °C  
Precipitação média anual: 551 mm  
Contexto climático: Temperado. Classificação Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Renovação  
Requisitos funcionais: Proteção, redução de peso, luminicos

Membrana: Membrana de fibra de vidro revestida a PTFE (FR 1400 MEHATOP F, tipo IV)  
Área: 2856 m²  
Fabricante: Valmex

Descrição:  
**Solução**  
A estrutura da cobertura de membrana, para a estação de comboios estio Arte Nova, compõem-se por 12 peças de 21m x 11.4m. A dimensão total da cobertura é de 83m x 34m. Os elementos estruturais são longitudinais, com arcos perpendiculares e diagonais entre si (tubos de 36 cm). A forma dos novos arcos acompanha os originais. Foram aplicadas braçadeiras/ amarrações na superfície da membrana. A cobertura situa-se numa zona onde neva muito, com uma sobrecarga estimada de 1.05 kN/m². Por isso, segundo a legislação Polaca, relativamente à remoção de neve acumulada, nas zonas inferiores da membrana, nas colunas, introduzem-se grandes aberturas. A membrana é conectada na parte inferior dos arcos longitudinais principais. Deste modo, a estrutura metálica original (arcos) é visível pelo interior da plataforma nos dias de sol, como sombras sobre a membrana.



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.41**

**Claustro da Abadia de Sables D'Olonne**

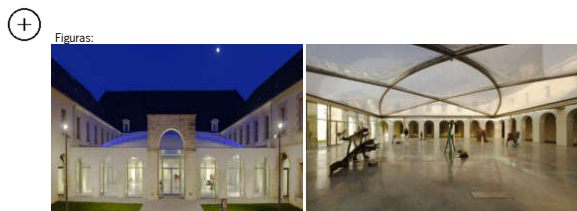
Título: Século XVIII  
Ano de construção existente: 2013  
Ano de intervenção: 2013  
Tipo/ função do edifício: Cultural  
Especialidades: Arquitetura: SABA Architects  
Engenharia: Groupe Alto  
Instalação: IASO, Llerida

Localização: França, Europa  
Temperatura média anual: 11.0 °C  
Precipitação média anual: 659 mm  
Contexto climático: Temperado. Classificação Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Ampliação  
Requisitos funcionais: Regulação térmica, luminica, visual. Reversibilidade

Membrana: Membrana tripla de ETFE  
Área: 550 m²  
Custo global (material + instalação): Aprox. 450 €/m² (estimativa)

Descrição:  
**Solução**  
- Membrana tripla de ETFE;  
- sub-estrutura metálica;  
- 28 metros de vão livre;  
- Quatro arcos cruzados que aludem à linguagem medieval do edifício pré-existente e que dão forma a uma estufa piramidal.



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.42**  
integração

**Julianus Shopping**

Título: Séc. XVIII  
Ano de construção existente: 2008  
Ano de intervenção: 2008  
Tipo/ função do edifício: Comercial e cultural  
Especialidades: Arquitetura: Nomad Concept (Amandus Van Quaille)  
Transformação e instalação: Nomad Concept e Flontex Europe

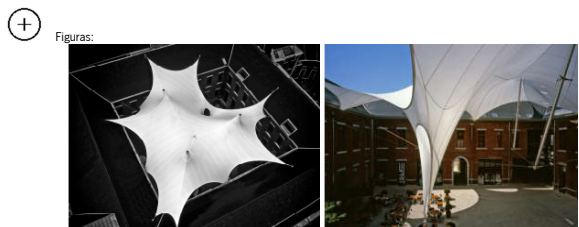
Localização: Bélgica, Europa  
Temperatura média anual: 10.7 °C  
Precipitação média anual: 1005 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo

Tipo de intervenção: Alteração  
Requisitos funcionais: Proteção, visual

Membrana: Membrana de PTFE  
Área: 1369 m²  
Peso: 1080 g/m²  
Fabricante: Sefar Tenara 4T40

Custo global (material + instalação): Aprox. 260 €/m² (estimativa)

Descrição:  
Grande estrutura com extensão livre de 37m x 37m, sustentada por 3 mastros de 14 metros de altura, equilibrando-se em cabos de aço. Nenhum mastro toca o chão para manter o espaço do pátio livre.



**ELEMENTO CONSTRUTIVO COBERTURA**

Conceito de intervenção:

**C.43**

**St Bartholomew Hospital**

Título: Século 18  
Ano de construção existente: 2013  
Ano de intervenção: 2013  
Tipo/ função do edifício: Hospital  
Especialidades: Arquitetura: Hok Architecture

Localização: Londres, Inglaterra; Europa  
Latitude/ longitude: 51° 30' N / 0° 7' O  
Altitude: 25 m  
Temperatura média anual: 11.1 °C  
Precipitação média anual: 621 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Ampliação  
Requisitos funcionais: Leveza, controlo/regulação luminico, térmico e acústico  
Sistema de ancoragem metálico em alumínio  
Tripla de ETFE  
405 m²  
ETFE: 1.05 kg/m²  
ETFE + sistema de ancoragem em alumínio: 4.37 kg/m²  
Fabricante: Architen Landrell  
Tempo de instalação: 1 semana  
Custo global (material + instalação): 1250 €/ m² (fonte: Architen Landrell por Amy Wilson)  
Inclui sistema de impresso inteligente

Descrição:  
Este edifício é o hospital mais antigo de Londres, fundado em 1123, e é o único que ocupa a sua localização existente. A instalação de uma cobertura em ETFE faz parte do projeto de extensão deste edifício.

**Solução**  
As principais vantagens desta solução são:

- Sistema inteligente de impressão**  
Com 1% do peso do vidro, a membrana ETFE é uma alternativa económica e com reduzido impacto ambiental e que permite atingir maior flexibilidade comparativamente ao vidro. O sistema de impressão inteligente usa um complexo sistema de controlo em 3 camadas de membrana ETFE. A camada superior e inferior são impressas através de um processo denominado por "Fritting" (nitricação). O padrão utilizado é um xadrez. Foram instalados, na cobertura, sensores de luminosidade que se encontram conectados às unidades de insuflação de ar para controlo luminico do espaço interior. Este controlo é feito do seguinte modo: quando se aumenta a pressão do ar entre a camada superior e a camada média a luz passa através do espaço entre os padrões impressos; quando a pressão do ar é adicionada à câmara inferior, devido à existência de um negativo do padrão da camada superior, a transmissão de luz para interior do edifício é reduzida.
- Regulação da pressão**  
Foram instalados sensores para monitorizar a pressão nas membranas (parte exterior e interior da almofada) Isto permite que a pressão de ar seja ajustada com base em fatores externos, como vento, chuva e neve. O ajuste da pressão é feito em 5 segundos. O sistema é tão eficiente que consome menos energia do que uma lâmpada de 100W.
- Trabalhos preparatorios**  
Trabalhar no topo de um átrio de seis péis direitos possui alguns riscos. Por isso, para garantir a segurança dos trabalhadores, foi instalado o sistema "SpanSet Walkabout". Este sistema cria uma plataforma de trabalho constituída por cintas e uma membrana de poliéster revestida a PVC.



**ELEMENTO CONSTRUTIVO**  
**FACHADA**

Conceito de intervenção: Proteção de passagem pedonal sem perda de iluminação natural

**F.01**

**Título:** Centro de Gerontologia  
**Ano de construção existente:** 1940  
**Ano de intervenção:** 2003  
**Tipo/ função do edifício:** Saúde  
**Especialidades:** Engenharia: Wörsching GmbH & Co. e KG, Starnber; Arquitetura: Siegert

**Localização**  
**Localização:** Bad Tölz, Alemanha; Europa  
**Latitude/ longitude:** 47°45'41.31"N / 11°33'54.55"E  
**Altitude:** 670 m  
**Temperatura média anual:** 7.9 °C  
**Precipitação média anual:** 981 mm  
**Contexto climático:** Continental Húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb

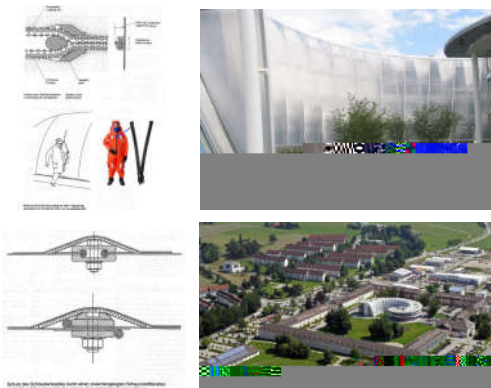
**Tipo de intervenção:** Alteração  
**Requisitos funcionais:** Proteção conta as variações climáticas, aumento do isolamento térmico, ganhos luminosos

**Membrana (tipo/ subestrutura):** Membrana ETFE simples; subestrutura metálica.  
**Área:** 1550 m<sup>2</sup>  
**Fabricante:** Hightex  
**Custo global (material + instalação):** 225 €/m<sup>2</sup>

**Descrição:**  
 O edifício existente possui passagens pedonais ao longo dos três pisos da sua fachada e necessitava de melhorias higrotérmicas e de proteção contra as condições climáticas.

**Solução**  
 Este edifício o primeiro a adotar uma fachada em ETFE. O critério adotado para esta intervenção foi promover uma fachada com elevada transparência e uma estrutura mínima para oferecer uma visão ininterrupta desde os corredores existentes para o exterior. Segundo este critério optou-se por uma solução de fachada em membrana ETFE transparente que permite a passagem de luz natural para o interior do edifício existente e devido à sua extrema leveza é possível aplicá-la em grandes painéis de fachada. Os raios ultra violeta são efetivamente refletidos permitindo uma eficiente regulação térmica. Devido às propriedades repelentes desta membrana é possível minimizar os custos de manutenção com a limpeza da fachada. Segundo Cremers (2011) a impressão de um padrão de pontos prateados sobre a membrana transparente ETFE serve para dispersar a luz e proteger dos raios UV. A membrana de fluoropolímero ETFE é correntemente utilizada em estruturas pneumáticas pré-tensadas, contudo possui uma gama de propriedades que a vocacionam para aplicação em coberturas e fachadas de edifícios, tais como:

- Elevada durabilidade, acima dos 20 anos.
- Retardância à chama (classificação B1) de acordo com a norma DUN 4102 e outras normas internacionais. Estudos anteriores Troitzsch (2004) demonstrou que o risco de queda desta membrana num incêndio é reduzido devido ao reduzido peso específico deste material (1/40 menos do que o vidro, 1750kg/m<sup>3</sup>), utilizado com espessuras que variam entre 0,08 e 2,5mm).
- Se for desenhada e instalada corretamente, a sujidade acumulada pode ser removida apenas através da água da chuva. Assim esta membrana fica livre de manutenção. Contudo requer inspeções para detetar eventuais defeitos (causados por exemplo pelo impacto de objetos afiados) e repará-los logo que possível. Também se recomenda que o perímetro de tensão e da estrutura de suporte seja inspecionado regularmente.



Fonte:  
 CREMERS, J. (2011). "Soft skins – innovative foil and textile architecture". Technical transactions, issue 11, year 108. Politécnico Krakowskiej, Polónia.  
 TROITZSCH, J. (Ed.) (2004). "Plastics Flammability Handbook, Principles, regulations, testing and approval", Munique, Alemanha.  
 BINE (2012). "Lightweight envelopes for old buildings", Projektinfo 08/ 2012. Disponível em: [http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos\\_2012/Projekt\\_08\\_2012/Projektinfo\\_0812\\_engl\\_inernetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos_2012/Projekt_08_2012/Projektinfo_0812_engl_inernetx.pdf) [Acedido a 14 de fevereiro de 2016]  
 KÖPF, M. (2011). "Richter-Schelle für den Landkreis". Disponível em: <http://www.sueddeutsche.de/muenchen/wolfratshausen/klage-gegen-umlagebescheide-richter-schelle-fuer-den-landkreis-1.1111151> [Acedido a 14 de fevereiro de 2016]

**ELEMENTO CONSTRUTIVO**  
**FACHADA**

Conceito de intervenção: Alternativa ao reboco armado delgado no sistema ETICS

**F.02**

**Título:** Casa em Munique  
**Ano de construção existente:** 1956  
**Ano de intervenção:** 2012  
**Tipo/ função do edifício:** Habitação  
**Especialidades:** Arquitetura: Stefan Krötsch  
 Engenharia: IB Kaspar & Teuteberg  
 Física das construções: IB Schwinghammer

**Localização**  
**Localização:** Munique, Alemanha; Europa  
**Latitude e longitude:** 48°20'N e 11°48'E  
**Altitude:** 521 m  
**Temperatura média anual:** 8.0 °C  
**Precipitação média anual:** 930 mm  
**Contexto climático:** Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb

**Tipo de intervenção:** Renovação  
**Requisitos funcionais:** Térmicos e impermeabilização

**Membrana (tipo):** Membrana de polietileno simples; subestrutura em madeira  
**Características:** Resistente aos raios UV, água e ácidos;  
 Resistente às condições climáticas;  
 Dimensionalmente estável e durabilidade da cor ao longo da vida útil;  
 Fator de proteção UV: 80 - 90%;  
 Peso: aprox. 200g/ m<sup>2</sup>  
 Manufaturável em todos os tamanhos

**Área:** 240 m<sup>2</sup>  
**Fabricante/instalador:** Konak kunststoffverarbeitung  
**Custo global (material+ instalação):** 30 €/ m<sup>2</sup>  
 7000 € tota da fachada

**Descrição:**  
 O objetivo desta intervenção foi reabilitar o edifício para alcançar o máximo de eficiência e conforto com um orçamento reduzido. Apresenta a seguinte patologia: fraco desempenho térmico da fachada, pontes térmicas, reduzida estanqueidade ao ar e água

**Solução**  
 Para além das intervenções realizadas em outros elementos construtivos do edifício, na fachada optou-se pela aplicação de manta e lâ de rocha (12 cm espessura) revestida com uma membrana têxtil de polietileno fixa a uma subestrutura de madeira sobre a parede existente.

Comparativamente ao reboco armado delgado utilizado no sistema ETICS – correntemente utilizado na reabilitação de edifícios – caso o revestimento em membrana de polietileno seja rasgado, este pode ser facilmente substituído e reciclado.

Fonte:  
 KROETSCH, S. (2016). "Graues Haus". Disponível em: <http://www.kroetsch.net/architektur/index.php?id=6&art=2&typ=no&> [Acedido a 11 de Janeiro de 2016]  
 Disponível em: <http://issuu.com/detail-magazine/docs/bk-green-d-2-2013/e-8753616/6044853> [Acedido a 11 de Janeiro de 2016]  
 KONAK (2016). "Fassadennetz". Disponível em: <http://www.konak-netze.com/#fassade/1.han> [Acedido a 11 de Janeiro de 2016]



Figuras: Antes (ano 1956)

Depois (ano 2012)

Secção vertical da fachada intervenionada:  
 b) Parede exterior (U = 0.13 W/m<sup>2</sup> K) (da esquerda para a direita):  
 Membrana polietileno; ripas de 30 x 50 mm; caixa-de-ar; 2 x barrotes de madeira com 60 x 120 mm, cavidades preenchidas com lâ de rocha; reboco (existente), melhoria da estanqueidade, 30 mm; parede de alvenaria (existente), 300 mm; gesso (existente parcialmente), 15 mm.





## ELEMENTO CONSTRUTIVO FACHADA

## F.03

Conceito de intervenção: Alternativa ao reboco armado delgado no sistema ETICS



**Título:** Edifício EDF  
**Ano de construção existente:** 1958- garagem; 1970 – ampliação vertical de 4 pisos para escritórios  
**Ano de intervenção:** 2011  
**Tipo / função do edifício:** Serviços  
**Especialidades:** Arquitetura: Jean-Paul Viguier et Associés; Engenharia mecânica e civil: AGIBAT; Engenharia ambiental: SE&ME; Economia: Sletec



**Localização:** Lyon, França; Europa  
**Latitude e longitude:** 45°43'N e 4°56'E  
**Altitude:** 177 m  
**Temperatura média anual:** 11,6 °C  
**Precipitação média anual:** 763 mm  
**Contexto climático:** Temperado marítimo. Classificação climática Köppen-Geiger: Cfb



**Tipo de intervenção:** Renovação  
**Requisitos funcionais:** Melhoria do desempenho higrtermico e da estanquidade à água.



Membrana (tipo/ subestrutura): Membrana sintética de impermeabilização em poliolefina termoplástica (TPO); membrana têxtil em malha aberta revestida; subestrutura metálica



**Área:** 3400 m<sup>2</sup>



**Fabricante:** Balnchet, Ferrari e Firestone



**Tempo de execução:** 48 semanas (70 m<sup>2</sup> por semana; 1,8 m<sup>2</sup>/ hora)



**Custo global: (material + instalação + certificação)** 140 €/ m<sup>2</sup> / 477 760 € total



**Descrição:** Este projeto consistiu na conversão de um edifício com função de garagem num edifício para escritórios.

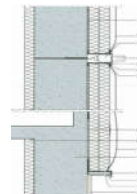
**Solução**  
Com a finalidade de aumentar o desempenho térmico do edifício, fornecendo ao mesmo tempo um aspeto contemporâneo (de acordo com a renovação urbana em decurso no quarteirão onde se insere o edifício), foi aplicado isolamento térmico sobre as paredes exteriores existentes. Para revesti-lo optou-se por uma membrana impermeabilizante de poliolefina. Esta foi fixada através de cantoneiras e de fixações pontuais (com frção de luminárias) criando um efeito de *captions*.

Este sistema foi desenvolvido pela empresa Blanchet. Foram desenvolvidos vários protótipos deste sistema para a realização testes experimentais (estanquidade, resistência ao vento, etc.), junto do CSTB (Centre Scientifique et technique du bâtiment) e emissão de um certificado de fiabilidade – ATEX (Application technique experimentale). O sistema consiste num tipo de "estofa" que combina dois tipos de isolamento: um rígido (colocado sobre a parede existente) e outro menos denso, colocado sobre o anterior e revestido por uma membrana impermeável. Esta membrana é tensionada pelos aros especificamente desenvolvidos para as janelas e pelas luminárias Led que pontuam a fachada. Esquemáticamente, uma das inovações deste sistema consiste em permitir a execução de 24 m de fachada (em altura) sem nenhuma junta horizontal. A estanquidade das juntas verticais (existentes a cada 1,2m de largura) é assegurada por soldagem térmica da membrana. No eixo dos algarzes o recobrimento dos mesmos é feito sem juntas. A tensão da membrana é obtida por fixações mecânicas nas partes superior, inferior e laterais (nas quatro direções) e pelas luminárias encastradas no meio.

**Particularidades:** Para suportar grandes esforços, as janelas foram reforçadas por cantoneiras em aço. O corte final da membrana, em torno das janelas foi executado com uma ferramenta de corte in situ. A colocação da membrana nos cantos também se revelou uma operação delicada devido à assimetria no posicionamento das janelas.



Figuras:



1. Membrana para o apoio sobre parede de betão;
2. Membrana impermeabilizante em poliolefina;
3. Luminária Led encastrada (Ø 15 cm);
4. Tubo difusor em plásticos macios;
5. Remate em poliamida;
6. Vedante;
7. Suporte metálico para a luminária;
8. Bucha de frção do isolamento;
9. Isolamento interior;
10. Membrana impermeabilizante em poliolefina;
11. Estrutura de betão;
12. Paredaria;
13. Perfil de remate do isolamento;
14. Escavado dos condensados;
15. Reboco



Antes (ano 1958)



Fonte:

MENARD, J. (2013). "Lyon, la métamorphose d'un garage en bureaux high-tech", *Les cahiers techniques du bâtiment*, n° 323, Abril. Disponível em: <http://www.viguier.com/en/publication/57/Le-Cahier-Technique-du-Batiment-323> [Acedido a 11 de Janeiro de 2016]

VIGUIER, J. (2016). "Rehabilitation of an office building for EDF". Disponível em: <http://www.viguier.com/en/project/29/Rehabilitation-of-an-office-building-for-EDF> [Acedido a 11 de Janeiro de 2016]

LAMARRE, F. (2012). "In Lyon, building EDF pushes the limits of renovation", *Les Echos*, Maio Disponível em: <http://www.viguier.com/en/publication/3/Le-Echos-immobilier> [Acedido a 11 de Janeiro de 2016]

MENARD (2012). "Front facade", *AMC*, n° 217. Disponível em: <http://www.viguier.com/en/publication/14/AMCn217> [Acedido a 11 de Janeiro de 2016]

LAMARRE, F. (2012). "Warm jacket Building", *Architecte*, n° 358. Disponível em: <http://www.viguier.com/en/publication/40/Architecte-n358> [Acedido a 11 de Janeiro de 2016]



Depois (ano 2011)

## ELEMENTO CONSTRUTIVO FACHADA E TETO

## F.04

Conceito de intervenção: Adição de envolvente protetora + Reabilitação energética



**Título:** Biblioteca Nacional King Fahad  
**Ano de construção existente:** 1970  
**Ano de intervenção:** 2013  
**Tipo/ função do edifício:** Serviços/ biblioteca  
**Especialidades:** Arquitetura: Gerber Architekten  
Engenharia civil: Bollinger & Grohmann Ingenieure



**Localização:** Riade, Arábia Saudita; Ásia  
**Latitude e longitude:** 24°42'N e 46°44'E  
**Altitude:** 587 m  
**Temperatura média anual:** 25,4 °C  
**Precipitação média anual:** 111 mm  
**Contexto climático:** Desértico. Classificação climática de Köppen-Geiger: BWh



**Tipo de intervenção:** Ampliação  
**Requisitos funcionais:** Proteção solar, aumento do isolamento térmico, iluminação natural



Membrana (tipo/ subestrutura): Membrana fibra de vidro revestida a PTFE (TENARA®) simples; subestrutura metálica.



**Área:** 12 000 m<sup>2</sup> (fachada)



**Fabricante:** Sefar (Membrana textile); Pfeifer (estrutura de cabos tensionados)



**Custo global (material + instalação):** 930 €/ m<sup>2</sup>



**Descrição:**  
**Solução**  
O edifício existente foi submetido a uma reabilitação energética. Para tal, foi construído um novo edifício com que incorpora o edifício existente dos anos 70. A nova construção forma um perímetro cúbico entorno do edifício existente conferindo-lhe proteção permanente (a todos os níveis: contra as condições climáticas, etc.)

Para conferir proteção solar, foi construído um revestimento composto por membranas rombóides suportadas por estruturas de cabos tensionados, que reinterpretem estruturas das tradicionais tendas árabes (com a tecnologia contemporânea) bem como a (filigrana) tradicional da arquitetura do Médio Oriente, com um jogo de zonas opacas e transparentes. Estes elementos de proteção solar, no conjunto têm apenas um fator de penetração da luz solar de 7% e permitem que ao mesmo tempo seja possível ter contacto visual do interior para o exterior e vice-versa.

Dado às temperaturas exteriores acima dos 50°C, a fachada em membrana, foi otimizada em relação ao percurso solar local mediante a refração tridimensional da luz, combinando proteção solar requerida com o máximo de penetração e transparência. Contudo, foi necessário adicionar a esta fachada um sistema de ventilação e de arrefecimento (pelo pavimento) para alcançar o aumento do conforto térmico e a redução do consumo energético.

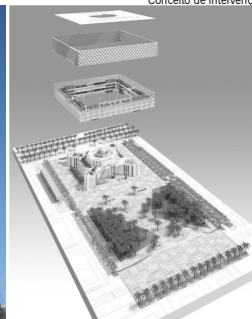
Fonte: ARCHDAILY (2016). "King Fahad National Library". Disponível em: <http://www.archdaily.com/469088/king-fahad-national-library-gerber-architekten> [Acedido a 14 de Janeiro de 2016]



Figuras:

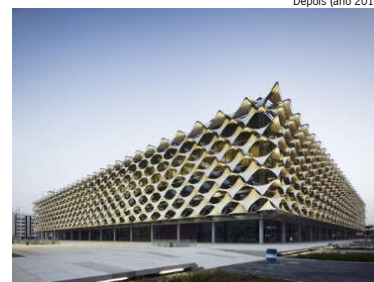


Antes (edifício existente - anos 70)



Conceito de intervenção

Depois (ano 2013)



**ELEMENTO CONSTRUTIVO**  
**FACHADA**



Conceito de intervenção: Proteção de passagem pedonal sem perda de iluminação natural

Título: **Westraven**  
Ano de construção existente: 1975  
Ano de intervenção: 2007  
Tipo/ função do edifício: Serviços/ escritórios  
Especialidades: Arquitetura: Cepezed

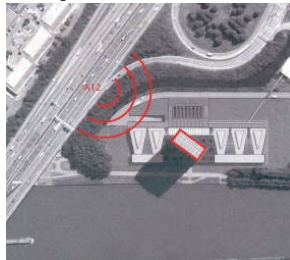
Localização: Utrecht, Holanda ; Europa  
Latitude/ longitude: 52°6'N / 5°7'E  
Altitude: 5 m  
Temperatura média anual: 9,4°C  
Precipitação média anual: 802 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Renovação  
Requisitos funcionais: Proteção contra o vento, ventilação e proteção solar  
Membrana (tipo/ subestrutura): Membrana de fibra de vidro com malha aberta revestida a PTFE. Simples. Tipo Duraskin® B18971 - Glass Fibre EC 6. Subestrutura em alumínio  
Área: 3500 m²  
Propriedades: 450g/m²; 40% transmissão de luz. Resistência ao fogo A2  
Fabricante: Verseidag-Indutex  
Custo global (material + instalação): 60 €/m²

Descrição:  
O presente edifício foi construído para albergar a nova sede do Departamento de Obras Públicas Holandês (RWS) que tem grande respeito pela sustentabilidade e inovação. Após uma análise exaustiva, entre construir um novo edifício ou renovar o edifício existente que possuía o "síndrome do edifício doente", a RWS concluiu que a renovação era a melhor opção.

**Solução**  
A fachada norte da torre foi aplicada uma 2ª fachada de vidro, para bloquear a poluição sonora. Às restantes fachadas foi aplicada uma alternativa ao vidro: uma membrana têxtil mais leve e mais económica (mas sem capacidade de isolamento acústico). A estrutura da membrana, com trama aberta oferece proteção contra o vento e faz com que seja possível trabalhar com as janelas abertas, mesmo nos andares superiores. Deste modo, a cavidade entre a fachada existente e a fachada têxtil torna-se numa zona amortecedora ("buffer zone") e a trama da membrana permite que se gerem pequenos "remoinhos de vento" por trás do tecido de modo a neutralizar o efeito do vento (Figura 03). Por outro lado, este efeito permite que os escritórios sejam ventilados diretamente pelo exterior. Para além disto também funciona como protetor solar, sem bloquear a visão do interior para o exterior.  
A membrana foi tensada entre balaustres metálicos através de tubos de alumínio, fazendo uso das instalações existentes para ancoragem dos equipamentos de limpeza de vidros.  
Uma vez que esta solução foi aplicada pela 1ª vez, no âmbito de uma intervenção de reabilitação de um edifício, foram realizados testes para todos os requisitos técnicos e funcionais. Os testes demonstraram que esta 2ª pele em membrana reduz suficientemente as forças do vento e a ação dos raios UV (CEPEZED, 2016).

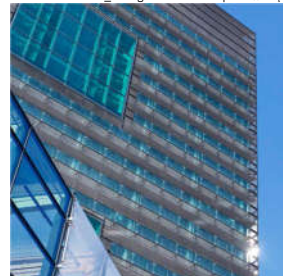
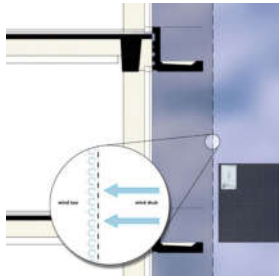
Fonte:  
VERSEIDAG-INDUTEX (2010). "Duraskin® B18909", Verseidag-Indutex.  
CRONE, J. (2008). "Innovatieve waterstaatsarchitectuur". Bouwwereld, #4, p. 46-55.  
CEPEZED (2016). "Second skin facade"; disponível em: <http://www.cepezed.nl/en/projects/58-second-skin-facade>; [Acedido a 10 de Março 2016]



01\_Edifício existente antes da renovação.



02\_Vista geral do edifício após renovação



03\_Seção demonstrativa do conceito da fachada em 2D e 3D

04\_Fachada do edifício com membrana.

**TIPO DE INTERVENÇÃO**  
**FACHADA E COBERTURA**



Conceito de intervenção: reversibilidade

Título: **Shishiodoshi House**  
Ano de construção existente: 1980  
Ano de intervenção: 2010  
Tipo/ função do edifício: Habitação  
Especialidade: Arquitetura: Avignon-Clouet Architects

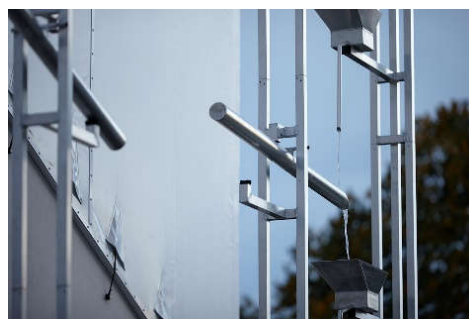
Localização: Rezé, France; Europa  
Latitude e longitude: 47°13'02" N e 1°33'12" O  
Altitude: 15 m  
Temperatura média anual: 11,7 °C  
Precipitação média anual: 783 mm  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática Köppen-Geiger: Cfb.

Tipo de intervenção: Ampliação  
Requisitos funcionais: impermeabilização, reversibilidade  
Membrana (tipo/subestrutura): Membrana de poliéster revestida a PVC, simples; subestrutura metálica  
Área: 250 m²  
Custo global (material + instalação): 60€ /m² (estimativa)

Descrição:  
O conceito de intervenção apoiou-se no pensamento do arquiteto Christian de Portzamparc, segundo o qual, a durabilidade de algo relaciona-se com a sua capacidade em ser transformado - "Le durable, c'est le transformable".

**Solução**  
Com uma altura de 11 metros, esta ampliação foi construída com uma estrutura de madeira totalmente revestida com uma membrana em PVC de cor branca. A seleção deste material para revestimento de fachada foi feita tendo em conta o seu reduzido custo económico.

Fonte:  
WONDERFUL VINYL (2016). "Shishiodoshi house". Disponível em: <http://wonderfulvinyl.pvc.org/en/p/shishiodoshi-house> [Acedida a 11 de Janeiro de 2016]  
AVIGNON CLOUET (2015). "Un Batiment, combien de vies?" Disponível em: <http://www.avignon-clouet.com/home.php?p=846> [Acedida a 11 de Janeiro de 2016]



## TIPO DE INTERVENÇÃO FACHADA E COBERTURA

Conceito de intervenção:



Título:  
Tipo/ função do edifício:



Localização  
Temperatura média anual:  
Precipitação média anual:  
Contexto climático:



Tipo de intervenção:  
Requisitos funcionais:



Membrana (tipo/subestrutura):  
Custo global  
(material + instalação)



## F.07

Integração

**Edifício em Basileia**  
Habitação e serviços

Basileia, Suíça; Europa  
11.7 °C  
783 mm

Temperado continental. Classificação climática Köppen-Geiger: Cfb.

Renovação  
Regulação térmica e acústica

Membrana de poliolefina e manta de la de rocha; subestrutura metálica  
Aprox. 60€ /m<sup>2</sup> (estimativa)



Descrição:

Reabilitação térmica e acústica das fachadas frontantes com uma linha de caminho de ferro através de um revestimento multicamada (material isolamento e membrana) configurado com uma textura (tipo capitoné).



Figuras:



## TIPO DE INTERVENÇÃO FACHADA E COBERTURA

Conceito de intervenção:



Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidade:



Localização  
Temperatura média anual:  
Precipitação média anual:  
Contexto climático:



Tipo de intervenção:  
Requisitos funcionais:



Membrana (tipo/subestrutura):  
Área:  
Custo global  
(material + instalação)



Descrição:

Este edifício sofreu ataques bombistas violentos durante a II Guerra Mundial. Como tal, no início do século XXI foi denominado como uma Zona Memorial, com o objetivo de restore and enhance this part of the territory. Dentro desta zona existe a Igreja de San Michele Arcangelo, recuperada e acessível ao público.

**Solução**

Parte da reabilitação deste edifício consistiu em encerrar uma abertura, formada pelo colapso parcial de uma abóbada, com uma parede penumática em membrana dupla de ETFE. As motivações para optar por esta solução residiram na sua transparência e leveza.

Fonte:

<https://www.canobbio.com/cgi-bin/progetti/42/scheda-coedi-gb.pdf>



Figuras:



## TIPO DE INTERVENÇÃO FACHADA E COBERTURA

Conceito de intervenção:



Título:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidade:



Localização  
Altitude:  
Temperatura média anual:  
Contexto climático:



Tipo de intervenção:  
Requisitos funcionais:



Membrana (tipo/subestrutura):  
Área:  
Custo global  
(material + instalação)



## F.09

Integração

**KWO Grimselstrom**  
1925  
2013  
Transportes e energia  
Arquitetura:

Innertkirchen, Suíça; Europa  
15 m  
11.7 °C

Temperado marítimo. Classificação climática Köppen-Geiger: Cfb.

Renovação  
Regulação térmica e baixa intrusividade

Membrana dupla de ETFE; subestrutura metálica  
145 m<sup>2</sup>

Aprox. 200€ /m<sup>2</sup> (estimativa)



Descrição:

Reforço da janela de vidro num edifício histórico - Melhoria do valor de U num edifício histórico através da sobreposição de um painel em membrana dupla de ETFE sobre as janelas existentes.

Fonte:

<http://www.texlon.ch/en/efte-foil-construction/projects/kwo-grimselstrom-efte-window-reinforcement-aba-he.htm>



Figuras:





<b>ELEMENTO CONSTRUTIVO</b>	<b>T.01</b>
<b>TETO</b>	
Conceito de intervenção:	Conversão de ginásio em sala de concertos de caráter temporário
Título:	<b>Abadia Beneditina de Pannonhalma</b> <b>Património mundial da UNESCO</b>
Ano da construção existente:	996
Ano de intervenção:	2012
Tipo/ função do edifício:	Educação/ cultura
Especialidades:	Arquitetura: Dániel Baló, Dániel Eke, Zoltán Kalászi Engenharia eletrotécnica: István Kalászi
Localização:	Pannonhalma, Hungria; Europa
Latitude/ Longitude:	47° 00' N / 18° 00' E
Contexto climático:	Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb
Tipo de intervenção:	Conversão temporária
Requisitos funcionais:	Reversibilidade e acústica
Membrana (tipo):	Membrana não tecido de polipropileno (17 gr/ m <sup>2</sup> ) - geotêxtil
Área:	200 m <sup>2</sup>
Custo global (material + instalação)	6€/m <sup>2</sup>

**+** Descrição:

A abadia beneditina de Pannonhalma, fundado em 996, é um dos monumentos mais antigos da Hungria e foi transformado num colégio interno para rapazes. Desde 2005, este edifício acolhe o Festival "Pannonhalma Arcus Temporum" (um exercício espiritual de três dias em forma de música, teatro e arte). Para que tal acontecesse, existiu a necessidade de transformar o ginásio deste edifício e adaptá-lo a um uso diferente, com um orçamento reduzido. Isso implicou uma intervenção ao nível funcional para que se atingisse uma melhoria no desempenho acústico deste espaço.

**Solução**

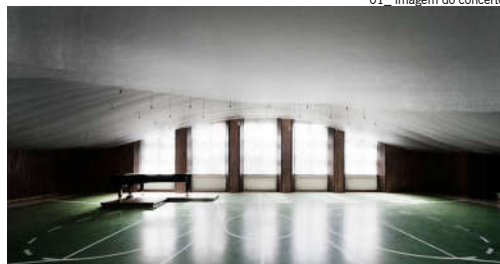
Foi projetada e construída uma instalação com várias camadas de membrana de polipropileno translúcida suspensas no teto, desfazadas e dispostas paralelamente entre si. Cada camada possui uma seção desenhada especificamente para controlar a absorção e propagação do som (ver imagens) resultando, no conjunto, numa ondulação tridimensional através da qual se atingiu uma melhoria acústica do ginásio – amortecendo e dispersando o som mais agudos através do espaço. Esta ondulação, combinada com uma grelha de pontos de iluminação, também permitiu distinguir a localização da zona do palco e da plateia. A translucidez da membrana utilizada permitiu criar um ambiente interior mais adequado para atuações musicais clássicas, desvanecendo a aparência característica do ginásio.

Fonte: YATZER (2016). "Gymnasium transformed into concert hall". Disponível em: <https://www.yatzer.com/gym-transformed-concert-hall-pannonhalma-archabbey-hungary/>. [Acedido a 11 Janeiro 2016]

**+** Figuras:



01\_ imagem do concerto.



02\_ Vista geral do ginásio com teto em membrana.



03\_ Vista transversal do ginásio com teto em membrana.

<b>ELEMENTO CONSTRUTIVO</b>	<b>T.02</b>
<b>TETO</b>	
Conceito de intervenção:	Redução do tempo de reverberação
Referência:	<b>Igreja de St. Petri-Pauli</b>
Ano da construção existente:	1483
Ano de intervenção:	2012
Tipo/ função do edifício:	Cultural
Especialidades:	Arquitetura: M. Rehder
Localização:	Eisleben, Alemanha; Europa.
Latitude e longitude:	52° 9' 0" N 11° 13' 0" E
Contexto climático:	Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb
Tipo de intervenção e patologia:	Fraco desempenho acústico, elevada reverberação acústica
Requisitos funcionais:	Acústicos – absorção
Membrana:	Membrana PVC microperfurada
Área:	36 m <sup>2</sup>
Fabricante:	Barrisol
Custo global (material + instalação)	200 €/ m <sup>2</sup> (estimativa)

**+** Descrição:

Contexto:

Na sua condição existente, a nave desta igreja é composta predominantemente por superfícies refletoras (compostas por materiais como gesso, vidro e madeira). Estudos realizados mostram que em fachadas de vidro e superfícies de madeira o efeito de absorção acústica só pode ser alcançado para ondas sonoras de baixa frequência.

**Solução:**

O objetivo desta intervenção foi reduzir significativamente o tempo de reverberação e suavizar a curva de frequências. Uma das vantagens desta membrana microperfurada é que o grau de absorção pode ser ajustado de forma precisa para cada espaço de intervenção. Através da seleção da distância certa entre a membrana e o teto acima existente, pode-se alcançar a quantidade ótima de absorção do som. Para esta aplicação em particular, a dimensão ótima determinada para a caixa-de-ar entre a membrana e o teto existente foi de 7 cm. Para além da intervenção no teto também se adicionaram 3 painéis com 12m<sup>2</sup> cada e com material de isolamento acústico (lã de rocha).

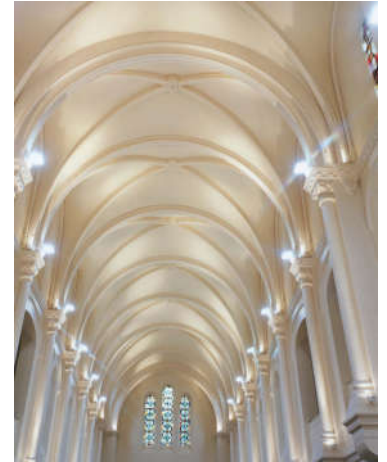
Fonte: BARRISOL (2016). "Projet acoustic et chauffant". Disponível em: <http://barrisol.blogspot.pt/2010/12/projet-acoustique-et-chauffant.html>; [Acedido a 13 de Janeiro de 2016]  
SLIDE SHARE (2016). "Maureen Ross". Disponível em: <http://www.slideshare.net/MaureenRoss/SideSlide-Presentation-2008>; [Acedido a 13 de Janeiro de 2016]

**+** Figuras:

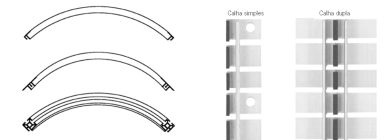


<b>ELEMENTO CONSTRUTIVO</b>	<b>TETO</b>	<b>MM T.03</b>
Conceito de intervenção:	Melhoria funcional com preservação das formas arquitetônicas originais	
<b>Ícone</b>	<b>Título:</b>	<b>Igreja em Versalhes</b>
<b>Ícone</b>	Ano de construção existente:	Sem dados
<b>Ícone</b>	Ano de intervenção:	2010
<b>Ícone</b>	Tipo/ função do edifício:	Religiosa/ cultural
<b>Ícone</b>	Especialidades:	Arquitetura: STDE 2A, Yves Durand
<b>Ícone</b>	Localização:	Versalhes, França; Europa
<b>Ícone</b>	Latitude e longitude:	48° 48' 5.0652" N e 2° 7' 48.4392" E
<b>Ícone</b>	Contexto climático:	Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfa Renovação.
<b>Ícone</b>	Tipo de intervenção e patologia:	Reduzir a manutenção
<b>Ícone</b>	Requisitos funcionais:	Acustica, luminosidade, reversibilidade e durabilidade
<b>Ícone</b>	Membrana:	Membrana PVC tensada entre perfis que acompanham a geometria da superfície do teto.
<b>Ícone</b>	Área:	400 m <sup>2</sup>
<b>Ícone</b>	Fabricante:	Barrisol
<b>Ícone</b>	Tempo de execução:	3 semanas
<b>Ícone</b>	Custo global (material + instalação)	200 €/ m <sup>2</sup> (estimativa)

**+** Figuras:



Adequação a superfícies curvas. Calhas entalhadas para se adaptarem às linhas curvas existentes e tensar a membrana na superfície a intervir.



**+** Descrição:

Este edifício necessitava de um restauro das suas superfícies superiores e laterais. Os revestimentos antigos requerem manutenção com frequência, que envolvem custos, devido à facilidade em se danificarem.

**Solução**

Foi aplicado um revestimento em membrana sob o teto existente. Esta solução permite a reconstrução de arcos simples, abóbadas, cúpulas e outras formas complexas.

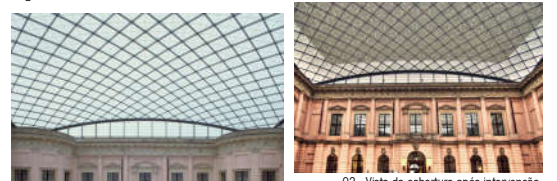
Este tipo de membrana apresenta vários tipos de acabamento (mate, acetinado, brilho) e cores. A opção recaiu sobre uma membrana com acabamento mate por ser semelhante ao acabamento do material existente existente, o gesso. Para além desta característica, esta membrana é impermeável e durável e quando integrada neste tipo de solução construtiva, o tempo de execução é reduzido.

Com esta solução foi possível reforçar os limites das superfícies deterioradas e reter partículas susceptíveis de cair do teto existente. Esta solução não adere ao teto existente, permite a instalação de materiais de isolamento térmico e acústico, e evita o aparecimento de manchas causadas pela presecção de humidade.

Fonte:  
BARRISOL (2016). "Technical documentation". Disponível em:  
<http://en.barrisol.com/PDF/brochures/technical-documentation.pdf>. [Acedido a 13 de Janeiro de 2016]

<b>ELEMENTO CONSTRUTIVO</b>	<b>TETO</b>	<b>MM T.04</b>												
<b>Ícone</b>	<b>Título:</b>	<b>Museu da História Alemã (Schlüterhof)</b>												
<b>Ícone</b>	Ano de construção existente:	1706												
<b>Ícone</b>	Ano de intervenção:	2003												
<b>Ícone</b>	Tipo/ função do edifício:	Cultural												
<b>Ícone</b>	Especialidades:	Arquitetura: I.M.Pei (Nova Iorque); engenharia: Schalich Bergermann & Partner (Estugarda)												
<b>Ícone</b>	Localização:	Berlim, Alemanha, Europa												
<b>Ícone</b>	Tipo de intervenção:	Renovação												
<b>Ícone</b>	Requisitos funcionais:	Isolamento e correção acústica												
<b>Ícone</b>	Membrana (subestrutura/tipo):	Membrana PVC microperfurada e translúcida												
<b>Ícone</b>	Área:	1800 m <sup>2</sup> (vão de 27 m)												
<b>Ícone</b>	Fabricante:	Barrisol												
<b>Ícone</b>	Custo global (material + instalação):	60€/m <sup>2</sup> (estimativa)												
<b>Ícone</b>	Risco de desastres naturais	<table border="0"> <tr> <td><b>20%</b></td> <td><b>10%</b></td> <td><b>0%</b></td> <td><b>0%</b></td> <td><b>0%</b></td> <td><b>0%</b></td> </tr> <tr> <td>Sismos</td> <td>Inundações</td> <td>Secas</td> <td>Deslizamento de terras</td> <td>Erupção vulcânica</td> <td>Ciclones</td> </tr> </table>	<b>20%</b>	<b>10%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	Sismos	Inundações	Secas	Deslizamento de terras	Erupção vulcânica	Ciclones
<b>20%</b>	<b>10%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>									
Sismos	Inundações	Secas	Deslizamento de terras	Erupção vulcânica	Ciclones									

**+** Figuras:



01\_ vista da cobertura antes da intervenção

02\_ Vista da cobertura após intervenção.



03\_ Esquema de redução do tempo de reverberação.

**+** Descrição:

O edifício existente com estilo Barroco foi projetado por Johann Arnold Nering, Martin Grünberg e Andreas Schlüter entre 1695 e 1706. Após ter sido destruído pela 2ª Guerra Mundial, este foi completamente reconstruído entre 1949 e 1965.

Para que o pátio deste edifício, com 41 x 41m, pudesse ser utilizado todo o ano foi projetada uma cobertura em vidro. Após a execução desta cobertura em vidro, descobriu-se que o tempo de reverberação era demasiado longo e que se existiam problemas de eco, devido à falta de superfícies de absorção do som. Foram realizadas monitorizações acústicas que mostraram que não seria possível realizar eventos com ou sem performance musical, mesmo com meios electroacústicos.




**Solução:**

Foi executada uma rede de cabos e hastes metálicas no perímetro da cobertura de vidro onde se colocaram duas camadas de membrana de PVC (microperfurada e translúcida) distanciadas entre si 15 cm.

Após a colocação da membrana realizaram-se novas monitorizações que mostraram que era possível melhorar o desempenho acústico deste espaço. O tempo de reverberação foi reduzido pelo efeito de absorção e nível de refração da membrana. Deste modo, nada impedia a realização de eventos neste espaço (BARRISOL, 2016). A figura 03 mostra o esquema de redução do tempo de reverberação de uma membrana perfurada em que o som inicial (1) se transforma em energia térmica (2) ao passar pela membrana perfurada (3) e é reduzido (4) (BARRISOL, 2015).

Através da composição das partes em membrana (num trabalho de filigrana) e sobretudo devido à translucidez da membrana aplicada, a estética do espaço manteve-se intacta.



**ELEMENTO CONSTRUTIVO TETO**    **T.05**  
Melhoria térmica e acústica

Conceito de intervenção:

**Sala do município de Vallée Doller e Soutzbach**  
Sem dados  
2010  
Serviços

Localização: Masevaux, França; Europa.  
Latitude e longitude: 47° 47' 0" N 7°0' 0" E  
Contexto climático: Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb  
Renovação.

Tipo de intervenção e patologia: Fraco desempenho térmico e acústico  
Requisitos funcionais: Térmicos, luminicos e acusticos

Membrana: Membrana PVC microperfurada com sistema radiante incorporado  
Área: 500 m<sup>2</sup>  
Fabricante: Barrisol  
Custo global (material + instalação) 250 €/m<sup>2</sup> (estimativa)

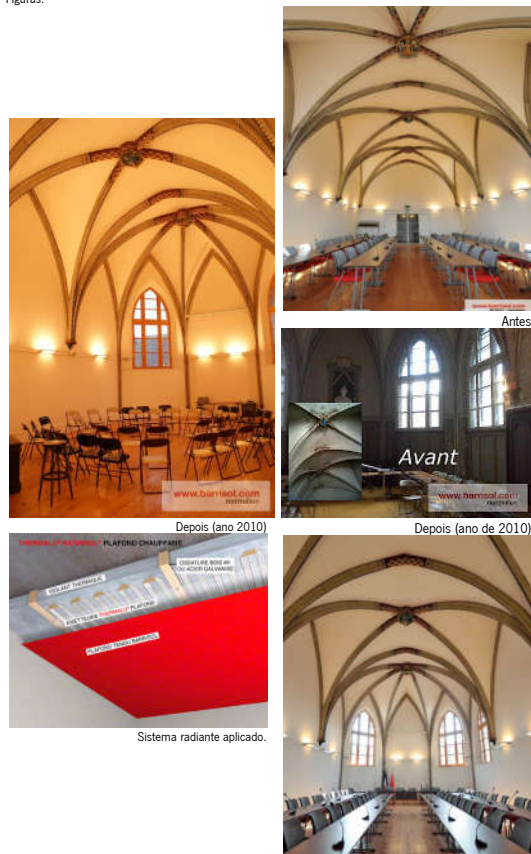
**+** Descrição:



Contexto:  
Uma antiga capela foi convertida na presente sala de reuniões. Os seus utilizadores manifestavam desconforto térmico e acústico.

Solução:  
A solução adotada passou pela aplicação de uma membrana microperfurada combinada com aquecimento radiante no teto e paramentos. A aplicação desta membrana permitiu que as formas originais da superfície do teto não fossem alteradas.

Fonte:  
BARRISOL (2016). "Projet accoustic et chauffant". Disponível em: <http://barrisol.blogspot.pt/2010/12/projetaccousticue-et-chauffant.html>; [Acedido a 13 de Janeiro de 2016]

**+** Figuras:



**ELEMENTO CONSTRUTIVO TETO**   **T.06**  
Redução do tempo de reverberação

Conceito de intervenção:

**Cantina de Convento Franciscano de Brindis**  
1908  
2014  
Religiosa  
Arquitetura: Massimo Monteleone; Instalador: Frattini Group.com

Localização: Brindisi, Italia; Europa.  
Contexto climático: Classificação climática de Köppen-Geiger: Renovação.

Tipo de intervenção e patologia: Correção da reverberação acústica e melhoria do desempenho térmico  
Requisitos funcionais: Absorção acústica, melhorar o desempenho térmico

Membrana: Membrana PVC microperfurada  
Área: 350 m<sup>2</sup>  
Fabricante: Barrisol  
Custo global (material + instalação) 100 €/m<sup>2</sup> (estimativa)

**+** Descrição:

O espaço onde foi feita a intervenção destina-se a ser usado como refeitório. Era necessário melhorar o desempenho acústico e térmico deste espaço.

Solução:  
O teto foi revestido com painel melamínico radiante e membrana microperfurada. Através de permissões metálicas, a membrana adapta-se à geometria da superfície existente e oculta o painel melamínico, ao mesmo tempo que permite fazer a correção acústica e promove a passagem do calor radiante. Deste modo é possível incrementar o desempenho deste espaço sem que ele perca as características estéticas e formais características.

Fonte:  
FRATTINI (2016); "Luogo di culto"; disponível em: <http://www.frattinigroup.com/luoghi-di-culto.html>

**+** Figuras:





## ELEMENTO CONSTRUTIVO TETO



**Título:** Museu em Bolonha  
**Ano de construção existente:** Sem informação  
**Ano de intervenção:** 2010  
**Tipo/ função do edifício:** Cultural  
**Especialidades:** Arquitetura: Nicoletta Sardi & Alessandro Urbani



**Localização:** Bolonha, Itália; Europa



**Tipo de intervenção:** Renovação  
**Requisitos funcionais:** Estéticos, acústicos e luminicos



**Membrana (subestrutura/tipo):** Membrana dupla de PVC  
**Área:** ? m<sup>2</sup>  
**Fabricante:** Barrisol



**Custo global (material + instalação):** 120 €/m<sup>2</sup> (estimativa)



**Risco de desastres naturais:** 40% Sismos, 40% Inundações, 0% Secas, 0% Deslizamento de terras, 0% Erupção vulcânica, 0% Ciclones



**Descrição:**

**Fonte:**  
 Acedido a 11 de Janeiro de 2016, <http://www.barrisolsydney.com.au/our-projects/church-projects/>  
 ILTEC (2016); disponível em: [http://www.iltecdesign.it/eng/iltecdesign\\_works.html](http://www.iltecdesign.it/eng/iltecdesign_works.html)

## T.07



**Figuras:**



## ELEMENTO CONSTRUTIVO TETO



**Conceito de intervenção:** Melhoria funcional com preservação das formas arquitetónicas originais



**Título:** Igreja da Elevação de Santa Cruz  
**Ano da construção existente:** 1871  
**Ano de intervenção:** 2011  
**Tipo/ função do edifício:** Religiosa  
**Especialidades:**



**Localização:** Jihlava, República Checa; Europa



**Contexto climático:** Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb



**Tipo de intervenção e patologia:** Renovação.



**Requisitos funcionais:** Acústica, luminosidade, reversibilidade e durabilidade



**Membrana:** Membrana PVC tensada entre perfis que acompanham a geometria da superfície do teto.



**Área:** 250 m<sup>2</sup>



**Fabricante:** Barrisol



**Tempo de execução:** 3 semanas



**Custo global (material + instalação):** Aprox. 100 €/m<sup>2</sup> (estimativa)



**Descrição:**

Esta igreja dominicana, que possui 3 naves e um presbitério, foi construída no ano de 1247 sob influência do estilo gótico francês. No século XIII foram construídas as paredes exteriores, o portal de entrada e o arco do triunfo. As abobadadas foram construídas na oitava década do século XIV, sob influência da oficina do famoso arquiteto Petr Parléř. Após os incêndios ocorridos no século XVI, a igreja foi reconstruída ao estilo renacentista. No ano de 1871 a igreja foi desconsagrada e entregue ao exército que a utilizou como quartel e armazém até ao ano de 1947. Devido às adaptações desta época, quase todo o espaço original foi destruído. Em 2005 o município comprou a igreja por 6 milhões de coroas checas. Apartir daí deu-se início ao projeto para restaurar o aspeto original da igreja. O município conseguiu um apoio financeiro no valor de 249.999 euros, de um Fundo Norueguês para o projeto de Renovação da herança cultural de Jihlava.

### Solução

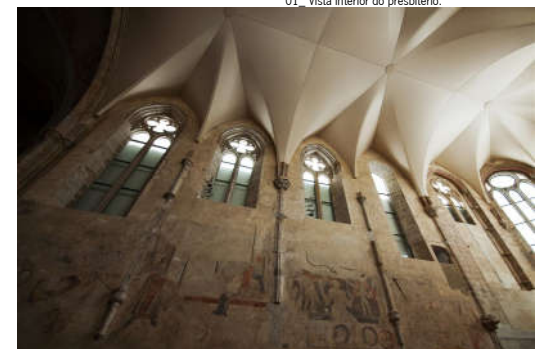
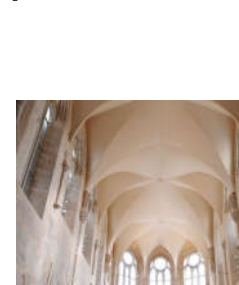
Na 1ª etapa de intervenção eliminou-se a humidade presente nas paredes, reconstruiu-se o telhado e os rebocos exteriores. E na 2ª etapa realizou-se uma reconstituição do teto abobadado do presbitério (que tinha sido destruído) em membrana tensada para melhoria do desempenho acústico.

**Fonte:** TIC (2016). "Jihlava". Disponível em: [http://tc.jihlava.cz/ES/vismo/o\\_uvvar.asp?id\\_org=101078&id\\_u=43239](http://tc.jihlava.cz/ES/vismo/o_uvvar.asp?id_org=101078&id_u=43239); [Acedido a 11 de Março de 2016]

## T.08



**Figuras:**



**ELEMENTO CONSTRUTIVO**  
**TETO**

**T.09**

Conceito de intervenção: Intervenção para otimizar as condições luminicas

Título: **Biblioteca da Universidade St. Edwards**  
Ano da construção existente: 1878  
Ano de intervenção: 2014  
Tipo/ função do edifício: Educacional  
Especialidades: Arquitetura: Sasaki Associates

Localização: Austin, Texas, EUA; América

Tipo de intervenção: Renovação  
Requisitos funcionais: Luminicos

Membrana (tipo): ETFE branco + Sefar architecture IA 85 OP  
Área: 43 m² (9 módulos de 3.15m x 1.5m)  
Fabricante: Sefar

Custo global (material + instalação): Aprox. 120 €/m² (estimativa)

Risco de desastres naturais: **20%** Sismos, **90%** Inundações, **10%** Secas, **0%** Deslizamento de terras, **0%** Erupção vulcânica, **50%** Ciclones

Figuras:



**+** Descrição:

O objetivo desta intervenção foi renovar o interior de uma biblioteca para melhorar o conforto luminoso interior. Com uma solução de armadura modular com membrana translúcida, foi possível melhorar a qualidade luminica do espaço existente (SEFAR, 2016). As juntas entre módulos são mínimas e praticamente livres de sombras, o que fornece uma distribuição de luz uniforme. Para além disso, se forem inseridas duas camadas de membrana nos módulos é possível criar atenuadores acústicos. Os módulos de membrana tensionada possuem uma instalação fácil e rápida. A membrana em PVDF utilizada nesta solução não apresenta compostos organicos voláteis e possui uma boa classificação de reação ao fogo (não apresenta gotejamento e produz pouco fumo).

As armaduras modulares com membrana dupla permitem melhorar a qualidade de difusão da luz e ao mesmo tempo melhorar as condições acusticas. Para além disto, o sistema com a opção de membrana dupla é estanque e previne a penetração de poiras e insetos que inibem a transferencia de luz e causam um impacto visual negativo.



**ELEMENTO CONSTRUTIVO**  
**TETO**

**T.10**

Título: **Escritórios Logan**  
Ano de construção existente: 1900  
Ano de intervenção: 2012  
Tipo/ função do edifício: Escritórios  
Especialidades: Arquitetura: SO-IL; Engenharia: Formactive; Instalador: Newmat

Localização: Logan, Nova Iorque; América do Norte

Tipo de intervenção: Alteração  
Requisitos funcionais: Acústicos e luminicos

Membrana (subestrutura/tipo): Membrana dupla de PVC translúcida e microperfurada  
Área: 1200 m²  
Fabricante: Newmat

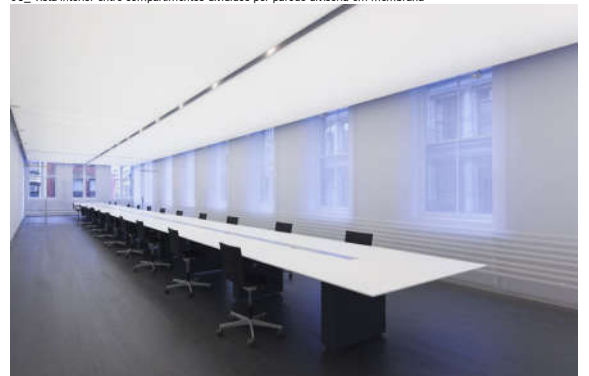
Custo global (material + instalação): Aprox. 60 €/m² (estimativa)

Risco de desastres naturais: **80%** Sismos, **0%** Inundações, **70%** Secas, **0%** Deslizamento de terras, **0%** Erupção vulcânica, **0%** Ciclones

Figuras:



01\_Vista interior entre compartimentos divididos por parede divisória em membrana



02\_tetos suspenso com membrana dupla e retro iluminado.

**+** Descrição:

Existente: Originalmente construído em 1900, o espaço de intervencao resulta da conversão de um armazém industrial em apartamentos. O pé direito elevado, a amplitude e generosa luminosidade destes espaços tornam-se ideais para conversão em espaços de trabalho.

Solução: O espaço existente possui caixilhos, tubagens e estrutura em ferro e apresenta sinais de desgaste causados pelo tempo e pelos vários usos que acomodou.

Para adaptar este espaço foi necessário criar compartimentos para usos distintos e adequá-lo às exigências acústicas e luminicas do novo uso. Pretendia-se manter os ganhos de luz natural e criar espaços comunicantes entre si mas mantendo o grau de privacidade necessário para cada espaço de trabalho. Optou-se por utilizar paredes divisórias e tetos suspensos em dupla membrana translúcida. O teto suspenso com membrana translúcida retro iluminada permite a difusão de luz artificial sem criação de sombras (NEWMAT, 2016). O revestimento do paramento interior da fachada é em membrana de poliéster com malha aberta e revestida a PVC que permite ocultar eventuais defeitos estéticos, manter a passagem de luz natural, melhorar o desempenho acústico e manter a visualização de elementos originais do edifício (como os caixilhos e as tubagens de ferro. Estas membranas são tensadas ao máximo, de modo a se tornarem firmes ao toque.

Fonte: NEWMAT USA (2016); "Logan"; disponível em: <http://newmatusa.com/newmat/2400/projects/corporate/logan.html>; accedido a 16 Março 2016.

**ELEMENTO CONSTRUTIVO**  
**TETO**

Conceito de intervenção: Reutilização - conversão de um armazém em espaço de escritórios.

**T.11**

**Eco Membrane**

Título: **Eco Membrane**  
Ano da construção existente: 1936  
Ano de intervenção: 1997  
Tipo/ função do edifício: Serviços/ escritórios  
Especialidades: Arquitetura: Thomas Herzog

Localização: Munique, Alemanha; Europa.  
Latitude e longitude: 51° 00' N e 09° 00' E  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb

Tipo de intervenção: Alteração  
Requisitos funcionais: Máximar a iluminação natural; regulação térmica e acústica; redução consumo energético

Membrana (tipo/ subestrutura): Membrana PVC transparente. Simples.  
Características: Subestrutura metálica, cabos.  
Área: Valor de U 1.8 W/m<sup>2</sup>/K  
Fabricante: 1400 m<sup>2</sup>  
Custo global: Hightex  
(material + instalação) Aprox. 60 €/ m<sup>2</sup> (estimativa)

Descrição:  
O edifício existente foi construído entre 1936 e 1938. Este edifício, com 1400 m<sup>2</sup>, apresentava uma estrutura metálica, cobertura metálica sem isolamento, fachadas com fenestração compostas por vidro simples e caixilharia de ferro e um interior com reduzida iluminação natural. Estas condições estavam longe de proporcionar um espaço confortável para a instalação do novo departamento de design da empresa. Contudo, existiram alguns constrangimentos no processo de construção pois a empresa pretendia que a aparência exterior e interior permanecesse inalterada para manter a ideia de conjunto com os outros edifícios da empresa - a intervenção teria de ser mínima, os custos de reabilitação deviam ser reduzidos e a intervenção devia proporcionar um baixo consumo de energia na fase de utilização do edifício. Procurava-se uma solução funcional com o máximo aproveitamento da luz natural para os trabalhos de desenho.

**Solução**  
Destes constrangimentos resultou numa solução arquitetónica inovadora, em que a reutilização de edifícios industriais se tornou um ato de sustentabilidade na medida em que se evitaram resíduos de demolição, e se reduziu o consumo de novos materiais de construção e de energia.

Foram feitas intervenções funcionalmente necessárias: inseriu-se uma uma clarabóia ao longo do cume do telhado para se obter uma faixa de luz contínua e janelas que abrem ao nível dos olhos assegurar ligações visuais ao exterior. Estas modificações melhoraram as condições de iluminação natural no interior do edifício de modo a reduzir o consumo de iluminação artificial. Contudo, a intervenção principal relaciona-se com a otimização das condições térmicas no interior do edifício. Esta otimização foi conseguida através da inserção de duas membranas (com ar entre si). Com o ar comprimido entre as duas membranas criou-se uma solução isolante que melhorou consideravelmente o desempenho térmico do interior do edifício. Com esta membrana de fluor-plástico (extremamente fina e com reduzido impacto ambiental) conseguiu-se reduzir o volume útil com necessidade de ser aquecido no inverno, sem esconder a envolvente existente do edifício. O espaço interior adquiriu uma nova tensão através do contraste entre a geometria existente, com superfícies planas, e as formas suaves e curvas da solução com membrana.

Os conceitos de sustentabilidade foram incorporados nesta solução que se revelou eficiente. Um aspecto notável deste caso de estudo é que as mudanças necessárias não resultaram apenas na modernização do

edifício nem numa abordagem ecologicamente correta, mas ocorreram através da utilização inovadora de materiais simples e económicos, que permitiram alcançar qualidades que tornaram a reutilização deste edifício mais lógica do que a demolição e construção nova.

Para além das preocupações ambientais e de redução do consumo energético desta solução, também foram reinterpretados os princípios históricos de transparência. Assim, os funcionários deste novo departamento, os designers, teriam uma constante visualização das tecnologias construtivas passadas e presentes. Esta solução construtiva com membrana traz algumas vantagens como reduzida sobrecarga estrutural e devido à sua reduzida espessura é possível alcançar ganhos de área útil.

Fonte: FREE LIBRARY (2016). "Eco membrane". Disponível em: <http://www.thefreelibrary.com/Eco+membrane-a021119079>; [Acedido a 11 de janeiro de 2016]  
ECO MEMBRANE (2014). [http://www.thomashertzogarchitekten.de/Warehouse\\_english.html](http://www.thomashertzogarchitekten.de/Warehouse_english.html)

Figuras:



**ELEMENTO CONSTRUTIVO**  
**TETO**

Conceito de intervenção: Redução do tempo de reverberação e melhoria do desempenho acústico em locais com pé direito elevado.

**T.12**

**Igreja de Agnese de Modena**

Título: **Igreja de Agnese de Modena**  
Ano da construção existente: 1970  
Ano de intervenção: 2003  
Tipo/ função do edifício: Religioso  
Especialidades: Arquitetura: Marcello Detteri

Localização: Modena, Itália; Europa.  
Latitude e longitude: 44° 40' 00" N e 10° 55' 00" E  
Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfa  
Renovação.

Tipo de intervenção/ patologia: Desequilíbrio do desempenho acústico, elevada reverberação  
Requisitos funcionais: acústicos

Membrana: Membrana PVC microperfurada com e sem material absorvente  
Características: Furações: 300 000/ m<sup>2</sup>  
Diâmetro das furações: 0,2 mm  
Taxa de perfurações: 0,6 %  
Espessura: 0,18 mm

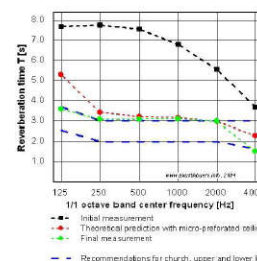
Área: 90 m<sup>2</sup>  
Fabricante: Barrisol  
Custo global: 100 €/ m<sup>2</sup> (estimativa)  
(material + instalação)

Descrição:  
O edifício existente, construído nos anos 70, apresentava problemas acústicos. A maioria dos materiais que constituíam as superfícies deste edifício (gesso, vidro, mármore e madeira) são refletoras de som. O vidro e a madeira absorvem apenas ondas sonoras de baixa frequência por isso o desempenho acústico do edifício estava desequilibrado com níveis anormais de ressonância de ondas sonoras de alta frequência. Em estudos realizados (NOCKE & HILGE, 2004) o tempo de reverberação medido in situ apresentou valores acima de 7 segundos para frequências inferiores a 1000 Hz (ver figura 1).

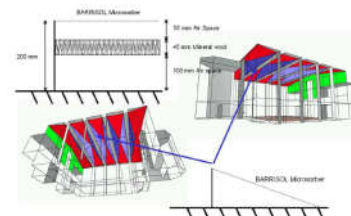
**Solução**  
O objetivo desta intervenção foi reduzir significativamente o tempo de reverberação e suavizar a curva de frequências. Uma das vantagens desta membrana microperfurada é que o grau de absorção pode ser ajustado de forma precisa para cada espaço de intervenção. Através da seleção da distância certa entre a membrana e o teto acima existente, pode-se alcançar a quantidade ótima de absorção do som. Para esta aplicação em particular, a dimensão ótima para a caixa-de-ar entre a membrana e o teto existente foi determinada para ser inferior a 20 cm.

Fonte: LISYS (2016). "Acoustics". Disponível em: <http://www.lisys.hu/sites/default/files/barrisol/pdf/acoustics.pdf>; [Acedido a 13 de Janeiro de 2016]  
BARRISOL (2016). "Barrisol essentials 2014". Disponível em: [http://www.barrisol-bg.com/cdir/barrisol-bg.com/files/BARRISOL\\_ESSENTIALS\\_2014.pdf](http://www.barrisol-bg.com/cdir/barrisol-bg.com/files/BARRISOL_ESSENTIALS_2014.pdf); [Acedido a 13 de Janeiro de 2016]  
NOCKE, C. & HILGE, C. (2004). "Application of micro-perforated stretched ceilings", CFA/ DAG' 04, Estrasburgo, Alemanha. [http://www.conforg.fr/cfadaga2004/master\\_cd/cd1/articles/000628.pdf](http://www.conforg.fr/cfadaga2004/master_cd/cd1/articles/000628.pdf); [Acedido a 13 de Janeiro de 2016]

Figuras:



01\_ Medição do tempo de reverberação antes e depois da reabilitação do edifício.

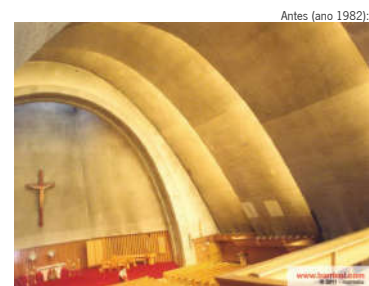


02\_ Duas configurações para a aplicação da membrana microperfurada no edifício. As áreas assinaladas a cor azul representam membranas microperfuradas sem material absorvente e as áreas assinaladas a cor vermelha apresentam o material poroso aplicado na caixa-de-ar acima da membrana microperfurada.

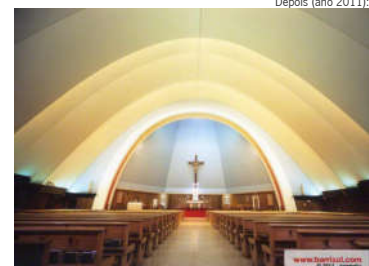


<b>ELEMENTO CONSTRUTIVO</b>	
<b>TETO</b>	<b>T.13</b>
Conceito de intervenção:	
Título:	<b>Igreja de St-Ignatus-De-Loyola</b>
Ano de construção existente:	1982
Ano de intervenção:	2011
Tipo/ função do edifício:	Religiosa
Localização:	Montreal, Canadá/América
Latitude e longitude:	47° 35' N e 80° 8' O
Contexto climático:	Continental húmido. Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb
Tipo de intervenção e patologia:	Presença de amianto
Requisitos funcionais:	Barreira contra o amianto, melhoria acústica e luminica.
Membrana:	Membrana PVC
Área:	
Fabricante:	Barrisol
Custo global (material + instalação):	Aprox. 100 €/ m <sup>2</sup> (estimativa)

Figuras:



Antes (ano 1982):



Depois (ano 2011):



**+** Descrição:  
Este edifício necessitava de uma intervenção de reabilitação funcional para eliminar completamente os traços de amianto que prejudicam a saúde dos seus ocupantes.

**Solução**  
A solução de revestimento do teto com membrana tensada (com técnica de construção adequada) permitiu uma rápida e fácil instalação, com um custo reduzido, quando comparado com o processo de eliminação do amianto. A membrana utilizada quando tensada, devido às suas resistências à prova de água e barreira ao vapor, cria uma barreira contra substâncias indesejáveis como o amianto.

Fonte:  
BARRISOL (2016). "Ignatus de Loyola church". Disponível em: <http://ca.barrisol.com/en/architect-canadian-projects-ignatus.htm>. [Acedido a 11 de Janeiro de 2016]

<b>ELEMENTO CONSTRUTIVO</b>	
<b>FACHADA E TETO</b>	<b>T.14</b>
Conceito de intervenção:	Adição de envolvente protetora + Reabilitação energética
Título:	<b>Biblioteca Nacional King Fahad</b>
Ano de construção existente:	1970
Ano de intervenção:	2013
Tipo/ função do edifício:	Serviços/ biblioteca
Especialidades:	Arquitetura: Cerber Architekten Engenharia civil: Bollinger & Grohmann Ingenieure
Localização:	Riade, Arábia Saudita; Ásia
Latitude e longitude:	24° 42' N e 46° 44' E
Altitude:	587 m
Temperatura média anual:	25,4 °C
Precipitação média anual:	111 mm
Contexto climático:	Desértico. Classificação climática de Köppen-Geiger: BWh
Tipo de intervenção:	Ampliação
Requisitos funcionais:	Proteção solar, aumento do isolamento térmico, iluminação natural
Membrana (tipo/ subestrutura):	Membrana têxtil PVDF simples; subestrutura metálica.
Área:	15 000 m <sup>2</sup> (teto) modulação 10 x 25m
Fabricante:	Sefar (Membrana textile); Pfeifer (estrutura de cabos tensados)
Custo global (material + instalação):	Aprox. 220 €/ m <sup>2</sup> (estimativa)

Figuras:



01\_Teto interior em membrana



02\_Sistema utilizado para tensionar o teto em membrana

**+** Descrição:  
O edifício existente foi submetido a uma reabilitação energética.

**Solução**  
Para obtenção de ganhos de iluminação natural, adequados às atividades de leitura, a cobertura do edifício existente foi substituída por uma cobertura de vidro. Abaixo desta cobertura foi instalado um teto tensado com uma membrana de cor branca (15000 m<sup>2</sup>) que filtra a intensa luz solar e difunde-a pelo espaço interior. Durante as horas sem luz solar o mesmo efeito é reproduzido através de pontos de iluminação artificial instalados acima do teto tensado.

Fonte:  
ARCHDAILY (2016). "King Fahad National Library". Disponível em: <http://www.archdaily.com/469088/king-fahad-national-library-gerber-architekten> [Acedido a 14 de Janeiro de 2016]



## ELEMENTO CONSTRUTIVO

### TETO

Conceito de intervenção:

Titulo:  
Ano de construção existente:  
Ano de intervenção:  
Tipo/ função do edifício:  
Especialidades:

Localização

Tipo de intervenção:  
Requisitos funcionais:

Membrana (tipo/ subestrutura):  
Área:  
Fabricante:

€  
Custo global  
(material + instalação):

## T.15

Reposição

### Abadia Dargun

Séc. XIII/ 1940

2014

Cultural

Arquitetura: Beyer architekten

Dargun, Alemanha; Europa

Renovação  
Diminuição do tempo de reverberação

Membrana de poliéster; subestrutura metálica.

300 m<sup>2</sup> (teto) modulação 10 x 10m

Serge Ferrari

Aprox. 60 €/ m<sup>2</sup> (estimativa)



Figuras



#### Descrição:

O edifício construído no século XIII, um mosteiro gótico, em pedra e tijolo, sofreu graves danos durante a 2ª Guerra Mundial, deixando-o em ruínas, com exceção da nave, o transepto e partes do coro. Estas partes serviram como um símbolo regional e tornaram-se uma atração turística. Após a queda do Muro de Berlim, no final da década de 80, parte do mosteiro de Dargun foi aberto para eventos, mas a cobertura e a fachada improvisadas não se adequavam a este uso. Por isso, o edifício existente foi submetido a uma reabilitação acústica.

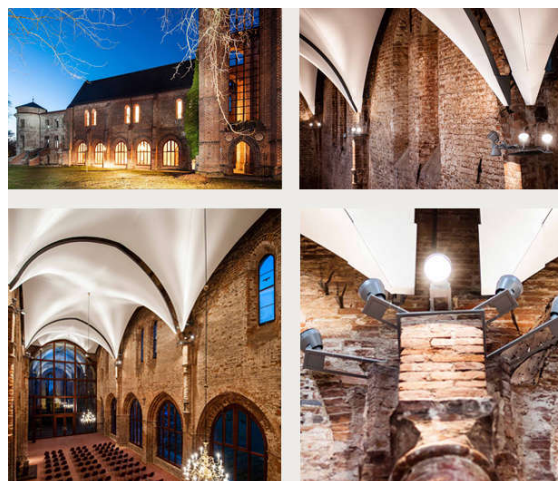
#### Solução

A adição de um teto em membrana, como um substituto das originais abóbadas góticas em pedra, reduz o tempo de reverberação na nave. Existem três abóbadas cruzadas; a cada uma adicionou-se um teto suspenso em membrana, com 10x10 metros. Cada teto em membrana flutua livremente entre as abóbadas de arco, e é conectado através de suportes metálicos nos quatro cantos da abóbada. Deste modo cada abóbada é definida com reduzido peso adicional para a estrutura de suporte. A membrana contribui para a melhoria acústica e da reflexão e difusão luminica. A membrana de poliéster aplicada permite que o tempo de reverberação seja uniformemente reduzido - em altas, médias e baixas frequências de som.

Como a solução em membrana para o teto é muito leve, cerca de 2 kg/m<sup>2</sup> (membrana e elementos sub-estrutural), o reforço do suporte estrutural é mínimo, bem como quaisquer cargas transmitidas para as paredes laterais da alvenaria - resultando numa boa solução para a integridade estrutural do edifício.

#### Fonte:

<https://fabricarchitecturemag.com/2017/04/01/an-ancient-structure-can-now-host-modern-events/>



## ELEMENTO CONSTRUTIVO PAREDE INTERIOR

Conceito de intervenção:



Título: **Danish Cultural Ministry**  
 Ano de construção existente: 1728  
 Ano de intervenção: 2005  
 Tipo/ função do edifício: Serviços/ Escritórios  
 Especialidades: Design: Louise Campbell & Marianne Britt Jorgensen



Localização: Copenhaga, Dinamarca; Europa  
 Contexto climático: Temperado marítimo. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb



Tipo de intervenção: Renovação  
 Requisitos funcionais: Acusticos e flexibilidade



Membrana (tipo/ subestrutura): Veludo  
 Área: 180 m<sup>2</sup>  
 Custo global: Membrana + estrutura: 80 €/m<sup>2</sup> (estimativa)  
 (material e instalação) Membrana: 20 €/m<sup>2</sup> (estimativa)



Figuras:



01\_Vista exterior do edifício



02\_Vista interior dos escritórios.



Descrição:  
 Este edifício é classificado como monumento protegido e alberga o escritório do Ministério da Cultura Dinamarquês. Era necessário criar uma série de gabinetes para os membros da equipa.

### Solução

A solução passou por compartimentar o piso de entrada existente (destinado a uma sala). Foi necessário garantir a reversibilidade da solução pois esta não podia alterar permanentemente o aspeto do edifício (devido ao seu estatuto). Por isso foram construídos cinco cubos modulares e independentes do edifício existente, e com estrutura metálica. Foram aplicadas cortinas com tecido opaco nas faces dos cubos para atuarem como: dispositivo de proteção solar (nas faces voltadas para as janelas existentes); e divisórias para separar a área de trabalho das áreas comuns e proporcionar um ambiente de trabalho mais concentrado.

Fonte:

KRÜGER, S. 2009. Textile Architecture, Berlin, Jovis Verlag, p. 64.



03\_Vista geral do interior do espaço compartimentado para albergar os novos escritórios.

## ELEMENTO CONSTRUTIVO PAREDE INTERIOR

Conceito de intervenção:



Título: **Hotel Evidencia Light**  
 Ano de construção existente: 1900 (estimativa)  
 Ano de intervenção: 2012  
 Tipo/ função do edifício: Serviços/ Hotel  
 Especialidades: Instalação: Meevo



Localização: Lisboa, Portugal; Europa  
 Contexto climático: Mediterraneo .Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa



Tipo de intervenção: Renovação  
 Requisitos funcionais: Ocultação de micro fissuras



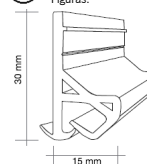
Membrana (tipo/ subestrutura): Membrana de poliéster revestida a PU (poliuretano) e impressa.  
 Área: Simple e com subestrutura em PVC.  
 Fabricante: ?  
 Custo global: Descor



Repor a forma



Figuras:



01\_Vista exterior do edifício.



Descrição:  
 Este projeto constitui um exemplo de como as membranas permitem criar ambientes graficamente personalizados. Existia a necessidade de converter o edifício existente num hotel. O edifício existente

### Solução

Devido à reduzida dimensão dos quartos do espaço a intervir optou-se por uma solução de revestimento em membrana que para além de ocultar imperfeições e permitir ganhos de área útil devido à reduzida espessura da membrana, também permitiu que a mesma fosse impressa com grafismos que incluem imagens de mobiliário, ajudando a dar escala e algum conforto visual ao espaço interior.

Fonte:

EVIDENCIA (2016). "Evidencia light hotel". Disponível em: <http://evidencia-light-sta.catarina.lisbon-hotel.net/pt/>; [Acedido a 10 Março 2016]



04\_Sistema de tensionamento da membrana Descor.



02\_Vista interior dos quartos com revestimento das paredes em membrana.





**ELEMENTO CONSTRUTIVO**  
**PARADE INTERIOR**

Conceito de intervenção: Conversão de espaço industrial em pousada da juventude

**PI.03**

Título: **Mino**  
Ano de construção do existente: 1970  
Ano de intervenção: 2010  
Tipo/ função do edifício: Serviços, Alojamento  
Especialidades: Arquitetura: Antonio Ravalli

Localização: Miglarino, Itália; Europa  
Contexto climático: Mediterrânico. Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfa.

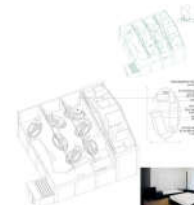
Tipo de intervenção: Alteração  
Requisitos funcionais: Acústica, térmica e luminica

Membrana (tipo): Membrana de poliéster com malha aberta e sem revestimento  
Área: 80 m<sup>2</sup>  
Custo global: Membrana: 30 €/m<sup>2</sup> (estimativa)  
(material e instalação)

Figuras:



02\_ vista interior dos compartimentos.



01\_ Esquema conceitual da proposta de intervenção.



03\_ vista exterior do edifício após renovação.  
02\_ Antes

Descrição:

O projeto está localizado num centro multiusos do município de Miglarino resultante da reabilitação dos edifícios de uma antiga indústria de transformação de cânhamo. O projeto, com financiamento reduzido, pretende dar resposta à necessidade de alojamento de um circuito turístico de verão do Parque Delta do Pò. Os objetivos deste projeto são: atingir um custo de construção e consumo energético reduzidos.

Solução:

Os principais desafios para a reabilitação funcional deste edifício prenderam-se com aspetos de iluminação, renovação de ar. O espaço de dormitório apresenta uma compartimentação semelhante à de uma acampamento através da inserção de células autónomas, delimitadas por uma membrana translúcida de poliéster. Esta foi a solução encontrada para proporcionar conforto luminoso e de ventilação devido ao fato de só existirem fontes de luz e ar numa única fachada do edifício a interencionar. Dado que o edifício será utilizado durante a primavera/ verão, optou-se pela ventilação passiva do espaço do dormitório. A ventilação passiva ficou facilitada devido à localização de aberturas existentes a norte e de duas torres de ventilação que foram adicionaram no telhado.

Fonte:  
DIVISARE (2016). "Mino". Disponível em: <http://divisare.com/projects/151257-antonio-ravalli-mino>; [Acedido a 11 janeiro 2016]  
RAVALLI, A. (2016). "Mino". Disponível em: <http://www.antonioravalli.it/MINO/>; [Acedido a 11 janeiro 2016]



04\_ Depois



**ELEMENTO CONSTRUTIVO**  
**PARADE INTERIOR**

Conceito: Flexibilidade

**PI.04**

Título: **Mies Update**  
Ano do projeto: 2002  
Tipo/ função do edifício: Arquitetura: Kalhöfer- Korschildgen

Especialidades:

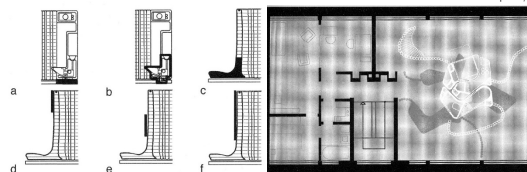
Tipo de intervenção: Renovação  
Requisitos funcionais: Mobilidade, luz, abastecimento, elasticidade, calor e comunicação.

Membrana (tipo): Membrana PVC, dupla. Subestrutura em PVC/ fibra de vidro.  
Custo global: Sem dados  
(material e instalação)

Figuras:



01\_ Estrutura rígida como balcão de cozinha, como wc, chuveiro e como canto de repouso.



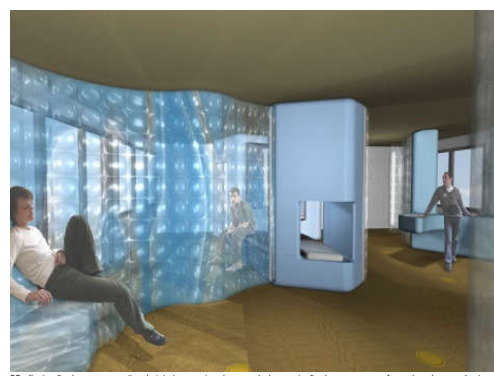
02\_ Esquemas conceituais representativos do potencial uso estratégico das paredes insufláveis.

Descrição:

Este projeto apresenta uma visão sobre as transformações dos materiais e técnicas utilizadas na indústria da produção de móveis. Apoiando-se na ideia de Mies Van der Rohe da "maior liberdade possível para a todos os tipos de uso" e dos "espaços fluidos", o projeto interpreta a planta dos apartamentos projetados por ele à luz de técnicas e materiais atuais. Móveis de carácter especial tipificados, com "paredes pneumáticas" que avançam no espaço, possibilitam variadas opções no sentido da organização, forma e atmosfera dos ambientes. As paredes rígidas recebem a infraestrutura técnica, os volumes pneumáticos inflados expandem-se tridimensionalmente em diferentes formas, tanto a parede como o mobiliário, e servem, devido a um revestimento especial, como condutores de calor, luz ou sinais eletrónicos.

Potencialidades destas divisórias: a) mobilidade - sistema com elementos insufláveis deslizantes substituídos rodas; em estado de repouso a estrutura rígida apoia-se sobre o piso; para movimento, a camada em forma de anel de borracha é preenchida de ar, transformando o conjunto num sistema deslizante; b) abastecimento - a construção posterior de uma instalação sanitária é frequentemente dificultada pela falta de ligação com o canal de escoamento ou pelos custos; o sistema "Gestolette" é uma alternativa, apresentando sistema de escoamento integrado com tubagem de 32mm para saída de esgoto, associado a um recipiente coletor construído na estrutura rígida; para esvaziar o recipiente existem, distribuídos no piso duplo, estações de conexão para retores; c) elasticidade - alcançada através da metalização de polímet, na superfície da membrana, juntamente com a tensão elétrica acionada por botão localizado na parte de baixo da parede pneumática; d) luz - a parte superior da parede pneumática é revestida por uma folha, uma superfície comprimida, condutora de luz; a luz é gerada pelo contacto com a parede; e) calor - as superfícies das paredes pneumáticas constituídas por folhas de fibras de poliéster, conduzem calor até 25° e podem ser aquecidas pelo acionamento de botões; f) comunicação - as superfícies verticais das paredes pneumáticas constituem-se de películas de material polimérico e eletrónico, que podem transformar-se, por pressão em determinados pontos, em monitores.

Fonte:  
KALHOEFER- & KORSCHILDGEN (2010). "Mies Update". Disponível em: [http://www.kalhoefer-korschildgen.de/de/projekte/wettbewerb/mies\\_update.html](http://www.kalhoefer-korschildgen.de/de/projekte/wettbewerb/mies_update.html); [Acedido a 02 junho de 2010].



03\_ Ilustração de uma perspetiva do interior, mostrando a possível apropriação dos espaços conformado pelas paredes insufláveis conjugadas com núcleos rígidos de mobiliário.

## ANEXO 6

*Tabela 6.1. Mensuração dos subcritérios – tipo, escala e descrição.*

<b>Código</b>	<b>Subcritérios</b>	<b>Unidades/Escala</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
SC1.1	Custo de construção	€	<b>QN</b>	Engloba o custo líquido dos materiais, transporte e mão de obra.
SC1.2	Custo energético operacional para aquecimento e arrefecimento (60 anos)	€	<b>QN</b>	Engloba o custo líquido da energia necessária para aquecimento e arrefecimento do edifício após intervenção durante 60 anos.
SC1.3	Custo de manutenção (60 anos)	€	<b>QN</b>	Engloba o custo líquido de manutenção da envolvente exterior do elemento de encerramento da varanda durante 60 anos.
SC1.4	Período de retorno do investimento na intervenção de reabilitação com a integração de estufas/ encerramento das varandas	anos	<b>QN</b>	Representa o número de anos após os quais a intervenção de encerramento das varandas passa a ser lucrativa.
SC2.1	Uso de técnicas e materiais de construção tradicionais	0 - Não existe; 1 - Muito insuficiente; 2- Insuficiente; 3 - Razoável; 4- Bom; 5 - Muito Bom	QL	
SC2.2	Capacidade de instalação em sítios ocupados	0 - Não existe; 1 - Muito insuficiente; 2- Insuficiente; 3 - Razoável; 4- Bom; 5 - Muito Bom	QL	É necessário desocupar o espaço para instalar a estufa? Causa transtornos (associados ao tempo de execução)?
SC2.3	Grau de intrusividade	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Intrusividade: capacidade de minimizar marcas ou danos no património.
SC2.4	Impacto do processo construtivo para a vizinhança	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Por exemplo, ruído, poeiras, obstrução temporária da via pública, decorrentes da fase de instalação dos elementos de encerramento das varandas na fachada posterior.
SC3.1	Qualidade estética da intervenção pelo exterior	0 - Não existe; 1 - Muito insuficiente; 2- Insuficiente; 3 - Razoável; 4- Bom; 5 - Muito Bom	QL	Escala, cor e forma. Relativamente ao edifício existente e à sua envolvente próxima. O impacto visual deve ser baixo. A qualidade estética reflete-se no grau de integração entre os novos e os elementos existentes, harmonia do conjunto e pelo impacto visual dos novos elementos.
SC3.2	Qualidade estética da intervenção pelo interior	0 - Não existe; 1 - Muito insuficiente; 2- Insuficiente; 3 - Razoável; 4- Bom; 5 - Muito Bom	QL	Escala, cor e forma. A qualidade estética reflete-se no grau de integração entre os novos e os elementos existentes, harmonia do conjunto e pelo impacto visual dos novos elementos.
SC4.1	Risco para os ocupantes perante incêndio	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Relacionado com a resistência ao fogo dos materiais (sem gotejamento, libertação de toxinas e grau de abertura da área transparente para evacuação). A resistência ao fogo do vidro é superior à da membrana de PVC (que liberta toxinas) mas a membrana de ETFE não liberta toxinas e é auto extingüível.
SC4.2	Risco para os ocupantes perante furacões/ tempestades	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Qual o risco para os ocupantes resultantes da implementação das soluções, relativamente a cada um dos eventos. Ou seja, até que ponto é que as soluções podem apresentar riscos acrescidos para a vida dos ocupantes perante a ocorrência de eventos de risco. Não deve existir projecção de material para fora do plano, nem gotejamento, nem sobre-elevação, etc.
SC4.3	Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	
SC4.4	Risco para os ocupantes em caso no caso da ativação de engenhos explosivos.	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	
SC5.1	Peso total	kg	<b>QN</b>	
SC5.2	Facilidade de montagem	0 - Impossível; 1 - Muito difícil; 2- difícil; 3-razoavel; 4- fácil; 5 - Muito fácil	QL	A instalação deve ser rápida, limpa e segura.
SC5.3	Tempo de execução estimado	horas	<b>QN</b>	Irá ter repercussões no tempo de exposição de partes do edifício a ações climáticas adversas, durante a realização da ampliação, sobretudo nos casos em que é necessário remover a cobertura original.
SC5.4	Durabilidade dos materiais de revestimento	anos	<b>QN</b>	
SC6.1	Grau de controlo dos sistemas de regulação pelos ocupantes	%	<b>QN</b>	Associa-se à percentagem de abertura da parte transparente da estufa.
SC6.2	Grau de adaptabilidade para futuras alterações	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	As alterações podem ser formais ou relativas a upgrades funcionais dos materiais/componentes, etc.
SC6.3	Grau de repetibilidade	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Repetibilidade: capacidade de desmontar e montar a solução construtiva noutra local.
SC6.4	Grau de reversibilidade	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Reversibilidade: capacidade de substituição total ou parcial dos componentes da solução construtiva em análise.
SC6.5	Isolamento acústico (Rw)	dB	<b>QN</b>	
SC6.6	Consumo energético operacional total do edifício c/ intervenção (em 60 anos)	KWh	<b>QN</b>	
SC7.1	Energia incorporada total (EE) em todo o ciclo de vida - 60 anos	MJ	<b>QN</b>	
SC7.2	Potencial de aquecimento Global total (PAG) em todo o ciclo de vida - 60 anos	kgCO2e	<b>QN</b>	
SC1.1	Custo de construção	€	<b>QN</b>	
SC1.2	Custo energético operacional para aquecimento e arrefecimento (60 anos)	€	<b>QN</b>	
SC1.3	Custo de manutenção (60 anos)	€	<b>QN</b>	
SC1.4	Período de retorno do investimento na intervenção de reabilitação com a integração de estufas/ encerramento das varandas	anos	<b>QN</b>	

## ANEXO 7

*Tabela 7.1. Mensuração dos subcritérios – tipo, escala e descrição.*

Código	Subcritérios	Unidades/ Escala	Tipo	Descrição
SC1.1	Custo de construção	€	QN	Engloba o custo líquido dos materiais, transporte e mão de obra.
SC1.2	Custo energético operacional para aquecimento e arrefecimento (60 anos)	€	QN	Engloba o custo líquido da energia necessária para aquecimento e arrefecimento da parte ampliada durante 60 anos
SC1.3	Custo de manutenção (60 anos)	€	QN	engloba o custo líquido de manutenção da envolvente exterior da parte ampliada durante 60 anos
SC1.4	Período de retorno do investimento na ampliação vertical	anos	QN	representa o número de anos após os quais a intervenção de ampliação vertical passa a ser lucrativa.
SC2.1	Uso de técnicas e materiais de construção tradicionais	0 - Não existe; 1 - Muito insuficiente; 2- Insuficiente; 3 - Razoável; 4- Bom; 5 - Muito Bom	QL	
SC2.2	Capacidade de instalação em sítios ocupados	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	É necessário desocupar o edifício total ou parcialmente para realizar a ampliação?
SC2.3	Grau de intrusividade	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Intrusividade: capacidade de minimizar marcas ou danos no património.
SC2.4	Impacto do processo construtivo para a vizinhança	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Por exemplo, ruído, poeiras, obstrução temporária da via pública, decorrentes da fase de construção da ampliação vertical.
SC3.1	Qualidade estética da intervenção pelo exterior	0 - Não existe; 1 - Muito insuficiente; 2- Insuficiente; 3 - Razoável; 4- Bom; 5 - Muito Bom	QL	Escala, cor e forma. Relativamente ao edifício existente e à sua envolvente próxima. O impacto visual deve ser baixo. A qualidade estética reflete-se no grau de integração entre os novos e os elementos existentes, harmonia do conjunto e pelo impacto visual dos novos elementos.
SC4.1	Resistência ao fogo dos materiais de revestimento da envolvente exterior	0 - Não cumpre com os requisitos legais; 1 - E; 2- B, C ou D; 3- A2: combustível; 4- A1: incombustível	QL	
SC4.2	Resistência ao fogo dos materiais de revestimento da envolvente interior	0 - Não cumpre com os requisitos legais; 1 - E; 2- B, C ou D; 3- A2: combustível; 4- A1: incombustível	QL	
SC4.3	Risco para os ocupantes perante furacões/ tempestades	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Qual o risco para os ocupantes resultantes da implementação das soluções, relativamente a cada um dos eventos. Ou seja, até que ponto é que as soluções podem apresentar riscos acrescidos para a vida dos ocupantes perante a ocorrência de eventos de risco. Não deve existir projeção de material para fora do plano, nem gotejamento, nem sobrelevação, etc.
SC4.4	Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	
SC4.5	Risco para os ocupantes em caso no caso da ativação de engenhos explosivos.	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	
SC4.6	Resistência à queda de granizo sobre a cobertura	0 - Não existe; 1 - Muito insuficiente; 2- Insuficiente; 3 - Razoável; 4- Bom; 5 - Muito Bom	QL	Por exemplo, no caso das superfícies em membrana, a deformação causada pela queda de granizo é recuperável ao longo do tempo, com o aquecimento da superfície. No caso de uma cobertura em vidro, cerâmica ou metálica, a deformação ou fendilhação já não é recuperável sem intervenção.
SC5.1	Peso total (envolvente exterior e laje de pavimento da parte ampliada)	kg	QN	
SC5.2	Facilidade de montagem	0 - Impossível; 1 - Muito difícil; 2- difícil; 3- razoável; 4- fácil; 5 - Muito fácil	QL	A instalação deve ser rápida, limpa e segura.
SC5.3	Tempo de execução estimado	dias	QN	Tem repercussões no tempo de exposição de partes do edifício a ações climáticas adversas, durante a realização da ampliação, sobretudo nos casos em que é necessário remover a cobertura original.
SC5.4	Acessibilidade para diagnóstico/facilidade de manutenção do espaço exterior	0 - Não existe; 1 - Muito insuficiente; 2- Insuficiente; 3 - Razoável; 4- Bom; 5 - Muito Bom	QL	
SC5.5	Acessibilidade para diagnóstico/facilidade de manutenção do espaço interior	0 - Não existe; 1 - Muito insuficiente; 2- Insuficiente; 3 - Razoável; 4- Bom; 5 - Muito Bom	QL	
SC5.6	Durabilidade média dos materiais de revestimento da envolvente exterior da parte ampliada	anos	QN	
SC6.1	Grau de adaptabilidade para futuras alterações	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	As alterações podem ser formais, relativas a upgrades funcionais dos materiais/ componentes, etc. Potencial de remoção/ ampliação da parte ampliada no futuro
SC6.2	Grau de repetibilidade	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Repetibilidade: capacidade de desmontar e montar a solução construtiva noutra local.
SC6.3	Grau de reversibilidade	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Reversibilidade: capacidade de substituição total ou parcial dos componentes da solução construtiva em análise.
SC6.4	Isolamento acústico (Rw) médio da envolvente exterior	dB	QN	
SC6.5	Consumo energético operacional total do edifício c/intervenção (em 60 anos)	kWh	QN	
SC7.1	Energia incorporada total (EE)	MJ	QN	Em todo o ciclo de vida - 60 anos
SC7.2	Potencial de aquecimento Global total (PAG)	kgCO <sub>2</sub> e	QN	Em todo o ciclo de vida - 60 anos
SC7.3	Resíduos sólidos gerados na fase de construção e manutenção	kg	QN	Ciclo de vida - 60 anos
SC7.4	Contributo para a biodiversidade local	0 - Não existe; 1 - Muito baixo; 2- Baixo; 3- Médio; 4- Elevado; 5- Muito elevado	QL	Por exemplo, integrando elementos biológicos no sistema construtivo, vegetação, por exemplo.

## ANEXO 8

*Tabela 8.1. Mensuração dos subcritérios – tipo, escala e descrição.*

<b>Código</b>	<b>Subcritérios</b>	<b>Unidades Escala</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
SB1.1	Custo de construção	€	<b>QN</b>	
SB1.2	Custo operacional e de manutenção (80 anos)	€	<b>QN</b>	
SB2.1	Respeito pela autenticidade	<b>0 a 5</b>	QL	Relativo à cultura local. A intervenção de reabilitação deve ter um impacto mínimo.
SB2.2	Respeito pelas intervenções anteriores/ Preservação do existente	<b>0 a 5</b>	QL	As sucessivas intervenções de todas as épocas devem ser respeitadas como um único objeto histórico consolidado, não devendo nenhuma das intervenções ser removida.
SB2.3	Grau de intrusividade	<b>0 a 5</b>	QL	Intrusividade: capacidade de minimizar marcas ou danos no património.
SB3.1	Qualidade estética da intervenção pelo exterior	<b>0 a 5</b>	QL	Escala, cor e forma. Relativamente ao edifício existente e à sua envolvente próxima. O impacto visual deve ser baixo. A qualidade estética reflete-se no grau de integração entre os novos e os elementos existentes, harmonia do conjunto e pelo impacto visual dos novos elementos.
SB3.2	Qualidade estética da intervenção pelo interior	<b>0 a 5</b>	QL	Escala, cor e forma. A qualidade estética reflete-se no grau de integração entre os novos e os elementos existentes, harmonia do conjunto e pelo impacto visual dos novos elementos.
SB4.1	Risco para os ocupantes perante incêndio	<b>0 a 5</b>	QL	A resistência ao fogo do vidro é superior à da membrana de ETFE (apesar desta ser combustível também é auto extingüível, ou seja, não propaga a chama, e não liberta toxinas). Contudo, a facilidade de corte da membrana de ETFE e as aberturas criadas em contacto com a chama promove a desenfumagem do espaço interior e os pedaços de membrana que forem projetados para fora do plano são tão leves e pequenos que não causam danos aos ocupantes, nem obstem as áreas de evacuação.
SB4.2	Risco para os ocupantes perante tempestades	<b>0 a 5</b>	QL	Qual o risco para os ocupantes resultantes da implementação das soluções, relativamente a cada um dos eventos. Ou seja, até que ponto é que as soluções podem apresentar riscos acrescidos para a vida dos ocupantes perante a ocorrência de eventos de risco. Não deve existir projeção de material para fora do plano, nem gotejamento, nem sobre-elevação, etc.
SB4.3	Risco para os ocupantes perante eventos sísmicos	<b>0 a 5</b>	QL	Qual o risco para os ocupantes resultantes da implementação das soluções, relativamente a cada um dos eventos. Ou seja, até que ponto é que as soluções podem apresentar riscos acrescidos para a vida dos ocupantes perante a ocorrência de eventos de risco. Não deve existir projeção de material para fora do plano, nem gotejamento, nem sobre-elevação, etc.
SB4.4	Risco para os ocupantes em caso no caso da ativação de engenhos explosivos.	<b>0 a 5</b>	QL	Qual o risco para os ocupantes resultantes da implementação das soluções, relativamente a cada um dos eventos. Ou seja, até que ponto é que as soluções podem apresentar riscos acrescidos para a vida dos ocupantes perante a ocorrência de eventos de risco. Não deve existir projeção de material para fora do plano, nem gotejamento, nem sobre-elevação, etc.
SB4.5	Resistência à queda de granizo sobre a cobertura	<b>0 a 5</b>	QL	Por exemplo, no caso das superfícies em membrana, a deformação causada pela queda de granizo é recuperável ao longo do tempo, com o aquecimento da superfície. No caso de uma cobertura em vidro, cerâmica ou metálica, a deformação ou fendilhação já não é recuperável sem intervenção.
SB5.1	Peso total da solução de cobertura	<b>kg</b>	<b>QN</b>	
SB5.2	Facilidade de montagem	<b>0 a 5</b>	QL	A instalação deve ser rápida, limpa e segura.
SB5.3	Facilidade de transporte até ao local da obra	<b>0 a 5</b>	QL	
SB5.4	Tempo de instalação estimado	<b>dias</b>	<b>QN</b>	A rapidez de instalação favorecerá a minimização dos prejuízos decorrentes da interrupção de atividades no espaço intervencionado.
SB5.5	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço exterior	<b>0 a 5</b>	QL	A solução adotada deve privilegiar/ permitir a manutenção periódica.
SB5.6	Acessibilidade para diagnóstico/ Facilidade de manutenção do espaço interior	<b>0 a 5</b>	QL	A solução adotada deve privilegiar/ permitir a manutenção periódica.
SB5.7	Durabilidade do material de revestimento da cobertura	<b>anos</b>	<b>QN</b>	
SB6.1	Grau de repetibilidade	<b>0 a 5</b>	QL	Repetibilidade: capacidade de desmontar e montar a solução construtiva noutra local.
SB6.2	Grau de reversibilidade	<b>0 a 5</b>	QL	Reversibilidade: capacidade de substituição total ou parcial dos componentes da solução construtiva em análise.
SB6.3	Indicador Fator Luz Dia (FLD)	<b>0 a 1</b>	<b>QN</b>	Verifica se os níveis de iluminação natural adequados às atividades principais. Deve ser superior a 1,5%. No caso de ambas as soluções apresentarem FLD superior a 1,5%, a melhor solução é a que apresenta a maior área de iluminância inferior a 1200 lux.
SB6.4	Indicador de Autonomia Espacial da Luz do dia (AELD)	<b>%</b>	<b>QN</b>	Verifica se os níveis de iluminação natural adequados às atividades principais.
SB6.5	Indicador de Exposição Solar Anual (ESA)	<b>%</b>	<b>QN</b>	Verifica se os níveis de iluminação natural adequados às atividades principais.
SB6.6	Indicador de Iluminância Natural Útil (INU)	<b>%</b>	<b>QN</b>	Verifica se a iluminação natural se adequa às principais áreas de ocupação
SB6.7	Isolamento acústico da cobertura (Rw)	<b>dB</b>	<b>QN</b>	Atenuação do ruído através da envolvente exterior.
SB6.8	Tempo de reverberação médio (500-1000Hz) do espaço com a solução	<b>1.3 a 1.8s</b>	<b>QN</b>	Verificar se é adequado à atividade principal (emissão de música).
SB6.9	Clareza do som (C80) (500-1000Hz) do espaço com a solução	<b>(-)2 e 4dB</b>	<b>QN</b>	Verificar se é adequado à atividade principal (emissão de música).
SB7.1	Energia incorporada total (EE) em todo o ciclo de vida - 80 anos	<b>MJ</b>	<b>QN</b>	
SB7.2	Potencial de aquecimento Global total (PAG) em todo o ciclo de vida - 80 anos	<b>kgCO2e</b>	<b>QN</b>	