

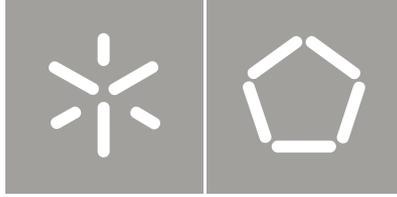


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Helenice Maria Sacht

Módulos de Fachada para Reabilitação
Eco-Eficiente de Edifícios

Helenice Maria Sacht
Módulos de Fachada para Reabilitação
Eco-Eficiente de Edifícios



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Helenice Maria Sacht

Módulos de Fachada para Reabilitação
Eco-Eficiente de Edifícios

Tese de Doutoramento
Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Luís Manuel Bragança Miranda Lopes

e co-orientação da
Professora Doutora Maria Manuela de Oliveira Guedes de
Almeida

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à minha família, em especial aos meus pais Arnaldo Sacht e Dilma Rosa Mauro Sacht pelo grande incentivo durante toda a minha vida acadêmica.

Ao Professor Doutor Luis Bragança e à coorientadora Professora Doutora Manuela Almeida pela orientação e grande apoio recebido durante todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho de investigação.

Ao Gabinete de Relações Internacionais (GRI) da Universidade do Minho pelo acompanhamento e apoio imprescindível e ao Programa Erasmus Mundus ISAC - Improving Skills Across Continents pelo apoio financeiro. A todos os meus amigos e colegas do Laboratório de Física e Tecnologia das Construções – LFTC, em especial à Eng^a. Catarina Araújo, à Eng^a. Joana Andrade, ao Eng^o. José Amarílio Barbosa e a Eng^a. Elsa Martins por sua preciosa ajuda, sem a qual não seria possível a concretização deste trabalho.

A todos os amigos do ISISE (Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering): à Eng^a. Inês Costa, ao Eng^o. Rodrigo Lameiras e em especial à amiga Eng^a. Gláucia Dalfré pelo apoio e companheirismo no decorrer do desenvolvimento desta tese de doutoramento.

Ao Eng^o. Heriberto Oliveira pela ajuda na realização dos ensaios de caracterização espectrofotométrica dos vidros.

Ao físico Doutor Edson Matsumoto que possibilitou, com bastante empenho, tanto o planeamento quanto a execução dos ensaios em túnel de vento realizados na Universidade Estadual de Campinas, no Brasil.

A todos os amigos de São Carlos-SP em especial às amigas Arq^a. Sofia Bessa, Arq^a. Marieli Lukiantchuki e Arq^o. Rodrigo Jabur pelo companheirismo e ajuda valiosa, tanto em termos académicos quanto a nível pessoal.

À amiga Arq^a. Maíra Dias pela ajuda e apoio durante a estadia em Campinas;

Ao Vitor Meneguetti e família pelo incentivo e apoio fundamental à minha carreira desde 2006.

Ao Eng^o. Gabriel Gonçalves (Covipor – La Veneciana Glassolutions Saint-Gobain); ao gestor Sr. Francisco Ferreira (Covipor – La Veneciana Glassolutions Saint-Gobain) e ao Eng^o. Artur Reynolds Brandão (Saint-Gobain Glass) pelo empenho no fornecimento das amostras de vidros para utilização nos ensaios de caracterização espectrofotométrica realizados neste trabalho de investigação.

Ao Eng^o. Pedro Miguel Costa Sainhas e ao diretor Sr. José Fraga Rodrigues da F2J Alumínios e Vidros Lda. pelos esclarecimentos na área de fachadas e perfis de alumínio.

Um agradecimento especial aos amigos Eng^a. Ana Teixeira e Orlando Vilela pela grande ajuda na impressão e entrega desta tese de doutoramento.

Por fim, os meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização de mais uma etapa da minha vida académica.



Módulos de Fachada para Reabilitação Eco-Eficiente de Edifícios

Resumo

Reduzir o consumo de energia e precaver o desperdício energético são alguns dos grandes objetivos da União Europeia (UE). Nesse contexto, a procura por novas tecnologias para a eficiência energética dos edifícios é urgente e pertinente uma vez que as tecnologias convencionais são relativamente pouco eficientes. Nas últimas décadas a tecnologia na área de fachadas sofreu avanços significativos, integrando elementos específicos para se adaptarem às condições externas e às exigências do utilizador. Dentre os componentes dos edifícios, as fachadas constituem um meio privilegiado para atuar e propor soluções, uma vez que influenciam o consumo de energia do edifício e o conforto dos seus ocupantes, dado que contribuem significativamente para a transferência de calor entre o ambiente interior e o ambiente exterior. Dessa forma, o objetivo deste trabalho de investigação foi o desenvolvimento de um sistema de fachadas denominado: “Módulos de Fachada para Reabilitação Eco-Eficiente de Edifícios”. Foram desenvolvidos pequenos componentes ajustáveis e intercambiáveis entre si, nomeadamente: grelha estrutural para montagem dos módulos; módulo padrão envidraçado fixo e móvel (projetante); módulo de proteção solar; módulo de ventilação; módulo parede de Trombe, módulo estufa e módulo fotovoltaico “girassol”, visando principalmente a eficiência energética. A metodologia consistiu no uso de simulações computacionais para determinação das condições de conforto térmico, iluminação natural e geração energética do módulo fotovoltaico e, além disso, foram realizados ensaios de caracterização espectrofotométrica dos vidros e ensaios em túnel de vento para o módulo de ventilação. Os resultados indicaram uma diminuição do consumo energético para os modelos simulados, principalmente devido ao uso de soluções passivas, como paredes de Trombe. O sistema de fachadas proposto resultou num sistema modular, com elementos passíveis de serem utilizados em conjunto ou separados, de forma flexível e versátil de acordo com a orientação solar e necessidades climáticas. A versatilidade e flexibilidade dos módulos é um importante diferencial do sistema, uma vez que permite uma abordagem arquitetónica diferente a cada aplicação, tal característica normalmente não é encontrada em sistemas de fachadas, que compreendem geralmente um único módulo. O uso deste sistema modular nos modelos indicou uma diminuição expressiva do consumo energético, principalmente devido ao uso dos módulos solares passivos. Espera-se que este sistema de fachada seja uma nova tecnologia que incorpora vidros de alto desempenho e soluções passivas, além de atender às exigências funcionais e estéticas.

Palavras-chave: Fachadas; Eficiência Energética; Simulação Computacional; Espectrofotometria de vidros; Túnel de vento.



Facade Modules for Eco-Efficient Renovation of Buildings

Abstract

Reduction in energy consumption and avoidance of energy waste are two of the main objectives of the European Union (EU). In this scope, the search of new technologies for energy efficiency in buildings is urgent once conventional technologies are not efficient in most cases. Over past, facade technology has been significantly improved by specific elements and materials to adapt climate conditions and user's requirements. Among building elements, facades are privileged components to study and propose solutions. They have major influence on energy consumption of buildings and in comfort of occupants, contributing significantly to the heat transfer between indoor and outdoor environment. In this context, the main objective of this research was the development of a new facade system named "Facade Modules for Eco-Efficient Renovation of Buildings". Small adjustable and interchangeable components were developed, namely structural grid for modules assembly, fixed and awning standard glazing modules, solar protection module, ventilation module, Trombe wall module, sunspace module and photovoltaic (PV) "sunflower", to mainly improve energy efficiency. The methodology consisted in computer simulations to determine conditions of thermal comfort, daylighting, and energetic generation of PV module. Spectrophotometer tests for glazing and wind tunnel tests for ventilation module were performed. The results indicated a decrease in the energy consumption of the simulated models, mainly due to the use of passive solutions, such as Trombe walls. The proposed facade system resulted in a modular system, with elements capable of being used in group or separately, with flexible and versatile applications, according to solar orientation and climacteric needs. The versatility and flexibility of the modules is an important advantage of the system, once it allows a different architectural approach for each application, such this feature is not usually found in facade systems, that comprises generally a single module. The use of this modular facade system in the models indicated an expressive energy consumption decrease, mainly due to the use of passive solar modules. This facade system is expected to be a new technology incorporating high-performance glass and passive solutions, also meeting functional and aesthetic demands.

Key-words: Facade; Energy Efficiency; Computational Simulation; Glass spectrophotometer test; Wind tunnel.

**INDICE**

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTAÇÃO E OBJETIVOS	01
1.1 Introdução.....	01
1.2 Objetivos.....	04
1.2.1 Objetivos Específicos	04
1.2.2 Hipótese e Tese.....	06
1.3 Organização da Tese de Doutoramento.....	07
CAPÍTULO 2. FACHADAS: CONCEÇÃO E REQUISITOS	11
2.1 Conceção de Fachadas.....	11
2.2 Requisitos de uma Fachada	16
2.2.1 Qualidade da Envolvente.....	18
2.2.2 Conforto Térmico	19
2.2.3 Iluminação Natural	25
2.2.4 Ventilação Natural	31
2.2.5 Acústica	34
CAPÍTULO 3. A ARQUITETURA SUSTENTÁVEL, BIOCLIMÁTICA E AS FACHADAS	41
3.1 Aspetos Bioclimáticos e a Envolvente	44
3.2 Fachadas e Sustentabilidade	46
3.3 Sistemas Solares Passivos de Aquecimento e Arrefecimento	48
3.3.1 Sistemas Solares Passivos de Aquecimento.....	50
3.3.2 Sistemas Solares Passivos de Arrefecimento	54
3.4 Soluções Passivas em Fachadas.....	55
3.4.1 Forma e Orientação do Edifício	55
3.4.2 Vãos Envidraçados em Fachadas	56
3.4.3 Janelas: Dimensionamento e Tipo de Aberturas	61
3.4.4 Massa Térmica	78
3.4.5 Parede Acumuladora ou de Armazenamento Térmico.....	80
3.4.6 Parede de Trombe.....	81
3.4.7 Parede de Água.....	88



3.4.8 Estufas.....	92
3.5 Sistemas de Fachada Atuais e Inovadores	95
3.6 Sistema Modular de Fachadas	117
CAPÍTULO 4. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	121
4.1 Definição do Conceito do Sistema de Fachadas	122
4.2 Definição dos Componentes dos Módulos de Fachada	124
4.2.1 Elaboração Modelo Teórico do Sistema	124
4.2.1.1 Características dos Envidraçados Pré-Selecionados	124
4.2.1.2 Determinação da Espessura dos Vidros.....	126
4.2.1.3 Seleção dos Materiais para os Módulos de Fachada	129
4.2.2 Estudo da Integração dos Componentes.....	137
4.2.2.1 Caracterização Climática de Portugal e Definição dos Climas para Estudo do Sistema de Fachada	139
4.2.2.2 Definição do Modelo Base	144
4.2.2.3 Ganhos Internos	149
4.2.2.4 Período de Funcionamento dos Sistemas	152
4.2.2.5 Condições de Referência.....	153
4.2.2.6 Visão Geral das Simulações Computacionais	155
4.2.2.7 Simulações de Desempenho Térmico	156
4.2.2.8 Simulações de Desempenho Lumínico.....	176
4.2.2.9 Simulações de Desempenho da Microgeração Energética do Módulo Fotovoltaico	186
4.2.2.10 Previsão de Desempenho Acústico	198
4.2.3 Otimização das Características Físicas dos Componentes.....	200
4.2.3.1 Ensaio de Caracterização Espectrofotométrica de Vidros	201
4.2.3.2 Ensaio em Túnel de Vento para o Módulo de Ventilação	212
4.2.4 Proposta do Sistema Modular de Fachadas: Pormenorização e Potencial de Aplicação	229



CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SISTEMA DE FACHADA	233
5.1 Teste: Simulações Computacionais de Desempenho Térmico.....	234
5.1.1 Variação de Temperaturas Internas do Modelo Base	234
5.1.2 Necessidades Energéticas de Aquecimento do Modelo Base Parede de Trombe..	238
5.2 Simulações Computacionais de Desempenho Térmico: Fachadas Envidraçadas	239
5.2.1 Simulações para Dez Tipos de Envidraçados	240
5.2.1.1 Coimbra: Necessidades Nominais de Aquecimento e Arrefecimento..	240
5.2.1.2 Faro: Necessidades Nominais de Aquecimento e Arrefecimento	241
5.2.1.3 Análise Geral	242
5.2.2 Simulações para Três Tipos de Envidraçados	243
5.2.2.1 Bragança: Necessidades Nominais de Aquecimento e Arrefecimento	244
5.2.2.2 Coimbra: Necessidades Nominais de Aquecimento e Arrefecimento..	245
5.2.2.3 Faro: Necessidades Nominais de Aquecimento e Arrefecimento	246
5.2.2.4 Análise Geral	247
5.3 Simulações Computacionais de Desempenho Térmico: Soluções Passivas.....	249
5.3.1 Simulações para Soluções Passivas de Aquecimento	250
5.3.1.1 Bragança: Necessidades Nominais de Aquecimento e Arrefecimento	250
5.3.1.2 Coimbra: Necessidades Nominais de Aquecimento e Arrefecimento..	251
5.3.1.3 Faro: Necessidades Nominais de Aquecimento e Arrefecimento	252
5.3.1.4 Análise Geral	253
5.3.2 Simulações para Soluções Passivas de Arrefecimento.....	256
5.3.2.1 Módulos de Ventilação.....	257
5.3.2.2 Dispositivos de Proteção Solar	261
5.3.2.3 Análise Geral Soluções Passivas de Arrefecimento	265
5.4 Simulações Computacionais de Desempenho Lumínico	268
5.4.1 Bragança	268
5.4.2 Coimbra	272
5.4.3 Faro	275
5.4.4 Análise Geral de Desempenho Lumínico	278
5.5 Simulação Computacional para Módulo Fotovoltaico	280
5.5.1 Solterm 5.0	280
5.5.1.1 Bragança	280



5.5.1.2 Coimbra	281
5.5.1.3 Faro	282
5.5.1.4 Análise Geral: Resultados do Software Solterm 5.0	283
5.5.1.5 Microgeração Energética x Necessidades Energéticas	285
5.5.1.6 Análise Ambiental dos Módulos Fotovoltaicos	287
5.5.2 Sunny Design 2.0	288
5.5.3 Comparação dos Resultados obtidos pelo Solterm 5.0 e Sunny Design 2.0	290
5.5.4 Estudo de Outros Tipos de Painéis no Sunny Design 2.0	291
5.6 Previsão de Desempenho Acústico	293
5.6.1 Desempenho Acústico para Módulo Envidraçado com Características Semelhantes ao Estudado	295
5.7 Ensaios de Caracterização Espectrofotométrica de Vidros	297
5.7.1 Vidros Float Simples: Diamant e Planilux	299
5.7.2 Vidro de Auto-limpeza: Bioclean	300
5.7.3 Vidros com Capa de Controlo Solar: Cool Lite KNT 155 Incolor e Verde	301
5.7.4 Vidros de Baixa Emissividade: Planitherm Total e Planitherm Futur Ultra N	302
5.7.5 Vidro Planistar	303
5.7.6 Envidraçados Duplos 04 e 07	304
5.7.7 Análise Geral do Desempenho Espectrofotométrico dos Vidros versus Desempenho Térmico	305
5.7.8 Desempenho Espectrofotométrico dos Vidros Versus Desempenho Lumínico	309
5.8 Ensaios em Túnel de Vento para Módulo de Ventilação	311
5.8.1 Ensaios de Velocidade	312
5.8.2 Taxa de Renovação de Ar por Hora	322
5.8.3 Análise Geral dos Resultados dos Ensaios em Túnel de Vento	326
CAPÍTULO 6: PORMENORIZAÇÃO E POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO SISTEMA MODULAR DE FACHADAS	331
6.1 Sistema Modular de Fachadas	332
6.2 Definição do Sistema de Fachadas	334
6.3 Pormenorização do Sistema Modular de Fachadas	344
6.3.1 Grelha Estrutural	344
6.3.2 Módulo Padrão Fixo e Projetante	346



6.3.3 Módulo Parede de Trombe	352
6.3.4 Módulo Estufa	356
6.3.5 Módulo de Ventilação	358
6.3.6 Módulo Proteção Solar	360
6.3.7 Módulo Fotovoltaico	371
6.3.8 Opções de Configuração do Sistema de Fachada	373
6.4 Síntese das Recomendações para o Sistema de Fachadas.....	378
6.5 Análise Económica Simplificada	384
6.5.1 Grelha Estrutural.....	385
6.5.2 Módulo Padrão Fixo.....	386
6.5.3 Módulo Padrão Projetante	387
6.5.4 Módulo Parede de Trombe	389
6.5.5 Módulo Estufa.....	392
6.5.6 Módulo de Ventilação	392
6.5.7 Módulo de Proteção Solar	393
6.5.8 Módulo Fotovoltaico.....	394
6.5.9 Custo Final por Módulo.....	395
6.5.10 Determinação do Período de Retorno para as Soluções de Fachada Indicadas ..	397
6.5.11 Panorama da Área de Construção em Portugal e Avaliação do Potencial de Aplicação do Sistema Modular de Fachadas.....	407
CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES	417
7.1 Conclusões	417
7.2 Perspetivas para o Desenvolvimento de Trabalhos Futuros.....	425
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	429
ANEXOS	455
Anexo A: Simulações Computacionais de Desempenho Térmico: Fachadas Envidraçadas.....	455
Anexo B: Simulações Computacionais de Desempenho Térmico: Soluções Passivas	461
Anexo C: Simulações Computacionais de Desempenho Lumínico	468
Anexo D: Simulações Computacionais para Módulo Fotovoltaico	486
Anexo E: Dados da Pormenorização do Sistema de Fachadas.....	490



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Caracterização Energética Nacional	02
Figura 2.1 Esquema ilustrativo elaborado, considerando parâmetros e aspetos que devem ser considerados durante a conceção de uma fachada	14
Figura 2.2 Limites de temperatura aceitável para espaços naturalmente ventilados	25
Figura 2.3 Edifício Solar XXI.....	27
Figura 2.4 Projeto Escola Secundária de Valongo (1993).....	27
Figura 2.5 Aberturas de admissão de ar em paredes de fachada – Posições mais aconselháveis ...	34
Figura 3.1 “ <i>Trias Enegetica</i> ” ilustrativa dos três passos que devem ser seguidos na busca pela eficiência energética dos edifícios	47
Figura 3.2 Casas Janas - Casa de baixo consumo energético, Projeto Passive-On, Sintra, Portugal, 2002.....	49
Figura 3.3 3D Casa Passivhaus proposta para Portugal.....	49
Figura 3.4 Estimativa das necessidades anuais de aquecimento (vermelho) e de arrefecimento (azul) para uma casa típica e a casa <i>Passivhaus</i> , construída em Portugal	50
Figura 3.5 Temperatura resultante durante uma semana de muito calor, sem um sistema ativo de arrefecimento.....	50
Figura 3.6 Sistema de Ganho Direto	51
Figura 3.7 Edifício de Serviços, ICP – Porto. Arquiteto José Gigante	51
Figura 3.8 Casas Janas, Sintra. Arquiteta Filipa Mourão e João Santa Rita	51
Figura 3.9 Moradia – Algarve. Arquiteto Candido de Sousa.....	52
Figura 3.10 Escola do Alto da Faia. Arquitetos Jorge Conceição e Rui Órfão	52
Figura 3.11 Sistema de Ganho Indireto	53
Figura 3.12 Casa Shäffer, Porto Santo (Com Paredes de Trombe). Arquiteto Günther Ludewig.....	53
Figura 3.13 Detalhe da Janela.....	53
Figura 3.14 Sistema de Ganho Isolado	54
Figura 3.15 Moradia Unifamiliar com Estufa – Vale do Rosal. Inverno e Verão com Proteção de vegetação. Arquiteto Fausto Simões.....	54
Figura 3.16 Ferreira do Zêzere - Escola. Arquiteto Francisco Moita	54



Figura 3.17. Esquema ilustrativo da correta orientação de um edifício	56
Figura 3.18 Window-to-Wall Ratio (WWR) x Consumo Energético Anual	59
Figura 3.19 Tipos de janelas utilizadas no estudo	61
Figura 3.20 Esquema: Dimensões necessárias para avaliação da iluminação natural	63
Figura 3.21 Relação de 1:1,5 a 1:2 entre a altura dos vãos e a profundidade do compartimento.....	64
Figura 3.22 Influência da Localização e Forma dos Vãos Envidraçados - Linhas de igual Fator de Luz do Dia (FLD) para 4 arranjos diferentes da mesma área de vidro.....	64
Figura 3.23 Eficiência Energética - Coeficiente Transmissão Térmica Envidraçados	70
Figura 3.24 a. Massa térmica eficiente: a variação térmica no exterior é elevada mas no interior é pequena; b. Massa térmica menos eficiente	78
Figura 3.25 Parede acumuladora com efeito de Estufa (durante o dia em Inverno).....	80
Figura 3.26 Parede acumuladora com efeito de Estufa (Durante a Noite em Inverno)	80
Figura 3.27 Casas de Jade – Fachada Sul, Sintra (com Paredes de Armazenamento).....	81
Figura 3.28 Esquema de funcionamento de uma Parede de Trombe Inverno / Verão	83
Figura 3.29 Imagem - Infravermelho. a. Parede de trombe em Zion, 16 de dezembro, Horário: 8:30 b. Parede de trombe do NREL SEB, 21 de Janeiro, Horário: 8:30.....	84
Figura 3.30 Visitor Center, Zion National Park (Utah, EUA)	85
Figura 3.31 Wind Site Entrance Building (SEB) (Colorado, USA)	85
Figura 3.32 Distribuição das células fotovoltaicas no envidraçado.....	85
Figura 3.33 Diagrama mostrando a parede de trombe com células fotovoltaicas	85
Figura 3.34 Gráfico comparando a temperatura interna para ambientes com paredes de trombe tradicional e com células fotovoltaicas	86
Figura 3.35 Casa Termicamente Otimizada – Fachada Sul, Porto. Arquitetos Carlos Araújo e Santiago Boissel.....	86
Figura 3.36 Fachada Norte.....	86
Figura 3.37 Parede dinâmica, parede de trombe com efeito de Estufa durante o dia em Inverno	88
Figura 3.38 Esquema: Funcionamento de uma parede de água com tambores	89
Figura 3.39 Vista do interior da Casa Corrale, à direita a parede de água feita com tambores	89
Figura 3.40 Sistema See-Trough Wall.....	90
Figura 3.41 Sistema de Parede de água “ <i>Transwall</i> ”	91
Figura 3.42 Sala, destacando-se a grande área dos vãos e as colunas de água	92
Figura 3.43 Esquema elaborado: Sistemas de Fachada e seus Aspetos	96
Figura 3.44 Subcomponentes do sistema de vedação dos painéis de GRC mais utilizados	97



Figura 3.45 Exemplo de painel metálico compósito que pode ser utilizado em fachadas	97
Figura 3.46 Sistema Caiman	97
Figura 3.47 Sistema Mascaret	97
Figura 3.48 Fachada em Alumínio. Montagem de perfis individuais	98
Figura 3.49 Fachada em Alumínio. Montagem de elementos modulares	98
Figura 3.50 Secção vertical dos módulos de fachada em alumínio	99
Figura 3.51 Secção horizontal	99
Figura 3.52 a-j Sistemas de Fachada Modular em Alumínio.	100
Figura 3.53 Fachada modular em alumínio	101
Figura 3.54 Detalhe dos Perfis a; desenho b	101
Figura 3.55 Detalhe de um tipo de Painel ventilado que permite escoamento de água	101
Figura 3.56 Aplicação dos painéis	101
Figura 3.57 Sistema Kalzip	101
Figura 3.58 Exemplos de opções de cores das esquadrias e fachadas	102
Figura 3.59 Sistema de fachada em PVC a e detalhe do perfil b	102
Figura 3.60 Habitação com as fachadas construídas em PVC preenchido com concreto e aço.....	102
Figura 3.61 Fachadas Integradas avançadas trajetória do fluxo de ar. DA; SA; FAR; CAE e CAI... 104	104
Figura 3.62 Capricorn Haus, Düsseldorf.....	106
Figura 3.63 Fachada Capricorn	106
Figura 3.64 Detalhe da Secção da Fachada	106
Figura 3.65 Fachada Temotion.....	106
Figura 3.66 Arranjos possíveis da Fachada Temotion.....	106
Figura 3.67 Ideia de uma fachada aprimorada para reabilitação.....	107
Figura 3.68 O componente para fachadas	108
Figura 3.69 Detalhe da grelha dos componentes	108
Figura 3.70 Painéis prismáticos para fachadas	109
Figura 3.71 Detalhes da angulação dos painéis prismáticos	109
Figura 3.72 Edifício Power, Osaka – Japão, 2005.....	109
Figura 3.73 Detalhe da Fachada do Edifício.....	109
Figura 3.74 Edifício Nikken Sekkei Tokyo (2003)	110
Figura 3.75 Detalhe da fachada do edifício	110



Figura 3.76 Edifício de testes com fachada revestida com material fotocatalizador, Noda-shi, Chiba, Japão (2004)	111
Figura 3.77 Esquema - Funcionamento do sistema de vaporização de água na fachada	111
Figura 3.78 Graz-Liebenau (Dieselweg) na Áustria (1950), antes (esquerda) e depois (direita) da reabilitação	112
Figura 3.79 Detalhe do Painel	112
Figura 3.80 Célula Monocristalina	114
Figura 3.81 Célula Policristalina	114
Figura 3.82 Célula Amorfa	114
Figura 3.83 Esquema do painel em formato de árvore.....	116
Figura 3.84 O protótipo em testes para coletar a radiação solar	116
Figura 3.85 Exemplo de revestimento sem (superior) e com (inferior) cobertura de auto-limpeza ..	117
Figura 3.86 Detalhes de PCMs embutidos com vidro.....	117
Figura 3.87 Painel constituído por vidro e aerogel granulado.....	117
Figura 4.1 Portugal Continental. Zonas climáticas de Inverno.....	140
Figura 4.2 Portugal Continental. Zonas climáticas de Verão	140
Figura 4.3 Valores médios da temperatura mínima do ar no inverno	141
Figura 4.4 Valores médios da temperatura máxima no verão (Junho, Julho, Agosto).	141
Figura 4.5 Temperatura do ar: Média anual	142
Figura 4.6 Número médio anual de dias muito quentes (temperatura máxima superior a 35°C)	142
Figura 4.7 Valores médios da radiação solar global no plano horizontal para a Península Ibérica ..	143
Figura 4.8 Mapa de Portugal Continental e Ilhas: Localidades para simulações computacionais....	144
Figura 4.9 Modelo Base.....	145
Figura 4.10 Paredes - Sistema Convencional Português.	146
Figura 4.11 Laje de Cobertura - Sistema Convencional Português.....	146
Figura 4.12 Laje do Pavimento - Sistema Convencional Português.....	147
Figura 4.13 Paredes-Sistema <i>Light Gauge Steel Framing</i>	147
Figura 4.14 Laje de Cobertura-Sistema <i>Light Gauge Steel Framing</i>	148
Figura 4.15 Laje do Pavimento-Sistema <i>Light Gauge Steel Framing</i>	149
Figura 4.16 Período de Ocupação.....	150
Figura 4.17 Período de Uso de Iluminação Elétrica.....	151



Figura 4.18 Período de Uso de Equipamentos.....	152
Figura 4.19 Período de Ventilação Natural.....	153
Figura 4.20 Exemplo da interface do software <i>DesignBuilder</i> com a visualização do modelo.....	157
Figura 4.21 Hierarquia seguida pelo software <i>DesignBuilder</i>	158
Figura 4.22 Modelo multipavimentos confeccionado no <i>DesignBuilder</i>	159
Figura 4.23 Esquema mostrando como o <i>DesignBuilder</i> considera os blocos e definição de zonas nos modelos simulados.....	160
Figura 4.24 Planta: Perímetro das zonas formadas pelo <i>DesignBuilder</i>	160
Figura 4.25 Módulos de Fachada: Simulações computacionais de teste.....	164
Figura 4.26 Modelo com módulos envidraçados.....	167
Figura 4.27 Modelo com módulos formando uma parede de Trombe.....	168
Figura 4.28 Modelo com módulos formando duas paredes de Trombe.....	168
Figura 4.29 Modelo com módulos de estufa.....	169
Figura 4.30 Modelo com módulos de estufa e módulos parede de Trombe.....	169
Figura 4.31 Modelo com módulos de ventilação, formando um peitoril ventilado.....	171
Figura 4.32 Modelo com módulos de ventilação superiores e inferiores.....	171
Figura 4.33 Modelo com módulos de ventilação superiores.....	172
Figura 4.34 Modelo com módulos de ventilação inferiores.....	172
Figura 4.35 Modelo com módulos de ventilação superiores e inferiores e hachura indicando a posição dos dispositivos de proteção solar.....	174
Figura 4.36 Esquema apresentando alguns detalhes dos dispositivos de proteção solar horizontais considerados.....	174
Figura 4.37 Esquema ilustrativo, em vermelho os ganhos diretos que são considerados pelo método do BRE que é utilizado no software <i>Ecotect</i>	178
Figura 4.38 Exemplo da interface do <i>Ecotect</i>	179
Figura 4.39 Exemplo de imagem “falsecolor” gerada pelo <i>Desktop Radiance</i>	180
Figura 4.40 Exemplo de imagem “iso contour” gerada pelo <i>Desktop Radiance</i>	180
Figura 4.41 a-b. Condições de Simulação de Iluminação Natural: Esquemas ilustrativos 3D.....	184
Figura 4.42 Nível de iluminação de acordo com a latitude do local. Tais valores aumentam com a proximidade da linha do Equador.....	185
Figura 4.43 Exemplo da Interface do software <i>Solterm</i>	187
Figura 4.44 Sistema Fotovoltaico Simulado.....	193
Figura 4.45 Exemplo de tela do software <i>Sunny Design</i>	193



Figura 4.46 Sistema Fotovoltaico Simulado no Software <i>Sunny Design</i>	197
Figura 4.47 Esquema ilustrativo dos elementos que compõe a fachada estudada,	198
Figura 4.48 Amostra de vidro colocada no espectrofotómetro na vertical.	201
Figura 4.49 Esquema do comportamento da radiação ao incidir em uma superfície transparente. .	203
Figura 4.50 Esquema do comportamento da radiação ao incidir em uma superfície translúcida.	203
Figura 4.51 Espectro Solar.	203
Figura 4.52 Curva de Parry Moon- Distribuição Espectral da Energia Solar.	204
Figura 4.53 a-b. Dispositivo em papel madeira para conformação dos envidraçados duplos a; dispositivo com os vidros posicionados b.	207
Figura 4.54 Limpeza das Amostras.	210
Figura 4.55 Armazenamento das amostras já limpas.	210
Figura 4.56 Espectrofotómetro UNICAM UV/VIS.	210
Figura 4.57 Amostra posicionada no Espectrofotómetro.	210
Figura 4.58 Início do ensaio.	211
Figura 4.59 Detalhe do monitor com o traçado do gráfico dos resultados no momento do ensaio. .	211
Figura 4.60 Esquema de componentes de um túnel de vento e exemplo de modelo urbano em escala reduzida.	213
Figura 4.61 Túnel de Vento da UNICAMP.	216
Figura 4.62 Ilustração geral do túnel de vento de circuito aberto da UNICAMP.	216
Figura 4.63 Vista Posterior da placa composta por tubos de PVC para simular a turbulência, próximo à entrada de ar do túnel de vento. Túnel de Vento da UNICAMP.	217
Figura 4.64 Maquete em papel madeira.	218
Figura 4.65 Maquete em papel madeira com teto aberto.	218
Figura 4.66 Detalhe da cobertura que foi deixada aberta para possibilitar a instalação de sensores e demais mecanismos necessários para execução do ensaio.	218
Figura 4.67 Aberturas que serão utilizadas na configuração dos ensaios: abertura maior para fixação das fachadas em acrílico e menor para porta.	218
Figura 4.68 Detalhe da camada interna do vão destinado à fachada, que se sobressai para fixação das fachadas em acrílico.	219
Figura 4.69 Detalhe da camada interna dos vãos destinados à fachada e à porta.	219
Figura 4.70 Confeção dos Protótipos das fachadas em acrílico, depois de vincar são iniciados os cortes na cortadora a laser.	219
Figura 4.71 Uma das placas com os protótipos das fachadas cortados.	219



Figura 4.72 Caso 01A: Fachada com 6 módulos de ventilação (tipo peitoril ventilado) com elementos da grelha posicionados na vertical.	220
Figura 4.73 Caso 01B: Fachada com 3 módulos de ventilação posicionados na parte superior e inferior, com elementos da grelha posicionados na vertical.	221
Figura 4.74 Caso 02A: Fachada com 6 módulos de ventilação (tipo peitoril ventilado) com elementos da grelha posicionados na horizontal.	221
Figura 4.75 Caso 02B: Fachada com 3 módulos de ventilação posicionados na parte superior e inferior, com elementos da grelha posicionados na horizontal.	222
Figura 4.76 Fachada dos Casos 01A e 01B.	222
Figura 4.77 Fachada dos Casos 02A e 02B.	223
Figura 4.78 As quatro variações de fachadas ensaiadas.	223
Figura 4.79 Esquema: Configuração de Fachadas para Ensaio em Túnel de Vento.	224
Figura 4.80 Planta: Posicionamento dos Sensores na Maquete.	226
Figura 4.81 Perspetiva: Posicionamento dos Sensores na Maquete.	227
Figura 4.82 Detalhe da parte superior da maquete com as lâminas de borracha para vedação posicionadas.	227
Figura 4.83 Detalhe da parte inferior do túnel de vento.	227
Figura 4.84 Maquete posicionada no interior do túnel e sensor externo em frente à fachada (P1)..	228
Figura 4.85 Sensores internos (P2, P3 e P4) posicionados na maquete.	228
Figura 4.86 Detalhe de um sensor no interior da maquete (P4).	228
Figura 4.87 Hastes metálicas e sensores externos (P5 e P6) posicionados na saída de ar da maquete.	228
Figura 5.1 Inverno: Temperaturas internas com uso dos envidraçados.	235
Figura 5.2 Verão: Temperaturas internas com uso dos envidraçados.	235
Figura 5.3 Inverno: Temperaturas internas com uso do Envidraçado de Controlo Solar.	236
Figura 5.4 Verão: Temperaturas internas com uso do Envidraçado de Controlo Solar.	236
Figura 5.5 Inverno: Temperaturas internas com uso do envidraçado de auto-limpeza.	237
Figura 5.6 Verão: Temperaturas internas com uso do envidraçado de auto-limpeza.	237
Figura 5.7 Necessidades Energéticas de Aquecimento.	238
Figura 5.8 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional - Coimbra.	240
Figura 5.9 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF - Coimbra.	240
Figura 5.10 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Coimbra.	241



Figura 5.11 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Coimbra.....	241
Figura 5.12 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional - Faro.	242
Figura 5.13 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema LGSF - Faro.....	242
Figura 5.14 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Faro.....	242
Figura 5.15 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Faro.	242
Figura 5.16 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional - Bragança.	244
Figura 5.17 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF - Bragança.	244
Figura 5.18 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Bragança.....	244
Figura 5.19 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Bragança.....	244
Figura 5.20 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional - Coimbra.....	245
Figura 5.21 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF - Coimbra.	245
Figura 5.22 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Coimbra.....	245
Figura 5.23 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Coimbra.....	245
Figura 5.24 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional - Faro.	246
Figura 5.25 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF - Faro.	246
Figura 5.26 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Faro.....	246
Figura 5.27 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Faro.	246
Figura 5.28 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional - Bragança.	250
Figura 5.29 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF - Bragança.	250
Figura 5.30 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Bragança.....	251
Figura 5.31 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Bragança.....	251
Figura 5.32 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional - Coimbra.....	252
Figura 5.33 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF - Coimbra.	252
Figura 5.34 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Coimbra.....	252
Figura 5.35 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Coimbra.....	252
Figura 5.36 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional - Faro.	253
Figura 5.37 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF - Faro.	253
Figura 5.38 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Faro.....	253
Figura 5.39 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Faro.	253
Figura 5.40 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Bragança.....	258
Figura 5.41 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Bragança.....	258
Figura 5.42 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Coimbra.....	259



Figura 5.43 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Coimbra.....	259
Figura 5.44 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Faro.....	260
Figura 5.45 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Faro.....	260
Figura 5.46 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Bragança.....	262
Figura 5.47 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Bragança.....	262
Figura 5.48 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Coimbra.....	263
Figura 5.49 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Coimbra.....	263
Figura 5.50 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Faro.....	264
Figura 5.51 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Faro.....	264
Figura 5.52 Bragança: Fachada 04 5x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).270	
Figura 5.53 Bragança: Fachada 04 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).270	
Figura 5.54 Bragança: Fachada 07 5x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).270	
Figura 5.55 Bragança: Fachada 07 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).270	
Figura 5.56 Bragança: Fachada 04 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	271
Figura 5.57 Bragança: Fachada 04 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	271
Figura 5.58 Bragança: Fachada 07 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	271
Figura 5.59 Bragança: Fachada 07 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	271
Figura 5.60 Coimbra: Fachada 04 5x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b) ..	273
Figura 5.61 Coimbra: Fachada 04 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b) ..	273
Figura 5.62 Coimbra: Fachada 07 5x5 módulos: Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)....	273
Figura 5.63 Coimbra: Fachada 07 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b) ..	273
Figura 5.64 Coimbra: Fachada 04 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b)	274
Figura 5.65 Coimbra: Fachada 04 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b)	274
Figura 5.66 Coimbra: Fachada 07 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b)	274
Figura 5.67 Coimbra: Fachada 07 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b)	274
Figura 5.68 Faro: Fachada 04 5x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	276
Figura 5.69 Faro: Fachada 04 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	276
Figura 5.70 Faro: Fachada 07 5x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	276
Figura 5.71 Faro: Fachada 07 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	276
Figura 5.72 Faro: Fachada 04 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	277
Figura 5.73 Faro: Fachada 04 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	277
Figura 5.74 Faro: Fachada 07 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	277



Figura 5.75 Faro: Fachada 07 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	277
Figura 5.76 Bragança: Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico.	281
Figura 5.77 Coimbra: Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico.	282
Figura 5.78 Faro: Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico.	282
Figura 5.79 Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico por ano.....	283
Figura 5.80 Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico por m ² .ano.....	281
Figura 5.81 Consumo Energético x Energia fornecida pelo sistema fotovoltaico - Envolvente convencional.....	286
Figura 5.82 Consumo Energético x Energia fornecida pelo sistema fotovoltaico-Envolvente LGSF	286
Figura 5.83 Consumo de energia primária de origem fóssil: Impactos evitados com o uso dos sistemas.	287
Figura 5.84 Emissão de gases com Efeito de Estufa – CO ₂ : Impactos evitados com o uso dos sistemas.	288
Figura 5.85 Sunny Design: Energia anual fornecida pelos sistemas fotovoltaicos por ano.....	289
Figura 5.86 Sunny Design: Energia anual fornecida pelos sistemas fotovoltaicos por m ²	290
Figura 5.87 Solterm e Sunny Design: Comparação da energia anual fornecida pelos sistemas fotovoltaicos.....	290
Figura 5.88 Solterm e Sunny Design: Comparação da energia anual fornecida pelos sistemas fotovoltaicos por m ²	291
Figura 5.89 Sunny Design: Energia anual fornecida pelos sistemas fotovoltaicos por ano.....	292
Figura 5.90 Sunny Design: Energia anual fornecida pelos sistemas fotovoltaicos por m ²	292
Figura 5.91 Isolamento de vidros duplos.....	295
Figura 5.92 Curva de Transmissão-Vidro Diamant 6mm.....	299
Figura 5.93 Curva de Transmissão-Vidro Planilux 6mm.....	300
Figura 5.94 Curva de Transmissão-Vidro Bioclean 6mm	300
Figura 5.95 Curva de Transmissão-Vidro Cool Lite KNT 155 6mm.....	301
Figura 5.96 Curva de Transmissão-Vidro Cool Lite KNT 155 Verde 6mm	302
Figura 5.97 Curva de Transmissão-Vidro Planitherm Total 6mm	303
Figura 5.98 Curva de Transmissão-Vidro Planitherm Futur Ultra N 6mm.....	303
Figura 5.99 Curva de Transmissão-Planistar 6mm	304
Figura 5.100 Curva de Transmissão - Envidraçado 04 (6mm - 6mm ar - 6mm) em comparação com os vidros simples pelos quais é composto.	304



Figura 5.101 Curva de Transmissão - Envidraçado 07 (6mm - 6mm ar - 6mm) em comparação com os vidros simples pelos quais é composto.	305
Figura 5.102 Transmissão Total dos Vidros e Envidraçados.....	307
Figura 5.103 Curvas de Transmissão dos Vidros.....	308
Figura 5.104 Curvas de Transmissão - Envidraçados 04 e 07 (6mm - 6mm ar - 6mm).	310
Figura 5.105 Caso 1A com ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).	315
Figura 5.106 Caso 1B com ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).	315
Figura 5.107 Caso 2A com ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).	316
Figura 5.108 Caso 2B com ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).	316
Figura 5.109 Caso 1A sem ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).	317
Figura 5.110 Caso 1B sem ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).	317
Figura 5.111 Caso 2A sem ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).	318
Figura 5.112 Caso 2B sem ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).	318
Figura 5.113 Caso 1A com ventilação cruzada: Razão entre as velocidades nos pontos internos e externos (V) e a velocidade na fachada (V1).	320
Figura 5.114 Caso 1B com ventilação cruzada: Razão entre as velocidades nos pontos internos e externos (V) e a velocidade na fachada (V1).	320
Figura 5.115 Caso 2A com ventilação cruzada: Razão entre as velocidades nos pontos internos e externos (V) e a velocidade na fachada (V1).	321
Figura 5.116 Caso 2B com ventilação cruzada: Razão entre as velocidades nos pontos internos e externos (V) e a velocidade na fachada (V1).	321
Figura 5.117 Caso 1A sem ventilação cruzada: Razão entre as velocidades nos pontos internos e a velocidade na fachada (V1).	321
Figura 5.118 Caso 1B sem ventilação cruzada: Razão entre as velocidades nos pontos internos e a velocidade na fachada (V1).	321



Figura 5.119 Caso 2A sem ventilação cruzada: Razão entre as velocidades nos pontos internos e a velocidade na fachada (V1).....	322
Figura 5.120 Caso 2B sem ventilação cruzada: Razão entre as velocidades nos pontos internos e a velocidade na fachada (V1).....	322
Figura 5.121 Caso 1A com ventilação cruzada: Taxa de renovação por hora em função da velocidade média de saída do ar.....	322
Figura 5.122 Caso 1B com ventilação cruzada: Taxa de renovação por hora em função da velocidade média de saída do ar.....	322
Figura 5.123 Caso 2A com ventilação cruzada: Taxa de renovação por hora em função da velocidade média de saída do ar.....	323
Figura 5.124 Caso 2B com ventilação cruzada: Taxa de renovação por hora em função da velocidade média de saída do ar.....	323
Figura 5.125 Todos os casos com ventilação cruzada: Taxa de renovação por hora em função da velocidade média de saída do ar.....	323
Figura 5.126 Gráfico: Taxa de renovação por hora em função da velocidade média de saída do ar para um intervalo de taxas de renovação usual.....	325
Figura 5.127 Caso 02A e 02B: Melhores Soluções em Termos de Ventilação Natural.....	327
Figura 6.1 Palácio de Cristal, projetado por Joseph Paxton e construído entre 1850 e 1851.....	333
Figura 6.2 <i>Le Modulor</i> , publicado em 1948, utilizando as dimensões estéticas da seção áurea e da série de Fibonacci.....	333
Figura 6.3 Esquema: Possibilidades de montagem de acordo com as necessidades.....	333
Figura 6.4 Esquema: Fachada Montada.....	333
Figura 6.5 Módulo padrão inicial.....	335
Figura 6.6 Módulo padrão múltiplo inicial.....	335
Figura 6.7 Dispositivo de proteção solar vertical e sua instalação no módulo padrão.....	335
Figura 6.8 Dispositivo de proteção solar horizontal e sua instalação no módulo padrão.....	335
Figura 6.9 Dispositivo de proteção solar: proposta de variação da angulação.....	335
Figura 6.10 Módulo de ventilação inicial.....	336
Figura 6.11 Módulo parede de Trombe inicial.....	336
Figura 6.12 Módulo estufa inicial.....	336
Figura 6.13 Módulo fotovoltaico inicial.....	336
Figura 6.14 Módulo fotovoltaico-Proposta para a peça de ligação.....	336



Figura 6.15 Módulo fotovoltaico acoplado sobre módulo padrão.....	336
Figura 6.16 Proposta inicial do sistema, com uso dos módulos padrão envidraçado, módulo parede de Trombe e módulo fotovoltaico.	337
Figura 6.17 Grelha Estrutural.....	337
Figura 6.18 Módulo Padrão Fixo.....	338
Figura 6.19 Módulo Padrão Projetante	338
Figura 6.20 Módulo de Proteção Solar Opção 01.....	338
Figura 6.21 Módulo de Proteção Solar Opção 02.....	338
Figura 6.22 Módulo de Ventilação.	339
Figura 6.23 Módulo Parede de Trombe.	340
Figura 6.24 Módulo Estufa.....	341
Figura 6.25 Módulo Fotovoltaico.....	341
Figura 6.26 Esquema de montagem da grelha estrutural.....	345
Figura 6.27 Esquema dos pormenores das ligações.....	346
Figura 6.28 Cortes e vista do módulo padrão fixo composto por perfis FXi.....	348
Figura 6.29 Corte horizontal: Ligações entre os perfis da grelha estrutural e módulo padrão fixo. ...	349
Figura 6.30 Corte vertical: Ligações entre os perfis da grelha estrutural e o módulo padrão fixo. ...	349
Figura 6.31 Cortes e vista do módulo padrão projetante composto por perfis FXi.	350
Figura 6.32 Pormenor de um caixilho FXi 52mm com linhas direitas (semelhante ao módulo padrão fixo) (a) e com linhas curvas (semelhante ao módulo padrão projetante) (b).....	351
Figura 6.33 Corte horizontal: Ligações entre os perfis da grelha estrutural e o módulo padrão projetante.....	351
Figura 6.34 Corte vertical: Ligações entre os perfis da grelha estrutural e o módulo padrão projetante.	352
Figura 6.35 Cortes e vista do módulo parede de Trombe, também composto por perfis FXi como o módulo padrão fixo.	354
Figura 6.36 Pormenores da peça suporte para a parede de Trombe, no caso de ter que construir uma parede de elevada massa específica.	355
Figura 6.37 Vista de parte da parede de elevada massa específica (base), da abertura inferior e parte dos perfis.	355
Figura 6.38 Perspetiva da peça suporte para a parede de Trombe.	356
Figura 6.39 Corte BB e vista do módulo estufa.	357
Figura 6.40 Corte AA do módulo estufa.....	358



Figura 6.41 Cortes e vista do módulo de ventilação.....	359
Figura 6.42 Perspetiva: Detalhes da montagem da grelha do módulo de ventilação.....	359
Figura 6.43 Proposta para o sistema de vedação do módulo de ventilação, com base numa “porta” de edifício comercial, com componentes e escala adaptada aos módulos.....	360
Figura 6.44 Desenhos iniciais apresentando as possibilidades do componente.....	361
Figura 6.45 Dispositivo de Proteção Solar Paralelo à Fachada.....	362
Figura 6.46 Dispositivo de Proteção Solar Paralelo à Fachada: Máscara de Sombra.....	362
Figura 6.47 Máscara de Sombra para a Orientação Solar Este.....	362
Figura 6.48 Máscara de Sombra para a Orientação Solar Oeste.....	363
Figura 6.49 Máscara de Sombra para a Orientação Solar Sul.....	363
Figura 6.50 Dispositivo de Proteção Solar à 45° da Fachada.....	364
Figura 6.51 Dispositivo de Proteção Solar à 45° da Fachada: Máscara de Sombra.....	364
Figura 6.52 Máscara de Sombra para a Orientação Solar Este.....	364
Figura 6.53 Máscara de Sombra para a Orientação Solar Oeste.....	365
Figura 6.54 Máscara de Sombra para a Orientação Solar Sul.....	365
Figura 6.55 Dispositivo de Proteção Solar à 90° da Fachada.....	366
Figura 6.56 Dispositivo de Proteção Solar à 90° da Fachada: Máscara de Sombra.....	366
Figura 6.57 Máscara de Sombra para a Orientação Solar Este.....	366
Figura 6.58 Máscara de Sombra para a Orientação Solar Oeste.....	367
Figura 6.59 Máscara de Sombra para a Orientação Solar Sul.....	367
Figura 6.60 Corte e vistas do dispositivo de proteção solar.....	368
Figura 6.61 Possibilidades de Posicionamento.....	369
Figura 6.62 Possibilidades de inclinação do dispositivo de proteção solar ativadas.....	369
Figura 6.63 Vista de uma segunda opção considerando pequenas palas móveis.....	370
Figura 6.64 Pormenor do perfil FE915, inicialmente para lâmina de 300mm que foi adaptado para utilização.....	370
Figura 6.65 CE902 Perno de fixação para as lâminas FE915.....	370
Figura 6.66 Pormenores em planta da unidade de isolamento exterior de um sistema fotovoltaico.....	371
Figura 6.67 Cortes e vista do módulo fotovoltaico “girassol”.....	372
Figura 6.68 Perspetiva: Pormenor do elemento de ligação dos perfis horizontais e verticais.....	372
Figura 6.69 Pormenor da peça que permite movimentação de rotação e do eixo horizontal.....	372
Figura 6.70 Utilização dos módulos na busca pela orientação solar sul.....	373



Figura 6.71 Módulo padrão projetante (PRO) e oito módulos parede de Trombe (TW) (1 parede de Trombe é formada por 4 módulos parede de Trombe).....	374
Figura 6.72 Módulo padrão projetante (PRO) e módulos parede de Trombe (TW).....	374
Figura 6.73 Módulo padrão fixo (FIX), projetante (PRO) e módulo de ventilação (VE).	375
Figura 6.74 Módulo padrão fixo (FIX), projetante (PRO), módulo estufa (EST) e parede de Trombe (TW).....	375
Figura 6.75 Módulo padrão fixo (FIX), módulo de ventilação (VE) e de proteção solar (PS).	376
Figura 6.76 Módulo Fotovoltaico (FOT).....	376
Figura 6.77 Possibilidades: módulo fotovoltaico (FOT), módulo padrão fixo (FIX) e projetante (PRO)	377
Figura 6.78 Possibilidades de desenvolvimento de módulos múltiplos a partir do módulo padrão fixo (FIX), módulo projetante duplo (PRO-D) e módulo fixo múltiplo (FIX-M).....	377
Figura 6.79 Módulo padrão fixo e possibilidade de criação e estudo de um módulo opaco (OPC)..	378
Figura 6.80 Investimentos no setor da reabilitação em 2008 - Países Euroconstruct.	408
Figura 6.81 Reabilitações do edificado e construções novas, Portugal, 1995-2010.....	411
Figura A1 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional - Évora.....	455
Figura A2 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF - Évora.....	455
Figura A3 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Évora.	455
Figura A4 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Évora.	455
Figura A5 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional – Funchal Madeira. ..	456
Figura A6 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF – Funchal Madeira.....	456
Figura A7 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional – Funchal Madeira. .	456
Figura A8 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF – Funchal Madeira.	456
Figura A9 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional – Guimarães.....	457
Figura A10 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF – Guimarães.....	457
Figura A11 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional – Guimarães.	457
Figura A12 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF – Guimarães.....	457
Figura A13 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional – Lajes-Açores.	458
Figura A14 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF – Lajes-Açores.	458
Figura A15 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional – Lajes-Açores.	458
Figura A16 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF – Lajes-Açores.	458



Figura A17 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional – Lisboa.....	459
Figura A18 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF – Lisboa.....	459
Figura A19 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional – Lisboa.....	459
Figura A20 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF – Lisboa.....	459
Figura A21 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional – Porto.....	460
Figura A22 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF – Porto.....	460
Figura A23 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional – Porto.....	460
Figura A24 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF – Porto.....	460
Figura B1 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional - Évora.....	461
Figura B2 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF - Évora.....	461
Figura B3 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional - Évora.....	462
Figura B4 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF - Évora.....	462
Figura B5 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional – Funchal Madeira.....	462
Figura B6 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF – Funchal Madeira.....	462
Figura B7 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional – Funchal Madeira.....	463
Figura B8 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF – Funchal Madeira.....	463
Figura B9 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional – Guimarães.....	463
Figura B10 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF – Guimarães.....	463
Figura B11 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional – Guimarães.....	464
Figura B12 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF – Guimarães.....	464
Figura B13 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional – Lajes-Açores.....	465
Figura B14 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF – Lajes-Açores.....	465
Figura B15 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional – Lajes-Açores.....	465
Figura B16 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF – Lajes-Açores.....	465
Figura B17 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional – Lisboa.....	466
Figura B18 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF – Lisboa.....	466
Figura B19 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional – Lisboa.....	466
Figura B20 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF – Lisboa.....	466
Figura B21 Necessidades Nominais de Aquecimento: Sistema Convencional – Porto.....	467
Figura B22 Necessidades Nominais de Aquecimento: LGSF – Porto.....	467
Figura B23 Necessidades Nominais de Arrefecimento: Sistema Convencional – Porto.....	467
Figura B24 Necessidades Nominais de Arrefecimento: LGSF – Porto.....	467



Figura C1 Évora: Fachada 04 5x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	469
Figura C2 Évora: Fachada 04 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	469
Figura C3 Évora: Fachada 07 5x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	469
Figura C4 Évora: Fachada 07 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	469
Figura C5 Évora: Fachada 04 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b)	470
Figura C6 Évora: Fachada 04 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b)	470
Figura C7 Évora-Fachada 07 5x5 módulos: Inverno (a) e Verão (b)	470
Figura C8 Évora-Fachada 07 3x5 módulos: inverno (a) e verão (b).....	470
Figura C9 Funchal-Madeira: Fachada 04 5x5 módulos-Fator Luz do Dia(a) e Nível de iluminância (b)	472
Figura C10 Funchal-Madeira: Fachada 04 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	472
Figura C11 Funchal Madeira: Fachada 07 5x5 módulos-Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	472
Figura C12 Funchal-Madeira: Fachada 07 3x5 módulos-Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	472
Figura C13 Funchal-Madeira: Fachada 04 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	473
Figura C14 Funchal-Madeira: Fachada 04 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	473
Figura C15 Funchal-Madeira: Fachada 07 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	473
Figura C16 Funchal-Madeira: Fachada 07 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	473
Figura C17 Guimarães: Fachada 04 5x5 módulos- Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	475
Figura C18 Guimarães: Fachada 04 3x5 módulos -Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	475
Figura C19 Guimarães: Fachada 07 5x5 módulos -Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	475
Figura C20 Guimarães: Fachada 07 3x5 módulos -Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b)	475
Figura C21 Guimarães: Fachada 04 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b)	476
Figura C22 Guimarães: Fachada 04 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b)	476
Figura C23 Guimarães: Fachada 07 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b)	476
Figura C24 Guimarães: Fachada 07 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b)	476
Figura C25 Lajes-Açores-Fachada 04 5x5 módulos:Fator Luz do Dia(a) e Nível de iluminância (b)	478
Figura C26 Lajes-Açores: Fachada 04 3x5 módulos-Fator Luz do Dia(a) e Nível de iluminância(b)	478
Figura C27 Lajes-Açores: Fachada 07 5x5 módulos-Fator Luz do Dia(a) e Nível de iluminância(b)	478
Figura C28 Lajes-Açores: Fachada 07 3x5 módulos:Fator Luz do Dia(a) e Nível de iluminância(b)	478



Figura C29 Lajes-Açores-Fachada 04 5x5 módulos: Inverno (a) e Verão (b).....	479
Figura C30 Lajes-Açores-Fachada 04 3x5 módulos: Inverno (a) e Verão (b).....	479
Figura C31 Lajes-Açores - Fachada 07 5x5 módulos: Inverno (a) e Verão (b).....	479
Figura C32 Lajes-Açores - Fachada 07 3x5 módulos: Inverno (a) e Verão (b).....	479
Figura C33 Lisboa-Fachada 04 5x5 módulos: Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	481
Figura C34 Lisboa-Fachada 04 3x5 módulos: Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	481
Figura C35 Lisboa-Fachada 07 5x5 módulos: Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	481
Figura C36 Lisboa-Fachada 07 3x5 módulos: Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	481
Figura C37 Lisboa-Fachada 04 5x5 módulos: Inverno (a) e Verão (b).....	482
Figura C38 Lisboa-Fachada 04 3x5 módulos: Inverno (a) e Verão (b).....	482
Figura C39 Lisboa-Fachada 07 5x5 módulos: Inverno (a) e Verão (b).....	482
Figura C40 Lisboa-Fachada 07 3x5 módulos: Inverno (a) e Verão (b).....	482
Figura C41 Porto: Fachada 04 5x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	484
Figura C42 Porto: Fachada 04 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	484
Figura C43 Porto: Fachada 07 5x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	484
Figura C44 Porto: Fachada 07 3x5 módulos - Fator Luz do Dia (a) e Nível de iluminância (b).....	484
Figura C45 Porto: Fachada 04 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	485
Figura C46 Porto: Fachada 04 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	485
Figura C47 Porto: Fachada 07 5x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	485
Figura C48 Porto: Fachada 07 3x5 módulos - Inverno (a) e Verão (b).....	485
Figura D1 Évora: Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico.....	486
Figura D2 Funchal-Madeira: Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico.	487
Figura D3 Guimarães: Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico.....	488
Figura D4 Lajes - Açores: Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico.	488
Figura D5 Lisboa: Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico.....	489
Figura D6 Porto: Energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico.....	490



ÍNDICE DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1. Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis e Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência.....	18
Tabela 2.2 Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados não orientados a norte, com mais de 5% da área útil do espaço que servem com dispositivos de proteção 100% ativos.	19
Tabela 2.3 Diferença vertical da temperatura entre a cabeça e o tornozelo.....	23
Tabela 2.4 Temperatura da superfície do chão.	23
Tabela 2.5 Assimetria da temperatura radiante das superfícies.	23
Tabela 2.6 Exemplo de critérios de projeto para espaços em diferentes tipologias.....	24
Tabela 2.7 Iluminâncias recomendadas no plano de trabalho em Edifícios Residenciais	28
Tabela 2.8 Iluminâncias recomendadas no plano de trabalho de acordo com as tarefas.....	29
Tabela 2.9 Fator Luz do dia recomendado em Edifícios Residenciais.....	30
Tabela 2.10 Reflectâncias recomendada das superfícies.....	30
Tabela 2.11 Razão de luminâncias máximas recomendadas.	31
Tabela 3.1 Área mínima de janela para garantir vista para o exterior.....	62
Tabela 3.2 Valores indicados para a dimensão dos vãos envidraçados.....	66
Tabela 3.3 Máxima Eficiência Fotovoltaica por Tecnologia.	115
Tabela 4.1 Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis e Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência.....	124
Tabela 4.2 Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados não orientados a norte com mais de 5% da área útil do espaço que servem.	125
Tabela 4.3 Fração envidraçada para diferentes tipos de caixilharia.	126
Tabela 4.4 Síntese - Características necessárias para os envidraçados das fachadas.	126
Tabela 4.5 Pressão Dinâmica do Vento.....	128
Tabela 4.6 Equações - Espessura dos Vidros	128
Tabela 4.7 Vidros para módulo padrão - Pano Interior.	131
Tabela 4.8 Vidros Cool Lite KNT 155 para módulo padrão - Pano Exterior.....	132
Tabela 4.9 Vidro Bioclean para módulo padrão - Pano Exterior.	132
Tabela 4.10 Vidro Planistar para módulo padrão - Pano Exterior.	133



Tabela 4.11 Vidros Diamant (Modulo Parede de Trombe) e Planilux (Módulo Padrão).....	134
Tabela 4.12 Síntese dos Envidraçados.....	135
Tabela 4.13 Síntese das Propriedades dos Envidraçados Analisados I.....	135
Tabela 4.14 Síntese das Propriedades dos Envidraçados Analisados II.....	136
Tabela 4.15 Composição da Parede-Sistema Convencional Português.....	146
Tabela 4.16 Composição da Laje de Cobertura-Sistema Convencional Português.....	147
Tabela 4.17 Paredes - Sistema <i>Light Gauge Steel Framing</i>	148
Tabela 4.18 Laje de Cobertura- Sistema <i>Light Gauge Steel Framing</i>	148
Tabela 4.19 Síntese - Coeficientes de Transmissão Térmica ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) de Referência.....	149
Tabela 4.20 Equipamentos Elétricos.....	151
Tabela 4.21 Síntese dos Ganhos Internos.....	152
Tabela 4.22 Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento de acordo com o RCCTE.....	154
Tabela 4.23 Propriedade dos Envidraçados analisados para todas as cidades.	165
Tabela 4.24 Composição de Fachadas Envidraçadas para Simulações de Desempenho Térmico.	166
Tabela 4.25 Composição de Fachadas para Simulações com Soluções Passivas de Aquecimento.....	170
Tabela 4.26 Composição de Fachadas para Simulações de Ventilação Natural.....	173
Tabela 4.27 Composição de Fachadas para Simulações com Dispositivos de Proteção Solar Horizontais.....	175
Tabela 4.28 Valores de iluminância (lux) medidos no ambiente real e no modelo virtual.....	181
Tabela 4.29 Reflectâncias dos Materiais	181
Tabela 4.30 Configurações de Fachada para Simulações de Desempenho Lumínico.....	182
Tabela 4.31 Fator Luz do dia recomendado em edifícios residenciais.	183
Tabela 4.32 Nível de Iluminação por Cidade.	185
Tabela 4.33 Iluminâncias recomendadas para Edifícios Residenciais.....	185
Tabela 4.34 Dados de otimização obtidos por meio do <i>Solterm 5.0 I</i>	190
Tabela 4.35 Dados de otimização obtidos por meio do <i>Solterm 5.0 II</i>	191
Tabela 4.36 Dados de otimização obtidos por meio do <i>Solterm 5.0 III</i>	191
Tabela 4.37 Painéis fotovoltaicos simulados I	192
Tabela 4.38 Painéis fotovoltaicos simulados II.	196
Tabela 4.39 Painéis fotovoltaicos simulados III.	197
Tabela 4.40 Características das Amostras de vidros.....	208
Tabela 4.41 Dimensões da Maquete	218



Tabela 5.1 Diminuição do consumo de acordo com a solução passiva incorporada.....	239
Tabela 5.2 Duração das Estações de Acordo com o Clima e Envidraçados.	249
Tabela 5.3 Duração das Estações de Acordo com o Clima e Soluções Passivas de Aquecimento.	256
Tabela 5.4 Bragança: Necessidades Nominais de Arrefecimento, Sistema Convencional e LGSF .	258
Tabela 5.5 Coimbra: Necessidades Nominais de Arrefecimento, Sistema Convencional e LGSF ...	259
Tabela 5.6. Faro: Necessidades Nominais de Arrefecimento, Sistema Convencional e LGSF	261
Tabela 5.7 Bragança: Necessidades Nominais de Arrefecimento, Sistema Convencional e LGSF.	262
Tabela 5.8 Coimbra: Necessidades Nominais de Arrefecimento, Sistema Convencional e LGSF ...	263
Tabela 5.9 Faro: Necessidades Nominais de Arrefecimento, Sistema Convencional e LGSF.	264
Tabela 5.10 Duração das Estações de Acordo com Clima e Soluções Passivas de Arrefecimento..	267
Tabela 5.11 Bragança: Fator Luz do Dia e Nível de Iluminância	269
Tabela 5.12 Coimbra: Fator Luz do Dia e Nível de Iluminância	272
Tabela 5.13 Faro: Fator Luz do Dia e Nível de Iluminância	275
Tabela 5.14 Dados Gerais de Desempenho Lumínico por Cidade.	278
Tabela 5.15 Dados Gerais de Desempenho Lumínico por Cidade-Valores Médios.	279
Tabela 5.16 Consumo Energético x Energia Fornecida pelos Sistemas Fotovoltaicos.	285
Tabela 5.17 Estimativa de Desempenho Acústico para o Módulo Envidraçado.	296
Tabela 5.18 Transmissão da Radiação nos intervalos do ultravioleta, visível e infravermelho.....	306
Tabela 5.19 Envidraçados 04 e 07: Transmissão da Radiação nos intervalos do ultravioleta, visível e infravermelho.....	310
Tabela 5.20 Caso 01A: Com e sem ventilação cruzada - Velocidades Médias por Frequência.	313
Tabela 5.21 Caso 01B: Com e sem ventilação cruzada - Velocidades Médias por Frequência.	314
Tabela 5.22 Caso 02A: Com e sem ventilação cruzada - Velocidades Médias por Frequência.	314
Tabela 5.23 Caso 02B: Com e sem ventilação cruzada - Velocidades Médias por Frequência.	315
Tabela 5.24 Caso 01A: Com e sem ventilação cruzada – Razão entre Velocidades.	318
Tabela 5.25 Caso 01B Com e sem ventilação cruzada - Razão entre Velocidades.	319
Tabela 5.26 Caso 02A Com e sem ventilação cruzada - Razão entre Velocidades.	319
Tabela 5.27 Caso 02B Com e sem ventilação cruzada - Razão entre Velocidades.	320
Tabela 5.28 Taxa de Renovações por hora recomendado para ambientes de habitações	324
Tabela 5.29 Espaço ventilado de acordo com a taxa de renovações por hora.....	325
Tabela 5.30 Razões Médias para os Pontos Medidos em Todos os Casos.	326
Tabela 5.31 Classificação das melhores soluções de ventilação natural.	326



Tabela 6.1 Características do material utilizado no elemento acumulador da parede de Trombe.....	353
Tabela 6.2-a Recomendações para Fachadas por Clima.....	379
Tabela 6.2-b Recomendações para Fachadas por Clima.....	380
Tabela 6.3-a Esquemas Gráficos das Recomendações para Fachadas.....	381
Tabela 6.3-b Esquemas Gráficos das Recomendações para Fachadas.....	382
Tabela 6.3-c Esquemas Gráficos das Recomendações para Fachadas.....	383
Tabela 6.4 Recomendações para os Módulos Fotovoltaicos.....	384
Tabela 6.5 Custo por m ² : Grelha Estrutural em Perfis de Alumínio.....	385
Tabela 6.6 Custo por Unidade: Caixilharia para Módulo Padrão Fixo.....	386
Tabela 6.7 Custo por m ² : Envidraçado 07.....	387
Tabela 6.8 Custo por m ² : Envidraçado 04.....	387
Tabela 6.9 Custo por Unidade: Caixilharia para Módulo Padrão Projetante.....	388
Tabela 6.10 Custo por m ² : Envidraçado 07.....	389
Tabela 6.11 Custo por m ² : Envidraçado 04.....	389
Tabela 6.12 Custo por Unidade: Caixilharia para Módulo Parede de Trombe.....	390
Tabela 6.13 Custo por m ² : Envidraçado Parede de Trombe.....	390
Tabela 6.14 Custo por m ² : Parede de Betão para Parede de Trombe.....	391
Tabela 6.15 Custo por m ² : Pintura de Cor Preta para Parede de Betão.....	391
Tabela 6.16 Custo por m ² : Perfis de Alumínio para Módulo de Estufa.....	392
Tabela 6.17 Custo por m ² : Envidraçado para Módulo de Estufa.....	392
Tabela 6.18 Custo por Unidade: Caixilharia para Módulo de Ventilação.....	393
Tabela 6.19 Custo por m ² : Grelha para Módulo de Ventilação.....	393
Tabela 6.20 Custo por m ² : Grelha para Módulo de Proteção Solar.....	394
Tabela 6.21 Análise Económica do Sistema Fotovoltaico.....	394
Tabela 6.22 Sistema Fotovoltaico – Preço/m ²	395
Tabela 6.23 Preço de componentes dos módulos por unidade ou m ²	396
Tabela 6.24 Preço Final dos Módulos do Sistema de Fachada.....	396
Tabela 6.25 Preço Médio do Sistema de Fachadas.....	399
Tabela 6.26-a Soluções Indicadas e Preço por Clima.....	399
Tabela 6.26-b Soluções Indicadas e Preço por Clima.....	400
Tabela 6.26-c Soluções Indicadas e Preço por Clima.....	401
Tabela 6.27 Preço Médio do Sistema de Fachadas com Módulos Fotovoltaicos.....	401



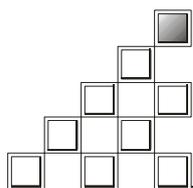
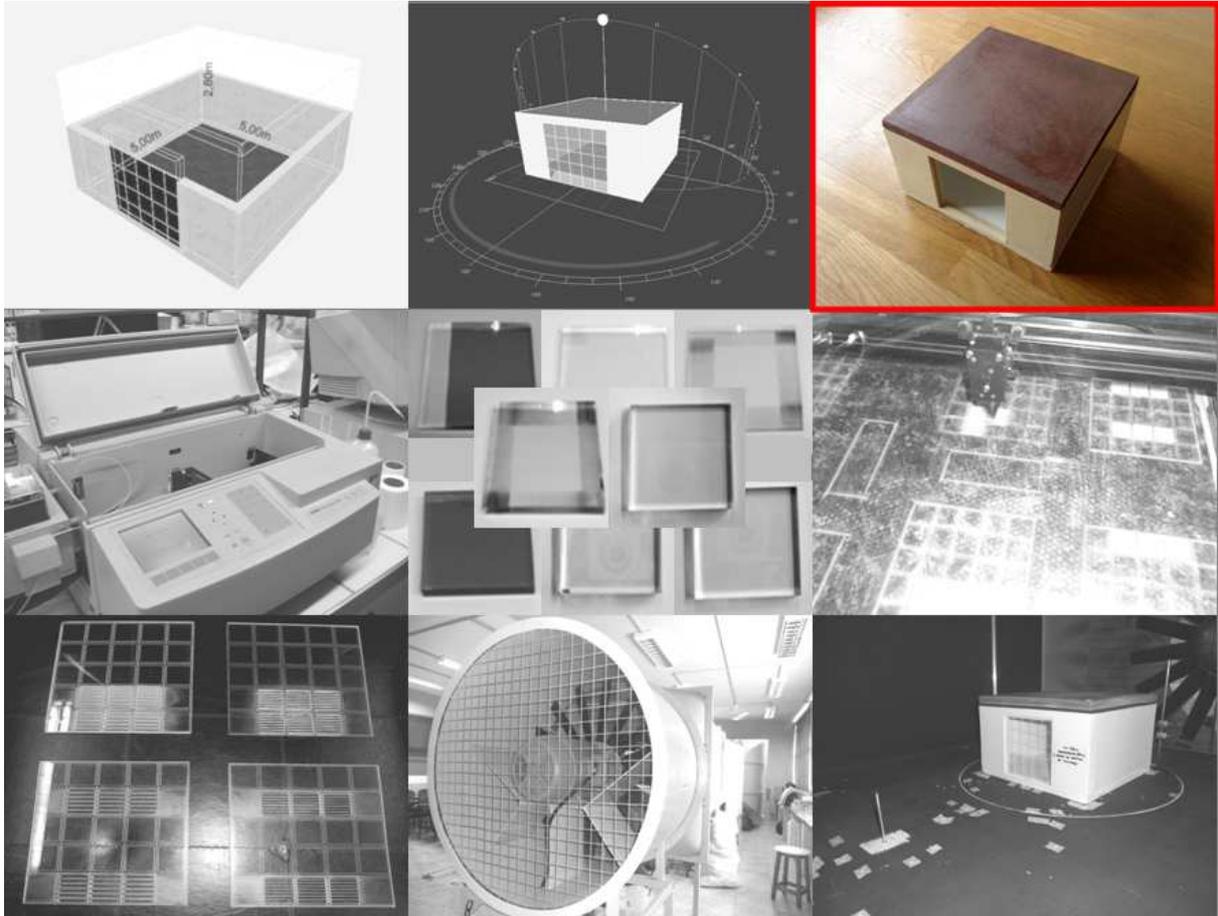
Tabela 6.28 Solução Base: Necessidades Energéticas de Aquecimento e Arrefecimento Custo de Exploração.....	402
Tabela 6.29 Solução 01: Período de Retorno Simples.	403
Tabela 6.30 Solução 02: Período de Retorno Simples.	404
Tabela 6.31 Período de Retorno para Uso de Painéis Fotovoltaicos no Sistema de Fachadas.	406
Tabela 6.32 Número de Construções Novas em Portugal.	408
Tabela 6.33 Necessidades de reparação dos edifícios – 2001.....	409
Tabela 6.34 Edifícios concluídos para Habitação Familiar, por Tipo de Obra, 2008-2010	410
Tabela 6.35 Proporção da reabilitação do edificado relativamente às construções novas de edifícios concluídos para Habitação familiar, 2008-2010.	410
Tabela C1 Évora: Fator Luz do Dia e Nível de Iluminância.....	468
Tabela C2 Funchal - Madeira: Fator Luz do Dia e Nível de Iluminância	471
Tabela C3 Guimarães: Fator Luz do Dia e Nível de Iluminância	474
Tabela C4 Lajes - Açores: Fator Luz do Dia e Nível de Iluminância	477
Tabela C5 Lisboa: Fator Luz do Dia e Nível de Iluminância	480
Tabela C6 Porto: Fator Luz do Dia e Nível de Iluminância	483
Tabela E1 Componentes do Módulo Padrão Fixo, Módulo Parede de Trombe e Módulo de Ventilação	490
Tabela E2 Componentes do Módulo Padrão Projetante	491
Quadro 3.1 Estratégias bioclimáticas de acordo com a zona climática	45
Quadro 3.2 Vantagens e Desvantagens do uso de sistemas de ganho direto.	52
Quadro 3.3 Critérios para escolha dos envidraçados.....	67
Quadro 3.4 Janela de Correr.	72
Quadro 3.5 Janela Guilhotina.	72
Quadro 3.6 Janela Fixa.	73
Quadro 3.7 Janela de Abrir.....	73
Quadro 3.8 Janela Projetante e de Tombar.....	74
Quadro 3.9 Janela Pivotante.	75
Quadro 3.10 Janela Basculante ou Gelosia.	75



Quadro 3.11 Janela Projetante – Deslizante ou Maximar.....	76
Quadro 3.12 Janela Sanfonada.....	76
Quadro 3.13 Janela bow-window.....	77
Quadro 3.14 Funcionamento da Parede de Trombe	83
Quadro 3.15 Vantagens e inconvenientes da parede de trombe.....	87
Quadro 3.16 Vantagens e inconvenientes das paredes de água.....	91
Quadro 3.17 Soluções de Fachadas com Fotovoltaicos.....	113
Quadro 4.1 Versão final dos módulos que compõem o sistema de fachadas proposto.....	123
Quadro 4.2 Climas para simulações computacionais.....	144
Quadro 4.3 Imagens das Amostras dos vidros.....	209
Quadro 5.1 Envidraçados- Simulações de Teste	235
Quadro 5.2 Nível de Aquecimento Necessário-Convencional: Coimbra e Faro.....	243
Quadro 5.3 Nível de Arrefecimento Necessário LGSF: Coimbra e Faro.....	243
Quadro 5.4 Nível de Aquecimento Necessário - Sistema Convencional e LGSF.....	247
Quadro 5.5 Nível de Arrefecimento Necessário- Sistema Convencional e LGSF	247
Quadro 5.6 Ordem de Eficiência dos Sistemas Fotovoltaicos – Solterm.....	284
Quadro 5.7 Ordem de Eficiência dos Sistemas Fotovoltaicos-Sunny Design	293
Quadro 6.1a Solução inicial e final dos módulos componentes do sistema de fachada.....	342
Quadro 6.1b Solução inicial e final dos módulos componentes do sistema de fachada.....	343
Quadro 6.2 Perfis para Janelas FXi e FBi: Características.....	347

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein



CAPÍTULO 1. Fundamentação e Objetivos



1.1 Introdução

O aumento do consumo energético no setor dos edifícios nos últimos anos, aliado à maior sensibilidade da opinião pública pelas questões ambientais, levou o poder político e económico a tentar encontrar as causas e a procurar soluções de controlo. Diversos estudos levaram à conclusão que há um grande potencial de redução dos consumos energéticos ao nível dos edifícios de habitação e de serviços e que qualquer ação de combate ao desperdício energético resulta mais rápida e eficaz do que qualquer outra. Nova legislação e incentivos têm vindo a ser criados, indicando grande vontade de agir e intervir nestas áreas.

Reduzir o consumo de energia e precaver o desperdício energético são dois dos grandes objetivos mundiais da atualidade. Ao proporcionar a melhoria da eficácia energética, a UE contribui de forma decisiva para a competitividade, a segurança do abastecimento e o respeito dos compromissos assumidos no âmbito do Protocolo de Quioto sobre as alterações climáticas. Existem grandes potenciais de redução, em especial nos setores que consomem muita energia, como é o caso dos edifícios.

Principalmente nas duas últimas décadas do século XX tomou-se cada vez maior a consciência, quer da escassez das fontes de energia fósseis, quer dos efeitos negativos do consumo no meio ambiente, quer ainda do rápido aumento do preço dos combustíveis e, em consequência, da necessidade de redução dos consumos. Com isso, existe a necessidade de tentar compatibilizar as crescentes exigências ao nível do conforto com a necessidade de adoção de medidas de economia de energia.

Em janeiro de 2007 foi proposto um amplo pacote de medidas relativas ao clima e à energia que contem metas de 20% de redução do consumo de energia e das emissões de gases com efeito de estufa e do aumento de 20% da quota de energias renováveis até 2020. Estas metas foram adotadas à luz das cada vez mais numerosas provas científicas das alterações climáticas, dos elevados preços da energia e da crescente dependência das importações e suas possíveis repercussões geopolíticas. A redução do consumo de energia pode claramente dar uma contribuição significativa para alcançar estes objetivos (COM (2008) 780, 2008).

O setor dos edifícios, comerciais e residenciais é o maior consumidor de energia e emissor de CO₂ na UE, sendo responsável por cerca de 40% do consumo final de energia e das emissões de CO₂. Tem um grande potencial ainda inexplorado para realizar economia de energia rentável que, se concretizadas, significa que em 2020 a UE consumiria menos 11% de energia final. Daí decorrem, por sua vez, numerosos benefícios, como a redução das necessidades de energia, da dependência das importações e do impacto no clima, a diminuição das faturas energéticas, o aumento do emprego e a promoção do



desenvolvimento local. Considera-se que a economia de energia mais significativa ocorrerá nos setores dos edifícios residenciais e para uso comercial (terciário), com um potencial de redução avaliado em, respetivamente, 27% e 30%, indústrias transformadoras, com economia da ordem dos 25% e o setor dos transportes, com uma previsão de redução do consumo de 26% (COM (2008) 780, 2008).

Em Portugal no ano de 2007, o peso do consumo dos principais setores de atividade económica relativamente ao consumo final de energia, foi de 29,2% na Indústria, 36,4% nos Transportes, 17,1% no Doméstico, 12,2% nos Serviços e 5,1% nos outros setores (onde se inclui a Agricultura, Pescas, Construção e Obras Públicas). No setor doméstico, houve um aumento do consumo de energia elétrica por unidade de alojamento (2611 kWh/alojamento em 2007 contra 2544 kWh/alojamento em 2006). O setor dos edifícios em Portugal tem um forte impacto no consumo de energia como se pode verificar pela análise da **Figura 1.1**. Esta representa 29,3% da energia final total do país, sendo cerca de 17,1 % associado ao uso residencial e 12,2 % aos serviços (DGGE, 2011a).

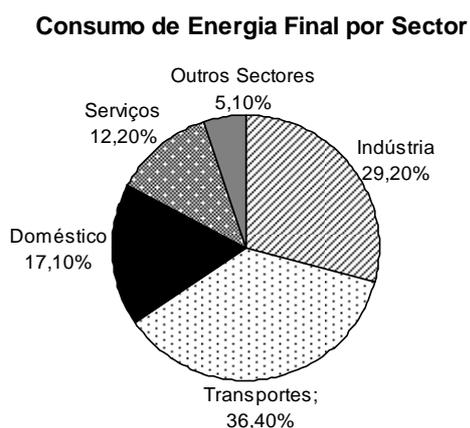


Figura 1.1 Caracterização Energética Nacional.

Fonte: Elaborado a partir de DGEG, 2011a.

A Resolução do Conselho de Ministros nº 154/2001 de 27 de setembro, intitulada como Programa E4 (MEI, 2001) apresenta a seguinte informação sobre o uso de energia renovável e consequente diminuição de consumo energético em Portugal:

“Apesar de ser comum a referência à inexistência de recursos endógenos no nosso país, a verdade é que se afigura como possível: duplicar a potência elétrica instalada por via renovável e a satisfação dos objetivos de 39% de energia elétrica de origem renovável num horizonte de dez a quinze anos; satisfazer parte significativa da energia usada em águas quentes, uso específico dominante no subsector doméstico e com grande expressão no setor industrial, com recurso à energia solar térmica; e atenuar significativamente as necessidades



em energia “comercial” para o conforto ambiente, através da promoção da iluminação natural, das tecnologias solares passivas de aquecimento e de arrefecimento e dos conceitos da arquitetura bioclimática, outras vias de aproveitamento de energias endógenas com expressão no clima”.

Embora responsável em todos os níveis da ação económica, pela implementação direta de conceitos como “sustentabilidade”, “ecologia” e “racionalização de recursos”, só recentemente a indústria da construção - em grande parte por uma ação social cada vez mais ativa que originou uma nova consciência política e uma crescente receptividade dos mercados - tem procurado soluções inovadoras para enfrentar esses desafios. Os responsáveis pelo setor têm vindo a descobrir que essas exigências funcionam antes de mais como catalisadores e dinamizadores do mercado, lançando mais-valias aos produtos, contribuindo para a rápida modernização do setor.

A necessidade de se caminhar no sentido da construção sustentável engloba uma série de medidas. Algumas dessas medidas passam pela utilização de novos materiais e tecnologias de construção mais avançadas. Nesse contexto a procura de novas tecnologias para a eficiência energética dos edifícios, especificamente para fachadas é urgente e pertinente uma vez que as tecnologias convencionais, correntemente utilizadas na reabilitação de edifícios são relativamente pouco eficientes em termos energéticos quando comparadas com as tecnologias que incorporam componentes de elevado desempenho.

Dentre os elementos dos edifícios, as fachadas constituem um meio privilegiado para atuar e propor soluções, uma vez que têm uma influência direta no consumo de energia do edifício e no conforto dos seus ocupantes. As fachadas contribuem significativamente para a transferência de calor entre o ambiente exterior e o ambiente interior e, portanto, são os elementos construtivos que podem exercer maior influência na criação de condições de conforto ou desconforto térmico para os ocupantes.

Para a questão da qualidade no projeto, é necessária a busca de novas tecnologias de fachadas como é o caso deste trabalho de investigação, no sentido de serem identificados parâmetros e variáveis ambientais que possam apoiar no processo da sua configuração a fim de se obter em soluções adequadas para alcançar a eficiência energética e as condições de conforto ambiental mais adequadas à vivência humana.



1.2 Objetivos

A proposta deste trabalho de investigação consistiu no desenvolvimento de um sistema de fachada modular de pequenos componentes ajustáveis e intercambiáveis entre si (grelha estrutural para montagem dos módulos; módulo padrão fixo e móvel - projetante; módulo de proteção solar; módulo de ventilação; módulo parede de Trombe, módulo estufa e módulo fotovoltaico “girassol”), visando principalmente a eficiência energética.

O sistema modular resultou em elementos passíveis de serem utilizados em conjunto ou separados, de forma flexível e versátil de acordo com a orientação solar e necessidades climáticas. Essa versatilidade e flexibilidade dos módulos é um importante elemento diferenciador do sistema, uma vez que permite uma abordagem arquitetónica diferente para cada aplicação, tanto em soluções novas quanto em soluções de reabilitação. Tal característica normalmente não é encontrada em sistemas de fachadas, que compreendem geralmente um único módulo.

1.2.1 Objetivos Específicos

A ênfase maior deste sistema de fachadas está baseada na incorporação, em grande parte dos módulos, de elementos envidraçados de elevado desempenho e tecnologias passivas. Esse sistema é adequado para ser utilizado tanto na reabilitação quanto em novos edifícios e capaz de aproveitar e potenciar a radiação solar para aquecimento, auxiliar no arrefecimento e iluminação natural dos espaços habitáveis. A proposta do sistema desenvolvido foi agregar elementos solares passivos para aquecimento, devido às características do clima de Portugal, e elementos que vão auxiliar no arrefecimento, além de um módulo através do qual fosse possível gerar energia para utilização.

Os sistemas solares passivos para aquecimento podem ser classificados segundo três categorias ou conceitos, que são: ganho direto, ganho indireto e ganho isolado. No sistema de ganho direto a radiação solar é captada por um envidraçado, normalmente orientado ao sul, no sistema agora proposto isto ocorre através do módulo padrão fixo e móvel. Nos sistemas de ganho indireto, a radiação solar atinge primeiramente um espaço intermédio para posteriormente ocorrerem ganhos de calor através de condução ou convecção pela superfície, nesta proposta essa estratégia é utilizada pelo módulo parede de Trombe. Os sistemas de ganho isolado são similares ao de ganho indireto, porém possuem uma separação que pode ser física ou através da colocação de isolamento entre o espaço de armazenamento térmico e o espaço a ser aquecido, onde a transferência de calor se dá através da convecção natural, nesse sistema proposto é representado pelo módulo estufa.



Os elementos que vão auxiliar no arrefecimento passivo são os módulos de ventilação e dispositivos de proteção solar. E além disso, os módulos fotovoltaicos são propostos como complemento do sistema de fachada, de forma a permitir, além de economia energética, a captação de energia solar através de um dos componentes.

Com base nesses elementos, os objetivos concretos e específicos atingidos com este trabalho de investigação foram:

1º. Definição conceptual dos componentes e suas funções, nomeadamente:

- Módulo Padrão Fixo e Móvel (compostos por envidraçados duplos);
- Módulo de Proteção Solar (estores venezianos horizontais com ajuste de inclinação de 0º, 45º e 90º - perpendicular ao módulo de fachada);
- Módulo de Ventilação (composto por uma grelha otimizada);
- Módulo Parede de Trombe (composto por envidraçado duplo e elemento de armazenamento térmico);
- Módulo Estufa (composto por envidraçado simples) e,
- Módulo Fotovoltaico (móvel de forma a otimizar os ganhos solares por poder ser instalado em diferentes orientações solares).

2º. Realização de um estudo, por meio de simulação computacional da integração dos diversos componentes, da sua interação e otimização do sistema a nível de:

- Comportamento térmico: Foi a prioridade das simulações computacionais. Nesta análise foi considerada além do sistema de fachadas, o uso de dois tipos de envolvente, uma do sistema convencional português (alvenaria dupla) e outra típica do sistema *light gauge steel framing*, quatro orientações solares (norte, sul, este e oeste) e nove climas que incluem Portugal continental e ilhas;
- Iluminação natural: Analisou-se as condições de iluminação natural para as configurações de fachada com melhor desempenho térmico;
- Acústica: Realizou-se uma previsão de desempenho acústico dos módulos envidraçados, principais componentes do sistema de fachadas;
- Microgeração energética: Foram estudadas por meio de simulação computacional, painéis fotovoltaicos possíveis de serem utilizados no módulo fotovoltaico proposto no sistema.



3º. Otimização das características físicas dos componentes, ao nível da definição final dos materiais a utilizar e seu dimensionamento de modo a maximizar o desempenho. Realizou-se um estudo da integração das soluções consideradas para as simulações que apresentarem melhor desempenho em conjunto. Após determinar as melhores soluções de fachada (“fachada ideal”) em termos de desempenho (térmico, iluminação natural e acústica) foi feita a definição final dos materiais a utilizar nos módulos. Além disso, foram realizados dois tipos de ensaios relacionados com a otimização das características físicas dos componentes, sendo eles: a caracterização espectrofotométrica dos vidros destinados aos módulos e ensaio em túnel de vento para o módulo de ventilação.

4º. Pormenorização dos detalhes construtivos, que incluiu o detalhamento do sistema; análise das condições de montagem, elaboração do projeto do sistema de fachadas e previsão de custo dos módulos.

1.2.2 Hipótese e Tese

Atualmente está sendo dada grande importância à ideia de concepção de edifícios e componentes com elevada eficiência energética e maior desempenho ambiental. Parte-se do princípio que é possível reduzir o consumo de energia e aumentar a eficiência energética dos edifícios através da otimização do desempenho das fachadas. Como a fachada é a fronteira entre o ambiente exterior e o interior, intervenções e propostas neste elemento da construção, possibilitam um melhor controlo da troca de calor e podem contribuir para a economia de energia com aquecimento e arrefecimento dos edifícios.

Diante disso, o propósito principal deste trabalho de investigação foi comprovar que a partir do uso de soluções passivas com aproveitamento da radiação solar e a combinação adequada de materiais correntemente utilizados, seria possível desenvolver um sistema modular de fachadas versátil, com possibilidades de aplicação em diferentes orientações solares, adequado ao clima e cuja finalidade principal é a economia de energia.

Essa hipótese foi confirmada com o desenvolvimento do sistema modular de fachadas em questão. Através do estudo desenvolvido sobre módulos de fachada versáteis e intercambiáveis foi possível constatar por meio de simulações computacionais e experimentos, uma maior eficiência energética com a utilização de tal sistema e, além disso, oferecer um contributo para a microprodução de energia através do uso de módulos fotovoltaicos.



1.3 Organização da Tese de Doutoramento

A presente tese de doutoramento está dividida em sete capítulos que serão resumidos a seguir.

O **Capítulo 1** abordará o tema, os objetivos, a hipótese e a organização deste trabalho de investigação, visando situar o assunto abordado para melhor entendimento. Uma das bases para justificação do desenvolvimento do sistema de fachadas proposto é o aumento do consumo energético no setor dos edifícios nos últimos anos, o que requer a busca pela eficiência energética por meio de novas tecnologias, além de uma solução versátil para aplicação tanto em novos edifícios quanto em reabilitação.

O **Capítulo 2** tratará do tema “conceção e requisitos de fachadas”, especificamente dos requisitos relacionados com a qualidade da envolvente, conforto térmico, iluminação natural, ventilação natural e acústica.

O **Capítulo 3** apresentará um panorama sobre arquitetura sustentável, bioclimática e as fachadas, considerando: aspetos bioclimáticos e a envolvente; fachadas e sustentabilidade; sistemas solares passivos de aquecimento e arrefecimento; soluções passivas em fachadas; e sistemas de fachada atuais e inovadores.

O **Capítulo 4** apresentará a metodologia considerada para o desenvolvimento do sistema de fachadas em questão, especificamente: a definição dos componentes dos módulos de fachada; elaboração modelo teórico do sistema; estudo da integração dos componentes por meio de simulação computacional; otimização das características físicas dos componentes por meio de ensaios de caracterização espectrofotométrica de vidros e ensaios em túnel de vento para o módulo de ventilação; pormenorização do sistema de fachadas, além de uma análise económica simplificada.

No **Capítulo 5** serão apresentados os resultados das simulações computacionais executadas que incluíram: simulações computacionais de desempenho térmico de teste para envidraçados e parede de Trombe; simulações computacionais de desempenho térmico para fachadas envidraçadas e uso de soluções passivas de aquecimento e arrefecimento; simulações computacionais de desempenho lumínico e de microgeração energética para o módulo fotovoltaico. Neste capítulo será apresentada também uma previsão de desempenho acústico com base nas informações fornecidas pelos fabricantes dos perfis de alumínio utilizados. Além disso, são apresentados os resultados de ensaios de caracterização espectrofotométrica de vidros e dos ensaios em túnel de vento para o módulo de ventilação.



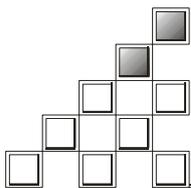
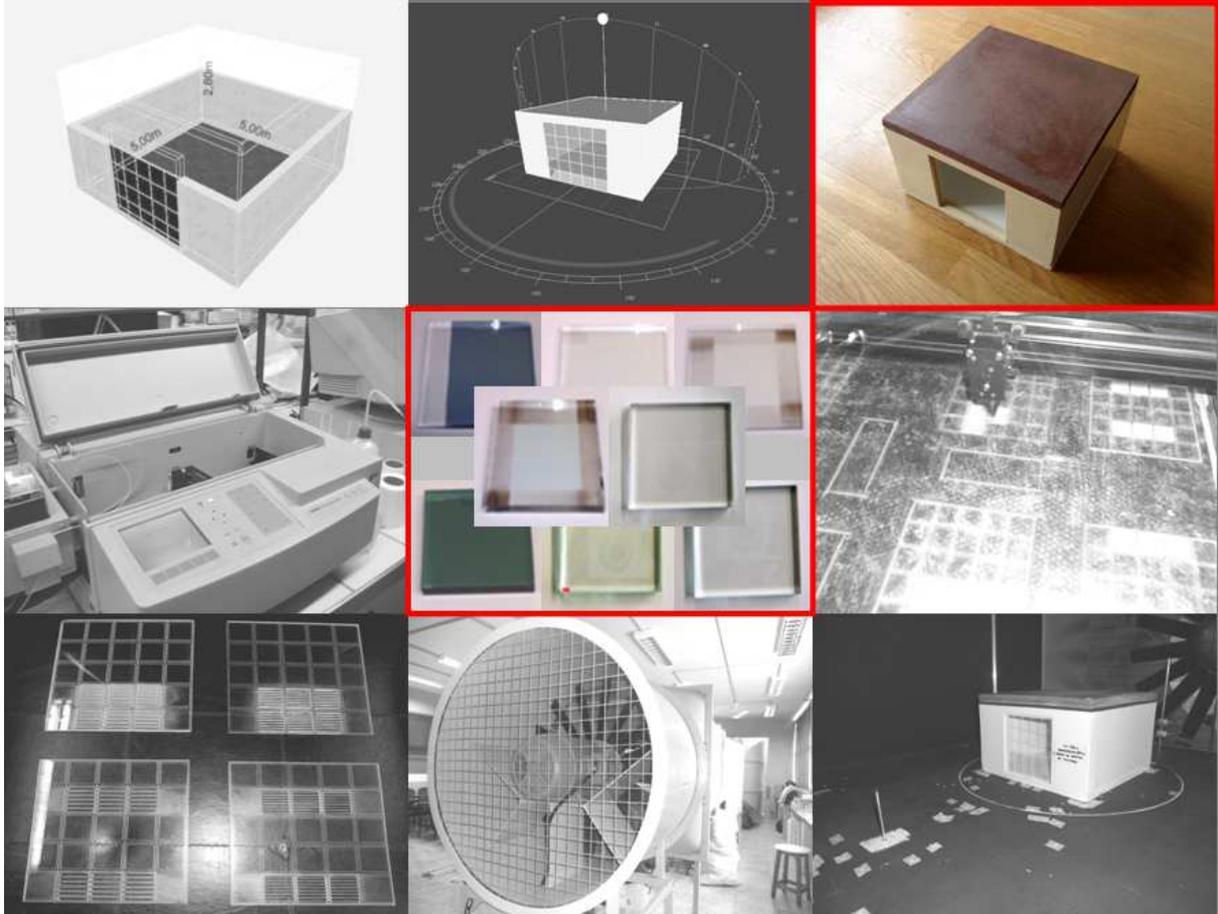
No **Capítulo 6** será apresentada a proposta deste trabalho de investigação, através da definição de todos os componentes do sistema, considerando desde a etapa inicial de conceção, apresentando os módulos inicialmente previstos no sistema e a proposta que foi efetivamente desenvolvida. É apresentada também a pormenorização do sistema de fachadas e o estudo do seu potencial de aplicação com base nos resultados de uma análise económica simplificada.

Finalmente, no **Capítulo 7** serão apresentadas as conclusões decorrentes do desenvolvimento deste trabalho de investigação, especificamente sobre os resultados das simulações computacionais e caracterização de componentes (ensaios de caracterização espectrofotométrica de vidros e ensaios em túnel de vento para o módulo de ventilação), assim como perspectivas para trabalhos futuros pertinentes à área de sistemas de fachadas que visam o aumento da eficiência energética.

Nos **Anexos** encontram-se parte dos resultados das simulações computacionais (desempenho térmico, lumínico e simulações dos módulos fotovoltaicos) significativos, além de dados da pormenorização do sistema de fachadas desenvolvido.

"Pensamentos valem e vivem pela observação exata ou nova, pela reflexão aguda ou profunda; não menos querem a originalidade, a simplicidade e a graça do dizer".

Machado de Assis



CAPÍTULO 2. Fachadas: Conceção e Requisitos



No presente capítulo será abordado o assunto “conceção de fachadas”, no qual foram detalhados todos os requisitos importantes de serem considerados no desenvolvimento de um sistema de fachadas que é o objetivo deste trabalho de investigação. Para isso foram tratados os seguintes aspetos: qualidade da envolvente; conforto térmico; iluminação natural, ventilação natural e acústica.

2.1 Conceção de Fachadas

A função principal da fachada é criar condições de habitabilidade para o edifício, protegendo o ambiente interior contra a ação indesejável dos diversos agentes atuantes (calor, frio, sol, chuva, vento, humidade, ruídos, etc.) controlando-os. Para assegurar a qualidade nos projetos de edifícios, é conveniente a busca de novas tecnologias, no sentido de serem identificados parâmetros e variáveis ambientais que possam apoiar no processo da sua configuração, a fim de se obter a solução adequada em termos de eficiência energética e conforto ambiental.

Em relação ao tipo de vedação vertical exterior convencional, as paredes simples constituíam o tipo mais comum utilizado na construção em Portugal até há cerca de 50 anos, antes da introdução das caixa-de-ar e dos materiais de isolamento. Nos anos 50 introduziram-se as paredes duplas, confeccionadas em alvenaria de tijolo no interior e pedra ou tijolo maciço no exterior, mas sem isolamento na caixa-de-ar. Nos anos 60 as paredes duplas passaram a ser totalmente de tijolo, com o tijolo de maior espessura no exterior.

Nos anos 70 a qualidade regrediu e os panos passaram a ser ambos de reduzida ou média espessura. Apenas nos anos 80 se voltaram a utilizar panos de espessura maior no exterior e nesta altura começam a introduzir-se materiais de isolamento térmico a preencher, total ou parcialmente, a caixa-de-ar das paredes como medida para se reduzir os consumos de energia no setor dos edifícios (MENDONÇA, 2005). Atualmente as paredes multicamadas são as mais comuns na construção em Portugal, com predominância para as paredes duplas de alvenaria de tijolo vazado com caixa-de-ar parcialmente preenchida com materiais de isolamento térmico.

Atualmente, as fachadas passam a ser abordadas de uma forma diferente, como um elemento de trocas térmicas entre o interior e o exterior do edifício, com um potencial impacto para o conforto dos ocupantes e para a eficiência energética. É possível que as fachadas contribuam de forma significativa para a redução dos consumos de energia nos edifícios ao funcionar como uma barreira seletiva, face às condições climatéricas exteriores,



de forma a permitir manter condições de conforto interiores, sem recurso a sistemas mecânicos de climatização, ou pelo menos reduzindo ao mínimo a necessidade de recorrer a este tipo de sistema. No entanto, os sistemas de climatização não devem ser desprezados ou ignorados, porém a necessidade de sua integração deve ser analisada, desde o início (CARDOSO, 2008).

Do estudo realizado por Cardoso (2008) sobre o estado da arte dos elementos constituintes da fachada, verificou-se que existem inúmeras tecnologias desenvolvidas a partir de soluções solares passivas e que só nos últimos anos tem vindo a ser recuperadas, com a implementação de novos materiais de forma a aumentar o desempenho global dos sistemas.

Por meio da verificação de algumas soluções de fachada podem ser identificadas as seguintes necessidades:

- i. Integração de sistemas solar passivos integrados capazes de serem incorporados em edifícios novos e a reabilitar e que cumpram os requisitos locais impostos pelos regulamentos nacionais;
- ii. Sistemas de fachadas dimensionados de acordo com o espaço a ocupar e que assegurem qualidade, conforto do espaço a ocupar e redução de consumo energético;
- iii. Sistemas autossuficientes capazes de suprir a necessidade de recorrer a outros sistemas de aquecimento principalmente, evitando custos de instalação e operação que podem ser bastante dispendiosos;
- iv. Sistemas com módulos de pequenas dimensões que facilitem as condições de transporte e instalação.

Além da necessidade de tecnologias de fachada que incorporem sistemas solares passivos destaca-se também outro aspeto que pode ser incorporado: a microprodução de eletricidade em baixa tensão com possibilidade de entrega de energia à rede elétrica pública que foi regulada pelo Decreto-Lei n.º 68/2002. Posteriormente, o Decreto-Lei n.º 29/2006, veio estabelecer as bases gerais de organização e funcionamento do Sistema Elétrico Nacional (SEN) (SEN, 2006), classificando a produção de eletricidade em regime ordinário e em regime especial.

O Decreto-Lei n.º 68/2002 visa a adaptação da legislação a soluções inovadoras de produção descentralizada, bem como novas tecnologias. Surge assim “a figura de produtor-consumidor de energia elétrica em baixa tensão (ou do produtor em autoconsumo) ” podendo este manter a sua ligação à rede pública de distribuição de energia elétrica “na



tripla perspetiva de autoconsumo, de fornecimento a terceiros e de entrega de excedentes à rede” (DECRETO-LEI n.º 68, 2002).

Ao regime especial corresponde a produção de eletricidade com incentivos à utilização de recursos endógenos e renováveis ou a produção combinada de calor e eletricidade. Também em relação ao mesmo assunto, está previsto no Decreto-Lei n.º 363/2007 que a eletricidade produzida se destine predominantemente a consumo próprio, sendo o excedente passível de ser entregue a terceiros ou à rede pública, com o limite de 150 kW de potência no caso de a entrega ser efetuada à rede pública. Esse aspeto de microprodução já pode ser observado em alguns edifícios em Portugal (DECRETO-LEI n.º 363, 2007).

No Decreto-Lei n.º 319/2009 são definidos objetivos, mecanismos, incentivos e “quadros institucionais, financeiros e jurídicos” com vista à eliminação das atuais lacunas e limitações do mercado, as quais apresentam impedimentos à utilização eficiente da energia. As condições para a promoção do mercado de serviços energéticos, para o desenvolvimento de medidas que permitam a melhoria contínua da eficiência energética que se destina aos consumidores finais, constituem também um elemento integrante do conteúdo deste decreto-lei (DECRETO-LEI n.º 319, 2009).

As fachadas, incluindo os vãos envidraçados e os revestimentos, podem ser consideradas como um dos mais relevantes subsistemas do edifício, sendo responsáveis por criar condições de habitabilidade e ainda desempenhar um papel importante em relação à sustentabilidade dos edifícios. O custo de execução e de manutenção é expressivo em relação ao dos outros subsistemas (OLIVEIRA; MELHADO, 2008). Esse subsistema é constituído pelos elementos que definem e limitam verticalmente o edifício e controlam a passagem de agentes atuantes. Atualmente existe uma tendência para a industrialização desse tipo de sistema e a coordenação modular começa a ser utilizada na busca pela racionalização e diminuição do desperdício.

Esse elemento integrante do edifício possui a função de revestir e envolver o interior, cujo desenho e contração forma o elemento controlador com maior potencial para o ambiente interior em relação a luz, temperatura, som, ventilação e qualidade do ar. É responsável por cerca de 15 a 40% do custo total de um edifício, e pode tornar-se responsável por até 40% dos gastos energéticos no período de vida útil do edifício (SANTIAGO, 2007).

A complexidade do projeto de fachadas tem alcançado um nível de aperfeiçoamento no qual se pode citar a chamada “fachada inteligente”. Esse termo refere-se às fachadas que respondem dinamicamente às exigências do ambiente exterior e da ocupação interior,



segundo princípios de consumo consciente de energia e mantendo o conforto do utilizador. Porém existe um número variado de elementos e configurações que podem ser escolhidas, e para isso deve-se considerar prioritariamente alguns parâmetros, tais como: custo, estética, orientação, tamanho das aberturas (janelas), tipo de envidraçado etc. (OCHOA; CAPELUTO, 2008). Elaborou-se um esquema (**Figura 2.1**) que apresenta alguns dos requisitos e aspetos que devem ser considerados durante a conceção de uma fachada, principalmente de fachadas inovadoras como é o caso deste trabalho.

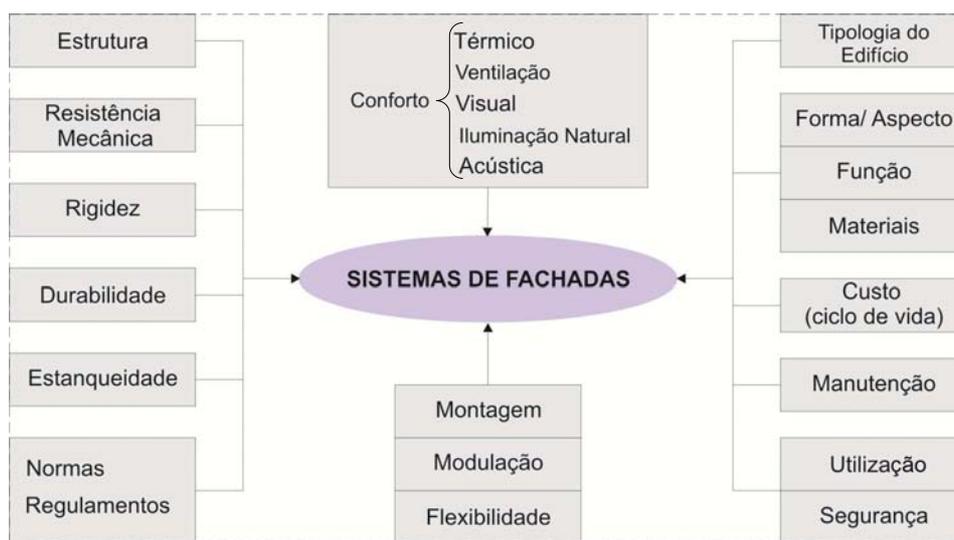


Figura 2.1 Esquema ilustrativo elaborado, considerando parâmetros e aspetos que devem ser considerados durante a conceção de uma fachada.

As fachadas de uma edificação constituem um elemento de proteção entre as condições internas e externas. Koenigsberger (1977) ressalta que as fachadas devem promover condições ambientais internas agradáveis, agindo como superfície seletora, que exclui condições indesejáveis e aproveita condições benéficas do ambiente externo.

Dentre as condições necessárias para habitabilidade em edificações, encontram-se as exigências relacionadas com conforto ambiental. As componentes da fachada representam uma parte importante na obtenção de qualidade de vida e do conforto em edificações, pois atuam como verdadeiros filtros das condições físicas entre o exterior e o interior do edifício. As fachadas possuem enorme responsabilidade no tocante ao conforto ambiental da edificação, sem deixar de satisfazer diversas exigências humanas, como: iluminação natural, aquecimento no período frio e estética (ASHRAE, 2004). Em relação às exigências em termos de conforto ambiental, a *International Standard Organization* (ISO), identifica como principais necessidades dos ocupantes o conforto higrotérmico, visual e acústico, a qualidade do ar interior e a estanqueidade.



De acordo com Mendonça (2005) a fachada funciona como mediador energético e cada vez mais estão sendo tratadas como um elemento independente do edifício, uma vez entendido o papel das fachadas no edifício, como é o caso do presente estudo. Diante disso, as seguintes questões devem ser consideradas na sua concepção:

- **Função:** Para que deverá ser desenhada e quais as solicitações a que esta deve dar resposta? (iluminação, acústica, conforto térmico, ventilação, contacto com o exterior, etc.);
- **Forma:** Qual será o seu aspeto?
- **Construção:** Como são os elementos, componentes da fachada do edifício e como se conjugam no todo? (Materiais e propriedades; proporção entre áreas opacas e envidraçados - WWR¹ – *window-to-wall ratio*; número de camadas; etc.);
- **Energia:** Qual é o consumo energético da fachada no fabrico dos seus componentes, durante a construção, uso e demolição e qual a influência da configuração desta no consumo energético do edifício?

Dos aspetos referidos, a energia é o aspeto que tem ganho maior importância atualmente, devido ao já referido aumento das preocupações energéticas. No processo de concepção, todas estas questões deverão ser ponderadas em simultâneo. Mas, para que a solução adequada seja encontrada é necessário enquadrar todas estas questões no contexto específico em que se insere: no tipo de edifício, no tipo de atividade e no perfil dos utilizadores.

Inicialmente em Portugal não havia grande preocupação com a qualidade térmica da envolvente da construção, nomeadamente com as pontes térmicas, o que foi significativamente alterado após a entrada em vigor, em 1991, do primeiro Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei n. 40/1990, de 6 de fevereiro (RCCTE, 1990). Essa preocupação tornou-se mais evidente com a atualização do Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE) (RCCTE, 2006), que estabelece novas referências para a qualidade térmica da envolvente e exige um número mínimo de renovações de ar para garantir higiene e conforto dos ocupantes.

A concepção das fachadas deve considerar também outros aspetos, tendo em vista a durabilidade ao longo de todo o seu ciclo de vida. Deve-se cumprir os requisitos fundamentais da Diretiva 89/106/CEE, que são: resistência e estabilidade mecânica; segurança em caso de incêndio; higiene, saúde e ambiente; segurança no uso; proteção

¹ É definida como a proporção entre a área envidraçada transparente e a área exterior da parede piso a piso (ASRAE, 2005). Trata-se da área envidraçada líquida (usualmente cerca de 80% da área bruta da janela) dividida pela área bruta de parede exterior que correspondente à altura de piso a piso.



contra o ruído e economia de energia, tendo sempre presente os aspetos relacionados com a durabilidade. Tais aspetos serão descritos posteriormente (DIRETIVA 89/106/CEE, 1989).

2.2 Requisitos de uma Fachada

Dentre as características que devem ser evitadas nos edifícios e que estão, diretamente relacionadas com as fachadas pode-se mencionar as seguintes (ANSELMO et al., 2004):

- Isolamento térmico insuficiente nos elementos opacos da envolvente;
- Existência de pontes térmicas na envolvente do edifício;
- Presença de humidade (afetando o desempenho energético e a durabilidade);
- Baixo desempenho térmico de vãos envidraçados e portas (perdas de calor demasiado grande por transmissão térmica e por infiltrações de ar excessivas);
- Falta de proteções solares adequadas nos vãos envidraçados, dando origem a sobreaquecimento no interior dos edifícios ou aumento das cargas térmicas e das necessidades energéticas no caso de habitações com sistemas de arrefecimento ambiente;
- Ventilação não-controlada, criando maiores necessidades energéticas em aquecimento no inverno, ou inversamente, ventilação insuficiente, conduzindo a maiores níveis de humidade relativa no inverno e sobreaquecimento no verão, e o conseqüente desconforto dos ocupantes, fenómenos de condensação e baixo nível de qualidade do ar interior.

Os edifícios, além de adequar-se à normalização vigente para cumprir e atingir os objetivos de eficácia térmica, acústica, visual e funcional, deverão cumprir os requisitos fundamentais dos produtos de construção (DECRETO-LEI n. 4, 2007), garantindo assim, maior durabilidade (manutenção das características) ao longo da vida útil.

Considerando que os empreendimentos de construção, incluindo os edifícios e outras obras de construção e de engenharia civil, devem ser concebidos e realizados por forma a satisfazerem um conjunto de condições reputadas de interesse público, deve-se garantir que os produtos da construção se revelem adequados ao fim a que se destinam, de modo que os empreendimentos em que venham a ser aplicados satisfaçam as exigências essenciais.

As exigências essenciais das obras devem, em condições normais de manutenção, ser satisfeitas durante um período de vida útil economicamente razoável e referem-se



geralmente a fatores previsíveis. As exigências essenciais das obras são as seguintes (DECRETO-LEI n. 4, 2007):

- **Resistência mecânica e estabilidade:** As obras devem ser concebidas e construídas de modo que as ações a que possam estar sujeitas durante a construção e a utilização não causem desabamento total ou parcial da obra, deformações de grau inadmissível, danos em outras partes da obra ou das instalações ou do equipamento instalado em consequência de deformações importantes dos elementos resistentes e danos desproporcionados relativamente ao facto que esteve na sua origem.
- **Segurança contra incêndio:** As obras devem ser concebidas e realizadas de modo que, no caso de se declarar um incêndio, a estabilidade dos elementos resistentes possa ser garantida durante um período de tempo determinado, a deflagração e a propagação do fogo e do fumo dentro da obra sejam limitadas, a propagação do fogo às construções vizinhas seja limitada, os ocupantes possam abandonar ilesos a obra ou ser salvos por outros meios e a segurança das equipas de socorro tenha sido tida em consideração.
- **Higiene, saúde e ambiente:** As obras devem ser concebidas e realizadas de modo a não causarem danos à higiene e à saúde dos ocupantes ou vizinhos em consequência, nomeadamente, da libertação de gases tóxicos, da presença no ar de partículas ou gases perigosos, da emissão de radiações perigosas, da poluição ou contaminação da água ou do solo, da evacuação defeituosa das águas residuais, do fumo e dos desperdícios, sólidos ou líquidos, e da presença de humidade em partes das obras ou nos parâmetros interiores das mesmas.
- **Segurança na utilização:** As obras devem ser concebidas e realizadas de modo a não apresentarem riscos inaceitáveis de acidente durante a sua utilização e o seu funcionamento, designadamente riscos de escorregamento, queda, choque, queimadura, eletrocussão e ferimentos em consequência de explosão.
- **Proteção contra o ruído:** As obras devem ser concebidas e realizadas de modo que o ruído a que os ocupantes e as pessoas próximas se encontrem expostos se mantenha num nível que não prejudique a sua saúde e lhes permita dormir, descansar e trabalhar em condições satisfatórias.
- **Economia de energia e isolamento térmico:** As obras e as respetivas instalações de aquecimento, arrefecimento e ventilação devem ser concebidas e construídas de modo que a quantidade de energia necessária para a sua utilização seja reduzida, tendo em conta as condições climáticas do local de implantação e o conforto térmico dos ocupantes.



2.2.1 Qualidade da Envolvente

A envolvente do edifício, neste caso específico as fachadas, deve cumprir requisitos mínimos de desempenho energético, para isso são necessárias análises que considerem a variação periódica dos parâmetros climáticos externos. Neste contexto, deve-se buscar a melhor utilização possível de técnicas relevantes para reforçar o seu desempenho energético.

As trocas de energia, luz e calor entre os meios externos e internos, têm como fator principal a envolvente. Para analisá-la devem ser considerados todos os fatores que intervêm no problema, dentre eles a radiação solar, diante da qual os materiais se comportam de maneira distinta. A envolvente divide-se em dois tipos, que são: envolvente opaca e transparente. A principal diferença entre eles é justamente a sua capacidade ou incapacidade de transmitir a radiação solar para o ambiente interno (LAMBERTS, 1997).

Nesse aspeto, o Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE impõe em Portugal os requisitos mínimos de qualidade térmica para os elementos em zona corrente e não-corrente da envolvente opaca e para os vãos envidraçados dos edifícios em função da zona climática onde estes se inserem. No entanto a satisfação destes requisitos, só por si, não garante a satisfação das condições de conforto térmico nos edifícios, tendo apenas por objetivo evitar o sobreaquecimento no verão e aparecimento de humidade e fungos no inverno (RCCTE, 2006).

De acordo com o RCCTE, para elementos opacos, os requisitos são impostos ao nível do coeficiente de transmissão térmica (U), limitando esses valores a máximos admissíveis ($U_{máx}$) e recomendando valores de referência (U_{ref}), de modo a garantir a qualidade mínima exigível a um edifício novo. Os coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis em zona corrente ($U_{máx}$) para os elementos opacos da envolvente de edifícios são apresentados na **Tabela 2.1**.

Tabela 2.1 Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis e Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência.

Elemento da Envolvente	$U_{máx}$ ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)					
	Zona Climática I_1		Zona Climática I_2		Zona Climática I_3	
	$U_{máx}$	U_{ref}	$U_{máx}$	U_{ref}	$U_{máx}$	U_{ref}
Elementos exteriores em zona corrente:						
Zonas opacas verticais	1,80	0,70	1,60	0,60	1,45	0,50
Zonas opacas horizontais	1,25	0,50	1,00	0,45	0,90	0,40
Envidraçados	-	4,30	-	3,30	-	3,30

Fonte: RCCTE, 2006.



Para os envidraçados, os requisitos impostos são ao nível dos fatores solares máximos admissíveis e são também indicados valores de referência para o fator solar ($g_{\perp ref}$) e para o coeficiente de transmissão térmica (U_{ref}). Nenhum vão envidraçado da envolvente de qualquer edifício, desde que não orientado a norte (entre noroeste e nordeste), com área total superior a 5% de área útil de pavimento do espaço que serve, pode apresentar um fator solar correspondente ao vão envidraçado com o (s) respetivo (s) dispositivos de proteção 100% ativos que exceda os valores indicados (**Tabela 2.2**).

Tabela 2.2 Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados não orientados a norte, com mais de 5% da área útil do espaço que servem com dispositivos de proteção 100% ativos.

Classe de Inércia Térmica	Fator Solar Máximo Admissível		
	Zona Climática V_1	Zona Climática V_2	Zona Climática V_3
Fraca	0,15	0,15	0,10
Média	0,56	0,56	0,50
Forte	0,56	0,56	0,50

Fonte: RCCTE, 2006.

2.2.2 Conforto Térmico

O conforto térmico pode ser considerado um estado de espírito que reflete satisfação com o ambiente térmico que envolve o ser humano. Essa definição leva em conta que o significado de “estado de espírito” ou “satisfação”, enfatiza que o conforto é um processo cognitivo que envolve muitos aspetos, influenciados pelas características fisiológicas, psicológicas entre outras (ASHRAE, 2005).

A multidisciplinaridade do assunto leva à necessidade do estudo dos processos fisiológicos do corpo humano em relação ao calor, das suas trocas térmicas com o ambiente, do comportamento dos utentes em relação ao espaço e de como se dá a avaliação subjetiva de bem-estar. Os critérios de conforto para os ambientes interiores são ferramentas importantes tanto para o projeto de edifícios e de instalações de aquecimento e arrefecimento, quanto para a avaliação de construções já existentes (CHVATAL, 2007).

Segundo Roriz (1987) o conforto térmico é um dos requisitos básicos para que os ambientes apresentem o melhor nível possível de habitabilidade e sua importância está ligada não só à sensação de conforto dos seus utilizadores, como também ao seu desempenho no trabalho e à sua saúde. O mesmo autor cita como fundamental para determinação da condição de conforto elementos como o clima (temperatura do ar, humidade relativa, movimento do ar e radiação), o vestuário, e outros, de carácter subjetivo (aclimação, forma e volume do corpo, cor, metabolismo, etc.). O efeito conjugado desses parâmetros, quando produz sensações térmicas agradáveis denomina-se zona de conforto.



Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico. A sensação de conforto térmico pode ser melhorada e qualificada porém depende de considerações fisiológicas e psicológicas que variam por pessoa (CARDOSO, 2002).

Segundo Lamberts (2005) as variáveis de conforto térmico estão divididas em variáveis ambientais e variáveis humanas. As variáveis humanas são, o metabolismo gerado pela atividade física e a resistência térmica oferecida pelo vestuário. As variáveis ambientais são a temperatura do ar; a temperatura radiante média; a velocidade do ar e a humidade relativa do ar. Além disso, variáveis como sexo, idade, raça, hábitos alimentares, peso, altura entre outros podem exercer influência nas condições de conforto de cada pessoa e devem ser consideradas.

O conforto pode ser definido especificamente, em função da relação que o homem estabelece com ambiente e de acordo com o que o ambiente construído possibilita ao indivíduo sob o aspeto bioambiental, em termos de luz, som, calor, uso do espaço, de acordo com as experiências de cada pessoa. As bases da relação entre o homem e o ambiente construído residem no campo da psicofisiologia, cujas leis dizem respeito exatamente às sensações humanas com os estímulos físicos. A psicofisiologia orienta o projetista com relação aos principais problemas da percepção humana para se estabelecer as necessidades do usuário e possibilitar as respostas mais adequadas por meio da intervenção do projetista no meio ambiente (PIETROBON et al., 2001).

Procura-se por meio de parâmetros e índices estabelecer o bem-estar dos utilizadores de um edifício, num sentido mais amplo, pois o edifício, projetado para o homem deve atender aos requisitos de conforto psicológico dos utilizadores; sem esquecer outros aspetos não menos importantes, como os funcionais, construtivos, estéticos e até simbólicos da obra arquitetónica, além das condições de salubridade.

Atualmente o tema conforto ambiental consiste em uma visão integrada de um conjunto de condições e situações que antes eram tratadas de forma estanque e fragmentada por especialistas, os quais em sua maioria não dialogavam entre si (KOWALTOWSKI et al, 1998). Isso remete ao desafio da atuação dos projetistas no sentido de harmonizar esses diferentes critérios e indicadores de conforto na busca de uma melhor solução para os projetos de arquitetura.

Os estudos que propõem critérios de conforto diferenciam-se de acordo com a abordagem experimental adotada. Existem basicamente duas abordagens, denominadas (CHVATAL, 2007):



- Analítica, na qual as condições de conforto são obtidas através da avaliação subjetiva de indivíduos expostos ao ambiente por elas proporcionado, utiliza as câmaras climáticas;
- Empírica, na qual os critérios de conforto são estabelecidos através de levantamentos de campo. Nela os indivíduos votam as suas sensações de acordo com escalas previamente desenvolvidas para esta finalidade, sendo as da ASHRAE, de Bedford e de Fanger as mais conhecidas.

Posteriormente, os dados obtidos numa série de trabalhos científicos (BEDFORD, 1936; WEBB, 1959; HUMPHREYS e NICOL, 1970) conduziram a alguns estudos (NICOL e HUMPHREYS, 1972; HUMPHREYS, 1973, 1976, 1978), nos quais se pretendeu explorar o que havia sido observado, o que acabou por resultar em 1978 na formulação da abordagem adaptativa do conforto térmico. Trata-se de um tipo de abordagem empírica que utiliza os dados recolhidos em campo para determinar a temperatura interior de conforto, a qual é expressa em função da temperatura exterior.

O tema do conforto adaptativo é discutido numa série de trabalhos de investigação. O princípio básico dessa abordagem é que se ocorrer alguma mudança no meio que produza desconforto, as pessoas tem uma reação de forma a retornar sua condição de conforto (NICOL; HUMPHREYS, 2002). Os mesmos autores sugeriram um algoritmo para determinar a temperatura interna ideal a ser fornecida pelo sistema HVAC baseada numa previsão da temperatura interior em relação a temperatura exterior.

Em outros trabalhos de investigação, informações coletadas a partir de estudos de campo em escritórios europeus foram utilizadas para explorar a margem de temperatura na qual estaria a "temperatura de conforto adaptativo", a fim de sugerir em qual intervalo de temperaturas estaria a "zona de conforto", considerada aceitável pelos ocupantes do edifício. Neste estudo observou-se que para escritórios na Europa o nível de desconforto é função da diferença entre a temperatura prevalecente interior e da temperatura de conforto (Nicol; Humphreys, 2007).

Sobre a normalização na área de conforto, a União Europeia estabeleceu uma diretiva orientadora, a Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios. Essa diretiva orientadora conhecida, como EPBD teve como objetivo promover a melhoria do desempenho energético de edificações dentro da comunidade, considerando as condições climáticas externas locais, assim como as exigências climáticas internas e a relação custo – benefício (DIRECTIVA 2002/91/CE, 2002).



A versão revista da desta Directiva já foi publicada no Jornal Oficial da União Europeia em 18 de maio de 2010 e vem reforçar as exigências mínimas para os edifícios, no âmbito da eficiência energética. Em relação à versão anterior, aprovada em 2002, a revisão da Diretiva traz alterações significativas, como a abolição do limite de 1000m² na aplicação dos requisitos em casos de grandes reabilitações, a introdução de requisitos a nível dos sistemas de climatização ou a intensificação dos processos de inspeção e da qualidade dos certificados energéticos. Foi também inserido o conceito de "edifícios com necessidades quase nulas de energia", obrigando a que, "o mais tardar em 31 de dezembro de 2020, todos os novos edifícios tenham desempenhos energéticos muito elevados", sendo que as suas necessidades de energia quase nulas deverão ser cobertas por fontes de energias renováveis. Esse prazo é antecipado em dois anos para os novos edifícios públicos (DIRETIVA 2010/31/EU, 2010).

O conforto térmico pode ser quantificado por normas convencionais, tais como a ISO 7730 (ISO 7730, 2005) e a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004) que permitem o cálculo da temperatura de conforto. Anteriormente estas normas não eram consideradas completamente fiáveis. Isto porque, não consideravam as reações de adaptação das pessoas ou a necessidade de alguma variedade no seu ambiente em suas primeiras versões.

A crescente discussão sobre a necessidade de proposição de uma alternativa ao método determinístico prescrito nas regulamentações (FOUNTAIN, 1996; MAHDAVI e KUMAR, 1996) levou à inclusão de um modelo adaptativo na recente revisão da norma ASHRAE 55 (2004). Em sua versão anterior de 1992, essa norma baseava-se exclusivamente nos estudos de Fanger (FANGER, 1972). O modelo foi desenvolvido utilizando a extensa base de dados da ASHRAE, que congrega resultados obtidos em levantamentos de campo em quatro continentes. Igualmente, a nova revisão da norma ISO 7730 (2005), que se baseia no método analítico, procurou integrar de alguma forma a questão adaptativa, aumentando a faixa de conforto para edifícios não climatizados, ventilados naturalmente (OLESEN e PARSONS, 2002 citado por CHVATAL, 2007).

Também a recente norma europeia EN 15251 (CEN, 2007), procura especificar critérios para projetos do ambiente interior, tendo em vista atender aos objetivos da Diretiva sobre o Desempenho Energético de Edifícios (DIRETIVA 2002/91/CE, 2002), esta norma considera a adaptação dos ocupantes, ao prescrever valores de temperatura interior em função da temperatura média exterior, no verão, para edifícios não condicionados.

Na mesma área de estudo, Matias (2010) fez uma avaliação das condições ambientais (objetivas) e psicossociais (subjetivas) de conforto térmico em ambientes interiores, e desenvolveu um modelo adaptativo caracterizando e definindo as condições de



conforto térmico para edifícios em Portugal. Para isso, foi realizado um conjunto de estudos de campo em edifícios de serviços (ensino e escritórios) e edifícios residenciais (convencionais e lares de idosos), que consistiram na medição de vários parâmetros ambientais (interiores e exteriores) e na aplicação de questionários aos utentes dos espaços analisados.

A ISO 7733 (2005) estabelece, para um tipo de atividade leve ou sedentária e vestuário típico de inverno e verão, um conjunto de recomendações para garantir condições de conforto. A **Tabela 2.3** apresenta valores que se relacionam com as causas do desconforto: a diferença vertical da temperatura do ar entre a cabeça e o tornozelo; a **Tabela 2.4** apresenta os valores da temperatura da superfície do chão, piso frio/quente e a **Tabela 2.5** apresenta a assimetria da temperatura radiante.

As três categorias apresentadas A, B e C são divididas de acordo com as características em termos de diferença vertical da temperatura, temperatura da superfície do chão e assimetria da temperatura radiante de superfícies. Para pertencer a uma destas categorias, todos os critérios devem ser satisfeitos simultaneamente.

Tabela 2.3 Diferença vertical da temperatura entre a cabeça e o tornozelo.

Diferença vertical da temperatura entre a cabeça e o tornozelo	
Categoria	Diferença vertical da temperatura (°C) ^a
A	< 2
B	< 3
C	< 4

^a A uma distância de 1,1 e 0,1 m acima do piso.

Fonte: ISO 7733 (2005).

Tabela 2.4 Temperatura da superfície do chão.

Temperatura da superfície do chão	
Categoria	Temperatura da superfície do chão (°C)
A	19 a 29
B	19 a 29
C	17 a 31

Fonte: ISO 7733 (2005).

Tabela 2.5 Assimetria da temperatura radiante das superfícies.

Assimetria da temperatura radiante de superfícies				
Categoria	Horizontais (teto)	Verticais (paredes)	Horizontais (teto)	Verticais (paredes)
	quente	frias	frias	quentes
A	< 5	< 10	< 14	< 23
B	< 5	< 10	< 14	< 23
C	< 7	< 13	< 18	< 35

Fonte: ISO 7733 (2005).



O critério para a temperatura operativa² é baseado em níveis típicos de atividades, para o valor de $0,5clo$,³ considerando o vestuário típico durante o verão; e $1,0clo$, considerando o vestuário típico durante o inverno. O critério para a velocidade média do ar foi aplicado para uma intensidade de turbulência de 40% (ventilação mista). Os critérios de projeto são válidos para as condições de ocupação determinadas, mas também podem ser aplicáveis e outros tipos de espaços similares (**Tabela 2.6**) (ISO 7733, 2005).

Tabela 2.6 Exemplo de critérios de projeto para espaços em diferentes tipologias.

Tipo de Edifício/ Ambiente	Atividade W/m ²	Classe	Temperatura Operativa (°C)		Velocidade média do ar (máxima) (m/s) ^a	
			Verão	Inverno	Verão	Inverno
Escritórios Sala de Reunião Auditório Cafeteria/Restaurante Salas de aula	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,10
		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 ^b
Creches	81	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,10 ^c
		B	23,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5	0,18	0,15 ^b
		C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19 ^b
Lojas	93	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13 ^b
		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,20	0,15 ^b
		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0	0,23	0,18 ^b

^a A velocidade média do ar (máxima) está baseada numa intensidade de turbulência de 40%. A humidade relativa considerada é de 60% para verão e 40% para inverno. Tanto para verão quanto para o inverno, a temperatura mais baixa é usada para determinar a velocidade média do ar (máxima).

^b Limite abaixo de 20 °C.

Fonte: ISO 7733 (2005).

A ASHRAE 55 aplica o modelo adaptativo a espaços não climatizados (*naturally conditioned spaces*), assim, as temperaturas interiores de espaços que verifiquem os critérios anteriores podem ser determinadas a partir do gráfico da **Figura 2.2**. Ao invés de uma temperatura de conforto (linha) considera-se uma zona de conforto

Em torno das temperaturas confortáveis, a norma estabelece dois níveis de grau de satisfação: 90% e 80%. O grau de satisfação de 80% é para aplicações típicas e deve ser usado quando outras informações não se encontram disponíveis. O grau de satisfação de 90% deve ser usado quando há maior exigência de conforto térmico, como é o caso de edifícios de serviços. A **Figura 2.2** está baseada no modelo adaptativo de conforto térmico que é derivado de um banco de dados global de 21000 medidas obtidas principalmente em

² É a temperatura uniforme de um ambiente com comportamento de corpo negro imaginário, no qual o ocupante poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme (ABNT, 2005).

³ Este valor representa o índice de resistência térmica da roupa à troca de calor sensível por condução, convecção e radiação entre a pele e a superfície externa da roupa (ABNT, 2005).



edifícios comerciais. As temperaturas limites para a análise são apresentadas na **Figura 2.2** e não podem ser extrapoladas, para ambos os limites superiores e inferiores apresentados no gráfico. Se a temperatura média mensal exterior for inferior a 10°C (50°F) ou superior a 33.5°C (92.3°F), este método não pode ser aplicado.

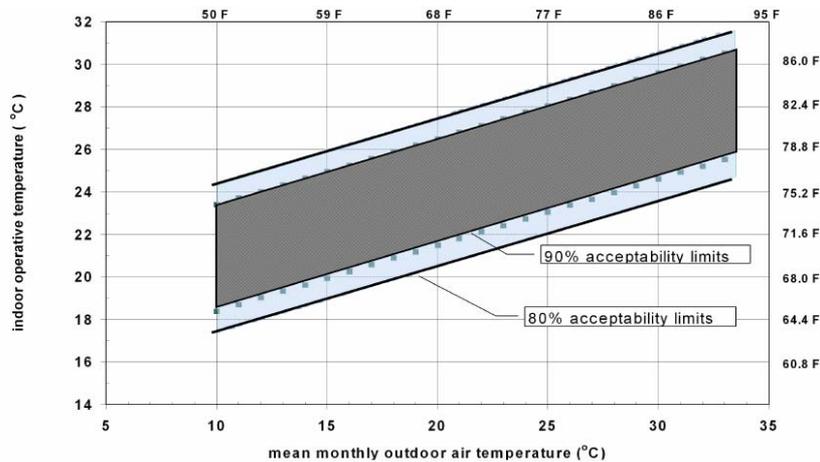


Figura 2.2 Limites de temperatura aceitável para espaços naturalmente ventilados.

Fonte: ASHRAE, 2004.

Já com base na normalização portuguesa, as condições ambientes de conforto de referência de acordo com o RCCTE, a partir do art. 14º são: uma temperatura do ar de 20°C para a estação de aquecimento e uma temperatura do ar de 25°C e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento.

Porém, salienta-se que não se trata apenas de seguir a normalização de conforto térmico, pois deve haver a preocupação por parte dos profissionais da área da construção civil de adaptar soluções arquitetónicas e sistemas construtivos que promovam maior eficiência ao sistema final, incluindo a busca do aproveitamento máximo dos recursos naturais disponíveis, a serem considerados desde a fase de conceção dos projetos. Essas soluções devem-se basear, evidentemente, em dados climatológicos fiáveis e demais características da região na qual será implantada a edificação.

2.2.3 Iluminação Natural

A história da arquitetura é rica em exemplos da importância da iluminação natural em diferentes tipologias de edifícios. A luz natural destaca-se como modeladora de formas, elemento dinâmico que permite o contacto do interior com o exterior, elemento que proporciona a percepção da temporalidade aos ambientes e que exerce papel fundamental na integração da arquitetura com o meio em que está inserida (SCARAZZATO, 2004).



A utilização da luz natural é, sob todos os aspetos, o ponto de partida para se obter um sistema de iluminação energeticamente eficiente, esta é a tendência mundial cada vez mais adotada nos modernos sistemas de iluminação. Nos últimos anos, tem renascido o interesse na promoção das boas práticas de projeto de iluminação natural por razões de eficiência energética e conforto visual.

A luz solar apresenta grandes vantagens em relação à luz artificial. Além de ser gratuita, limpa, e disponível, possui vantagens de caráter ergonómico, energético e económico. Produz alta iluminância, permite a distinção e perceção de cores, estas propriedades indicam que a luz solar fornece boas condições de visão. Além disto, devido à própria evolução, o olho humano percebe como naturais os objetos iluminados pela luz solar. Estudos mostram que trabalhar num ambiente iluminado somente por luz artificial é prejudicial à saúde e resulta em maior stress e desconforto (IEA, 2000).

Para que a luz natural possa atingir de fato o objetivo e tornar uma edificação sustentável é necessária uma estratégia de integração que envolve a localização e a orientação da edificação, o desenho das aberturas, a integração com o sistema de luz artificial e térmico além da manutenção do conjunto. Um projeto que não avalie todos os fatores pode criar vários inconvenientes, tais como o encandeamento, devido a reflexões intensas nas superfícies dentro do ambiente, desconforto devido a diferenças acentuadas de iluminação dentro dos espaços, além de ganhos excessivos de calor. Em climas frios, a penetração da radiação direta nos ambientes internos é desejável para promover aquecimento, ao contrário de climas quentes, onde a porção direta deve ser evitada, sendo somente a radiação difusa desejável para promover a iluminação do ambiente.

Na União Europeia, o consumo de energia elétrica em iluminação no Setor Residencial representa mais de 12% do consumo total deste setor. Cerca de 20% da fatura de eletricidade de uma habitação é devida à iluminação e no setor dos serviços, essa percentagem, pode chegar até 60%. Em Portugal, a situação é idêntica. No setor doméstico a iluminação representa em termos médios cerca de 12% do consumo de energia elétrica e no setor dos serviços sobe para 20%, existindo em ambos os setores um elevado potencial de economia de energia que devemos explorar (DGEG, 2011a). Esses valores poderiam ser minimizados, a partir da implementação de estratégias de melhor utilização da iluminação natural.

Em Portugal podem ser citados dois exemplos de projetos de arquitetura em que o aproveitamento da luz natural foi um dos objetivos prioritários, permitindo conjugar adequados níveis de iluminação interior e simultaneamente minimizar a utilização de luz artificial, são eles: o Edifício Solar XXI (**Figura 2.3**) e a Escola Secundária de Valongo (1993), localizada no Concelho de Águeda (**Figura 2.4**) (DGEG, 2011a).



Figura 2.3 Edifício Solar XXI
Fonte: INETI, 2005.

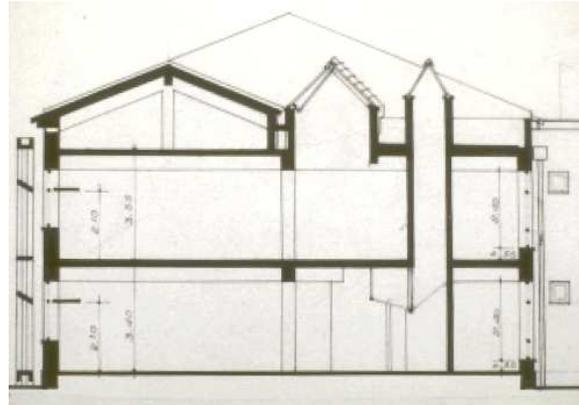


Figura 2.4 Projeto Escola Secundária de Valongo (1993).
Fonte: MCNICHOLL & OWEN LEWIS, 1994.

De acordo com a ASHRAE, existem três relações fundamentais para a otimização da iluminação natural que podem ser estabelecidas em função das propriedades dos envidraçados utilizados e da área envidraçada, ou *window-to-wall area ratio* (WWR), são elas (ASHRAE, 2005):

- O consumo energético anual para arrefecimento, que aumenta com a incidência de radiação solar, que pode ser indicado pelo produto do Fator de Ganho de Calor por Insolação (*Solar Heat Gain Fator* - SHGF) e WWR;
- O consumo energético anual para iluminação artificial, que diminui exponencialmente com o aumento da iluminação natural e pode ser indicado pelo produto da transmitância visível (T_v) e WWR;
- O consumo energético anual para aquecimento que diminui linearmente com a diminuição dos ganhos de calor provenientes de iluminação artificial.

Segundo Santos (2002), as propriedades dos materiais com maior influência nas condições de iluminação natural nos edifícios são:

- A reflectância difusa visível das superfícies opacas (interiores e exteriores);
- A transmitância visível das superfícies transparentes e translúcidas (envidraçados).

As propriedades de reflexão das superfícies interiores (paredes, teto e pavimento, mobiliário, etc.) afetam o modo como a luz natural se distribui no interior dos compartimentos, manifestando-se tanto nos aspetos quantitativos como nos qualitativos da iluminação. De modo semelhante, as características de reflexão das superfícies exteriores fronteiras (obstruções) e do pavimento exterior, também contribuem para as iluminâncias finais interiores e para a qualidade do ambiente visual. Para além destes parâmetros é ainda de interesse conhecer outras características dos materiais como sejam a cor, a aparência e textura e o estado de conservação.



As iluminâncias recomendadas no interior de um compartimento dependem do tipo de atividades que têm lugar nesse compartimento, sendo que no desenho das fachadas, as características dos envidraçados e as potencialidades de regulação dos mesmos, têm que se adequar às necessidades dos ocupantes. Relativamente à qualidade de iluminação, os níveis de iluminação recomendados para certas tarefas estão bem definidos e, se forem especificados e implementados de acordo com as normas existentes, não deverão causar desconforto aos habitantes. Em Portugal, não existindo normas específicas para requisitos de iluminação, estes podem-se estabelecer através da consulta a tabelas de níveis de iluminação natural recomendadas para diferentes atividades, tais como as diretivas CIBSE na Inglaterra, a normalização da CIE (*Commission Internationale de L'Eclairage*) ou outras fontes equivalentes.

O RCCTE em termos de iluminação adota uma posição conservadora ao ter como área de envidraçado de referência, um valor de 15% da área útil do pavimento (RCCTE, 2006) e não prevê soluções de ganhos térmicos indiretos na metodologia de previsão do desempenho térmico, nem beneficia a inclusão de soluções de iluminação natural.

As iluminâncias recomendadas no interior de um compartimento dependem do tipo de atividades que são executadas nesse compartimento, se necessitam de maior precisão ou não, as **Tabelas 2.7** e **2.8** extraídas da norma NBR 5413: Iluminância de interiores (ABNT, 1992) apresentam os valores recomendados para iluminância para edifícios residenciais e de acordo com a tarefa executada.

Tabela 2.7 Iluminâncias recomendadas no plano de trabalho em Edifícios Residenciais

Edifícios residenciais		
Local		Iluminâncias recomendadas (lux)
Zonas de passagem Corredores e escadas	Geral	75 - 100 - 150
	Local	200 - 300 - 500
Cozinhas	Geral	150 - 200 - 300
	Local	300 - 500 - 750
Salas de Estar/ Salas de jantar	Geral	100 - 150 - 200
	Local	300 - 500 - 750
Salas de Estudo		300 - 500 - 750
Quartos de dormir	Geral	100 - 150 - 200
	Local	200 - 300 - 500

Fonte: ABNT, 1992.

**Tabela 2.8** Iluminâncias recomendadas no plano de trabalho de acordo com as tarefas.

Classe	Iluminância Recomendada (lux)	Tipo de Atividade
A Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples	20 - 30 - 50	Áreas públicas com arredores escuros.
	50 - 75 - 100	Orientação simples para permanência curta.
	100 - 150 - 200	Recintos não usados para trabalho contínuo; depósitos
	200 - 300 - 500	Tarefas com requisitos visuais limitados, trabalho bruto de maquinaria, auditórios.
B Iluminação Geral para área de trabalho	500 - 750 - 1000	Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios.
	1000 - 1500 - 2000	Tarefas com requisitos especiais, indústrias.
C Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis	2000 - 3000 - 5000	Tarefas visuais exatas e prolongadas (eletrónica)
	5000 - 7500 - 10000	Tarefas visuais muito exatas e prolongadas (microeletrónica)
	10000 - 15000 - 20000	Tarefas visuais muito especiais, cirurgia.

Fonte: ABNT, 1992.

A existência de iluminâncias suficientes para a realização das tarefas visuais (principal exigência quantitativa) constitui uma condição necessária, mas em muitas situações a visibilidade das tarefas visuais depende ainda de outros fatores como: o modo como a luz é disponibilizada, as características de cor das fontes de iluminação e das superfícies e os níveis de encandeamento presentes (aspectos qualitativos). Numa perspetiva de conforto e eficiência energética é desejável que a iluminação dos espaços interiores seja efetuada, preferencialmente, com recurso à luz natural, devendo esta ser suplementada por sistemas de iluminação elétrica eficazes e flexíveis quando as necessidades de iluminação não possam ser satisfeitas apenas à custa da luz natural. Deste modo, o aproveitamento da iluminação natural nos edifícios, e em particular naqueles com ocupação predominantemente diurna, pode contribuir de modo significativo para a eficiência energética, o conforto visual e o bem-estar dos seus ocupantes (SANTOS, 2007).

Nesse contexto, o Fator de Luz do Dia (FLD)⁴ é o parâmetro de uso mais generalizado na caracterização e quantificação das condições de iluminação natural nos edifícios. Os requisitos em termos de iluminâncias podem ser obtidos por meio do FLD no plano de trabalho que é definido como o quociente da iluminância num dado ponto de um plano de trabalho no interior de um compartimento (E_{int}), devida a luz recebida direta e indiretamente do céu, pela iluminância num plano horizontal resultante da luz proveniente de todo o céu de obstrução (E_{ext}). Este fator depende da distribuição relativa das iluminâncias do céu, admitindo-se normalmente que se trata de céu encoberto (SANTOS, 2005).

⁴ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE (CIE), "International Lighting Vocabulary", 4th Ed, IEC/CIE, 1987.



$$FDL(\%) = \left(\frac{E_{int}}{E_{ext}} \right) \times 100$$

Onde:

FDL = Fator de luz do dia (%);

E_{int} = Iluminância num ponto de um plano no interior de um compartimento;

E_{ext} = Iluminância horizontal global exterior devida a um hemisfério de céu (encoberto) desobstruído.

Segundo Hopkinson et al (1966), o conceito de FLD é a eficácia do compartimento como instalação de iluminação, ou seja, como se comporta o meio de penetração da luz do dia no compartimento. Embora a luz do dia no exterior possa aumentar ou diminuir, o FLD permanece constante, e isto ocorre porque a iluminação no interior se altera simultaneamente com a luz do dia no exterior, sendo portanto, a constância uma vantagem do FLD. Os valores de FLD recomendados para edifícios residenciais são indicados na **Tabela 2.9**.

Tabela 2.9 Fator Luz do dia recomendado em Edifícios Residenciais

Edifícios Residenciais		
Local	Fator de Luz do Dia (%)	
	Mínimo	Médio
Quartos de dormir	0,3	1
Cozinhas	0,6	2
Salas de Estar	0,5	1,5
Escritório	2	5
Sala de Aula	2	5

Fonte: A Green Vitruvius, 1999.

Outro parâmetro para análise da iluminação é o contraste, que representa a razão entre o brilho de uma superfície e o seu fundo imediato, esse parâmetro está relacionado com uma melhor avaliação do brilho dos objetos. O contraste pode ser quantificado pela reflectância (**Tabela 2.10**) ou pela razão de luminâncias (**Tabela 2.11**) das superfícies em estudo. Para a definição de um espaço visualmente confortável nos edifícios, podem ser definidos tipos de contraste: um entre as superfícies da envolvente do compartimento, outro entre a superfície e o observador (SILVA, 2006).

Tabela 2.10 Reflectâncias recomendada das superfícies

Superfícies	Reflectância Recomendada
Tetos	0,70 – 0,85
Paredes (adjacentes a fontes)	0,6 – 0,7
Paredes (restantes)	0,4 – 0,5
Pavimentos	0,15 – 0,3

Fonte: Santos, 2005.

**Tabela 2.11** Razão de luminâncias máximas recomendadas.

Tipo de razão	Razão de Luminâncias
Fundo da Tarefa visual: ambiente	3:1
Fundo da Tarefa visual: campo periférico	10:1
Fonte de luz: campos adjacentes	20:1
Interior em geral	40:1

Fonte: Santos, 2005.

2.2.4 Ventilação Natural

A ventilação natural de uma edificação é um fator determinante para o conforto térmico, para a saúde e o bem-estar dos ocupantes das edificações. Denomina-se por ventilação natural a renovação do volume de ar de um certo ambiente através do estabelecimento de um fluxo de ar entre o exterior e o interior. A ventilação natural pode ocorrer por dois processos que atuam distintamente ou de maneira conjugada: ação dos ventos, que gera diferentes campos de pressão sobre o edifício, ou por efeito chaminé, que gera diferenças de densidade de ar devido às diferenças de temperatura entre o exterior e o interior. Suas funções são renovar o ar, a dispersão de poluentes e odores, e o conforto térmico do usuário. Depende de fatores fixos, tais como: a disposição dos edifícios, dos edifícios vizinhos e da presença de obstáculos; a localização, a orientação, a forma e as características construtivas do edifício; a posição, tamanho e tipo de aberturas. Os fatores variáveis da ventilação são a direção, velocidade e frequência dos ventos (TOLEDO, 2001) e além disso a diferença de temperatura entre o interior e exterior.

No trabalho desenvolvido por Viegas (2010) “CAD 6 - Ventilação e qualidade do ar interior” são revistos os métodos de estimativa de caudais, em função das várias configurações possíveis para os esquemas de ventilação natural. É apresentado também um método gráfico para cálculo simplificado em tipologias arquitetônicas simples. É feita uma revisão sucinta das características do vento, bem como uma breve revisão do essencial da aerodinâmica de edifícios e aborda influência da turbulência na ventilação natural.

A ventilação natural em edifícios de habitação deverá ser geral e permanente, com entrada de ar pelos compartimentos principais (sala, quartos) e saída pelos compartimentos de serviço (cozinhas, instalações sanitárias). A solução de ventilação autônoma para cada divisão não é a mais adequada. Sempre que possível devem ser implementadas soluções que permitam uma adequada ventilação natural que deve contemplar:

- Aberturas de admissão de ar nos compartimentos principais (as janelas não devem permitir infiltrações de ar excessivas);



- Passagem de ar dos compartimentos principais para os compartimentos de serviço e não o contrário;
- Aberturas de evacuação de ar dos compartimentos de serviço, ligadas a condutas individuais ou coletivas de evacuação de ar para o exterior;
- Possibilidade de limitação da permeabilidade ao ar da envolvente exterior em janelas e caixas de estore.

A ventilação natural, se bem explorada, pode suprir as expectativas de eficiência energética em boa parte do tempo de ocupação (NICOL, 2004). Em grande parte dos ambientes, as pessoas preferem ter controlo da iluminação e da ventilação, o que pode exigir um projeto de condicionamento diferenciado ou o condicionamento natural.

A ventilação natural regula o clima interno de uma edificação por meio da troca de ar pelas aberturas. As forças motrizes naturais geram o efeito chaminé, que tem sua origem na diferença de temperatura entre o ar externo e o ar no interior do ambiente construído e pelas diferenças de pressão ocasionadas pela ação do vento.

Os vãos de uma mesma habitação em comunicação com o exterior, quando possível devem ser localizados em fachadas de orientação diferente de maneira a permitir o aproveitamento da diferença de pressões provocada pela ação do vento para aumentar a eficácia da ventilação. A disposição dos compartimentos e a orientação das aberturas para o exterior devem, preferencialmente estar coordenadas com a direção do vento predominante de forma a favorecer a admissão de ar exterior pelos compartimentos principais e a evacuação pelos compartimentos de serviço (NP 1037-1, 2002).

Uma circulação natural de ar adequada, dentro de um ambiente, além de auxiliar na diminuição do gradiente térmico, contribui para a renovação do ar (remoção dos poluentes do ar interno), que, dependendo do perfil de ocupação do ambiente, pode afetar a produtividade dos ocupantes além de ser prejudicial à saúde. A velocidade de circulação do ar no interior da edificação e as temperaturas superficiais internas são variáveis que podem ser alteradas, por meio de estratégias arquitetónicas, sem emprego de equipamentos mecânicos, para se obter uma melhor condição de conforto aos ocupantes (MAZON, 2006).

A ventilação das habitações deve ser geral e permanente, mesmo nos períodos em que a temperatura exterior obriga a manter as janelas fechadas. O facto do efeito térmico estar essencialmente limitado à estação fria obriga a considerar em separado a ventilação em situação de inverno (entendido como a fase em que ocorrem diferenças de temperatura entre o interior das habitações e o exterior dos edifícios superiores a 8°C) e em situação de verão (situação em que não ocorre tal diferença de temperatura). No verão os compartimentos principais devem ser arejados sobretudo por abertura das janelas. Para



isso, as fachadas devem possuir vãos em comunicação direta com o exterior (NP 1037 1, 2002).

A necessidade de estanqueidade pode acarretar a redução das possibilidades de ventilação natural necessária para garantir a qualidade do ar de ambientes fechados, provocando a chamada “síndrome dos edifícios doentes” (SED). A síndrome dos edifícios doentes (SED) pode ser definida, de acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), como “uma situação na qual os ocupantes ou utilizadores de um prédio específico apresentam sintomas sem origem determinada e sem a possibilidade de constatação de uma determinada etiologia, sendo, portanto, desconhecida. A “SED” foi reconhecida pela OMS em 1982, por meio de um estudo realizado em Nördlingen na Alemanha, com o título “*Health aspects related to indoor air quality*”, no qual verificou-se que o problema da qualidade do ar de interiores poderia ser melhorado com o aumento de ventilação e a implantação de filtros na entrada e saída de ar (OMS, 1983).

Por razões de higiene e conforto dos ocupantes, é necessário que os edifícios sejam ventilados em permanência por um caudal mínimo de ar. De acordo com o Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios, RCCTE (RCCTE, 2006), em Portugal o edifício ou fração autónoma deve possuir características construtivas ou dispositivos para garantir a qualidade do ar interior, por ventilação natural ou mecânica, a uma taxa de renovação mínima de $R_{ph}=0,6r/h-1$.

As necessidades de ventilação encontram-se também na norma NP 1037-1 “Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás – Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural”. O objetivo desta norma é definir as regras a que devem obedecer os sistemas de ventilação natural dos edifícios de habitação, de modo a que os mesmos cumpram a sua função nos seus múltiplos aspetos. Nela apresentam-se os valores para “caudais tipo” de acordo com o compartimento a ventilar, para a partir daí ser promovido pela ventilação natural e suas estratégias.

As trocas de ar com o exterior que não correspondam às verificadas pelas aberturas de ventilação devem ser evitadas, pois podem induzir circulações de ar indesejáveis que perturbem o normal sentido de circulação. As aberturas de admissão de ar nos compartimentos principais devem ser corretamente localizadas, para evitar correntes de ar e de modo a que não possam ser inadvertidamente obstruídas por móveis ou por elementos decorativos.

A **Figura 2.5** apresenta alguns exemplos de aberturas de admissão de ar em paredes de fachada e os posicionamentos mais aconselháveis (ANSELMO et al., 2004).

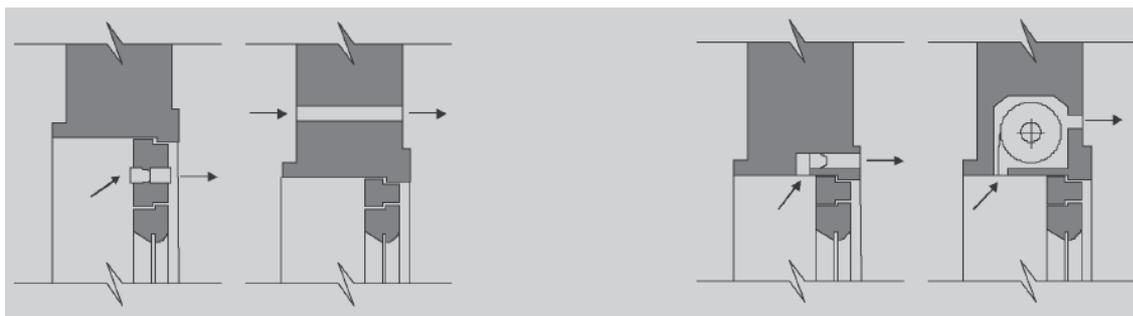


Figura 2.5 Aberturas de admissão de ar em paredes de fachada – Posições mais aconselháveis

Fonte: ANSELMO et al., 2004.

As entradas de ar podem ser de secção constante (não-reguláveis) ou de secção variável, devendo as primeiras utilizar-se apenas em fachadas pouco expostas ao vento. As entradas de ar de secção variável podem ser acionadas manualmente (reguláveis) ou por ação do vento (autorreguláveis). Em edifícios localizados em zonas ruidosas, devem instalar-se entradas de ar com proteção acústica.

2.2.5 Acústica

Na Europa, o ruído tem-se tornado uma das maiores preocupações em relação à saúde. Aproximadamente 40% da população está exposta a níveis que excedem 55dB(A), proveniente do tráfego de veículos e 20 % são expostos a níveis que excedem 65dB(A). Levando em conta a exposição devido ao ruído de tráfego, aproximadamente metade dos cidadãos da União Europeia vivem em zonas que não asseguram conforto acústico aos moradores. A poluição sonora pode causar alguns malefícios para a saúde, entre eles: perda de audição; inteligibilidade da fala; distúrbios do sono; impactos nas funções fisiológicas (hipertensão e isquemia cardíaca); doença mental; além de prejudicar a performance cognitiva de crianças e trabalhadores expostos (OMS, 1999).

Segundo um estudo da Federação Europeia para os Transportes e Ambiente, o excesso de ruído rodoviário e ferroviário provoca todos os anos, cerca de 50 mil mortes por ataque cardíaco na União Europeia (UE) e doenças de coração a mais de 200 mil cidadãos europeus. Ao todo, a poluição sonora custa cerca de 40 mil milhões de euros em cuidados de saúde aos contribuintes europeus. Nos 25 países da UE estudados existe um total de 245 milhões de pessoas (entre os mais de 450 milhões habitantes da UE), expostas a índices de ruído acima de 55dB, o limite a partir do qual a Organização Mundial de Saúde (OMS) considera que o ruído é prejudicial para os seres humanos (DEN BÔER; SCHROTEN, 2007).



Apesar de subjetiva e dependente de fatores socioeconómicos e culturais, variáveis de indivíduo para indivíduo, a avaliação da qualidade acústica do edifício, pode basear-se em critérios físicos mensuráveis, descritos na literatura especializada e nas normas internacionais respetivas (BRAGANÇA et al., 2002).

Em estudos na área de acústica demonstra-se que existem diferenças significativas entre os valores obtidos por alguns dos métodos convencionais conhecidos para a previsão do desempenho acústico de soluções construtivas de fachada e os valores obtidos "in situ" (BRAGANÇA; SILVA, 2000).

No estudo realizado por Bragança et al. (2002) avaliou-se um edifício caracterizado pela utilização de materiais leves e a adoção de grandes vãos envidraçados (edifício MBT- *Mixed Building Technology*), este tipo de solução assegurou um melhor comportamento acústico, quando comparado com o proporcionado por soluções tradicionais, apesar destas terem massa superficial superior. O emprego de caixilharias de boa qualidade e o emprego de material absorvente sonoro com maior espessura nos elementos construtivos são os principais fatores de contribuição para uma melhor qualidade acústica.

Em relação à qualidade acústica destaca-se em Portugal o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 e novamente publicado com alterações em 2008, como Decreto-Lei nº 96. Este regulamento destina-se especificamente às exigências a observar nos edifícios em termos de isolamento sonoro de envolventes exteriores e de compartimentação interior, assim como ao estabelecimento de condições de conforto adequadas, relativamente ao ruído dos equipamentos e das condições de reverberação em espaços específicos (RRAE, 2008).

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios em vigor até às alterações de 2008 apresentava-se simplificado em descrições de metodologias para previsão de isolamento a sons aéreos e em esclarecimentos de índole técnica. A exigência das características acústicas da envolvente de um edifício por parte das entidades licenciadoras é importante para que o mercado se dinamize, com vista ao cumprimento das imposições regulamentares (BRAGANÇA; SILVA, 2000).

Porém as alterações introduzidas nesse regulamento (RRAE, 2008) atualizam os parâmetros de desempenho acústico dos edifícios e os indicadores do ruído de equipamentos e instalações, e estabelecem explicitamente procedimentos de avaliação de conformidade com as normas definidas no regulamento, visando a melhoria da qualidade habitacional no País, tanto para edifícios novos como para os edifícios existentes que venham a ser objeto de reconstrução, ampliação ou alteração. É alargado o âmbito de aplicação do RRAE, incluindo também critérios mínimos para os edifícios de unidades



hoteleiras e definidos requisitos mínimos para auditórios, salas de espetáculo e cinemas de modo a evitar a necessidade de posteriores correções acústicas.

Os edifícios e as suas frações que se destinem a usos habitacionais ou que, para além daquele uso, se destinem também a comércio, indústria, serviços ou diversão, estão sujeitos ao cumprimento dos seguintes requisitos acústicos (RRAE, 2008):

a) O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{2m, nT, w}$), entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos deve satisfazer o seguinte:

- $D_{2m, nT, w} \geq 33\text{dB}$, em zonas mistas ou em zonas sensíveis⁵;
- $D_{2m, nT, w} \geq 28\text{dB}$, em zonas sensíveis;
- Os valores limite dos índices referidos nos itens anteriores são acrescidos de 3dB, quando sejam novos edifícios habitacionais em zonas urbanas consolidadas, e que essa zona seja abrangida por um plano municipal de redução de ruído; ou não exceda em mais de 5 dB(A) os valores limite fixados anteriormente.
- Quando a área translúcida for superior a 60% do elemento de fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2m, nT, w}$ o termo de adaptação apropriado, conforme o tipo de ruído dominante na emissão.

b) O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT, w}$, entre compartimentos de um fogo, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar de outro fogo, como locais recetores, deve satisfazer o seguinte:

$$D_{nT, w} \geq 50\text{dB}$$

c) O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT, w}$, entre locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores, deve satisfazer o seguinte:

- $D_{nT, w} \geq 48\text{dB}$;
- $D_{nT, w} \geq 40\text{dB}$, se o local emissor for um caminho de circulação vertical, quando o edifício seja servido por ascensores;
- $D_{nT, w} \geq 50\text{dB}$, se o local emissor for uma garagem de estacionamento automóvel;

d) O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT, w}$, entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores, deve satisfazer o seguinte:

$$D_{nT, w} \geq 58\text{dB}$$

⁵ As **zonas mistas** não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 65dB(A) no período diurno e superior a 55dB(A) no período noturno; As **zonas sensíveis** não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 55dB(A) e superior a 45dB(A).



e) No interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT, w}$, proveniente de uma percussão normalizada sobre pavimentos dos outros fogos ou de locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, deve satisfazer o seguinte:

$$L'_{nT, w} \leq 60 \text{ dB}$$

f) O índice estabelecido anteriormente não se aplica, se o local emissor for um caminho de circulação vertical, quando o edifício seja servido por ascensores;

g) No interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT, w}$, proveniente de uma percussão normalizada sobre pavimentos de locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, como locais emissores, deve satisfazer o seguinte:

$$L'_{nT, w} \leq 50 \text{ dB}$$

Os edifícios que se destinem a usos comerciais ou de prestação de serviços, ou partes análogas integradas em edifícios industriais, estão sujeitos ao cumprimento dos seguintes requisitos acústicos (RRAE, 2008):

a) O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2 m, nT, w}$, entre o exterior dos edifícios, como local emissor, deve satisfazer o seguinte:

- $D_{2 m, nT, w} \geq 30 \text{ dB}$, para os escritórios;
- $D_{2 m, nT, w} \geq 25 \text{ dB}$, para os restantes recintos;
- Quando a área translúcida for superior a 60% do elemento de fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2 m, nT, w}$ o termo de adaptação apropriado, conforme o tipo de ruído dominante na emissão, mantendo-se os limites anteriormente estabelecidos.

b) No interior dos escritórios, ou ambiente semelhantes, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT, w}$, proveniente de uma excitação de percussão normalizada sobre pavimentos de outros locais do edifício, como locais emissores, deve satisfazer o seguinte:

$$L'_{nT, w} \leq 60 \text{ dB}$$

c) Nos locais situados no interior do edifício onde se exerçam atividades que requeiram concentração e sossego, o nível de avaliação, $L_{Ar, nT}$, do ruído particular de equipamentos do edifício deve satisfazer o seguinte:

- i) $L_{Ar, nT} \leq 42 \text{ dB (A)}$, se o funcionamento do equipamento for intermitente;
- ii) $L_{Ar, nT} \leq 37 \text{ dB (A)}$, se o funcionamento do equipamento for contínuo.



Resumidamente, para o caso de fachadas (entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos), o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{2m, nT, w}$), aplicado:

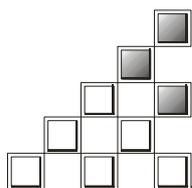
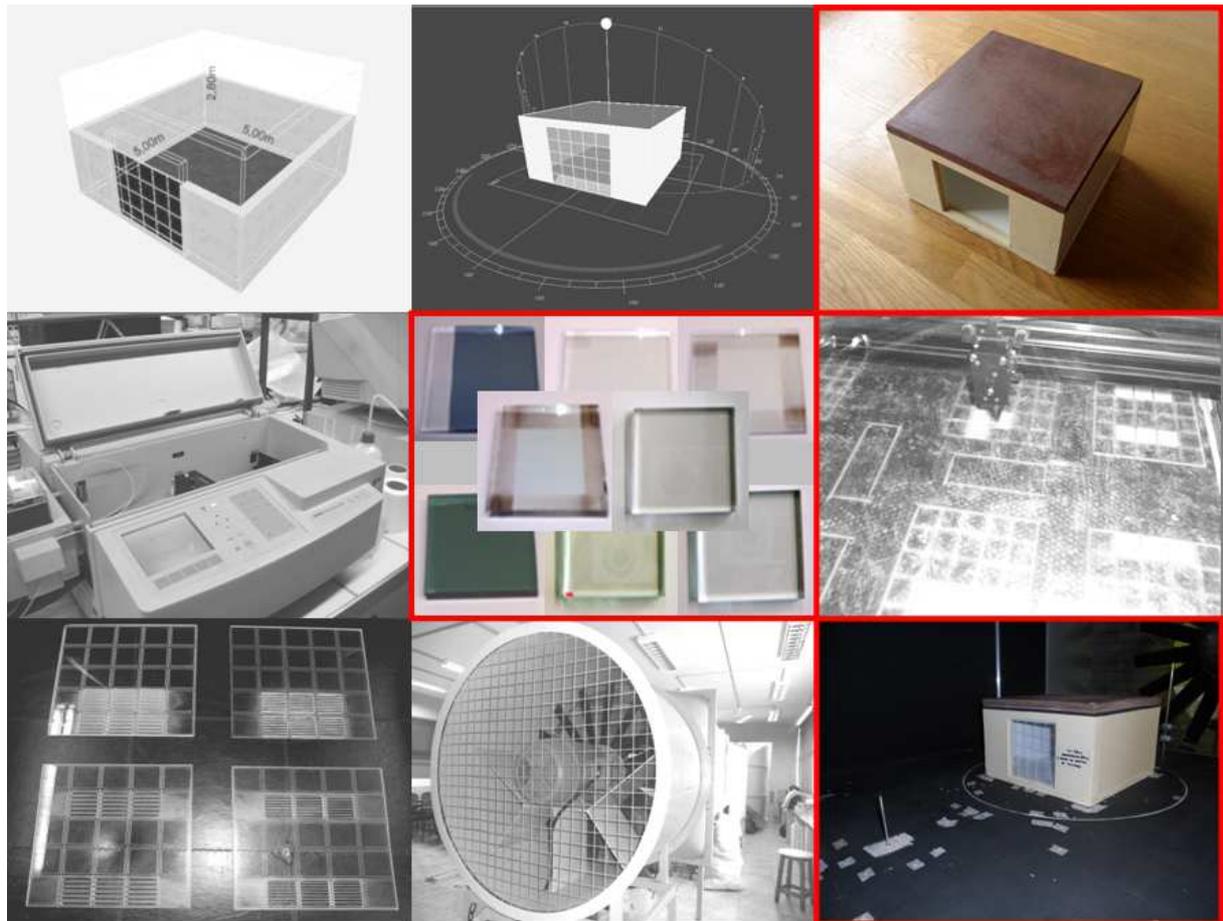
- $D_{2m, nT, w} \geq 33\text{dB}$, em zonas mistas ou em zonas sensíveis;
- $D_{2m, nT, w} \geq 28\text{dB}$, em zonas sensíveis.

Esses valores deverão ser acrescidos de 3dB, quando sejam novos edifícios habitacionais em zonas urbanas consolidadas, e estejam localizados em zona abrangida por um plano municipal de redução de ruído; ou em caso de não exceder em mais de 5 dB(A) os valores limite fixados anteriormente. Quando a área translúcida for superior a 60% da fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2m, nT, w}$ o termo de adaptação apropriado, conforme o tipo de ruído dominante na emissão.

O presente capítulo funcionou como base teórica inicial para a conceção do sistema de fachadas deste trabalho de investigação. Os aspetos tratados em termos de qualidade da envolvente, conforto térmico, iluminação natural, ventilação natural e acústica serviram como requisitos iniciais a serem considerados para o desenvolvimento do sistema em questão.

"Ninguém pode construir em teu lugar as pontes que precisarás passar, para atravessar o rio da vida. Ninguém, exceto tu, só tu. Existem, por certo, atalhos sem número, e pontes, e semideuses que se oferecerão para levar-te além do rio; mas isso te custaria a tua própria pessoa; tu te hipotecarias e te perderias. Existe no mundo um único caminho por onde só tu podes passar. Onde leva? Não perguntes, segue-o!"

Friedrich Nietzsche



CAPÍTULO 3. A Arquitetura Sustentável, Bioclimática e as Fachadas



No presente capítulo será apresentado o tema arquitetura bioclimática e as fachadas, contextualizando as estratégias passivas indicadas para tal fim, além dos recentes desenvolvimentos em termos de sistemas atuais e inovadores. Isso de forma a observar possíveis lacunas e necessidades em termos de tecnologias para aplicação em fachadas de onde surgiu posteriormente, uma base para elaboração da proposta de desenvolvimento do sistema de fachadas modular deste trabalho de investigação.

A arquitetura sustentável abrange o impacto ambiental de todos os processos envolvidos na construção, desde os materiais utilizados até às técnicas de construção ao consumo de energia no processo construtivo e no edifício durante o seu tempo de vida. Trata-se de construir de forma a promover alterações conscientes, atendendo às necessidades de edificação, habitação e uso do homem moderno, preservando o meio ambiente e os recursos naturais, garantindo qualidade de vida para as gerações atuais e futuras (ONU, 1987).

Existem diferentes termos relacionados com a arquitetura como “arquitetura verde”, “arquitetura ecológica”, “bioconstrução”, “arquitetura bioclimática”, “arquitetura eco-eficiente”, “arquitetura solar passiva”. São diferentes maneiras de relacionar a arquitetura com o ambiente e possuem significados semelhantes ou próximos e estão diretamente ligados ao tema arquitetura sustentável. Contrariamente à grande parte da arquitetura, a arquitetura sustentável reconhece que efeitos sociais, ambientais e económicos de cada pormenor se estendem além do limite do edifício.

O conceito de “arquitetura solar passiva” ou “arquitetura bioclimática” ou qualquer outra denominação, que ao longo das últimas décadas tem sido atribuída a determinado tipo de arquitetura, pode ser definida como uma arquitetura que, na sua conceção, aborda o clima como uma variável importante no processo de projeto, relevando o sol, na sua interação com o edifício, para um papel fundamental no mesmo (GONÇALVES; GRAÇA, 2004).

Para Lanham et al. (2004) a arquitetura solar passiva é muito semelhante à arquitetura bioclimática com a única diferença de que apenas lida com os ganhos energéticos provenientes do Sol, enquanto a arquitetura bioclimática pode incluir outras preocupações climatéricas. Já a arquitetura solar ativa faz uso de meios mecânicos de baixo consumo energético, em geral associado ao uso de energias renováveis (painéis solares, fotovoltaicos, sistemas híbridos de arrefecimento por evaporação, etc.).

A arquitetura tem procurado ao longo da história desenvolver meios de controlo ambiental que possam oferecer abrigo e conforto aos homens, e o clima de cada lugar tem sido o fator determinante na definição das conceções arquitetónicas, materiais e técnicas



construtivas utilizadas. O estudo do clima e sua relação com a prática de projeto constitui cada vez mais um diferencial da boa arquitetura.

Desde a antiguidade os princípios bioclimáticos, apesar de ser mais recente esta denominação, estavam inseridos no contexto da edificação. Acredita-se que alguns princípios fundamentais relacionando o clima às edificações tenham sido descritos pela primeira vez pelo filósofo Sócrates (470-399 a.C.) (MARAGNO, 2002):

“Nas casas com orientação sul, os raios de sol penetram nos pórticos durante o inverno, mas no verão o movimento do sol está diretamente sobre nossas cabeças e nossos telhados, produzindo sombra. Se é assim, esta é a melhor maneira: podemos fazer construções mais altas no sul, para captar o sol no inverno, e mais baixas no lado Norte, para excluir os ventos frios”.

Mesmo não sendo designada pelo termo “arquitetura sustentável”, existem indícios que remontam à Antiguidade Clássica, onde se referem as ligações entre os meios natural e artificial. Estas ideias foram abordadas por Vitruvius (séc. I a.C.), no seu Tratado de Arquitetura, através de certas recomendações acerca de temas como a localização, orientação e iluminação natural dos edifícios.

Vitruvius na primeira parte de seu tratado “*De Architectura Libri Decem*” (escrito provavelmente entre 33 a 14 a.C.) defende que a boa arquitetura está sempre apoiada em três atributos: *firmitas, utilitas et venustas*⁷, e acrescenta: o arquiteto deve ter conhecimento dos estudos da medicina, ao considerar questões relacionadas com o clima (do grego klima), com o ar, com a salubridade e à insalubridade dos sítios, e com o uso de diferentes águas. Pois, sem essas considerações, a higiene de um edifício não pode ser assegurada (VITRÚVIO, 1999).

Alberti em “*Da re aedificatoria*” (Publicado pela 1ª vez em Florença – 1485) demonstra preocupações semelhantes evidenciadas no próprio título do segundo capítulo: “Da região, do clima do ar, do sol e dos ventos”, onde trata das regiões satisfatórias para se construir em relação às influências do clima sobre as pessoas e os edifícios (ALBERTI, 1986).

Porém, mais próximo da atualidade, a génese da arquitetura bioclimática se encontra nos estudos desenvolvidos por pesquisadores como: Aladar Olgyay (1957); Victor Olgyay (1963); Baruch Givoni (1969); Fitch (1972); Koenigsberger (1973) Edward Mazria (1979), Watson (1979), John Evans (1980), entre outros.

⁷ Solidez, utilidade e beleza.



Na década de 70, a crise do petróleo fez despertar a consciência sobre as fontes de energia utilizadas no condicionamento artificial que não eram inesgotáveis, vindo a contribuir para uma revalorização da arquitetura integrada ao clima atenta às questões ambientais. Esta retomada ocorreu com maior ênfase nos países desenvolvidos, com maior acesso à energia. As pesquisas voltadas para os climas frios ou temperados, foram mais intensas do que as voltadas para os climas tropicais, que predominam nos países em desenvolvimento (MARAGNO, 2002).

A climatologia aplicada à arquitetura teve como pioneiros Fitch na década de 40, por meio da publicação *“American Buildings: the environmental forces that shape it”*. Esta publicação foi reeditada e ampliada em 1972. Como forma de tirar partido das condições climáticas para criar uma arquitetura com desempenho térmico adequado, Olgyay (1973) criou a expressão Projeto Bioclimático, que visa a adequação da arquitetura ao clima local. Watson e Labs (1983) consideram o projeto bioclimático como aquele cuja fonte ou recurso se encontra no microclima de seu sítio, onde será implantado. Em 1969 Givoni concebeu uma carta bioclimática da edificação em sua publicação *“Man, Climate and Architecture”*, que também foi adotada por muitos autores.

O projeto bioclimático satisfaz as necessidades do ser humano em termos térmicos, de iluminação e acústica, com uma preocupação com as condições climáticas e uso de técnicas que incluem o estudo da luz solar, do aquecimento e movimentação do ar através da envolvente do edifício, quando necessário. Isso para determinadas horas do dia e meses do ano; com o uso de materiais disponíveis na região e, além disso tenta integrar a edificação com o espaço envolvente (GIVONI, 1998).

Existem dois grandes fatores no contexto da arquitetura bioclimática, são eles: a multidisciplinaridade necessária para conceber um projeto eficiente e sua inserção no tema da sustentabilidade. Ambos estes fatores têm sido largamente desprezados na arquitetura moderna, observa-se de certa forma uma falta de diálogo entre a arquitetura e a engenharia e por outro lado existir ainda uma globalização dos critérios arquitetônicos criando um “modelo internacional” que em muitos casos está desenraizado do contexto local. Para a busca de um design passivo eficiente é necessário compreender que não existe uma solução ótima e aplicável a todas as situações, mas sim inúmeros mecanismos que devem ser selecionados no sentido de se encontrar uma solução adequada para determinado local (LANHAM et al, 2004), isso dará origem a uma arquitetura mais sustentável.

A concepção de edifícios bioclimáticos visa a obtenção natural das condições de conforto dos seus utilizadores, que variam em função do clima, do edifício em termos construtivos e também do tipo de utilização. Efetivamente, não só o clima varia



instantaneamente, como o conforto humano não é uma realidade estática, uma vez que o ser humano tem capacidade para se adaptar às variações das condições térmicas que o envolvem.

O custo adicional de um edifício bioclimático é mais elevado cerca de 3-5% para edifícios novos. Nos casos de reabilitação, este custo pode ser pouco mais elevado, mas deverá ser amortizado em poucos anos. Porém, mesmo apresentando maiores custos, os edifícios bioclimáticos são compensadores (SILVA, 2006).

3.1 Aspetos Bioclimáticos e a Envolvente

Um dos objetivos finais da conceção de edifícios bioclimáticos é a obtenção natural das condições de conforto dos seus utilizadores, que variam em função do clima, do edifício em termos construtivos e também do tipo de utilização. É necessário que o projetista tenha uma abordagem na conceção do edifício, tendo em atenção estes três parâmetros.

O projeto de um edifício bioclimático deverá começar por uma criteriosa escolha da implantação e da orientação do edifício, de forma a otimizar os ganhos solares no mesmo. É importante nesta fase saber se o clima é favorável a esses ganhos solares nas diferentes estações do ano, e quais os cuidados a ter quanto às proteções solares no período de verão. Outras informações como a temperatura exterior ao longo do ano e a amplitude térmica são de extrema importância em virtude do papel que desempenham no estabelecimento de fluxos energéticos: perdas e ganhos térmicos e do potencial em termos de ventilação natural.

As estratégias bioclimáticas influenciam tanto a forma do edifício, como os seus processos, sistemas e componentes construtivos. As estratégias a adotar num determinado edifício ou projeto deverão ser selecionadas; considerando a especificidade climática do local, a função do edifício e o modo de ocupação e operação do mesmo, com o objetivo de promover um bom desempenho em termos de adaptação ao clima.

No estudo realizado por Gonçalves e Graça (2004), a partir das zonas climáticas de Portugal (RCCTE, 2006) foram definidas algumas estratégias bioclimáticas, que resultam consequentemente em edifícios mais sustentáveis. O país é dividido em três zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3). Observa-se que as recomendações em muitos casos são comuns para todas as regiões do país, sendo que a sua aplicação prática depende apenas da severidade climática de cada zona.

Em todas as zonas climáticas é recomendado o uso de isolamento da envolvente, porém, segundo Chvatal (2007), o aumento do isolamento pode ser benéfico para uma



determinada habitação, mas não desejável quando esse mesmo edifício é adaptado, por exemplo, para outra função como um pequeno escritório, com alta taxa de ocupação e equipamentos, devido às diferenças entre os seus padrões de ganhos. É conveniente portanto que seja feita uma distinção clara entre os edifícios residenciais e os não residenciais nos regulamentos térmicos para edifícios. Enquanto, nos primeiros, a tendência deve continuar a ser de aumentar a espessura de isolamento térmico da envolvente e proteção solar dos envidraçados, nos edifícios não residenciais deve ser permitido uma otimização da envolvente, sem obrigar a isolamentos excessivos.

O **Quadro 3.1** apresenta uma síntese das estratégias bioclimáticas de acordo com a zona climática.

Quadro 3.1 Estratégias bioclimáticas de acordo com a zona climática.

Zona Climática	Estratégias Bioclimáticas	
	Inverno Estação de Aquecimento	Verão Estação de Arrefecimento
Zona I1-V1	Promover Ganhos Solares, Restringir Perdas por Condução ⁸ ; Promover Inércia Forte ⁹ .	Restringir Ganhos Solares ¹⁰ ; Restringir Ganhos por Condução; Ventilação.
Zona I1-V2	Promover Ganhos Solares; Restringir Perdas por Condução; Promover Inércia Forte.	Restringir Ganhos Solares; Restringir Ganhos por Condução; Ventilação Promover Inércia Forte.
Zona I1 – V3	Promover Ganhos Solares; Restringir Perdas por Condução; Promover Inércia Forte.	Restringir Ganhos Solares; Restringir Ganhos por Condução; Arrefecimento Evaporativo; Ventilação; Promover Inércia Forte.
Zona I2 – V1	Promover Ganhos Solares; Restringir Perdas por Condução; Promover Inércia Forte.	Restringir Ganhos Solares; Restringir Ganhos por Condução; Ventilação; Promover Inércia Forte.
Zona I2 – V2	Promover Ganhos Solares; Restringir Perdas por Condução; Promover Inércia Forte.	Restringir Ganhos Solares; Restringir Ganhos por Condução; Ventilação; Arrefecimento Evaporativo; Promover Inércia Forte.
Zona I2 – V3	Promover Ganhos Solares; Restringir Perdas por Condução; Promover Inércia Forte.	Restringir Ganhos Solares; Restringir Ganhos por Condução; Arrefecimento Evaporativo; Ventilação; Promover Inércia Forte.
Zona I3 – V1	Promover Ganhos Solares; Restringir Perdas por Condução; Promover Inércia Forte.	Restringir Ganhos Solares; Restringir Ganhos por Condução; Arrefecimento Evaporativo; Ventilação; Promover Inércia Forte.
Zona I3 – V2	Promover Ganhos Solares; Restringir Perdas por Condução; Promover Inércia Forte.	Restringir Ganhos Solares; Arrefecimento Evaporativo; Ventilação; Promover Inércia Forte.
Zona I3 – V3	Promover Ganhos Solares; Restringir Perdas por Condução; Promover Inércia Forte.	Restringir Ganhos Solares; Restringir Ganhos por Condução; Arrefecimento Evaporativo; Ventilação; Promover Inércia Forte.

Fonte: Elaborado a partir de Gonçalves e Graça (2004).

De acordo com Gonçalves e Graça (2004), no inverno interessa primeiramente isolar a envolvente dos edifícios numa graduação proporcional à divisão climática, sendo a zona I3 aquela que maior cuidado necessita. Complementarmente é necessário salvaguardar excessos de infiltrações de ar frio exterior. Por outro lado, interessa, em qualquer das zonas climáticas, promover os ganhos solares, sendo novamente a zona I3 a mais necessitada. A

⁸ Através do isolamento da envolvente.

⁹ Com o uso de paredes pesadas com isolamento pelo exterior.

¹⁰ Sombrear envidraçados.



obtenção destes ganhos pode ser feita através de vãos envidraçados devidamente orientados, sendo que a área de captação deverá ter em conta a especificidade de cada edifício (orientação, tipo de vidro e clima local).

Já no verão, as três zonas climáticas (V1, V2, V3) também apresentam características comuns, ainda que com severidades distintas. Nestas zonas, interessa restringir os ganhos solares mediante adoção de soluções eficazes de sombreamento dos vãos envidraçados, e promover a ventilação natural durante períodos em que a temperatura exterior seja favorável, dependendo de cada zona e de cada tipo de edifício.

Para evitar a necessidade de ar condicionado no verão, além de evitar ganhos solares, é necessário adotar soluções construtivas de inércia elevada, para que possa haver estabilidade da temperatura interior e sejam minimizadas situações de sobreaquecimento. A inércia é também essencial para um correto aproveitamento dos ganhos solares no inverno. Algumas estratégias bioclimáticas mais específicas e complementares podem contribuir significativamente para a melhoria do desempenho global dos edifícios, como é o caso do arrefecimento evaporativo nas zonas mais quentes e menos húmidas do interior do país, sendo que a sua utilização será de acordo com o tipo de edifício.

3.2 Fachadas e Sustentabilidade

Diferentes países têm desenvolvido uma visão específica de como incorporar a sustentabilidade para o ambiente construído. Uma ênfase especial deve ser dada à conceção das fachadas dos edifícios, que de acordo com o tipo de clima requer soluções mais elaboradas. Deve haver uma busca para substituir tecnologias ineficientes, em particular ter uma visão geral do edifício na conceção, permitindo interações otimizadas entre os subsistemas como: aquecimento, iluminação artificial e natural, ventilação e a envolvente do edifício buscando a sustentabilidade (HAASE; AMATO, 2006).

O Departamento de Energia dos Estados Unidos¹¹, por exemplo, elaborou um *Roadmap* para indicar aspetos do projeto da envolvente dos edifícios que incorpora algumas prioridades que devem ser atendidas, entre elas: preço acessível; boa durabilidade; ser favorável em termos energéticos e ambientais; promover conforto aos utilizadores e incorporar elementos de elevado desempenho (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2010). É apresentada no mesmo *Roadmap* uma previsão das características da envolvente que serão observadas nos edifícios (principalmente comerciais) em 2020, entre elas:

- Envolvente orgânica, dinâmica (como a pele humana);

¹¹ <http://www.energy.gov/>

- Condicionamento térmico em microescala (que possa ser controlado individualmente);
- Ventilação dinâmica, personalizada (separada do condicionamento de ar);
- Uso de materiais orgânicos compostos;
- Componentes e sistemas “*plug-and-play*”
- Distribuição de recursos energéticos a nível local (energia fotovoltaica, células de combustível, combinando arrefecimento, aquecimento e fornecimento de energia).

A eficiência energética é um dos principais pré-requisitos necessários de ser atendido para se alcançar a sustentabilidade. Lysen (1996) propôs três passos em busca da eficiência energética dos edifícios, que também podem ser aplicados em relação às fachadas. Em primeiro lugar é necessário analisar a energia que será consumida de forma a ser possível estimar o potencial de economia (minimizar o consumo energético); em segundo é necessário reduzir o consumo energético usando a energia de modo mais eficiente e o terceiro passo, a energia necessária deve ser produzida por meio de fontes renováveis (**Figura 3.1**).



Figura 3.1 “*Trias Enegetica*” ilustrativa dos três passos que devem ser seguidos na busca pela eficiência energética dos edifícios.

Fonte: Elaborado a partir de HAASE; AMATO, 2006.

Especificamente sobre fachadas sustentáveis, podem ser enumerados alguns dos benefícios que as mesmas podem trazer:

- Redução do consumo de energia para iluminação e climatização dos espaços. Esta diminuição dos custos compensa o investimento realizado para a aquisição de materiais sustentáveis e ecologicamente corretos;



- Uso de materiais com o ciclo de vida sustentável, ou seja, com mínimo impacto ao meio ambiente e possibilidade de reutilização dos produtos. Devem-se obter informações sobre os meios de produção dos materiais, a vida útil e as possibilidades de reciclagem;
- Valorização da cultura e da sociedade. Os projetos de fachadas expressam o contexto cultural de onde são criados. Além disso, produtos sustentáveis incentivam iniciativas locais e valorizam as comunidades.

3.3 Sistemas Solares Passivos de Aquecimento e Arrefecimento

Para climas temperados, como é o caso de Portugal, a complexidade envolvida na arquitetura é maior do que para outros tipos de climas. Diante disto, devem ser estudadas soluções mistas, que tenham o princípio de ser sistemas flexíveis. Com um conjunto de recursos podem ser resolvidos os problemas de adequação do edifício aos climas temperados que apresenta o “problema do frio” no inverno, que pode ser seco ou húmido; o “problema do calor” no verão, que também pode ser seco ou húmido e finalmente o “problema do tempo variável” em estações intermédias, que pode apresentar excessos de frio e de calor separados por curto intervalo de tempo. Apesar destas condições climáticas vistas separadamente não serem muito críticas, em conjunto fazem com que a arquitetura dos climas temperados apresente uma maior complexidade, do ponto de vista do projeto arquitetónico (FLORENSA; ROURA, 1995).

Os sistemas passivos são dispositivos construtivos integrados aos edifícios, cujo objetivo é contribuir para o aquecimento ou arrefecimento natural. Recebem esta denominação pois não há utilização de nenhuma fonte de energia artificial para seu funcionamento. Estes sistemas podem apresentar as seguintes funções específicas: captação da radiação solar, aproveitamento da inércia térmica, aproveitamento da ventilação natural e protetores contra incidência em excesso de radiação solar.

Alguns exemplos na área de soluções passivas que podem ser citados são dois programas de investigação e disseminação financiados pelo Programa IEE da Comissão Europeia (os projetos *Passive-On* e o PEP). O projeto *Passive-On*¹² procura examinar como expandir o conceito da “Casa Passiva”, particularmente no Sul da Europa. Nestas regiões, o consumo de energia para climatização do espaço interior não resulta somente da procura de casas aquecidas no inverno, mas também, e em alguns casos mais significativamente, em conseguir casas frescas no verão. Está também associado a países como o Reino Unido e a França como climas temperados.

¹² <http://www.passive-on.org/pt/>

A norma “Passivhaus” que partiu dos primeiros casos de estudo de Wolfgang Feist na Alemanha em 1995 consiste fundamentalmente em três requisitos: um limite de energia (aquecimento e arrefecimento); um requisito de qualidade (conforto térmico) e um conjunto definido de sistemas passivos preferenciais que permitem cumprir o limite energético e de qualidade sem um custo elevado. As características presentes na norma Alemã Passivhaus são: elevados níveis de isolamento, incluindo pontes térmicas reduzidas e janelas bem isoladas, espaços com infiltrações de ar reduzidas e um sistema de ventilação com um sistema eficiente de recuperação de calor. Para os climas centrais da Europa, verificou-se que estas melhorias em eficiência energética resultaram na possibilidade de simplificar o sistema de aquecimento.

O consórcio “Passive-On” elaborou assim uma proposta de revisão para a aplicação da norma “Passivhaus” em climas quentes da Europa tomando em consideração as variações climáticas e filosóficas mencionadas anteriormente. O ponto de partida da proposta “Passivhaus” em Portugal foi uma casa com dois quartos distribuídos por um piso único, que cumpre a regulamentação energética em vigor. As estratégias energéticas e de conforto da norma “Passivhaus” foram adaptadas para o contexto Português, particularmente no que se refere à longa estação de arrefecimento.

As casas Janas (**Figura 3.2 e 3.3**) são exemplos que combinam a capacidade de captar radiação solar (grandes vãos envidraçados a sul) e a capacidade de regular a temperatura interior com a sua grande capacidade térmica.



Figura 3.2 Casas Janas - Casa de baixo consumo energético, Projeto Passive-On, Sintra, Portugal, 2002.
Arquitetos: Filipa Mourão e João Santa Rita.
Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.

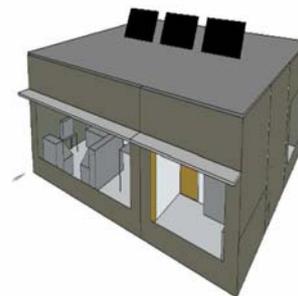


Figura 3.3 3D Casa Passivhaus proposta para Portugal.
Fonte: GONÇALVES; BROTAS, 2007.

As necessidades anuais de aquecimento da casa “Passivhaus” proposta para Portugal foram estimadas em 16.9 kWh/m², das quais 11 kWh/m² são fornecidas pelo sistema de painéis solares. A **Figura 3.4** apresenta uma estimativa das necessidades anuais de aquecimento e arrefecimento comparando uma casa típica e a Passivhaus de



Portugal. A **Figura 3.5** apresenta as temperaturas resultantes durante uma semana de muito calor, sem um sistema ativo de arrefecimento. Para esta casa a temperatura resultante é mantida abaixo de 25°C durante 71% do tempo de ocupação e abaixo de 28°C em 98% do tempo ocupado.

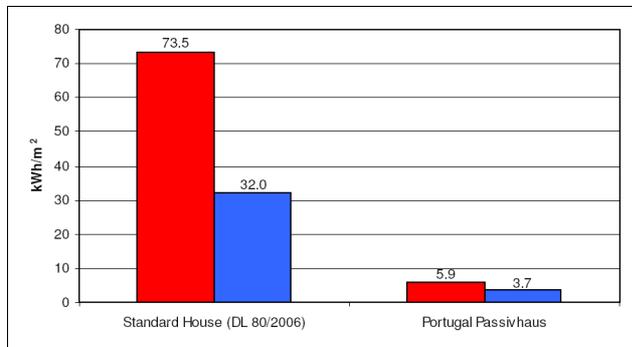


Figura 3.4 Estimativa das necessidades anuais de aquecimento (vermelho) e de arrefecimento (azul) para uma casa típica e a casa *Passivhaus*, construída em Portugal.

Fonte: GONÇALVES; BROTAS, 2007.

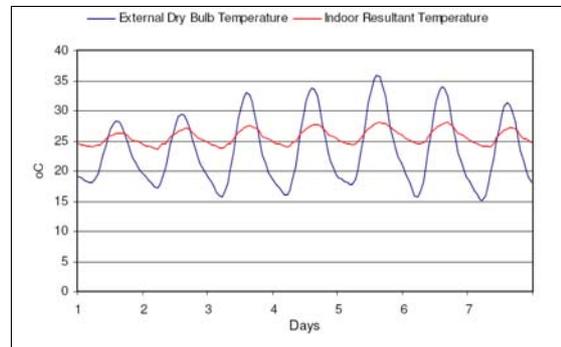


Figura 3.5 Temperatura resultante durante uma semana de muito calor, sem um sistema ativo de arrefecimento.

Fonte: GONÇALVES; BROTAS, 2007.

3.3.1 Sistemas Solares Passivos de Aquecimento

Os sistemas solares passivos para aquecimento podem ser classificados segundo três categorias ou conceitos, baseados na abordagem ou combinação de sistemas de ganho, armazenamento e transmissão de energia térmica (PAUL, 1979): Ganho Direto, Ganho Indireto e Ganho Isolado.

Ganho Direto

No sistema de ganho direto a radiação solar é captada por um envidraçado, normalmente orientado ao sul. Para o aumento da eficiência deste sistema é normal a utilização de massa térmica para armazenar a radiação solar em excesso durante o dia, libertando-a durante a noite. Nesse tipo de sistema, o espaço a aquecer deve dispor de vãos envidraçados bem orientados de forma a possibilitar a incidência da radiação no espaço e nas massas térmicas envolventes (paredes e pavimentos) (**Figura 3.6**). A construção corrente em Portugal tem em geral massa suficiente, sendo que uma boa orientação dos vãos conduz à utilização deste tipo de sistemas sem qualquer complexidade adicional. As **Figuras 3.7** e **3.8** apresentam exemplos de aplicação de sistemas diretos em Portugal.

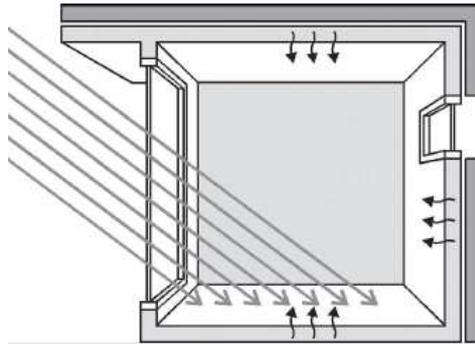


Figura 3.6 Sistema de Ganho Direto.
Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.



Figura 3.7 Edifício de Serviços, ICP – Porto. Arquiteto José Gigante.
Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.



Figura 3.8 Casas Janas, Sintra. Arquitecta Filipa Mourão e João Santa Rita
Fonte: LANHAM, 2004.

O sistema de ganho direto pode ser representado por um compartimento útil numa habitação, desde que disponha de um envidraçado. Para o funcionamento eficiente do sistema são necessárias algumas pré-condições: Correta orientação da janela, preferentemente a sul, para evitar que as perdas superem os ganhos no inverno; área transparente da janela em harmonia com a capacidade de armazenamento térmico; uso de dispositivos de sombreamento, como forma de prevenir o sobreaquecimento no verão; redução das perdas de calor, com a aplicação de isolamento térmico eficiente dos elementos opacos e isolamento noturno móvel (MENDONÇA, 2005). As **Figuras 3.9 e 3.10** apresentam outros exemplos de sistemas de ganho direto.



Figura 3.9. Moradia – Algarve. Arquiteto Candido de Sousa.

Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.



Figura 3.10. Escola do Alto da Faia. Arquitetos Jorge Conceição e Rui Órfão.

Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.

No **Quadro 3.2**, são apresentadas algumas vantagens e desvantagens do sistema de ganho direto em relação aos demais sistemas.

Quadro 3.2 Vantagens e Desvantagens do uso de sistemas de ganho direto.

Vantagens	Desvantagens
O sistema de ganho direto tem o maior rendimento energético, sendo que a energia de radiação por metro quadrado é máxima;	É necessário prever uma grande quantidade de massa de armazenamento térmico do edifício para evitar sobreaquecimentos que provoquem desconforto;
É uma das soluções mais económicas, pois materiais e sistemas utilizados podem ser os mais comuns, mesmo sem necessidade de recorrer a massa térmica adicional;	Grandes superfícies de captação podem provocar aumento do custo do sistema, pelos envidraçados em si, pela massa térmica adicional e pelos dispositivos de isolamento térmico necessários para proteger os envidraçados das perdas durante a noite;
A superfície envidraçada permite iluminação natural para os espaços interiores e permite a visibilidade para o exterior (caso de se utilizar vidro ou material translúcido);	Grandes superfícies envidraçadas podem originar falta de privacidade e iluminação natural excessiva;
O princípio de funcionamento é simples; trata-se de um sistema com grande flexibilidade na conceção arquitetónica.	A radiação direta pode provocar assimetrias nas temperaturas radiantes, podendo provocar desconforto nas horas de maior incidência do sol.

Fonte: Adaptado de CARDOSO, 2008.

Ganho Indireto

Neste tipo de sistema a radiação solar atinge primeiramente um espaço intermédio para posteriormente ocorrerem ganhos de calor através de condução ou convecção pela superfície (**Figura 3.11**). Pode ocorrer a retenção da energia solar no espaço intermédio por meio do efeito de estufa (Ex: Parede de Trombe, parede massiva, colunas de água, etc.) (**Figuras 3.12 e 3.13**). A massa térmica desse sistema é interposta entre a superfície de ganho e o espaço a aquecer. A massa térmica absorve a energia solar nela incidente, sendo posteriormente transferida para o espaço. Esta transferência pode ser imediata ou desfasada, conforme a estratégia de circulação (ou não) do ar que for adotada.

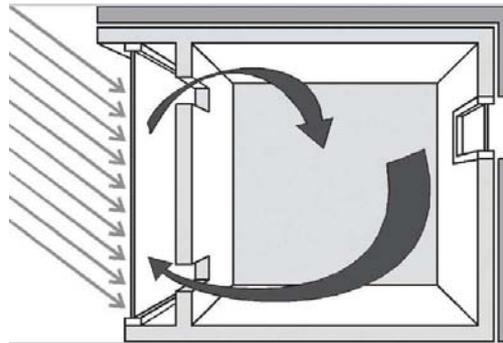


Figura 3.11 Sistema de Ganho Indireto.
 Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.



Figura 3.12 Casa Schäffer, Porto Santo (Com Paredes de Trombe). Arquiteto Günther Ludewig.
 Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.



Figura 3.13 Detalhe da Janela.
 Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.

Ganho Isolado

Trata-se de um sistema muito similar ao de ganho indireto, porém neste existe uma separação que pode ser física ou através da colocação de isolamento entre o espaço de armazenamento térmico e o espaço a ser aquecido, onde a transferência de calor se dá através da convecção natural (Ex: estufa, coletor de ar, etc.) (**Figura 3.14**).

Nesse tipo de sistema a captação dos ganhos solares e o armazenamento da energia captada não se encontram nas áreas ocupadas dos edifícios, o sistema opera independentemente do edifício (**Figuras 3.13 e 3.16**). Os espaços estufa são exemplos deste sistema e utilizam a combinação dos efeitos de ganho direto e indireto. A energia solar é transmitida ao espaço adjacente à estufa por condução através da parede de armazenamento que os separa e ainda por convecção, no caso de existirem orifícios que permitem a circulação de ar.

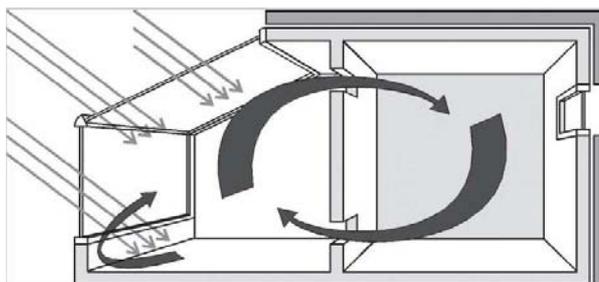


Figura 3.14 Sistema de Ganho Isolado.

Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.



Figura 3.15 Moradia Unifamiliar com Estufa – Vale do Rosal. Inverno e verão com proteção de vegetação. Arquiteto Fausto Simões.

Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.



Figura 3.16 Ferreira do Zêzere - Escola. Arquiteto Francisco Moita.

Fonte: GONÇALVES; GRAÇA, 2004.

Para o clima de Portugal o emprego de estratégias de aquecimento (estação fria) é necessário de forma que seja maximizada a captação do sol no inverno, através de vãos envidraçados bem orientados e dimensionados, aos quais se podem associar elementos massivos, que permitirão o armazenamento da energia solar e sua utilização em horas posteriores.

3.3.2 Sistemas Solares Passivos de Arrefecimento

Nos sistemas de arrefecimento (estação quente), pretende-se tirar partido de fontes frias que permitirão arrefecer o edifício. O ar exterior é um exemplo de fonte fria que apresenta em determinadas horas do dia (noite e manhã) uma temperatura inferior à temperatura interior dos próprios edifícios. Tal ocorre devido às grandes amplitudes térmicas diárias no período de verão verificadas na temperatura do ar em Portugal, podendo ser muito efetiva a estratégia de ventilação nesses períodos, principalmente à noite e início da manhã. Existem ainda outros sistemas de arrefecimento, ainda que com menos utilização: o arrefecimento radiativo, tirando partido da diferença de temperatura radiativa entre a



envolvente do edifício e a temperatura do “céu”; e o arrefecimento provocado pela evaporação de água (GONÇALVES; GRAÇA, 2004).

Os Sistemas de Arrefecimento Passivo recebem a seguinte classificação:

- Ventilação Natural¹³;
- Arrefecimento pelo Solo;
- Arrefecimento Evaporativo;
- Arrefecimento Radiativo.

Nos sistemas ativos de arrefecimento, recorre-se a meios artificiais de transferência, à convecção forçada de fluidos por meio de bombas ou ventiladores. Embora a definição de sistema passivo seja aquele em que toda a transferência de energia se processe de modo natural, admitem-se pequenas contribuições energéticas necessárias, por exemplo, ao acionamento de dispositivos de controlo, de sombreamento ou de isolamento noturno. Porém, para limitar a contribuição energética destes sistemas auxiliares, os quais podem ser acionados manual ou automaticamente, pode-se admitir que um sistema passivo é aquele em que a contribuição de energia auxiliar não excede 2% da energia útil captada pelo sistema (MENDONÇA, 2005).

No caso deste trabalho de investigação, serão tratados com maior ênfase sistemas solares passivos que podem ser implementados em fachadas.

3.4 Soluções Passivas em Fachadas

3.4.1 Forma e Orientação do Edifício

Quanto à orientação do edifício, o mais importante a considerar é a exposição solar. Normalmente é importante ter para Portugal a maior fachada voltada a Sul para receber o máximo de energia possível, tendo no entanto sombreamentos programados para o verão. A orientação do edifício deve também contar com os ventos dominantes e a sua influência na ventilação natural e infiltrações (LANHAM, et al., 2004).

A superfície de contacto edifício/externo é influenciada pela forma do edifício estando naturalmente relacionada com as perdas e ganhos de calor. Quanto mais compacto o edifício, melhor. A forma do edifício influencia também a exposição ao vento. No verão, a exposição ao vento é benéfica porque aumenta a ventilação, mas é prejudicial no inverno. Outras particularidades podem ser destacadas, como a orientação do edifício, pois para determinados compartimentos é necessário uma atmosfera fresca e seca, enquanto outros

¹³ Esse assunto foi tratado anteriormente na secção “2.2.4 Ventilação Natural”.



como a cozinha deve estar orientada com uma forte componente Sul, pois nesse local uma temperatura elevada é mais habitual.

Em relação aos compartimentos pode-se recomendar: Compartimentos com necessidades energéticas elevadas devem ser colocados a Sul, para beneficiarem mais profundamente do efeito do sol; Compartimentos com necessidades energéticas intermédias podem ser colocados em orientações menos favoráveis, como Este e Oeste; Compartimentos com necessidades energéticas reduzidas devem ser colocados a Norte, servindo assim de espaço tampão (SILVA, 2006). A **Figura 3.17** apresenta um esquema que ilustra a correta orientação de um edifício.

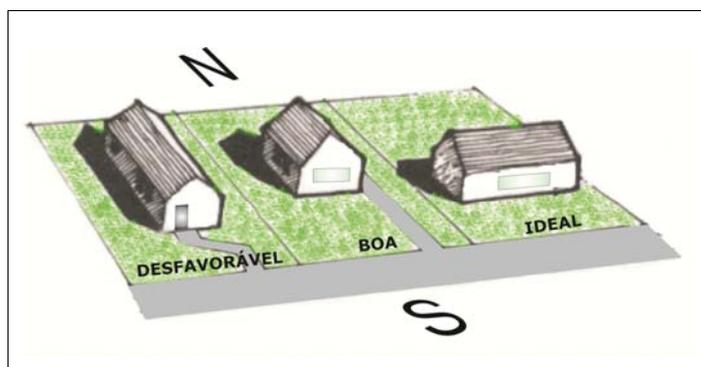


Figura 3.17 Esquema ilustrativo da correta orientação de um edifício.

3.4.2 Vãos Envidraçados em Fachadas

Uma das funções dos fechamentos exteriores de uma edificação é controlar de forma adequada as interferências do meio externo, visando proporcionar um melhor condicionamento ambiental. Os vãos envidraçados, ao serem utilizados ocupam um papel importante quando se trata de conforto térmico, pois, ao receberem radiação solar, contribuem consideravelmente para a elevação da temperatura no ambiente interno. Portanto, as necessidades de iluminação e contacto visual com o exterior, às quais essas superfícies transparentes visam atender, devem ser conjugadas com os requisitos para conforto térmico, de modo que seja alcançado um melhor aproveitamento da energia solar incidente, resultando em eficiência energética.

A arquitetura atual caracteriza-se pela utilização de grandes fachadas envidraçadas (ou translúcidas) independente das condições climáticas do local. Esse uso indiscriminado pode causar um sobreaquecimento das edificações devido ao ganho excessivo de carga térmica decorrente da incidência da radiação solar. Desse sobreaquecimento, duas consequências são imediatas: o desconforto dos usuários e a intensificação no consumo de energia elétrica para o condicionamento artificial do ambiente. A identificação de tais



problemas mostra a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias de produção de componentes translúcidos (vidros, policarbonatos, sistemas avançados, etc.) que, basicamente buscam o componente perfeito: alta transmissão luminosa; baixa transmissão de calor (infravermelho); e baixa transmissão de ultra violeta.

Do ponto de vista do conforto ambiental, as superfícies transparentes da fachada devem permitir a passagem da luz, proteger do calor e do frio além de ser um elemento estético. Por isso a proporção das superfícies envidraçadas ou a localização das mesmas são decisivas no controle térmico, de iluminação e acústica de um edifício. O dimensionamento adequado das áreas envidraçadas, em função da orientação solar, é uma medida que contribui consideravelmente para o conforto térmico das habitações. As maiores aberturas devem estar voltadas para a fachada de maior incidência solar, e o uso de fachadas envidraçadas são muito recomendadas, por permitir que a radiação solar entre no ambiente o aquecendo naturalmente. A linguagem e partido arquitetónico com uso de superfícies envidraçadas fazem sentido para países de clima temperado, pois existe maior necessidade de captação de luz e calor externos (VIANNA e GONÇALVES, 2001)

Vãos envidraçados bem orientados nas fachadas possibilitam a incidência da radiação no espaço e nas massas térmicas envolventes (paredes e pavimentos). Em Portugal a construção corrente tem em geral massa suficiente, sendo que uma boa orientação dos vãos conduz à utilização deste tipo de sistemas sem qualquer complexidade adicional. Para o uso de vãos envidraçados, o ideal é superfície estar orientada a sul, ou no quadrante sudeste-sudoeste, para captação da radiação solar (GONÇALVES e GRAÇA, 2004).

A relação entre a área envidraçada e a área total da fachada é utilizada como parâmetro em estudos sobre a influência das características arquitetónicas no consumo de energia (TOLEDO et al., 1995). Esta relação é conhecida como *WWR – window-to-wall ratio* e, em conjunto com as características óticas do tipo de vidro empregado são consideradas os principais parâmetros de projeto que influenciam consideravelmente no desempenho energético e no conforto ambiental das edificações (CARAM, 1998).

Existem pesquisas destinadas a estabelecer valores ótimos de *WWR* e tamanhos de janelas orientadas ao sul, sob o ponto de vista de desempenho térmico, com a finalidade de minimizar as cargas térmicas de aquecimento e refrigeração, como é o caso de Inanici e Demirbilek (2000) que realizaram estudos em cinco diferentes regiões climáticas na Turquia. A partir de tal estudo concluiu-se que uma relação *WWR* de 25% da janela orientada ao sul era o ideal em climas quentes, devido à necessidade de se diminuir o ganho de calor, no verão. Por outro lado, tamanhos maiores de janelas eram preferíveis em climas frios, devido



à necessidade de se aumentar os ganhos de calor, no inverno. Isso quer dizer que tamanhos maiores de janelas resultam em um aumento da carga de refrigeração, enquanto causavam uma diminuição da carga de aquecimento, devido ao ganho de calor solar.

Outra pesquisa realizada por Miyazaki et al. (2005) teve como propósito estudar uma janela com painel fotovoltaico semitransparente composta por envidraçados duplos, por meio de simulação computacional, em Tokyo (Japão). Foi analisado especificamente o efeito deste tipo de janela no consumo de energia de edifícios comerciais, em relação às cargas de aquecimento e arrefecimento, iluminação natural e produção de eletricidade. O objetivo do estudo era encontrar a transmitância ótima do painel semitransparente, bem como a relação WWR ideal, para minimizar o consumo energético total anual, considerando as cargas térmicas de refrigeração e aquecimento, a iluminação natural e a produção de eletricidade. Realizaram uma comparação da janela com envidraçado duplo e simples, considerada como referência. Com o aumento da relação WWR, o consumo total de energia também aumentava. Em contrapartida, o consumo total de energia do ambiente com a janela fotovoltaica diminuiu com o aumento do WWR, porque a produção de eletricidade aumentou com o WWR. A janela fotovoltaica com WWR de 50% pôde reduzir o consumo total de eletricidade em torno de 18%, ao ser comparado com a janela de vidro simples e WWR de 30%.

As principais conclusões decorrentes desse trabalho foram: Sem dispositivos de controlo de iluminação artificial, valores menores de transmitância do painel fotovoltaico fornecem menor consumo de eletricidade, independentemente do fator WWR; Com controlo de iluminação, os valores ótimos de transmitância do painel fotovoltaico ficaram em 80% para um WWR de 30%, 60% para WWR de 40%, e 40% para WWR de 50%. Conforme se diminuía a transmitância, era necessário aumentar o WWR, para haver economia de energia; e, além disso, os resultados mostraram que uma transmitância solar de 40% e um índice WWR de 50% alcançavam o mínimo consumo de eletricidade na edificação, quando a iluminação artificial era conjugada com a natural. Com a utilização da janela fotovoltaica, o consumo de eletricidade reduziu-se para 55% quando comparado com a janela com vidro simples e WWR de 30% e sem controlo de iluminação.

Para edifícios convencionais são necessárias três relações fundamentais para otimização da iluminação natural pela fachada, estas são determinadas em função das propriedades do envidraçando e da área de janela ou relação *window-to-wall area ratio* (WWR), que é definido como a relação entre a área envidraçada e a área de parede exterior de piso a piso (ASHRAE, 2005):

1. O uso anual de energia de arrefecimento (inclusive uso de ventoinha) aumenta linearmente com admissão de radiação solar, como indica o produto do coeficiente

de ganho de calor solar e WWR, mas é afetado através de diminuições em ganhos de calor da iluminação elétrica.

2. O uso anual de energia para iluminação diminui exponencialmente com admissão de iluminação natural, como indica o produto da Transmitância visível (T_v) e WWR.

3. O uso anual de energia para aquecimento (inclusive uso de termo ventilador) aumenta linearmente com a diminuição de ganhos de calor de iluminação.

A **Figura 3.18** ilustra um exemplo da relação entre consumo energético e WWR para um edifício não-residencial, com e sem iluminação natural, e orientação das fachadas a sul em Chicago e Houston. Através do estudo das aberturas pode ser alcançado um equilíbrio ótimo sobre as necessidades de iluminação natural, por meio de cálculos onde a área envidraçada e suas propriedades solares e óticas são parametricamente variadas (ASHRAE, 2005).

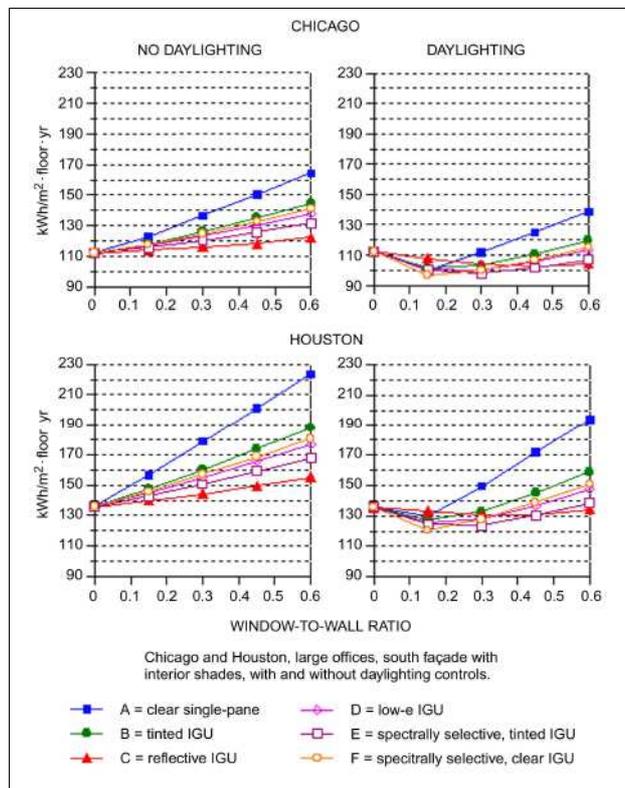


Figura 3.18 Window-to-Wall Ratio (WWR) x Consumo Energético Anual ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$).

Fonte: ASHRAE, 2005.

De acordo com Dogrusoy e Tureyen (2007) as janelas possuem vantagens e desvantagens, que são:



- Permitem uma ligação visual entre o interior e o exterior;
- Promovem condições de relaxamento, principalmente quando possibilita vista para o exterior e arrefece o ambiente;
- Promovem a entrada de iluminação natural e ventilação natural;
- Influenciam positivamente no estado emocional das pessoas;
- Auxiliam no processo de motivação, no caso de ambientes de trabalho.

Já as desvantagens apontadas são:

- As janelas transmitem radiação de ondas longas (Infravermelha) e podem causar aquecimento em excesso de acordo com o tipo de material empregado. São necessárias precauções para evitar encandeamento que prejudica o conforto visual dos usuários.
- O ruído proveniente do exterior pode criar um incómodo, em alguns casos;
- As janelas podem prejudicar a privacidade e iluminação natural excessiva, caso não tenham dispositivos como estore e palas;
- Podem em alguns casos prejudicar a concentração em ambientes de trabalho.

As preferências pelo tipo de janela podem variar de acordo com o contexto, que inclui características do ambiente, clima, cultura, físicas, além de características sociais, que podem ser variadas com as atividades realizadas no ambiente e as características dos ocupantes.

No estudo realizado pelos mesmos autores foram determinadas as preferências de janelas de acordo com um inquérito realizado a 219 usuários de escritórios de Izmir na Turquia (**Figura 3.19**), os resultados indicaram que grande parte dos usuários (48.6%) apresentou preferências por janelas ocupando toda a parede, com uma grande área; 35% janelas horizontais, 10,9% janelas quadradas, e o restante 5,5 % dividido entre as preferências por janelas redondas, retangulares e janelas em faixas verticais (DOGRUSOY e TUREYEN, 2007).



a. Janela ocupando toda a parede (Fachada Cortina) - Window wall.



b. Janelas horizontais



c. Janelas Quadradas



d. Janelas redondas



e. Janelas Retangulares



f. Janelas em faixas verticais.

Figura 3.19 Tipos de janelas utilizadas no estudo.

Fonte: DOGRUSOY e TUREYEN, 2007.

3.4.3 Janelas: Dimensionamento e Tipos de Abertura

As janelas podem ser responsáveis por grande parte dos ganhos ou perdas de calor em edificações. Caso suas dimensões não sejam cuidadosamente determinadas, podem contribuir para um aumento no consumo de energia de edificações de forma significativa. Janelas com áreas amplas podem proporcionar níveis mais elevados de iluminação natural e melhor conforto visual, mas podem também permitir maiores ganhos ou perdas de calor, o que se refletirá no consumo de energia de edificações condicionadas artificialmente (GHISI, 2005b).

Existe um limite de área de janela abaixo do qual não se tem vista suficiente para o exterior, dependendo da posição do usuário em relação à janela. Essas áreas são apresentadas na **Tabela 3.1**, e são válidas para janelas localizadas em uma única parede (BELL e BURT, 1995 citado por GHISI, 2005a). Essas mesmas áreas são também



recomendadas pela norma inglesa *Code of practice for daylighting* (BS 8206- 2, 2008), que podem ser utilizadas como referência.

Tabela 3.1 Área mínima de janela para garantir vista para o exterior.

Profundidade máxima da sala - P (em relação à parede com janela)	Área mínima de janela na parede (vista do interior - %)
$P \leq 8\text{m}$	20
$8 < P \leq 11\text{m}$	25
$11 < P \leq 14\text{m}$	30
$P > 14\text{m}$	35

Fonte: BS 8206-2, 2008.

De acordo com um estudo realizado por Ghisi (2005a) a partir de simulações computacionais observou-se que salas com pouca profundidade e com menores dimensões apresentaram maiores consumos relativos de energia, ou seja, não garantem edificações energeticamente eficientes, apesar de apresentarem maiores níveis de iluminação natural. No estudo foi possível perceber também que para uma mesma largura de sala existem diferentes consumos possíveis, de acordo com a geometria, ou seja, salas mais profundas apresentam menor consumo de energia. Portanto, somente a largura não é tão adequada para caracterizar o consumo de energia de ambientes quanto a profundidade. O estudo apresenta uma metodologia útil para o cálculo da área de envidraçado ideal que pode ser aplicado em qualquer clima, através da modelação de um compartimento e uso de uma ferramenta de simulação.

Para Santos (2005) os níveis de iluminação natural no interior dos edifícios dependem de: condições de nebulosidade do céu; período do dia e do ano; características geométricas do edifício/compartimento; dimensões e características espectrofotométricas dos vãos envidraçados e do grau de obstruções exteriores características reflectométricas dos materiais interiores. Um espaço será tanto melhor iluminado (lateralmente) nas zonas mais afastadas da (s) janela (s) se as seguintes condições se verificarem: A profundidade do espaço não for muito superior à sua largura; A profundidade do espaço não for muito superior à altura da janela; Se as superfícies, (nas zonas opostas à (s) da (s) janela (s)) forem claras.

Estas condições devem ser tomadas em consideração no “critério da limitação da profundidade”, para que a iluminação natural lateral de um determinado compartimento seja adequada, para além de se respeitarem os valores mínimos do Fator de Luz do Dia Médio (FLDM), a profundidade (L) do compartimento deve ainda verificar a seguinte condição (**Figura 3.20**) (SANTOS, 2005):



$$\frac{L}{W} + \frac{L}{h} \leq \frac{2}{(1 - R_b)}$$

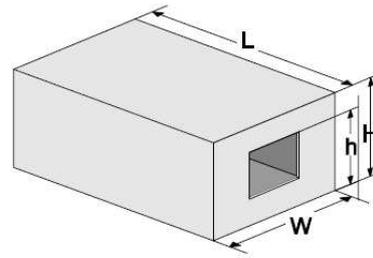


Figura 3.20 Esquema: dimensões necessárias para avaliação da iluminação natural.

Fonte: SANTOS, 2005.

Onde:

L = Profundidade do compartimento;

W = Largura do compartimento;

h = Altura da parte superior da janela, medida a partir do pavimento;

R_b = Reflectância média “pesada” das superfícies interiores da metade mais afastada da (s) janela (s).

A incidência e distribuição da iluminação natural num compartimento dependem principalmente das dimensões e localização das aberturas; do tipo de envidraçado utilizado; da configuração do compartimento e das reflexões nas superfícies interiores. A quantidade de luz natural disponível no interior de um compartimento está diretamente relacionada com a área envidraçada da (s) janela (s) do compartimento. Com iluminação natural unilateral, os efeitos do pé-direito e da profundidade dos espaços são significativos.

Os vãos envidraçados altos constituem um meio eficaz para se obterem níveis elevados de iluminação natural, Constituem o modo mais eficaz de proporcionar níveis de iluminação mais aceitáveis nas zonas mais afastadas dos vãos em compartimentos profundos. No entanto, as necessidades de proteção (por razões de conforto visual e térmico) são aumentadas. Recomenda-se uma relação de 1:1,5 a 1:2 entre a altura dos vãos e a profundidade do compartimento para a obtenção de condições razoáveis de quantidade e distribuição da iluminação natural (**Figura 3.21**). Os tipos de vãos e o seu posicionamento devem ser determinados de acordo com as necessidades de iluminação natural do ambiente (**Figura 3.22**).

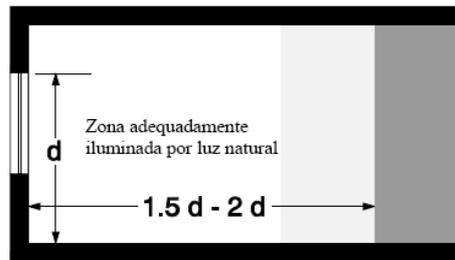


Figura 3.21. Relação de 1:1,5 a 1:2 entre a altura dos vãos e a profundidade do compartimento.

Fonte: SANTOS, 2005.

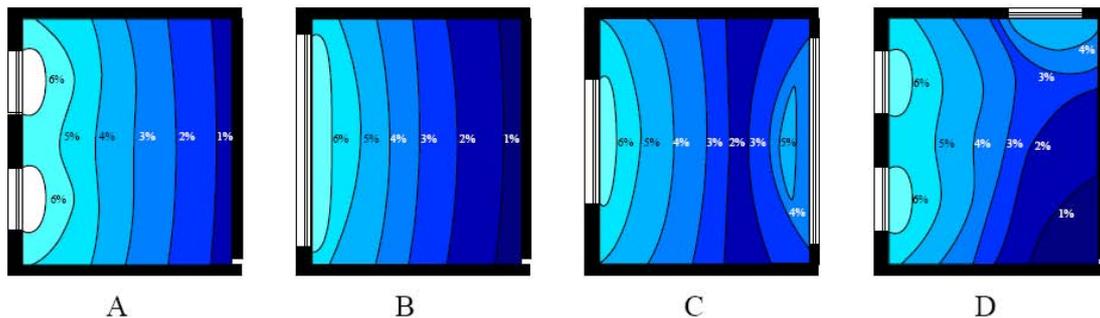


Figura 3.22 Influência da Localização e Forma dos Vãos Envidraçados - Linhas de igual Fator de Luz do Dia (FLD) para 4 arranjos diferentes da mesma área de vidro.

Fonte: SANTOS, 2005.

A - Vãos verticais representam maior profundidade da iluminação natural;

B - Vão horizontais representam maior uniformidade da iluminação natural;

C - Vãos em duas paredes opostas representam maior uniformidade e menor encandeamento;

D - Vãos em duas paredes adjacentes representam menor uniformidade e menor encandeamento

Outra característica importante em relação ao aproveitamento da iluminação natural é a orientação dos vãos envidraçados, que possuem características distintas:

- Orientados a Norte: Permitem o aproveitamento de luz natural de qualidade e uniformidade (sem grande variabilidade ao longo do dia e do ano) com ganhos térmicos mínimos de verão, mas com perdas; térmicas significativas nos períodos frios; A orientação Norte constitui a opção mais adequada quando se pretenda excluir a radiação solar direta;
- Orientados a Sul: permitem o acesso a uma iluminação natural forte e contrastante, embora com variações significativas de intensidade ao longo do dia e do ano; O sombreamento é desejável e relativamente fácil de assegurar; Permite o controlo da radiação solar quando o Sol está alto e o seu aproveitamento durante as estações frias. Estas características fazem da orientação Sul a preferencial para os vãos envidraçados.
- Orientados a Nascente e Poente: Proporcionam iluminação natural desigual ao longo dos períodos do dia (recebe luz do sol de manhã a Nascente e a tarde a



Poente); O sombreamento pode ser problemático, mas essencial para se garantir condições de conforto (térmico e visual) particularmente a Poente, devido aos elevados ganhos solares/ térmicos durante toda a estação de arrefecimento e eventualmente durante partes significativas da estação de aquecimento; Alternativamente, a diminuição da área envidraçada e/ou a utilização de envidraçados de controlo dos ganhos solares podem ser uma opção.

Além disso, a escolha correta do tipo de dispositivos de proteção também é fundamental para dificultar a passagem da radiação solar direta, ou difusa, bom como funcionar como isolante térmico. Os dispositivos de sombreamento exteriores são mais eficientes, pois evitam que a radiação solar atinja o envidraçado, enquanto os dispositivos de sombreamento interiores apenas bloqueiam a passagem da radiação quando esta já se encontra no interior do edifício, ou seja, a energia calorífica acumula-se entre o envidraçado e o dispositivo de sombreamento. O sombreamento pelo exterior é mais eficaz na redução dos ganhos solares (cerca de 80%) uma vez que interceta os raios solares antes destes atingirem os envidraçados (SANTOS, 2005).

Os dispositivos de proteção solar, tal como as aberturas, estruturam o ritmo das fachadas, podem reforçar linhas verticais ou horizontais do projeto, conforme exija o conceito formal da arquitetura, podem ainda ser explorados como adorno ou como marcação de elementos de maior hierarquia no desenho, como acessos, aberturas de espaços mais amplos e nobres, entre outros (LAMBERTS, 2005).

Todos os envidraçados devem ser protegidos da incidência direta do Sol, de modo a minimizar, quer os problemas de desconforto visual causados por contrastes excessivos da iluminação ou por efeitos de encandeamento, quer os de desconforto térmico devidos ao sobreaquecimento dos espaços interiores na estação quente. A orientação Sul está numa situação favorável quando comparada às demais orientações, porque é a única que permite tirar partido positivo das diferentes alturas do Sol nas estações fria e quente; nesta última estação, em que o Sol está mais alto, é relativamente fácil evitar a incidência direta da radiação solar com uso de palas (ANSELMO et al.,2004).



Em termos térmicos, a área de envidraçados deve ser ponderada, de forma a minimizar o consumo de energia para aquecimento, arrefecimento e iluminação. A otimização da área envidraçada para um edifício requer a simulação em regime dinâmico do comportamento termo energético do edifício, incluindo a modelação da iluminação interior. No caso de edifícios residenciais, para o clima médio Português, por exemplo, admitindo uma boa qualidade da envolvente, tendo em conta o aproveitamento solar na estação de aquecimento e as economias de energia associadas ao aproveitamento da iluminação natural, os valores indicados para a dimensão dos vãos envidraçados com vidros duplos e com dispositivos de sombreamento, são apresentados na **Tabela 3.2** (ANSELMO et al.,2004).

Tabela 3.2 Valores indicados para a dimensão dos vãos envidraçados

Orientação	Aquecimento	Aquecimento e Arrefecimento
Norte	20%	15%
Sul	40%	30%
Este/ Oeste	25%	20%

Fonte: ANSELMO et al.,2004.

Os valores indicados na tabela acima aplicam-se sobretudo para a conceção de edifícios novos, e deverá ser utilizada apenas como referência no caso da reabilitação, de acordo com a particularidade de cada edifício a reabilitar, dado que a alteração da área e orientação dos envidraçados é uma questão sensível, de acordo com o caso.



No **Quadro 3.3**, são apresentados alguns critérios para a escolha dos envidraçados.

Quadro 3.3 Critérios para escolha dos envidraçados.

Critérios	Características
A – Uso de Vidros simples ou múltiplos (geralmente duplos)	<p>Vidros duplos: Permitem aumentar o conforto térmico nas zonas próximas às janelas; Maior flexibilidade na seleção de produtos disponíveis; Reforça o isolamento acústico e reduz as cargas mecânicas. Os vidros duplos isolantes proporcionam maior economia de energia em particular se as orientações dos vãos não forem as mais favoráveis e se a eficácia de eventuais sistemas de sombreamento não for a mais adequada.</p> <p>Vidros Simples: Em locais com climas temperados, os vidros simples com um adequado sombreamento exterior podem ser eficazes mesmo se existirem níveis de radiação solar significativos.</p>
B - Tv (Transmitância Visível) para controlo do encandeamento	Uma transmitância visível (Tv) de 50% a 70% é um bom ponto de partida (dependendo do tipo de tarefas visuais e das dimensões dos vãos envidraçados); Quanto maior a área envidraçada, mais crítico é o controlo do encandeamento e, conseqüentemente, mais baixa deverá ser Tv.
C - Localização do edifício	Considerar: características climáticas do local de implantação, orientação e dimensões dos envidraçados. Se o objetivo primordial for o controlo dos ganhos solares, deverão ser escolhidos envidraçados com Fator Solar (FS) mais baixo possível e Tv mais elevada possível.
D - Controlo do Encandeamento	Envidraçados com Tv que permitam ajustar o problema de encandeamento e a necessidade de transmissão de luz. Deve optar-se por vidros com Tv até 25%, (dependendo das dimensões dos vãos), em situações em que não exista outra solução para o controlo do encandeamento.
E - Dimensões dos vãos envidraçados	Quanto maiores as dimensões dos vãos envidraçados menor será a Tv necessária para uma mesma quantidade de iluminação natural. Abertura eficaz (AE): $AE = Tv \left(\frac{A_v}{A_p} \right)$ <p>Onde: Tv = Transmitância visível; Av = Área útil de envidraçado e; Ap = Área da parede que contém a janela.</p> Quanto maiores as dimensões dos envidraçados, menor poderá ser Tv e quanto menores forem as dimensões dos envidraçados maior deverá ser Tv; Um valor médio adequado para a AE é um valor entre 0.20 e 0.30 (exceção: edifícios c/ fachada cortina); Quanto maior for a área envidraçada, menor deverá ser o FS e a Tv, vidro de características marcadamente isolantes para grandes áreas transparentes. Um projeto da fenestração desadequado poderá ocasionar custos acrescidos (equipamentos e gastos energéticos), para atenuar eventuais situações de desconforto dos ocupantes.
F - Orientação dos vãos envidraçados	Vidros com Fator Solar (FS) mais elevados para vãos orientados a Sul, Nascente e, principalmente, Poente; Caso não existam proteções exteriores (ou caso não sejam as mais eficazes), a orientação Sul deve também ser considerado como prioritário na proteção solar mediante a utilização de vidros de baixo FS.
G - Regulamentação	RCCTE (Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios) (RCCTE, 2006): Nenhum vão envidraçado da envolvente de qualquer edifício com área total superior a 5% da área útil de pavimento do espaço que serve, desde que não orientado a Norte (entre Noroeste e Nordeste), pode apresentar um Fator Solar (FS) correspondente ao vão envidraçado com o (s) respetivo (s) dispositivo (s) de proteção 100% ativo (s) que exceda os valores indicados, função do tipo de inércia e da zona



Fonte: Adaptado de SANTOS, 2005.

Tipos de Janelas para Fachadas

A função da janela na fachada vai além da caracterização estética, deve atender às exigências de iluminação natural, de ganhos de calor e ventilação dos espaços. Além disso, aspetos como a segurança e a privacidade dos usuários devem ser atendidos. Para a escolha adequada do tipo de janela a utilizar é preciso conhecer algumas particularidades, tal como o tipo de abertura, materiais, estanqueidade, isolamento, entre outras.

Há diversas opções disponíveis no mercado com diferentes estilos e materiais. Antes de iniciar o processo de escolha, deve começar por identificar as limitações existentes. Existem zonas históricas onde as janelas de alumínio não são autorizadas pelas autarquias por descaracterizar a construção original. Outro exemplo é a escolha do tipo de janela de acordo com o clima local e a orientação geográfica, o espaço disponível e o desempenho que é esperado em termos de isolamento térmico e acústico, segurança, facilidade de manutenção, estanqueidade, etc.

Dependendo das limitações, o processo de escolha do tipo de janela deve centrar-se nas seguintes características: Tipos de janela: de abrir, de correr, de abrir/correr, basculante, projetante, entre outras; Materiais constituintes PVC, alumínio, madeira, aço, compostos, etc.; características extras como segurança, isolamento, etc.

A escolha da janela tenderá a aumentar de importância devido às novas exigências de isolamento térmico e acústico dos edifícios, motivada pelas questões ambientais e normalização. Esses componentes da fachada devem apresentar funcionalidade para iluminação, ventilação e proteção térmica e acústica. De acordo com as necessidades, a escolha do tipo de caixilhos deve receber atenção especial, pois influencia no desempenho.

Ao preencher um vão, seja em fachadas ou não, as janelas exercem uma função de iluminação e ventilação - além de possibilitarem o contato visual com o exterior. Segundo as modernas técnicas de conservação de energia, o dimensionamento de um projeto de janela precisa considerar um aproveitamento otimizado da luz do dia, evitando o desperdício de iluminação artificial. Deve propor também soluções corretas para a troca de ar nos ambientes, independentemente de aparelhos de climatização.

A importância das janelas ultrapassa as exigências estéticas, de luminosidade e ventilação dos espaços. Outros fatores como a garantia da privacidade, segurança e bem-estar das pessoas nos ambientes devem ser assegurados. Por isso, é preciso conhecer suas particularidades, como o tipo de abertura, a forma como se projetam, sua estanqueidade, isolamento acústico, entre outras.



A escolha do tipo de janela e do tipo de vidro é preponderante no comportamento térmico do edifício. Os materiais mais empregados neste caso são:

- Caixilharia de madeira;
- Caixilharia de alumínio;
- Caixilharia de alumínio com corte térmico;
- Caixilharia de PVC;
- Caixilharia de aço (ferro).

A madeira é um material durável e resistente, se for de origem de florestas certificadas, e receber tratamento adequado não necessita de grandes cuidados de manutenção. É má condutora de calor e som, mas bom isolante termo acústico destaca-se pela estética que confere aos acabamentos, quando tratada corretamente, apresenta boa resistência à maresia e intempéries. O tratamento recebido pela madeira é de fundamental importância para determinar a durabilidade. O tipo de madeira também deve ser observado, já que algumas são mais resistentes a micro-organismos que outras, não necessitando sequer de tratamento.

As janelas em aço assim como as de alumínio, são boas condutoras de calor e som, e, conseqüentemente inferiores em termos de isolamento termo acústico. A corrosão, que ataca o aço, não tem efeito sobre o alumínio. O alumínio é um material com boa resistência e durabilidade, no entanto tem uma grande quantidade de energia incorporada, porém possibilita a reciclagem.

O PVC também utilizado na produção de janelas recebe aditivos químicos dotando-o de maior tenacidade ao impacto e calor, e pigmentos para cor. Oferece bom isolamento termo acústico e boa vedação à água e ao ar, além de resistência à poluição química. É também um material resistente, moderadamente durável, reciclável, no entanto o PVC branco tende a mostrar descoloração ao envelhecer.

Um estudo realizado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (SANTOS; MATIAS, 2006) apresenta diferentes soluções de vãos envidraçados e demais os elementos constituintes como o material da caixilharia. Para esse estudo, no caso de vãos envidraçados (janelas) simples consideram-se duas soluções de constituição da respectiva área transparente: uma folha de vidro (vidro simples); duas folhas de vidro separadas por um espaço de ar selado, com espessuras de 6 e 16mm (vidro duplo); vidro duplo com baixa emissividade (*low-e*), composto por duas folhas de vidro, uma delas com uma superfície revestida por um material com características de baixa emissividade, separadas por um espaço de ar selado, com espessura nominal de 16 mm.



No caso do vidro duplo considera-se a solução mais usual de duas folhas de vidro separadas por um perfil intercalar perimetral metálico, formado um espaço intermédio selado e preenchido com ar desidratado. Considerou-se que nas soluções de vidro duplo com baixa emissividade o valor assumido para a emitância da superfície é de $\epsilon=0,40$.

Diferenciam-se as soluções de caixilhos, em função dos materiais de utilização mais corrente no respetivo fabrico: Caixilho metálico (alumínio ou ferro); caixilho de madeira (pinho e outras espécies) e caixilho plástico (em geral PVC) executado com perfis unicelulares e multicelulares. As soluções dos envidraçados caracterizados procuram representar a prática corrente em Portugal, em termos de dimensão dos vãos, de geometria e características dos perfis, e de percentagem da área do envidraçado que estes ocupam. Assumiu-se que a área de vidro corresponde a cerca de 70 a 80% da área total do vão, no caso de janelas com caixilho metálico; e cerca de 70 a 75%, nas janelas de madeira; e cerca de 65 a 70% nas janelas com perfis plásticos (SANTOS; MATIAS, 2006).

A **Figura 3.23** apresenta os valores do coeficiente de transmissão térmica U ($W/m^2 \text{ }^\circ\text{C}$) para os diferentes tipos de caixilhos com vidro duplo (SANTOS; MATIAS, 2006). Os valores 6 e 16 mm representam a largura do espaço de ar selado. As linhas horizontais representam os coeficientes de transmissão térmica de referência recomendados pelo RCCTE de acordo com as zonas climáticas I1, I2 e I3. São apresentados ainda os valores de U ($W/m^2 \text{ }^\circ\text{C}$) considerando a existência de cortina opaca no interior e caixilhos com permeabilidade do ar baixa e elevada.

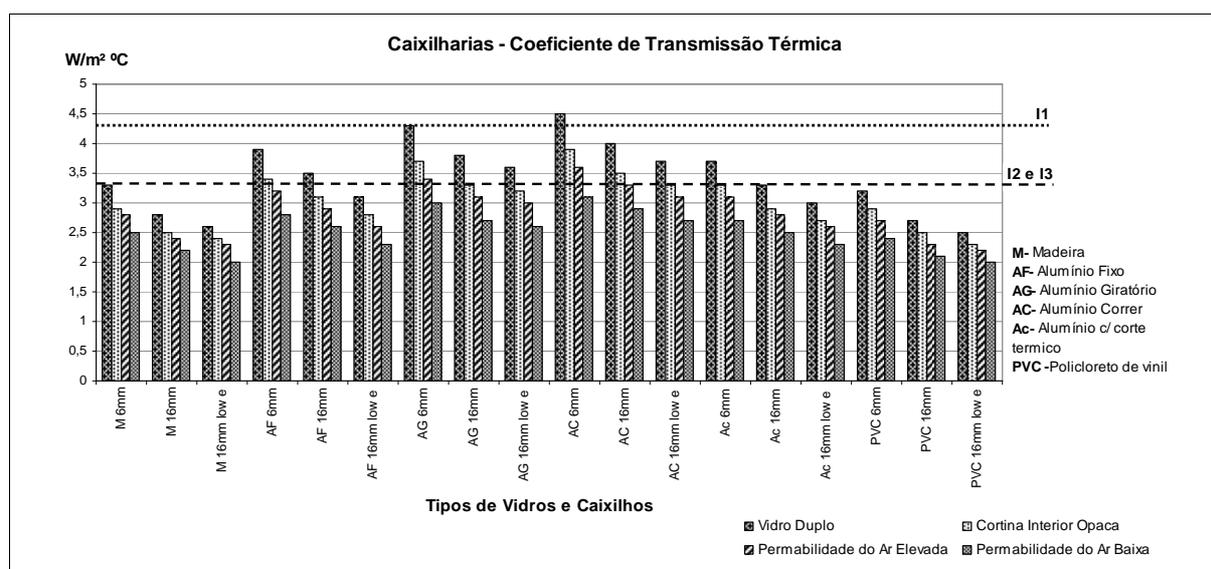


Figura 3.23 Eficiência Energética - Coeficiente Transmissão Térmica Envidraçados.

Fonte: Elaborado a partir de SANTOS; MATIAS (2006).



Observa-se que a caixilharia em PVC e madeira tem um melhor desempenho que a caixilharia em alumínio com e sem corte térmico. Entre as soluções de caixilhos em alumínio tem melhor desempenho térmico o caixilho fixo e o caixilho com corte térmico em relação ao caixilho giratório e ao caixilho de correr.

As caixilharias com lâmina de ar de 16mm têm um melhor desempenho térmico que as caixilharias com lâmina de ar de 6mm. As caixilharias com permeabilidade ao ar baixa têm um desempenho térmico melhor do que com permeabilidade elevada, no entanto o vão envidraçado deve possibilitar a renovação de ar.

A renovação de ar das caixilharias contribui para a ventilação natural e evita a produção de condensações no interior. Estas renovações de ar implicam perdas de energia pelo que é necessário criar um equilíbrio entre elas. No mercado existem grelhas de ventilação aplicáveis em caixilhos de madeira, alumínio ou PVC que permitem a ventilação com a janela fechada. As aberturas nos caixilhos são reguladas manualmente permitindo o aumento do caudal de ventilação natural no interior e a remoção do vapor de água, tanto de verão como de inverno.

Tipos de Janelas¹⁴

As janelas incorporam um sistema de partes fixas e móveis, incluindo acessórios que se encaixam e/ou se ajustam para permitir o funcionamento. Assim, as são classificadas de acordo com a movimentação de suas folhas. Para atender as exigências de circulação do ar e conforto, o especificador dispõe de meios para combinar diferentes tipologias de janelas, adicionando funções para iluminação ou ventilação. O mercado oferece alguns tipos principais de janela, mas também podem ser encontrados, resultantes de combinação de funções. A seguir, são indicadas as tipologias de janelas, com suas características funcionais positivas e negativas.

Janela de Correr

A janela de correr é formada por duas ou várias folhas, que podem ser movimentadas por deslizamento horizontal no plano da janela. É muito utilizada, move-se ao longo de trilhos. É denominada deslizante quando se abre para as laterais, e de guilhotina quando se abre para cima e para baixo. Em ambos os casos, apresenta manobras simples, que poupam os espaços ao redor, tanto interna como externamente (**Quadro 3.4**).

¹⁴ Boa parte das informações contidas sobre tipos de janelas foram extraídas de ALUSISTEM (2011).

**Quadro 3.4** Janela de Correr.

Janela de Correr	Vantagens	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de se debruçar na metade do vão; • As folhas não se movimentam sob a ação do vento; • A ventilação é de fácil controlo; • A abertura não ocupa áreas externas ou internas, grades ou persianas; • Simplicidade de operação; • Baixa manutenção; • Possibilidade de folhas de grandes dimensões. 	<ul style="list-style-type: none"> • Na abertura, libera apenas 50 % do vão; • Em vedações mal dimensionadas podem ocorrer problemas com drenos do trilho inferior, acarretando infiltração de água para o interior; • Dificuldades de limpeza do exterior.

Janela Guilhotina

A janela guilhotina é formada por uma ou mais folhas, que podem ser movimentadas por deslizamento vertical, no plano da janela (**Quadro 3.5**).

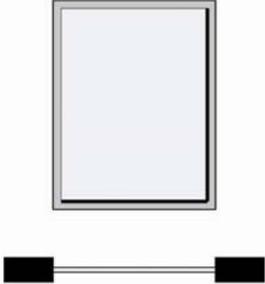
Quadro 3.5 Janela Guilhotina.

Janela Guilhotina	Vantagens	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilação razoavelmente regulável; • A posição não interfere na área interna ou externa, mesmo sob ação do vento; • Pode-se aplicar grades, telas ou persianas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Como a janela de correr, libera apenas 50 % do vão; • Necessita manutenção mais frequente para regular tensão dos cabos e nível das folhas; • Possibilidade de quebra dos cabos.

Janela Fixa

A janela fixa, como a própria denominação sugere não possui movimento. É adequada para ambientes onde a finalidade é a iluminação (**Quadro 3.6**).

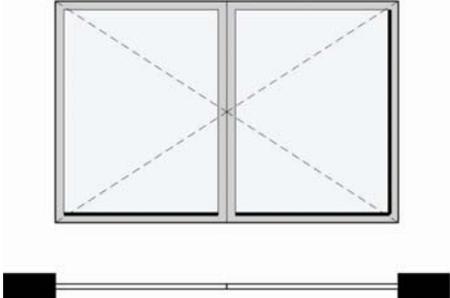
**Quadro 3.6** Janela Fixa.

Janela Fixa	Vantagens	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none">• A iluminação natural, estanqueidade, o isolamento térmico e acústico, e a segurança podem ser garantidas.	<ul style="list-style-type: none">• Imobilidade tanto dos vidros como dos caixilhos, que se mantêm fixados à abertura;• A ventilação é nula.

Janela de Abrir

A janela de abrir de eixo vertical é formada por uma ou mais folhas, que podem ser movimentadas mediante rotação em torno de eixos verticais fixos, coincidentes com as laterais da folha. Existem as janelas de folhas simples e as de folhas duplas. Tanto numa quanto noutra, as folhas fixam-se apenas quando abertas ou fechadas totalmente (**Quadro 3.7**).

Quadro 3.7 Janela de Abrir.

Janela de Abrir	Vantagens	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none">• Liberam 100% do vão para entrada de ar, sem nenhuma resistência ao vento;• Maior facilidade de limpeza devido ao posicionamento das folhas de abertura para o interior;• Boa estanqueidade ao ar e à água.	<ul style="list-style-type: none">• Nos casos de chuva oblíqua, a folha deverá ser fechada;• Ocorrência de sedimento diagonal em grandes dimensões envidraçadas;• Não possibilita regular a ventilação;• As de folhas duplas, caso se abram para dentro, dificultam a colocação de cortinas; se para fora, o uso de grades de segurança.

Janela Projetante e de Tombar

Formada por uma ou mais folhas, que podem ser movimentadas mediante rotação em torno de um eixo horizontal fixo, situado na extremidade superior ou inferior da folha. Pode ser: projetante e de tombar. Na janela projetante, o eixo fixo de rotação se localiza na extremidade superior; o movimento de abertura da folha pode ser para dentro ou para fora da edificação. Na janela de tombar, o eixo fixo de rotação se localiza na extremidade inferior e o movimento de abertura da folha pode ser para dentro ou para fora da edificação. Este tipo de janela, como o nome já diz, tomba para dentro, mas apenas na parte superior da



esquadria. Apesar de não liberar totalmente o vão, oferece aeração constante e boa vedação contra chuvas e ventos (**Quadro 3.8**).

A área útil para ventilação será função do ângulo de abertura da janela, obtendo-se baixa eficiência de ventilação para ângulos pequenos (até 30 graus), principalmente quando o vento incidir perpendicularmente ao plano da janela, quando então funcionará como uma barreira ao vento. Não permite controlo do direcionamento do fluxo de ar, com exceção das janelas projetantes e de tombar para dentro, que, ainda assim, dirigem o fluxo de ar para uma única direção.

Quadro 3.8 Janela Projetante e de Tombar.

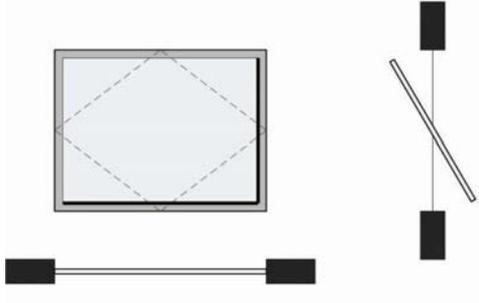
Janela Projetante e de Tombar	Vantagens	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none"> • No caso de projetante, possibilita boa ventilação, nas áreas inferiores, mesmo em dias de chuva; • Permite debruçar-se no vão aberto; • Possui boa estanqueidade ao ar e a água. • No caso do tipo de tombar, ocorre boa ventilação, mesmo com chuvas; • Boa estanqueidade ao ar e a água; • Facilidade de limpeza. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza externa difícil; • Não libera praticamente o vão; • Não permite o uso de persianas ou grades na parte externa ou interna. • Não libera o vão; • Díficil limpeza externa; • Necessidade de grande rigidez da folha para evitar deformações; • Acessórios de custo mais elevado.

Janela Pivotante

É constituída por uma ou varias folhas, que podem ser movimentadas mediante rotação em torno de um eixo que pode ser vertical ou horizontal não coincidente com as laterais das folhas. Cria vãos que permitem a circulação do ar em todo o ambiente, mas dificulta a colocação de cortinas e grades. Pode ser vertical ou horizontal de acordo com o posicionamento do eixo (**Quadro 3.9**).

A janela pivotante vertical é constituída por uma ou várias folhas, que podem ser movimentadas mediante rotação em torno de um eixo vertical e não coincidente com as laterais das folhas. A janela pivotante horizontal possui rotação da folha em torno de seus eixos situando-se no intervalo entre 160° e 180°.

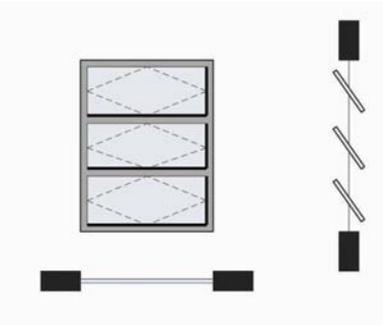
**Quadro 3.9** Janela Pivotante.

Janela Pivotante	Vantagens	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none">• Realiza abertura de grandes dimensões com um único vidro;• Facilidade de limpeza;• Graduação da ventilação;• Possibilidade de se debruçar no vão;• Permanece aberta quando ajustados os dispositivos de freios.• Possibilidade de graduar a ventilação nas áreas de alta e baixa;• Permanece aberta em qualquer ângulo se incorporar dispositivos de freio.	<ul style="list-style-type: none">• Limitação no uso de grades, persianas ou telas;• Projeção incômoda no interior do ambiente.• Para grandes dimensões, requer fechos perimétricos.

Janela Basculante ou Gelsia

Possui eixo de rotação horizontal, centro ou excêntrico não coincidente com as extremidades superior ou inferior da janela. Projeta-se para dentro ou para fora, num movimento de rotação em torno do eixo horizontal ou por meio de um braço de articulação (**Quadro 3.10**).

Quadro 3.10 Janela Basculante ou Gelsia.

Janela Basculante	Vantagens	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none">• Largamente empregada em cozinhas, casas de banho, áreas de serviço, armazéns e escolas;• Fácil limpeza; recomendada para paredes internas, divisórias ou corredores porque tem pequena projeção para ambos os lados, sem prejuízos às áreas próximas.• Controlo da ventilação, mesmo com chuvas fracas;• Dependendo do ângulo de abertura de suas folhas, a ventilação é parcial, mas constante.	<ul style="list-style-type: none">• Reduzida estanqueidade;• Não libera o vão;



Janela Projetante - Deslizante ou Maximar

É formada por uma ou mais folhas, que podem ser movimentadas em torno de um eixo horizontal, com translação simultânea desse eixo. A abertura da janela deixa os vidros numa posição perpendicular em relação à esquadria (**Quadro 3.11**).

Quadro 3.11 Janela Projetante – Deslizante ou Maximar.

Janela Projetante	Vantagens	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none"> • Vantagens idênticas as da janela projetante; • Com braços de articulação adequados, pode abrir em um ângulo de até 90 graus, melhorando ventilação e condições de limpeza; • Ventila mais as áreas inferiores do ambiente e pode ser mantida aberta mesmo com chuva; • Tem boa estanqueidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não permite uso de grades ou telas; • Libera parcialmente o vão • Garante boa ventilação e iluminação, mas pouca privacidade. • Sua limpeza exige esforço e requer dispositivos especiais para evitar riscos.

Janela Sanfonada

É formada por duas ou mais folhas articuladas entre si que, ao abrir, dobram-se uma sobre as outras, por deslizamento horizontal ou vertical de seus eixos de rotação. Esses eixos podem coincidir com as bordas da folha ou se situar em posições intermediárias. Move-se no sentido horizontal, flexionando suas folhas com a ajuda de dobradiças (**Quadro 3.12**).

Quadro 3.12 Janela Sanfonada.

Janela Sanfonada	Vantagens	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none"> • No caso de janela sanfonada de eixo vertical, as vantagens podem ser aproximadas às da janela de abrir; • Já aquela de eixo horizontal pode apresentar vantagens semelhantes às da projetante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Regula bem a entrada de luz e ar, mas quando fechada não permite boa estanqueidade.

Bay-window

Típica da arquitetura inglesa, esse modelo de janela, possui geralmente três faces que se projetam para fora do prumo da construção. Possui variações como a *oriel-window*, instalada no andar superior e ocupando todo o pé-direito do ambiente, e a *bow-window*, que, em vez de facetada, projeta-se para fora das paredes como um volume semicircular. A *bow-window* é semelhante a *bay-window*, porém possui mais de três faces que agrupadas formam um arco largo e o centro desse tipo de janela é geralmente fixo (**Quadro 3.13**).

Quadro 3.13 Janela *bay-window*.

Janela <i>Bay-window</i>	Vantagens	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none"> • Ampliação do espaço interno; • Melhores condições de iluminação natural de acordo com o tipo de envidraçado utilizado. • Pode regular bem a entrada de luz e ar, de acordo com o tipo de abertura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta custo mais elevado.

Existem ainda as venezianas, que podem ser incorporadas nas folhas de quaisquer dos tipos de janelas e proporciona ventilação mesmo fechada. Possuem palhetas na horizontal, que se apoiam na caixilharia. Além das janelas com palhetas estreitas, existe a do tipo portuguesa, cujas palhetas em balanço avançam para fora da caixilharia. Outros tipos são conhecidos como vitrôs e possuem uma ou mais folhas de vidro que se movem na vertical ou na horizontal a partir do comando de uma alavanca. Além de não liberarem o vão para passagem total do ar, proporcionam reduzida vedação.

Além desses tipos de janelas apresentados, podem ser utilizadas ainda janelas especiais, constituídas de dois ou mais tipos das janelas citadas. São especiais aquelas que, por características de forma, uso e funcionamento, não se enquadram nas tipologias anteriores.



3.4.4 Massa Térmica

A massa térmica é responsável pelo atraso entre o fornecimento de calor e o aumento da temperatura no interior do edifício. Este fenómeno pode ser explorado a diferentes níveis, associado com um correto isolamento térmico e ventilação. No inverno, uma massa térmica faz com que a energia recebida durante o dia se manifeste no interior durante a noite. No verão a função é idêntica mas o calor pode ser libertado durante a noite para o exterior através de ventilação (**Figura 3.24**) (LANHAM et al., 2004).

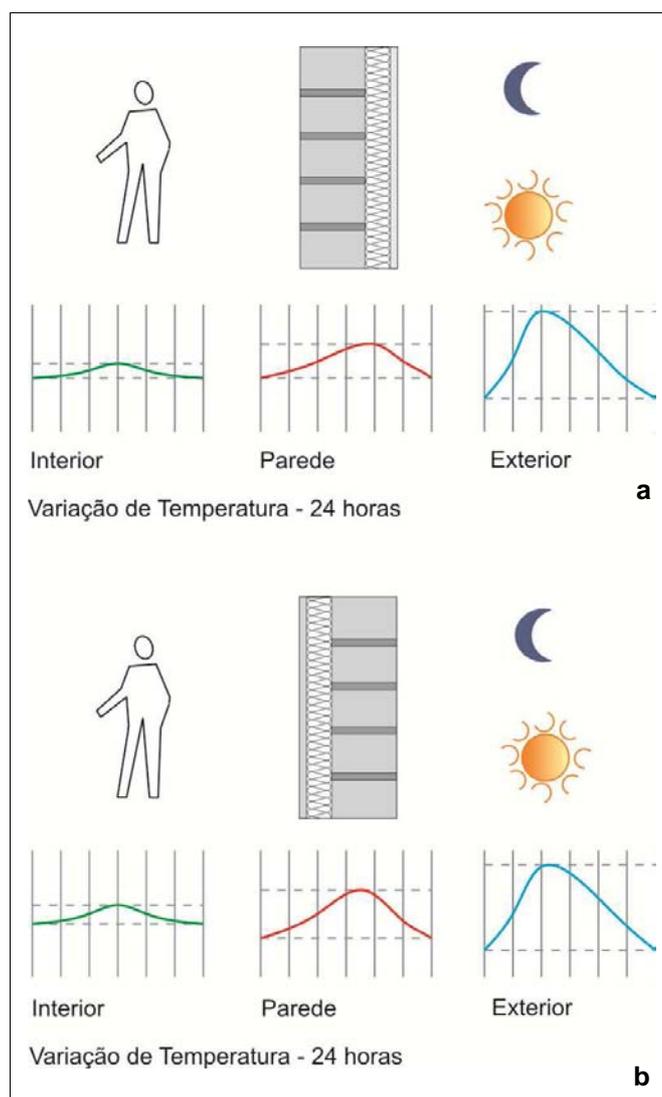


Figura 3.24 a. Massa térmica eficiente: a variação térmica no exterior é elevada mas no interior é pequena; b. Massa térmica menos eficiente.

Fonte: Adaptado de LANHAM et al., 2004.



No sistema de ganho direto, as massas térmicas desempenham um papel estabilizador das condições interiores, atenuando a amplitude térmica no interior dos edifícios. Quanto maior for a massa térmica, menor será essa variação, sendo que também será mais difícil aquecer o edifício, sendo necessário um equilíbrio entre massa térmica, isolamento e área de vãos, dependendo muito do tipo de edifício e localização do mesmo. Durante o período diurno, a massa térmica absorve o calor resultante da incidência direta da radiação solar e, durante o período noturno, o calor é devolvido ao espaço. O isolamento dos elementos da envolvente exterior deve ser pensado de forma a minimizar a influência das solicitações climáticas exteriores (GONÇALVES e GRAÇA, 2004).

Florensa e Roura (1995) denominam de sistemas de inércia os sistemas que atuam estabilizando a temperatura interior frente às oscilações das condições exteriores, seu funcionamento faz com que sejam adequados para melhorar os efeitos das oscilações de temperatura exterior, tanto no inverno quanto no verão. Esses sistemas estão caracterizados por sua massa térmica útil, que confere ao edifício inércia térmica nas variações de temperatura. A inércia térmica é um ciclo concreto que pode ser diário, semanal ou anual, é a capacidade de reter ou ceder calor no ciclo considerado. As massas com grandes espessuras atuam melhor nos ciclos de longa duração, uma vez que a transferência de calor tem tempo suficiente para atravessar toda a massa.

Para ser alcançado um bom desempenho no inverno, as massas térmicas devem estar expostas à radiação direta do sol sendo a sua melhor localização em áreas não obstruídas de fachadas a Sul. Em alguns casos, a inércia térmica pode aumentar as necessidades de aquecimento, sobretudo quando as áreas das janelas são demasiado pequenas. A cor do pavimento (se este é pesado) deverá ser escura para otimizar a sua eficácia e as superfícies texturadas aumentam a área de exposição. Com essas características é possível manter calor armazenado no nível do pavimento, reduzindo assim a tendência de estratificação térmica e aumentando o nível de conforto (CARDOSO, 2008).

Generalizando, materiais de construção com massas elevadas comportam-se como massas térmicas eficazes. Este é um fator essencial em Portugal, visto que o maior problema de climas quentes, ou neste caso Mediterrânicos é o calor. Uma das preocupações ao construir edifícios é prever mecanismos que consigam evitar a entrada excessiva de calor e que consigam dissipar o calor que entra. Uma massa térmica elevada, associada ao isolamento (preferencialmente externo) deve ser uma estratégia na construção em Portugal para preservar uma temperatura fresca durante o dia e apenas permitir libertação de calor à noite, período em que se pode utilizar a ventilação noturna para dissipar o calor (LANHAM et al., 2004).



3.4.5 Paredes Acumuladoras ou de Armazenamento Térmico

As paredes acumuladoras ou de armazenamento térmico localizadas nas fachadas são chamadas de forma geral de parede de Trombe, ainda que existam vários tipos, tais como: Parede acumuladora (Parede de Trombe não ventilada); parede de trombe, parede de água e parede dinâmica. A parede acumuladora ou parede de trombe não ventilada é uma parede de armazenamento térmico sem aberturas de termo circulação.

A parede acumuladora é geralmente composta por materiais densos como a pedra, o betão, a terra compactada, o tijolo ou outro material com boa capacidade de armazenamento térmico. Em grande parte dos casos seu rendimento é menor que o de uma parede de trombe ventilada, pois mesmo que a temperatura do ar entre o vidro e a parede de armazenamento seja muito superior, a distribuição do calor para o interior é menos uniforme (MENDONÇA, 2005). As paredes de armazenamento podem ocupar área útil do ambiente devido à espessura pouco maior que o convencional além de incrementar o peso do edifício.

Quando não se pretender utilizar a estratégia de ventilação natural, a “energia” incidente irá sendo acumulada na parede durante o dia, e por condução será transferida para o interior do espaço a aquecer, demorando um tempo que está de acordo com a espessura da parede. Esta estratégia permite “armazenar” energia que estará disponível no período noturno, estabilizando assim as temperaturas nesse espaço. Por isso a denominação “Parede de Armazenamento” (GONÇALVES e GRAÇA, 2004) (**Figuras 3.25 e 3.26**).

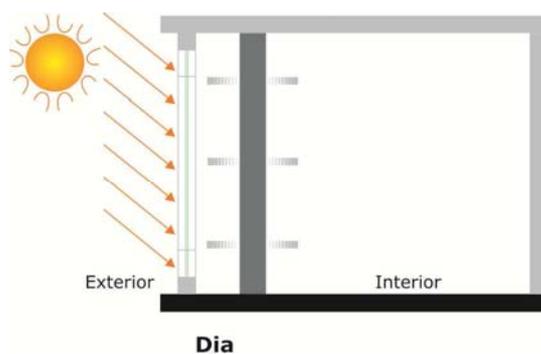


Figura 3.25 Parede acumuladora com efeito de Estufa (durante o dia - inverno).

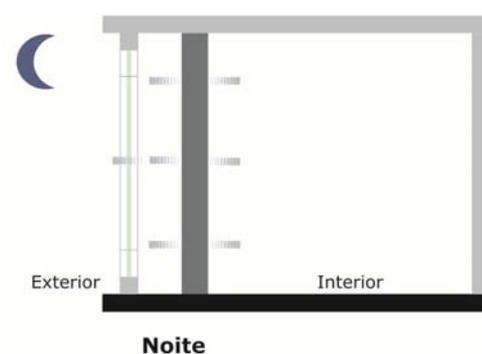


Figura 3.26 Parede acumuladora com efeito de Estufa (Durante a Noite - inverno).

É ideal que a parede acumuladora, com efeito de estufa, seja de cor escura e orientada a Sul, sendo cerrada com um vidro ou outro material transparente ou translúcido, afastado a uma distância de 5 a 20cm, para evitar a perda da radiação térmica adquirida pela exposição solar durante o dia e potenciar o efeito de estufa. Outros materiais opacos

com alta condutibilidade térmica e cor escura podem ser utilizados nesse sistema em substituição ao vidro, mas neste caso não se pode chamar de parede com efeito de estufa, pois apenas se potencia o aquecimento radiante da parede (MENDONÇA, 2005). A **Figura 3.27** apresenta um exemplo de aplicação de paredes de armazenamento, ou seja, que funciona como uma parede de trombe, porém sem ventilação.



Figura 3.27 Casas de Jade – Fachada Sul, Sintra (com Paredes de Armazenamento). Arquiteta Livia Tirone. **Fonte:** GONÇALVES e GRAÇA, 2004.

3.4.6 Parede de Trombe

Desde a antiguidade eram usadas paredes espessas de adobe ou pedra com o objetivo de captar o calor proveniente do sol durante o dia e transmiti-lo lentamente e uniformemente à noite de forma a aquecer as habitações. Hoje edifícios solares passivos incorporaram a esta técnica o armazenamento térmico, caracterizando a parede de trombe.

O norte-americano Edward Morse foi o primeiro a descrever o conceito de parede Trombe em 1881 numa patente (MORSE, 1881). No entanto, a ideia foi patenteada e repopularizada pelo engenheiro francês Jacques Felix Trombe e pelo arquiteto Michel (TROMBE, 1972). Outras denominações para Trombe parede é parede Trombe-Michel, parede solar parede, parede de armazenamento térmico, parede com coletor de armazenamento ou parede de armazenamento.

A primeira construção a utilizar este sistema foi uma casa construída em França (Odeillo) (1967) por Felix Trombe e o arquiteto Jacques Michel, que divulgaram a tecnologia nos anos 70, sendo hoje uma das soluções construtivas mais utilizadas no projeto solar passivo em climas com necessidades de aquecimento. A parede de trombe é um sistema de ganhos energéticos indiretos no qual a captação realiza-se através de um elemento que atua como acumulador de calor. O calor é cedido ao interior a partir deste elemento, por processos de convecção e condução, o que, devido à sua inércia térmica, retarda e amortece a oscilação das temperaturas interiores.



Uma típica parede de Trombe possui de 10 a 40 centímetros de espessura e orientação sul (hemisfério norte). Um pano simples ou duplo de vidro é colocado numa distância de 2 a 5 centímetros da parede maciça de forma a criar um espaço de ar de pequeno porte. Para aumentar a absorvidade da radiação solar, a superfície da parede maciça é normalmente pintada de cor preta (SUN et al., 2011).

O calor que passa através do vidro é absorvido pela superfície escura, armazenado na parede, e conduzido lentamente para dentro do ambiente. O uso de vidros com alta transmissão maximiza os ganhos solares. Para uma parede de Trombe com 20 centímetros de espessura, o calor leva cerca de 8 a 10 horas para chegar ao interior. Isso significa que os ambientes são aquecidos lentamente, reduzindo a necessidade de aquecimento convencional consideravelmente (TORCELLINI; PLESS, 2004).

Nesse sistema predomina o efeito de estufa, atingindo-se temperaturas elevadas (30-60°C) no espaço entre o vidro e a parede de armazenamento. Esta “energia” incidente pode ser transferida de imediato para o interior do espaço a aquecer por intermédio da ventilação natural através dos orifícios existentes na parede. Se tal for a utilização pretendida, o espaço será aquecido por uma corrente de convecção natural entre o espaço interior e o espaço “estufa”. Desta forma, a maior parte da energia incidente é transferida e utilizada diretamente, sendo que a energia acumulada na parede é reduzida.

De acordo com as pesquisas, a paredes de Trombe é uma tecnologia eficaz para reduzir a energia de aquecimento, chegando aos 47% em casos residenciais (BALCOMB, 1992) eles podem ser usados portanto como um método de aquecimento solar passivo eficiente e durável.

O desempenho das paredes de Trombe é menor se a parede interior não possui aberturas para as zonas interiores. Com base em experiências anteriores, o calor produzido por uma parede de Trombe em uma residência pode ser reduzido em mais de 40%, porque os armários de cozinha foram colocados no interior da parede (BALCOMB, et al., 1998; BALCOMB, et al., 1999).

A amenidade aparente do clima de Portugal leva à não ser considerada a instalação de aquecimento central ou sistemas de refrigeração na maior parte dos edifícios, com exceção dos edifícios de serviços. Gonçalves et al. (1997) desenvolveram uma pesquisa sobre "*Passive Solar Buildings in Portugal: Experiences in the Last 20 years*". Neste estudo apresentou alguns exemplos de usos de paredes de Trombe em Portugal.

O funcionamento da Parede de Trombe pode ser melhorado durante as estações amenas (primavera/outono) e de arrefecimento (verão), através da introdução de sistemas controláveis que permitam a entrada de ar pela base do envidraçado e a saída pelo seu

topo. Durante a primavera e outono, a temperatura amena do ar exterior potencia a utilização da parede para a ventilação natural do espaço interior, sem perda de cargas térmicas. Durante o verão, abrindo o topo do envidraçado, é possível evitar o sobreaquecimento do espaço interior. O ar aquecido pela radiação solar na caixa-de-ar ascende e escapa para o exterior, succionando o ar interior através da base da parede (Figura 3.28).

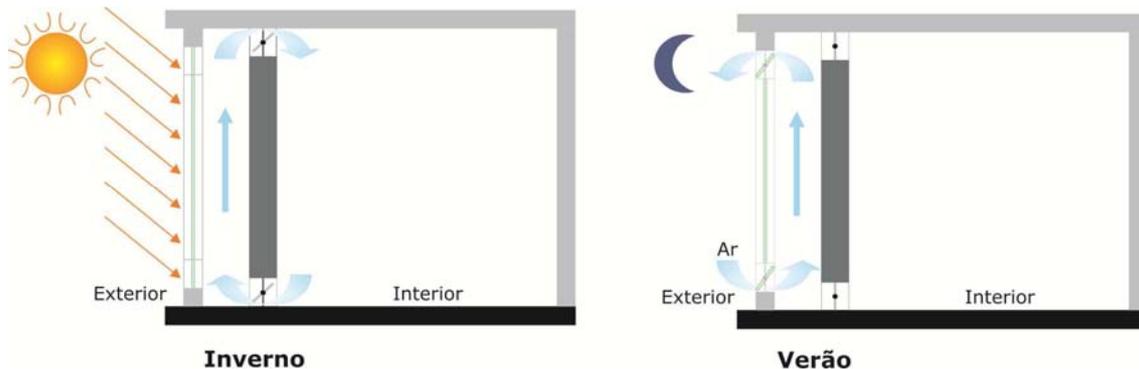


Figura 3.28 Esquema de funcionamento de uma Parede de Trombe inverno/ verão.

De acordo com Mendonça (2005), para que esse tipo de sistema forneça a energia necessária para suprimir as necessidades de aquecimento noturno deve funcionar de acordo com os critérios (Quadro 3.14):

Quadro 3.14 Funcionamento da Parede de Trombe

Período	Inverno	Verão
Dia	Os orifícios de ventilação apenas deverão ser abertos, quando a temperatura no espaço de ar exceder a temperatura do compartimento e for necessário o aquecimento;	Os orifícios de ventilação devem estar fechados e deverá ser previsto o sombreamento do sistema;
Noite	Para reduzir as perdas de calor, o eventual dispositivo de oclusão noturno deverá estar fechado, bem como os orifícios de ventilação.	Para facilitar o arrefecimento da parede, devem ser abertos os orifícios de ventilação exteriores.

Fonte: Elaborado a partir de MENDONÇA, 2005.

Com a aplicação de uma superfície seletiva a uma parede de Trombe seu desempenho é melhorado, reduzindo a quantidade de energia infravermelha através do envidraçado. A superfície seletiva pode ser revestida com uma chapa de metal fixada à superfície externa da parede. Isso fará com que quase toda a radiação visível do espectro solar seja absorvida e pouca quantidade da radiação infravermelha seja emitida. Uma alta



absorção transforma a luz em calor na superfície da parede e uma baixa emitância impede a passagem do calor através do vidro.

O uso de paredes de trombe deve ser estudado em conjunto com janelas, beirais e outros elementos para equilibrar a incidência de calor solar. Janelas estrategicamente posicionadas permitem o calor do sol e a iluminação natural entrarem no edifício durante o dia para auxiliar no aquecimento através de ganhos solares diretos. Ao mesmo tempo, a parede de trombe absorve e armazena calor para ser usado durante à noite. As coberturas corretamente dimensionadas podem evitar o ganho de calor da parede de Trombe durante o verão, período no qual o calor não é necessário (TORCELLINI; PLESS, 2004).

A **Figura 3.29** apresenta o comportamento de duas paredes de trombe, uma delas do *Visitor Center at Zion National Park* (Utah, EUA) e outra do *National Renewable Energy Laboratory (NREL), Wind Site Entrance Building (SEB)* (Colorado, USA).

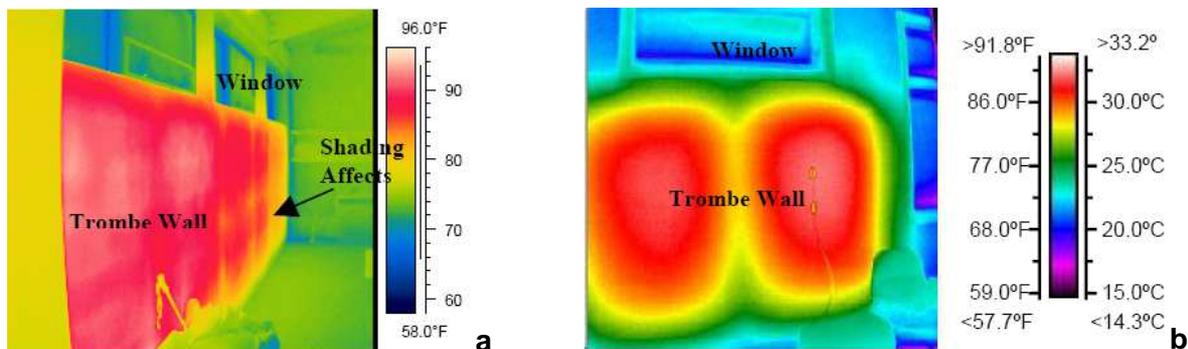


Figura 3.29 Imagem - Infravermelho. a. Parede de trombe em Zion, 16 de dezembro, Horário: 8:30
b. Parede de trombe do NREL SEB, 21 de janeiro, Horário: 8:30.

Fonte: TORCELLINI; PLESS, 2004

Em relação às temperaturas, observa-se através das imagens termográficas que a temperatura de superfície é geralmente homogênea, em torno de 32 a 36°C na parede de Trombe. De acordo com o estudo, a parede de trombe do *Visitor Center* fornece 20% do aquecimento necessário durante o ano, e no caso do *Wind Site Entrance Building (SEB)* grande parte do aquecimento necessário é fornecido pela parede de trombe (TORCELLINI; PLESS, 2004) (**Figuras 3.30 e 3.31**).

Nos últimos anos uma série de estudos têm sido feitos para otimizar o funcionamento das paredes de Trombe clássicas, através de paredes de Trombe compostas, que incorporam por exemplo elementos fotovoltaicos e materiais de mudança de fase (*PCMs Phase Change Materials*) (BRIGA-SÁ, 2011).



Figura 3.30 Visitor Center, Zion National Park (Utah, EUA).

Fonte: US Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy, 2009.



Figura 3.31 Wind Site Entrance Building (SEB) (Colorado, USA).

Fonte: US Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy, 2009.

Num estudo realizado na China foi analisada, por meio de simulação computacional, uma parede de trombe com células fotovoltaicas fixadas atrás do painel de vidro, dando origem a uma nova concepção (Parede de Trombe Fotovoltaica). Em torno de 80% da energia solar que incide na superfície de uma célula fotovoltaica (PV) é convertida de energia térmica para energia elétrica. A energia térmica da superfície das células fotovoltaicas é retirada neste caso pelo fluxo de ar entre o envidraçado e a parede, assim a temperatura das células fotovoltaicas diminui e sua eficiência elétrica aumenta (**Figuras 3.32 e 3.33**) (JIE, 2007).

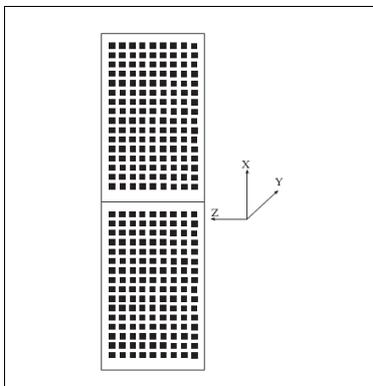


Figura 3.32 Distribuição das células fotovoltaicas no envidraçado.

Fonte: JIE, 2007.

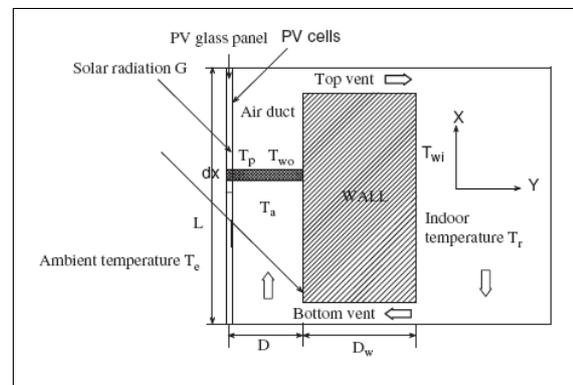


Figura 3.33 Diagrama mostrando a parede de trombe com células fotovoltaicas.

Fonte: JIE, 2007.

Nesse mesmo estudo observou-se que a temperatura interna obtida pelo uso da Parede de trombe fotovoltaica é menor se comparado com a parede de trombe tradicional (**Figura 3.34**), porém o sistema com painéis fotovoltaicos pode fornecer aquecimento e energia elétrica ao mesmo tempo, além de promover uma melhora no aspecto estético (JIE, 2007).

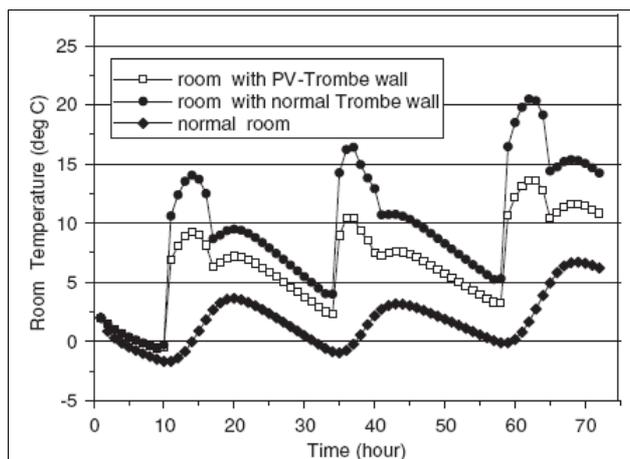


Figura 3.34 Gráfico comparando a temperatura interna para ambientes com paredes de trombe tradicional e com células fotovoltaicas.

Fonte: JIE, 2007.

As **Figuras 3.35** e **3.36** apresentam um exemplo de emprego de paredes de trombe numa moradia unifamiliar em Portugal. Neste caso no 1º andar, pavimento este que em madeira e cujas janelas são de menor dimensão, usaram-se paredes de trombe com a tripla função de captação, armazenamento e distribuição do calor.



Figura 3.35 Casa Termicamente Otimizada – Fachada Sul, Porto. Arquitetos Carlos Araújo e Santiago Boissel.

Fonte: GONÇALVES et al., 1997.



Figura 3.36 Fachada Norte.

Fonte: GONÇALVES et al., 1997.

O **Quadro 3.15** apresenta algumas vantagens e desvantagens das paredes de trombe.

**Quadro 3.15** Vantagens e inconvenientes da parede de trombe.

Vantagens	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none">• Sistema de aquecimento passivo de baixa manutenção;• Reduz o consumo de energias não renováveis para o aquecimento (vantagens econômicas e ambientais);• Proteção contra a degradação ultravioleta e privacidade no compartimento interior;• A flutuação de temperatura no espaço habitado é mais baixa.• A massa acumuladora é colocada próxima do vidro ou área coletora, a qual permite uma eficiente captação da energia solar;• Proporcionam calor durante o dia, por convecção de ar quente, e também durante a noite, normalmente quando é mais necessário, por radiação da energia armazenada na massa térmica;• O pavimento e as paredes dos espaços podem ser desenhados com mais flexibilidade desde que a massa acumuladora se mova para junto das janelas; da fachada sul;• Podem atuar como aquecedores no inverno e refrigeradores no verão, quando possuem aberturas.	<ul style="list-style-type: none">• Formação de condensações no envidraçado (humidificação dos materiais de construção, favorecendo a sua degradação precoce);• Comportamento durante longos períodos de céu nublado. Sem radiação solar, a parede não funciona, sendo necessário recorrer a soluções de aquecimento convencionais.• A elevada massa da parede e a ausência de isolamento térmico propiciam a perda de parte do calor produzido no interior, retardando o aquecimento;• Elevada espessura total da parede, o que pode diminuir o espaço útil de construção;• Maior custo de construção (necessidade de se construir duas paredes voltadas a Sul – uma em vidro e outra opaca).• A vista do exterior e a iluminação natural perdem-se. Algumas paredes de trombe tem vindo a ser desenhadas com incorporação de janelas, contudo recomenda-se um desenho adequado, dado que a incorporação de uma janela não deve afetar a eficiência destes sistemas;• Paredes de trombe ventiladas necessitam de ser fechadas a noite para prevenir inversão do sentido do fluxo do ar quente. A parte interior do vidro em paredes de trombe ventiladas também necessita de ser limpa regularmente, por isso um acesso deve ser considerado;

Fonte: Elaborado com base em MATEUS, 2004 e CARDOSO, 2008.

Algumas variações desse sistema têm sido introduzidas pelos arquitetos neste modo de funcionamento, tais como os materiais utilizados, uso de paredes em pedra; e na sua localização e dimensão. Outra estratégia possível com este tipo de sistema é o de poder ser utilizado na meia estação (primavera ou outono) para pré-aquecimento do ar exterior, necessitando para isso de um orifício entre o exterior e o espaço "estufa". Em geral os sistemas de ganho indireto permitem um controlo mais rigoroso sobre a quantidade de calor cedido ao ambiente interior do que no caso dos sistemas de ganho direto, pelo que a oscilação de temperatura interior é normalmente menor.

A parede dinâmica com efeito de estufa por exemplo é um sistema de ventilação combinada com efeito de estufa (**Figura 3.37**). Basicamente é uma parede de armazenamento com a particularidade de aquecer o ar exterior durante o dia. Durante a noite no período de inverno, ou em dias encobertos e sem ganhos, a abertura de ventilação deverá ser encerrada, ficando a parede apenas a aquecer por radiação, como parede acumuladora (MENDONÇA, 2005).

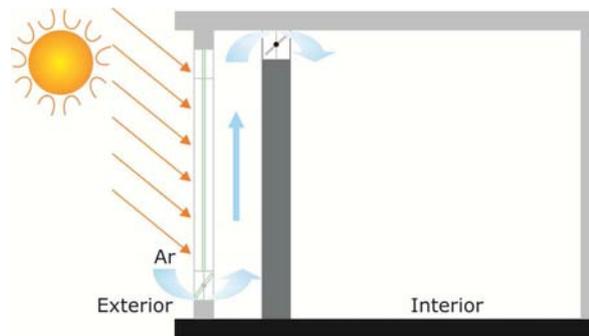


Figura 3.37 Parede dinâmica, parede de trombe com efeito de Estufa durante o dia em inverno.

3.4.7 Parede de Água

Este sistema é basicamente o mesmo que uma parede de armazenamento, sendo que o material de armazenamento, ao invés de ser um material construtivo como betão ou argamassa, é a água. Porém, além de água podem ser utilizados outros líquidos, bem como diferentes tipos de reservatórios.

A primeira parede de água construída foi provavelmente no Instituto de Tecnologia de Massachusetts em 1947 por Hoyt Hottel e um grupo de estudantes. Para a construção foram ordenados, ocupando toda a altura, arranjos de um e cinco galões lacrados, preenchidos com água e pintados de preto que foram posicionados atrás de um envidraçado duplo. Estas paredes de água forneceram cerca de 38 a 48% da demanda de aquecimento para o ambiente.

O desempenho do sistema foi reduzido devido à limitação de projeto; a redução dos ganhos diretos através das janelas; e a proteção entre a água e o envidraçado e o isolamento estavam inadequados (esse problema em relação ao isolamento foi descoberto nos anos 80). Ao invés de dar continuidade a estas experiências, que apresentaram bom desempenho em relação ao custo, os investigadores optaram por pesquisar sistemas solares ativos mais onerosos e incertos. As paredes de água ressurgiram em 1972 em Novo México, num projeto futurista de Steve Baer.

Na “Casa Corrale” foram usados 55 tambores com água para fornecer a massa térmica necessária para o funcionamento do sistema solar passivo. As paredes orientadas a sul foram compostas por envidraçados simples e isolados, com um invólucro refletivo que é diminuído em dias ensolarados de inverno e fechado durante a noite. Esse sistema funcionou de forma eficiente, apesar do nível modesto de isolamento nas paredes e teto. A parede de água armazena a energia recebida e a transmite por radiação e convecção, praticamente sem retardo. Caso existirem fendas entre os depósitos de água ocorre um

aumento do rendimento do sistema. São utilizados aproximadamente 200 litros de água por m² de parede (**Figura 3.38 e 3.39**) (BAINBRIDGE, 2005).

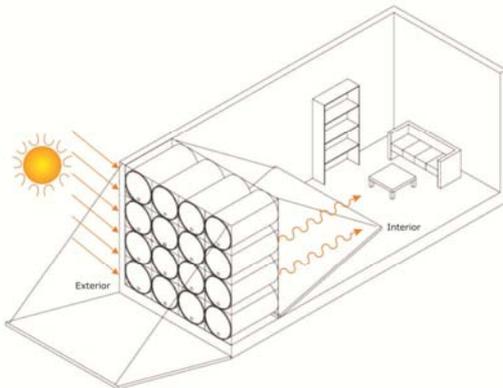


Figura 3.38 Esquema: Funcionamento de uma parede de água com tambores.
Fonte: Adaptado de KNAACK, 2007.



Figura 3.39 Vista do interior da Casa Corrale, à direita a parede de água feita com tambores.
Fonte: BAINBRIDGE, 2005.

A parede de água pode ser também uma variação da parede de armazenamento, na qual a água substitui a parede sólida. É uma solução interessante para ser empregada em situações onde paredes mais leves são necessárias, nesse caso um compartimento preenchido com água ocupa o lugar da alvenaria e podem ser usados tubos de fibra de vidro para o armazenamento da água. Como a água tem uma maior capacidade de aquecimento do que o tijolo ou cimento é possível que com um determinado volume uma parede de água seja mais eficiente do que uma parede sólida. A sua capacidade de armazenamento de calor é dez vezes mais elevada do que as paredes de alvenaria de tijolo furado e cinco vezes superior, por exemplo, à do betão, devido ao seu elevado calor específico.

Existe uma diferença fundamental entre o funcionamento de uma parede de água e de uma parede de trombe: Na parede de trombe existe um grande desfasamento temporal entre a absorção da energia e a sua cessão ao ambiente. No caso da parede de água, não isolada, a transferência de calor é muito rápida, fazendo com que seja necessário um controle adicional da distribuição de calor no interior do espaço a aquecer isso devido ao elevado calor específico e condutibilidade da água, incrementada pelos fluxos convectivos. Existem já algumas soluções translúcidas, utilizando tubos transparentes de poliéster que, uma vez cheios de água têm uma transmitância à luz do sol de cerca de 20% (MENDONÇA, 2005).

Um tipo de parede de água, denominada *See-Trough Wall* foi desenvolvido em Portugal. Trata-se um sistema ecológico em que o aproveitamento da água (pluvial ou da rede) desempenha um papel fundamental no aumento da eficiência energética e no



combate ao desperdício. Nesse caso a parede de água é constituída por um vidro triplo, com dois espaços entre os vidros, que formam caixas-de-ar (**Figura 3.40**).

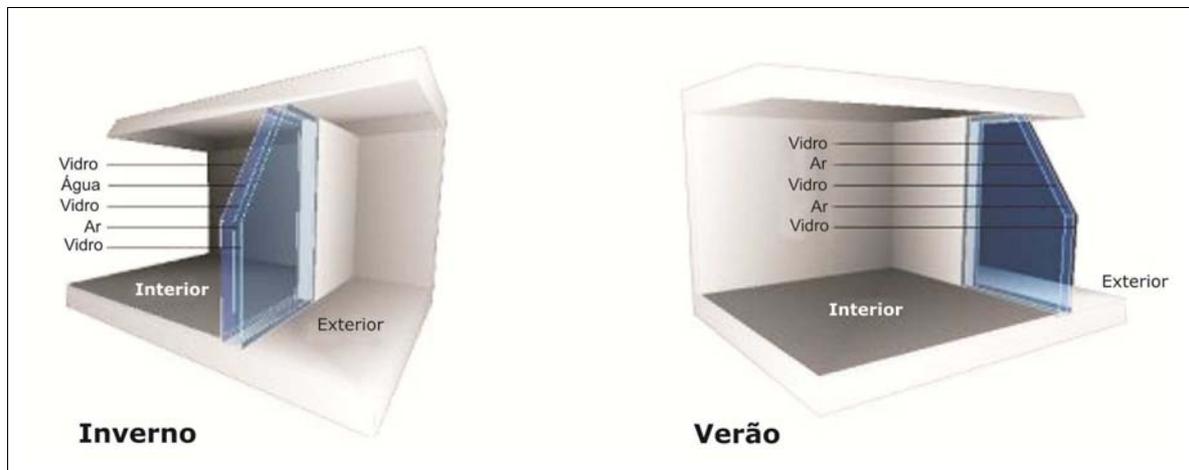


Figura 3.40 Sistema See-Trough Wall.

Fonte: COSTA, 2005.

No inverno, um dos espaços é preenchido por água (condutor de calor) e o outro, mais próximo do exterior, por ar (isolante de calor). No verão, ambos os espaços são preenchidos por ar. O sistema é baseado no aproveitamento das águas da chuva, que são recolhidas num tanque e armazenadas, sendo usadas para descargas domésticas, para o jardim e piscina. A água é filtrada e bombeada para as paredes do sistema. O sistema prevê, através de painéis solares, a possibilidade de aquecer a água previamente e injetá-la já aquecida, quando não há radiação solar. A parede de água aproveita a água das chuvas, reduz substancialmente o consumo de energia (em condições ideais reduz o consumo até 30%), reutiliza a água que está dentro das paredes de um imóvel, aproveitando-a para descargas e regas (a redução do consumo de água de rede para usos domésticos pode chegar a 50%) e repara (ao reduzir o consumo de energia, reduz as emissões de dióxido de carbono em cerca de 30%) (COSTA, 2005).

Outro exemplo de sistema de parede de água é o “Transwall”, que consiste em duas placas de vidro com água no interior, pode ser inserido no sistema uma terceira placa de vidro pintada e absorvente (**Figura 3.41**).

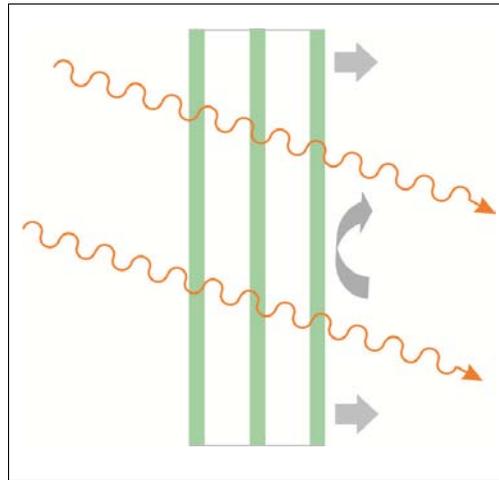


Figura 3.41 Sistema de Parede de água “Transwall”.

O **Quadro 3.16** apresenta algumas vantagens e inconvenientes do sistema de parede de água.

Quadro 3.16 Vantagens e inconvenientes das paredes de água.

Vantagens	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> • Podem ser instaladas facilmente e são viáveis economicamente em construções novas; • São mais eficientes que alvenaria para aquecer e esfriar, particularmente em áreas com temperaturas frias durante a noite; • São mais flexíveis que armazenamento com PCM's (<i>Phase Change Materials</i>) porque funcionam bem tanto para arrefecimento quanto para aquecimento e não tem temperatura crítica; • No caso de armazenamento de água em tambores estes podem ser disfarçados; • Podem ser menores que uma parede de alvenaria equivalente, prevenindo a sensação claustrofóbica de paredes inteiras em alvenaria; • Em grande parte dos casos podem ser aperfeiçoadas de forma fácil e económica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os sistemas de paredes de água apresentam o inconveniente do possível perigo de derrame da água depositada e também do ruído ocasionado pela água ao dilatar sobre as paredes dos depósitos; • A partir dos 15cm de espessura, o incremento da eficácia não é significativo comparado com o sobrecusto e a perda de espaço habitável que implica (MITJÁ, 1986); • Pode ocorrer o congelamento da água e desenvolvimento de fungos, para prevenir tal situação deverá ser acrescentada à água propilo-glicol ou óleos especiais para evitar a corrosão dos recipientes (quando metálicos) (MITJÁ, 1986); • Para permitir a dilatação da água ao aquecer, os recipientes não deverão ser totalmente cheios, recomenda-se que 10% do seu volume total fique vazio. • As perdas térmicas noturnas destes sistemas são usualmente elevadas. O isolamento em paredes de água torna-se complexo e de difícil instalação e manutenção.

Fonte: Adaptado de MENDONÇA, 2004; CARDOSO, 2008 e BAINBRIDGE, 2005.

Na Casa Termicamente Otimizada (CTO) no Campus do INETI no Porto, a massa de água foi colocada em colunas de fibra de vidro, pintadas com cor escura. Estas colunas foram instaladas junto aos vãos, recebendo assim a radiação solar (**Figura 3.42**). O calor resultante da incidência da radiação solar é transmitido por radiação e convecção para o ambiente. Na fase de projeto, admitiu-se que a capacidade de armazenamento poderia ser reforçada com a adição de seis colunas de água pintadas de cor escura (maior coeficiente de absorção da radiação solar) dispostas estrategicamente para aquecerem pela radiação do sol e favorecerem a privacidade; porém verificou-se ser desnecessário este número optando-se por três colunas.



Figura 3.42 Sala, destacando-se a grande área dos vãos e as colunas de água.

Fonte: GONÇALVES et al., 1997.

3.4.8 Estufas

O uso de estufas tem origem no progresso da indústria do vidro plano nos últimos 200 anos. As primeiras estufas surgiram durante a Era Victoriana, no século XIX na Europa. Eram utilizadas principalmente para manter espécies botânicas de várias partes do mundo, e além disso representavam uma forma de demonstrar status na sociedade. Hoje a função da estufa modificou-se e são vários os tipos de materiais que podem ser utilizados para a confecção das estruturas de suporte dos envidraçados, como madeira, metal (ferro, aço inox e alumínio), plásticos (usualmente PVC), betão ou tijolo.

Hoje a implementação de espaços tipo “estufa” ou “solário” junto à habitação tem a função de criar um microclima onde a temperatura é incrementada por influência da radiação solar, sendo o mecanismo que ocasiona este incremento o efeito de estufa.

Destacam-se os seguintes tipos de estufas:

- **Estufa Integrada:** apresenta vantagens, como a redução das perdas térmicas da habitação e da estufa, pela redução da superfície exterior de envidraçado, a facilidade de transferência de calor da estufa para a habitação, pela maior superfície de ligação entre ambas, a possibilidade de construção de habitações mais compactas, com redução de custo (MITJÁ, 1986).
- **Estufa Fechada:** nesse caso os átrios são considerados como estufas integradas, sendo rodeados por todos os lados por compartimentos da casa. Este



tipo de estufa tem aplicação privilegiada em edifícios de poucos pisos e muito horizontais.

- **Estufa Adossada:** partilham uma parede com a casa. Apresentam flexibilidade para a conceção arquitetónica, incluindo o aproveitamento solar passivo em edifícios já existentes, cobertura de terraços ou varandas existentes. Podem ser aplicadas em paredes exteriores transparentes ou opacas, mas geralmente numa combinação das duas.

No desenho de estufas adossadas (situação de ganho indireto) a espaços habitáveis, o calor captado pela estufa pode ser levado diretamente a qualquer lugar da habitação ou ser armazenado para se poder utilizar quando não há radiação solar. Igualmente, as estufas podem servir para reduzir as perdas térmicas das partes contíguas do espaço habitado, atuando como espaço tampão entre o espaço útil interior e o exterior. Tal como nas paredes de trombe, esta solução apresenta, como vantagem sobre o ganho direto, a possibilidade de redução das perdas de calor pelos envidraçados. Um aspeto importante é o isolamento da estufa durante a noite. Deverá ser isolada tanto a superfície vidrada (com um estore que proporcione algum isolamento térmico noturno), como as paredes e vãos de separação entre a estufa e a habitação (MENDONÇA, 2005).

Outro aspeto a ser considerado é a necessidade de massa térmica. Quando a área de envidraçado da estufa é pequena se comparada a área útil do edifício, não se torna necessária massa térmica, sendo o ar quente introduzido na habitação através de aberturas ou por ventilação forçada. Quando a proporção da superfície de vidro captador em relação à área útil da habitação é de 1/6 ou mais, deverá ser incluída massa térmica para reduzir as flutuações de temperatura na estufa. Poderão ser utilizados para este fim uma parede de separação entre a habitação e a estufa de 20 a 30cm de material pesado, um pavimento de estufa de 10 a 15cm de betão ou bidões de água.

Segundo Mendonça (2005) vários aspetos são importantes na conceção de estufas, destaca-se:

- **Orientação:** define a eficácia da captação de energia solar por parte da estufa. A orientação a Sul é sempre a ótima para a estufa adossada, já que neste caso o importante é o incremento dos ganhos na estação fria;
- **Estrutura:** o material empregado e o tipo de estrutura do caixilho influenciam no fator de obstrução do sistema, se torna importante que seja otimizado este, para além do aspeto económico;
- **Material Transparente:** o fator mais importante é o tipo de material transparente utilizado. Deste depende a quantidade de energia transmitida e retida,



em função da seletividade do seu espectro. As suas características fixam a opacidade aos comprimentos de onda larga e, portanto estabelecem a intensidade do efeito de estufa.

Em relação ao funcionamento do sistema, existem duas opções para a posição da porta ou de outros elementos de ligação envidraçados entre a estufa e o compartimento a climatizar, de acordo com as necessidades de aquecimento pontuais:

O sistema “de porta aberta”, no qual 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; e o sistema “de porta fechada”: nesse caso a temperatura no interior da estufa é menor do que no interior da casa, a porta de ligação deverá estar fechada, reduzindo as perdas e, se o céu estiver limpo, ainda poderá ser fornecido algum ganho por radiação direta.

Outros exemplos de ganho isolado são a parede acumuladora com isolamento interior e o sistema Barra-Constantini. A primeira é uma parede opaca que possui um isolamento térmico pelo interior, conseqüentemente o fluxo de calor por condução direcionado ao compartimento é negligenciável. Nesse sistema a energia absorvida é transportada para o compartimento pelo fluxo de ar (convecção), por isso pode ser classificada como um sistema de ganho isolado. O ar entra no espaço através dos orifícios situados na parte inferior dos envidraçados e o ar pré-aquecido entra no compartimento através dos orifícios situados na parte superior da parede opaca. Os ganhos de calor por convecção estão em sincronia com a intensidade da radiação solar.

O sistema Barra-Constantini é baseado em um coletor de ar com a instalação de um material absorvente entre uma parede e um envidraçado, em benefício de uma dupla circulação natural. Durante o inverno, o ar que entra em contacto com o painel absorvente é aquecido e encaminhado naturalmente para cima, circulando através de canais existentes no teto. Parte do calor armazenado pelo envidraçado é absorvido pela parede e transmitido após certo tempo; o restante do calor armazenado é injetado na forma de ar quente, que faz com que o ambiente seja aquecido (IMESSAD et al., 2004).

Nesse sistema pode ser empregada uma parede convencional, de betão, tijolos, entre outros, que também pode ser isolada no exterior. O elemento coletor solar que compõe o sistema é posicionado em frente à parede (por exemplo uma lâmina metálica lisa ou ondulada) coberta por um envidraçado. Com esse sistema de paredes contíguo a um ambiente interno são evitadas as perdas de calor indesejadas no inverno principalmente durante a noite e períodos nublados, e os ganhos de calor no verão são minimizados.



3.5 Sistemas de Fachadas Atuais e Inovadores

A fachada por ser um elemento exterior é um dos aspetos mais importantes do edifício. Nos anos 60 o arquiteto Robert Venturi chegou a afirmar que a fachada é o lugar em que a arquitetura acontece, pois é o elemento que sintetiza as forças internas e externas que atuam em todo projeto (MAHFUZ, 2009).

Até o início do século XX a fachada era parte do sistema de sustentação dos edifícios, o que explica a maior espessura, o número e tamanho das aberturas. Antes do Modernismo era essencialmente um muro com aberturas, com a área das aberturas sempre menor do que a de alvenaria. Com esse aspeto o controle climático das edificações era resolvido parcialmente pela inércia térmica, consequência da sua espessura e do emprego de um único material.

A fachada tradicional foi alterada radicalmente na arquitetura moderna. Nas primeiras décadas do século XX, o emprego da estrutura independente teve como consequência a ampliação das possibilidades de projeto das fachadas. No primeiro momento ocorreu um aumento no tamanho e no número de aberturas, com uma redução dos trechos opacos de alvenaria e o aumento do também do tamanho das aberturas, além da adoção frequente da horizontalidade na sua disposição.

Em seguida houve um aumento no uso de vidro nas fachadas, que em alguns casos passou a ser pouco mais do que uma fina película transparente. Na prática, poucos edifícios adotaram a transparência total, mas esse era um ideal presente em muitos escritos e projetos teóricos do início do século. Porém, com o tempo chegou-se a conclusão de que mesmo em climas frios, uma fachada não pode ser reduzida a uma mera lâmina de vidro, agentes como humidade, frio, calor e excesso de luminosidade logo obrigaram a um aumento de complexidade em relação às primeiras fachadas de vidro modernistas.

No Pós-Modernismo foi proposta a desvinculação entre a fachada e o corpo dos edifícios: o corpo resolveria a função enquanto a fachada seria dedicada ao aspeto simbólico da edificação. Posteriormente com uma preocupação generalizada com a habitabilidade e a sustentabilidade, os arquitetos passaram a criar fachadas mais complexas, compostas de várias camadas e utilizando os mais variados materiais em combinação. A partir daí, a aparência das fachadas e, conseqüentemente, do edifício, passa a ser em grande parte determinada pelo modo como é obtido o sombreamento, a ventilação e o isolamento do espaço interior.

Segundo Mendonça (2005) existe várias classificações possíveis para a pele exterior dos edifícios. Estas classificações abrangem basicamente os aspetos estruturais, as



heterogeneidades/homogeneidades e a opacidade/transparência (**Figura 3.43**). Porém considerando as fachadas atuais podem ser acrescentados outros aspetos como a quantidade de camadas, a existência de elementos ativos ou não incorporados, elementos de produção energética (painéis fotovoltaicos), entre outros.

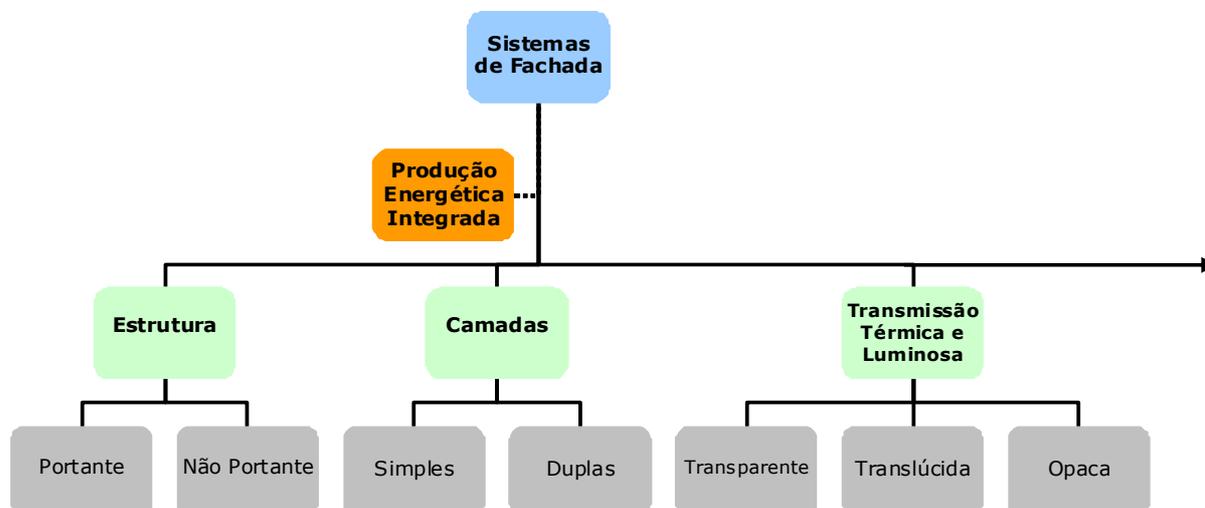


Figura 3.43 Esquema elaborado: Sistemas de Fachada e seus aspetos.

Existe atualmente uma variedade de soluções tecnológicas para fachadas de alta performance. Essas soluções estão baseadas em conceitos fundamentais de física das construções para iluminação natural, ganho e controle de radiação solar, ventilação e condicionamento térmico. Geralmente requisitos como iluminação natural e controlo solar são combinados nessas soluções. Após incrementos tecnológicos que aumentaram o desempenho das fachadas foram ampliadas as possibilidades de design. Observa-se que a evolução das fachadas tem rumo certo: a introdução de requisitos relacionados com o conforto ambiental e a economia de energia, conseqüentemente em direção à sustentabilidade.

Existem no mercado fachadas em diferentes tipos de materiais formadas por painéis que combinam variados tipos de materiais e funções, configuradas pela junção de partes lisas, planas ou curvas, juntas abertas ou fechadas, largas ou estreitas. Nota-se uma tendência, na indústria da construção civil, rumo à utilização de materiais reforçados com fibras, que possibilita a produção de componentes mais leves, com elevado desempenho mecânico e conforto ambiental. Um exemplo nessa linha de materiais compósitos é o painel GRC (*Glassfibre Reinforced Cement*), na designação internacional, no qual fibras de vidro resistentes a álcalis (AR) são adicionadas à matriz cimentícia. O GRC pode conter ainda fillers, pigmentos (É possível aplicar diversas cores e texturas), adições minerais e aditivos (**Figura 5.44**) (SILVA; SILVA, 2004).

Uma alternativa de vedação pré-fabricada, largamente utilizada no exterior para vedação de edifícios altos e de elevado padrão residencial, comercial e industrial é o painel metálico, principalmente o painel sanduíche de aço ou de alumínio. Os painéis são compostos por lâminas metálicas, isolamento térmico e revestimento interno, em configuração sanduíche ou integrada. Geralmente utilizam-se painéis de largura padrão, aparafusados para se obter uma simples montagem. As chapas de aço são as mais utilizadas, devido ao seu menor custo, protegidas por uma cobertura orgânica (PVC) ou pintura à base de fluoropolímeros (**Figura 3.45**) (SILVA; SILVA, 2004).

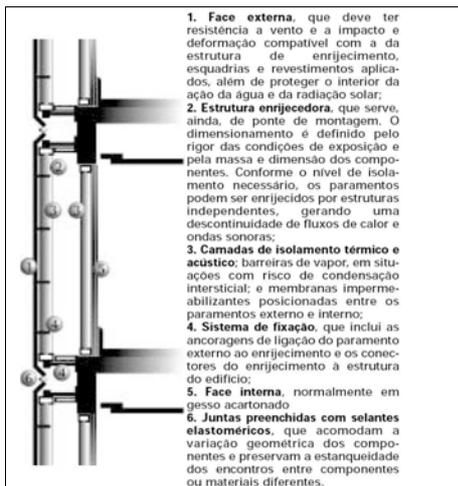


Figura 3.44 Subcomponentes do sistema de vedação dos painéis de GRC mais utilizados.

Fonte: SILVA; SILVA, 2004.

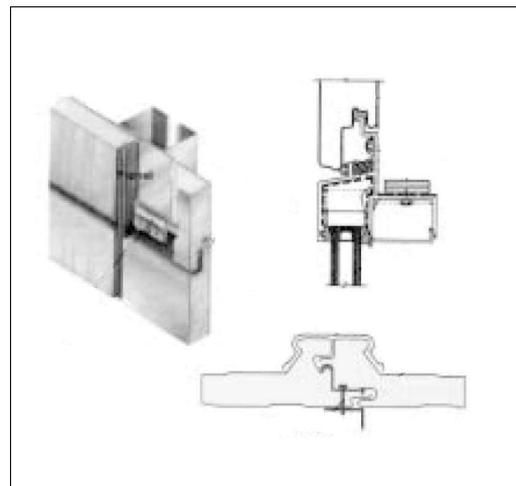


Figura 3.45 Exemplo de painel metálico composto que pode ser utilizado em fachadas.

Fonte: SILVA; SILVA, 2004.

Estes revestimentos são compatíveis com qualquer tipo de suporte: betão, alvenaria ou aço. As **Figuras 3.46** e **3.47** apresentam como exemplo o sistema Caïman que é produzido em chapa de aço inoxidável ou galvanizado pré lacado, de espessura 0,5mm ou 0,75mm e o sistema Mascaret de fachadas, que filtra a luz do dia. As perfurações realizadas por medida criam uma dinâmica visual e uma transparência que iluminam ou filtram o espaço interior de acordo com a hora, tempo e estações do ano. O acabamento perfurado permite uma utilização de quebra-luz vertical ou horizontal.

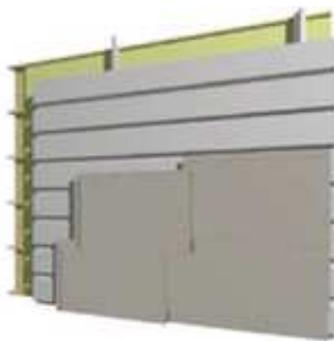


Figura 3.46 Sistema Caïman.
Fonte: ARCELOR MITTAL, 2009.

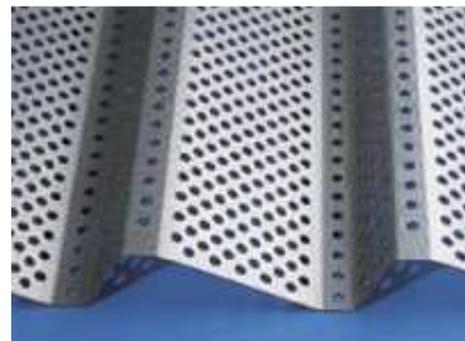


Figura 3.47 Sistema Mascaret.
Fonte: ARCELOR MITTAL, 2009.



Outro tipo de fachada pode ser feito com painéis compostos de alumínio - ACM (*Aluminum Composite Material*). Este tipo de painel foi criado em 1965 na Alemanha pela empresa *Aluisse Composites*. Destinados principalmente ao revestimento de fachadas, entre seus diversos atributos destaca-se sua condição de maleabilidade, característica que dá a esse painel metálico grande facilidade de conformação. Com o material é possível, por exemplo, moldar formas esculturais. Enquanto outros revestimentos costumam refletir o desenho da estrutura, no caso, o painel de alumínio pode, por si, constituir a linguagem da edificação. Uma outra vantagem que os painéis de alumínio trouxeram para o processo construtivo: a agilidade de montagem (**Figuras 3.48 e 3.49**). Etapas diferentes de obra, como a instalação de esquadrias e o revestimento de fachadas, são realizadas simultaneamente uma vez que, na maioria dos casos, o próprio fabricante de esquadrias aplica os painéis de alumínio.

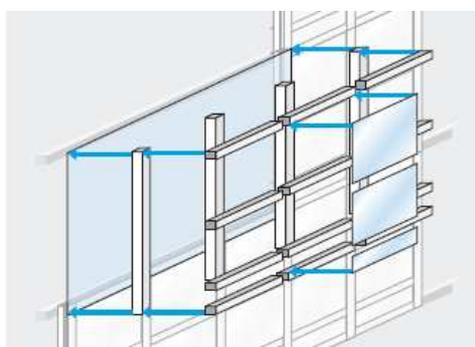


Figura 3.48 Fachada em Alumínio.
Montagem de perfis individuais.
Fonte: SCHÜCO, 2009d.

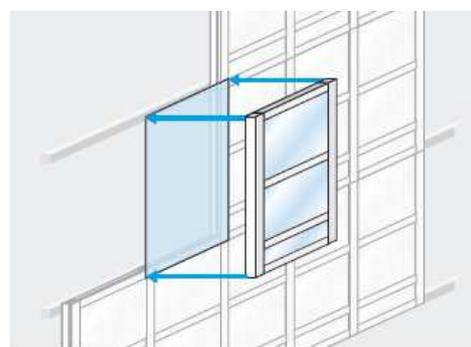


Figura 3.49 Fachada em Alumínio.
Montagem de elementos modulares.
Fonte: SCHÜCO, 2009d.

Durante a fase de projeto, deve-se prever como se comportarão as superfícies em termos de retenção de sujidades transportadas pelo ar - superfícies horizontais e inclinadas acumulam maior quantidade. Também deve-se permitir que a chuva se comporte como um agente de limpeza, orientando o caminho das águas de maneira a concentrar e drenar, ao invés de permitir que escorra e seque sobre os painéis. Deve-se também prever formas de acesso periódico que não danifiquem os painéis.

Além da forma de painéis, existem no mercado sistemas completos de perfis de alumínio (**Figura 3.50 e 3.51**) com os mais diferentes aspetos para fachadas: duplas, com janelas de variadas formas de abertura; sistemas de proteção solar fixos e móveis; controlo tecnológico inovador de fachadas; proteção contra incêndios e fumo; desenho variado e uma ampla gama de revestimentos de alumínio (SCHÜCO, 2009d).

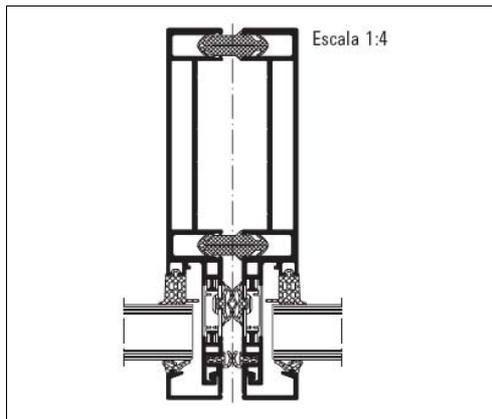


Figura 3.50 Secção vertical dos módulos de fachada em alumínio.
Fonte: SCHÜCO, 2009d.

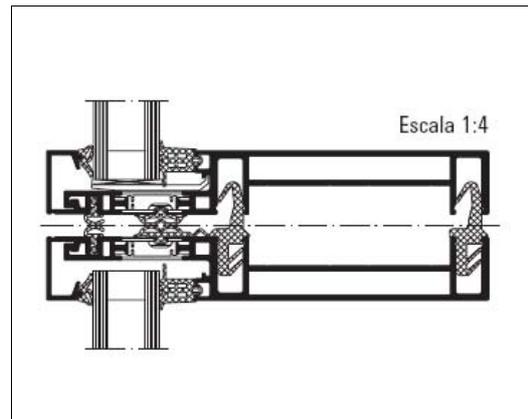


Figura 3.51 Secção horizontal.
Fonte: SCHÜCO, 2009d.

Existe uma série de opções para os sistemas de fachada em alumínio que incluem: isolamento térmico, alto isolamento térmico, fachada cortina, fachada com janelas, fachada não ventilada, fachada ventilada, fachada pele de vidro, fachadas com variados tipos de esquadrias (paralela projetante, projetante deslizante, portas); painel de isolamento térmico, painel antifogo, lâminas grandes de proteção solar e módulos fotovoltaicos (SCHÜCO, 2009c) (**Figura 3.52**).



a. Fachada com isolamento Térmico.



b. Fachada com alto isolamento térmico.



c. Fachada cortina



d. Fachada com janelas e detalhe do perfil.



e. Fachada de alumínio com reforço em aço.



f. Fachada pele de vidro e detalhe do perfil.



g. Fachada com proteção contra o fogo.



h. Fachada com proteção solar



i. Fachada com proteção solar e detalhe das palas.



j. Fachada com Fotovoltaicos.

Figura 3.52 a-j Sistemas de Fachada Modular em Alumínio.

Fonte: SCHÜCO, 2009c.

Existem também outras opções de sistemas, que possuem modulação com opções além do tradicional, que incluem a possibilidade de uso de envidraçados simples, duplos ou triplos; uso de painéis isolantes; iluminação natural; integração de portas e janelas corredeiras, além de painéis de enchimento (**Figuras 3.53 e 3.54**) (TECHNAL, 2009).



Figura 3.53 Fachada modular em alumínio.
Fonte: TECHNAL, 2009.

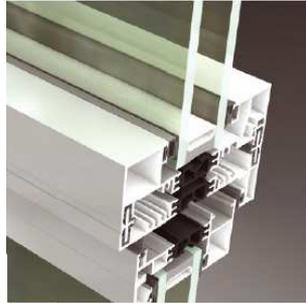
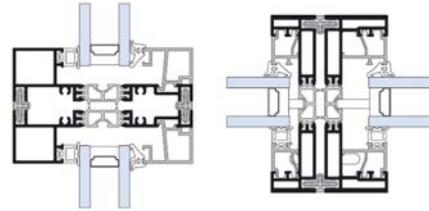


Figura 3.54 Detalhe dos Perfis a; desenho b.
Fonte: TECHNAL, 2009.



b

Alguns tipos de painéis e perfis de fachada possibilitam flexibilidade nos projetos. Os painéis nesse caso têm a vantagem de serem adaptados tanto para novos edifícios quanto para reabilitação de edifícios existentes. Podem ser encontrados com opções de revestimento em alumínio e em aço inoxidável com variadas cores que apresentam resultados tanto em termos de estética quanto para auxiliar na durabilidade. As opções de perfis, isolamento e cores se adaptam a diferentes tipos de projeto (**Figuras 3.55 a 3.57**) (CORUS, 2009a).



Figura 3.55 Detalhe de um tipo de Painel ventilado que permite escoamento de água.
Fonte: CORUS, 2009a.



Figura 3.56 Aplicação dos painéis.
Fonte: CORUS, 2009a.



Figura 3.57 Sistema Kalzip.
Fonte: CORUS, 2009b.

Em PVC (Policloreto de Vinilo) existe no mercado principalmente sistemas de portas e janelas para compor as fachadas e alguns sistemas de fachada. Existem opções variadas de cores, e possibilidade de montagem de janelas com 2 a 4 folhas. Esses sistemas em PVC tanto de esquadria quanto os sistemas de fachadas oferecem isolamento térmico adequado (**Figura 3.57 e 3.59**).



Figura 3.58 Exemplos de opções de cores das esquadrias e fachadas.

Fonte: SCHÜCO, 2009b.



Figura 3.59 Sistema de fachada em PVC a e detalhe do perfil b.

Fonte: SCHÜCO, 2009a.

Além disso o PVC também está a ser utilizado para a montagem de sistemas de fachadas completas, como é o caso do sistema “Betão/PVC”, desenvolvido no Canadá. Esse sistema construtivo é constituído por perfis leves e modulares de PVC, de simples encaixe e preenchido com betão e aço, com isso ganha-se alta produtividade, uma construção rápida e limpa, evitando desperdícios e reduz o impacto, além do PVC ser um produto reciclável (**Figura 3.60**) (BRASKEM, 2009).



Figura 3.60 Habitação com as fachadas construídas em PVC preenchido com betão e aço.

Fonte: BRASKEM, 2009.

Nas últimas décadas, os conceitos de construção de fachadas passaram por uma verdadeira revolução tecnológica, proporcionando a conceção de envolventes com as mais diversas funções. Essa evolução mostra como a indústria da construção responde tecnicamente às solicitações cada vez mais criativas dos projetos arquitetónicos. Pele de vidro, *structural glazing*, módulos *unitized*, fachada suspensa e fachada ventilada são alguns



dos exemplos que expressam a evolução tecnológica dos sistemas de fechamento vertical das edificações.

Para o desenvolvimento de elementos destinados à envolvente dos edifícios, devem ser considerados diferentes aspetos durante o processo de projeto, entre eles: o design arquitetónico, a construção, a instalação, além dos aspetos financeiros. Muitas vezes a importância dos aspetos económicos e do planeamento do processo de projeto é menosprezada, porém toda ideia deve ter sua a viabilidade provada para ser executada na prática.

A procura de tecnologias construtivas mais sustentáveis tem levado também ao aparecimento de soluções leves e com maior grau de industrialização. De forma geral, sistemas leves implicam pré-fabricação conduzindo a um processo de construção mais eficiente e racionalizado, a uma maior rapidez de construção e à minimização dos riscos e prejuízos da obra; além de possibilitar a aplicação em todo o tipo de edifícios, seja para soluções de reabilitação ou edifícios novos.

O uso de tecnologias leves, em comparação com as tecnologias convencionais implica num maior grau de industrialização do processo construtivo, pois está associada à utilização mais racional de recursos, materiais e mão-de-obra. Elementos com baixa massa e componentes de menores dimensões tornam-se adequados a locais em que a distância de transporte dos materiais e componentes de construção é elevada.

Nos recentes desenvolvimentos na área de fachadas observa-se a integração de diversas funções. Como a fachada define o potencial do edifício mais do que qualquer elemento, deveria ser flexível como tal. Essa flexibilidade poderia ser alcançada de várias formas, por exemplo, em termos de técnicas, implementação de soluções com elementos móveis, substituíveis e intercambiáveis. Têm sido desenvolvidas atualmente fachadas com uma série de opções integradas. São compostas por vidros fixos ou móveis, janelas especiais e sistema de HVAC descentralizados. No desenvolvimento desses sistemas, especialistas em adequação climática e HVAC participam na conceção, de forma a promover uma alta eficiência em termos de arrefecimento e aquecimento, principalmente para a aplicação em edifícios de serviços.

O projeto de fachadas é um processo de criação feito com o foco no edifício. Os passos seguidos podem ser definidos em fases específicas: conceção inicial, definição de funcionalidades, design, implementação, coordenação e montagem. Um processo necessário deve ocorrer durante todas as fases: retroalimentação global do design e definição de funcionalidades assim como a importância dos elementos dentro da estrutura



total do edifício (estrutura, sistemas das instalações, uso, segurança) (KNAACK et al., 2007).

O termo, por exemplo, do inglês *Advanced Integrated Façades* (AIF) (Fachadas Integradas Avançadas) refere-se a uma camada exterior do edifício que contribui em termos de aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação natural, além de promover conforto e economia energética. Esse tipo de fachada deve ser feito com o uso de recursos naturais renováveis, resultando num design inteligente. O conceito de design integrado representa uma mudança de envolvente estática para uma envolvente com comportamento dinâmico. A fachada torna-se capaz de se adaptar as mudanças climáticas exteriores de forma a alcançar as condições de conforto interior e reduzir o consumo energético (ASCHEHOUG; ANDERSEN, 2008).

Esse tipo de fachada recebe alguns tipos de classificação tendo como base a classificação utilizada para a fachada de dupla pele. A classificação mais comum considera o tipo de ventilação, a trajetória do fluxo de ar e a configuração do sistema como principais itens. A direção do fluxo de ar através da cavidade define o tipo de ventilação, que pode ser: ventilação natural (VN), ventilação mecânica (VM) ou ventilação híbrida (VH), esta última utiliza ambos os tipos de ventilação natural e mecânica.

A trajetória do fluxo de ar é um assunto de grande importância associado com a integração da fachada no edifício e nos demais sistemas. São apresentados alguns arranjos possíveis na **Figura 3.61**. Fachada com Descarga de Ar (DA), Fachada com suprimento de ar (SA), fachada com fluxo de ar reversível (FAR), fachada com cortina de ar exterior (CAE) e fachada com cortina de ar interior (CAI).

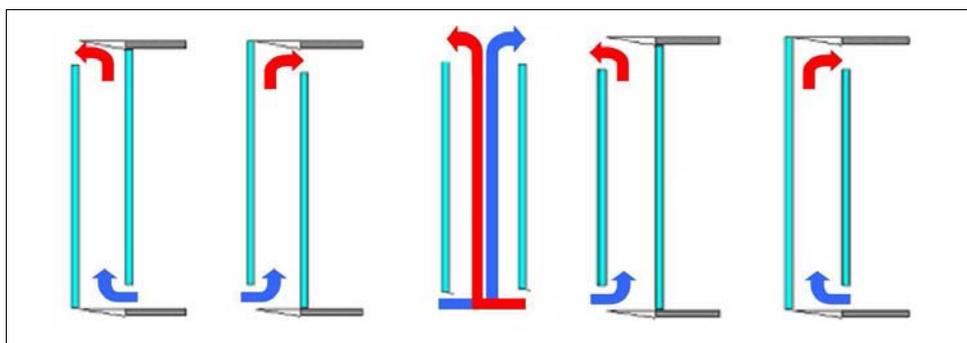


Figura 3.61 Fachadas Integradas avançadas trajetória do fluxo de ar. DA; SA; FAR; CAE; CAI.

Fonte: ASCHEHOUG; ANDERSEN (2008).

As “*Advanced Integrated Façades*” (AIF) podem apresentar as seguintes configurações (ASCHEHOUG; ANDERSEN, 2008):

- *Climate wall* (CW): se caracteriza por apresentar um pano de vidro duplo exterior e um pano de vidro simples ou uma fachada cortina no interior. Possui uma conexão da ventilação mecânica com o sistema de ventilação do edifício e um pequeno espaço (em torno de 10mm), posicionado abaixo do pano interior que permite que o ar escoe para o interior da cavidade. Essa disposição é similar a box window
- *Buffer* (BF): possui um espaço de ar que atua como um armazenador térmico.
- *Box window* (BW): A fachada de dupla pele é dividida verticalmente e horizontalmente formando uma “caixa”.
- *Shaft box* (SB): Esse tipo de fachada tem configuração similar à fachada box window, exceto pelo facto da shaft box SB libertar descargas de ar por uma cavidade posicionada na lateral no sentido das alturas da fachada.
- *Corridor* (C): A fachada dupla pele é dividida horizontalmente formando um corredor ao nível do pavimento. Aberturas de saída e entrada são posicionadas na passagem que mistura descarga e suprimento de ar
- *Multi-storey* (MS): Esse sistema de fachada não possui cavidades separadas. Podem ser incorporados no sistema elementos de proteção solar no exterior da fachada.
- *Swindow* (SW): É um tipo de abertura desenvolvida com o propósito de auxiliar na ventilação natural e integrar sistemas de HVAC. A configuração básica consiste numa janela horizontal articulada sobre a meia altura. Quando aberta, a altura da janela é equilibrada com um contrapeso posicionado no topo da janela

Esses sistemas de fachadas inovadores podem apresentar algumas desvantagens, por exemplo, em relação à compatibilidade com janelas operáveis e pelo grande número de pontos de manutenção (EBBERT; KNAACK, 2008). Podem ser citados, como exemplo dois tipos de sistemas de fachadas modernos, a Fachada Temotion e a Fachada Capricorn.

O edifício *Capricorn Düsseldorf* (**Figura 3.62**) é composto por uma fachada com componentes ativos e foi desenvolvida pelas empresas Trox e Schüco. O design da fachada inclui componentes transparentes e opacos, que combinam visibilidade, entrada de luz natural e redução de ganhos solares, se comparados com as tradicionais fachadas cortinas, incorpora tecnologia e equipamentos para regular o clima interior (**Figuras 3.63 e 3.64**).



Figura 3.62 Capricorn Haus, Düsseldorf.
Fonte: FSL, 2010.



Figura 3.63 Fachada Capricorn.
Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2009.

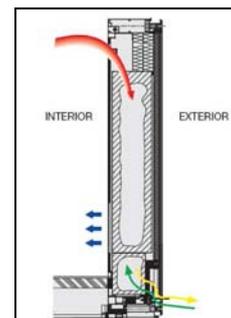


Figura 3.64 Detalhe da Secção da Fachada.
Fonte: FSL, 2010

A companhia Wicono-Hydro, a *Fachhochschule Biberach*, e a Universidade de Dortmund desenvolveram a fachada *Temotion* (**Figura 3.65**) que inclui um número significativo de funções, como a otimização do controle energético, ajuste automático de necessidades em termos de aquecimento e arrefecimento além de ventilação natural e mecânica. Existem também na fachada componentes para proteção contra radiação em excesso e encadeamento, que permitem regular a intensidade de iluminação natural e artificial (CASTRILLÓN, 2009). Além disso, possibilita variados tipos de configuração (**Figura 3.66**).

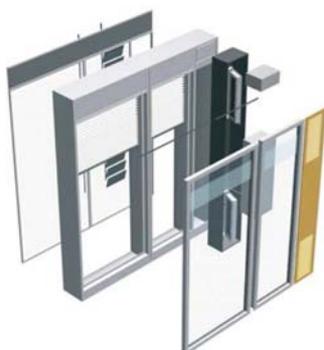


Figura 3.65 Fachada Temotion.
Fonte: WICONA PRODUCTOS Y REFERENCIAS, 2009.



Figura 3.66 Arranjos possíveis da Fachada Temotion.
Fonte: WICONA PRODUCTOS Y REFERENCIAS, 2009.

A característica principal é a integração de um elemento vertical operável na fachada que permite ventilação natural e inclui um espaço para instalação do equipamento que provê aquecimento e ventilação mecânica quando necessário. O componente de janela é separado do sistema de ventilação, permitindo a entrada direta de ar novo. Inclui características adicionais que são a reflexão da luz natural e a integração de iluminação artificial no módulo.

Todos os sistemas de fachada deveriam ser projetados e equipados com unidades de instalação completas em dimensões minimizadas. Para a reabilitação em especial, isso deveria ser levado em conta. Estudos de caso realizados sob o âmbito do projeto “Sistemas

de fachada para reabilitação”, realizados pela Universidade de Delft, no qual um dos objetivos foi renovar o conceito de fachada de forma que fosse adequada para diferentes tipos de edifícios.

Foi realizado um estudo sobre uma fachada composta por quatro componentes (**Figura 3.67**), uma balaustrada opaca, um envidraçado fixo, uma janela operável, elementos de conexão vertical e um espaço integrado para instalações. Trata-se de uma fachada ventilada, a qual pode ser revestida com diferentes tipos materiais como painéis de madeira, metal, pedras etc. Além disso, a vantagem de ser uma fachada ventilada está na flexibilidade de composição do isolamento, além da proteção solar no verão devido ao sombreamento. A estrutura é montada pelo exterior, com a mínima interferência no interior; esse sistema de fachadas pode ser ajustado para diferentes modulações, tanto na horizontal quanto na vertical. A proteção solar ajustável instalada no exterior da fachada e as janelas operáveis contribuem para a economia de energia (EBBERT; KNAACK, 2008).

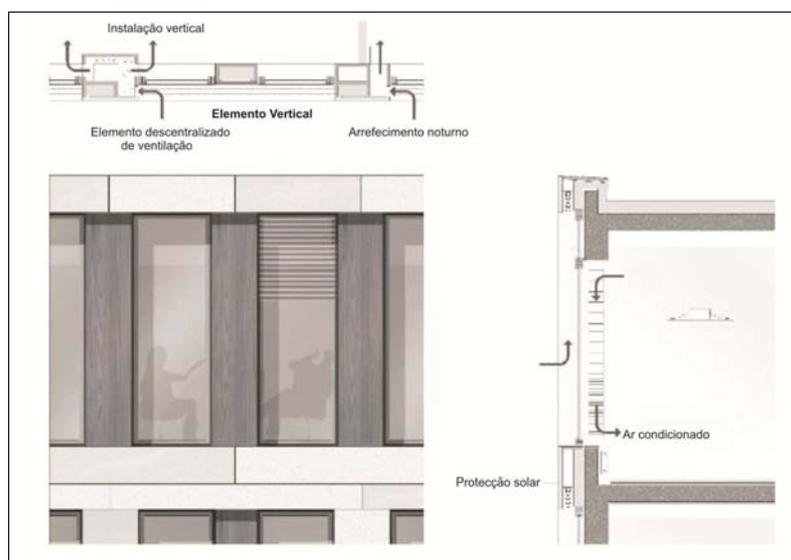


Figura 3.67 Ideia de uma fachada aprimorada para reabilitação.

Fonte: EBBERT; KNAACK, 2008.

Outro exemplo para utilização em fachadas é um sistema fixo que consiste em grelhas igualmente espaçadas, com três faces reflexivas em três dimensões fixadas dentro de uma placa de vidro duplo (**Figura 3.68**). Esse componente possibilita a difusão da luz natural uniformemente no interior da edificação e tem efeito de proteção solar variável com as mudanças sazonais, ou seja, admitem uma quantidade de luz direta e energia solar de acordo com a elevação do sol no céu, permitindo que o desempenho do edifício responda conforme a hora e a estação do ano (IEA, 2000).



Cada grelha tem superfícies côncavas e convexas que asseguram que toda luz refletida seja difundida, minimizando o efeito “espelho” quando vista externamente. Vista internamente (**Figura 3.69**), a aparência das grelhas é mais ou menos pronunciada, dependendo do ângulo e da distância em que se encontra o observador. As unidades do componente contêm duas folhas de vidro separadas por um caixilho-espaçador de alumínio em toda a extensão de seu perímetro que abriga o painel da grelha. A especificação do vidro depende das exigências de cada projeto. Entretanto, sendo necessário, no vidro externo pode ser incorporado um revestimento de controlo do sol com baixa transmitância solar (como películas, por exemplo).



Figura 3.68 O componente para fachadas.

Fonte: IEA, 2000.

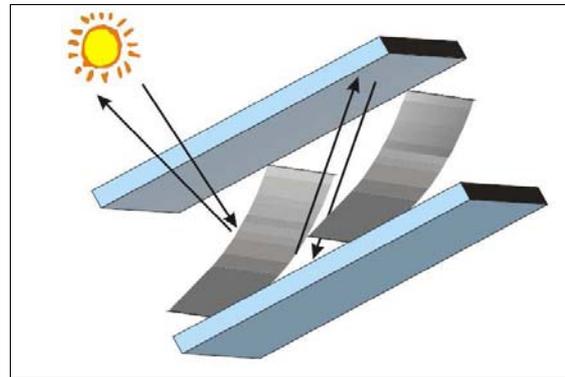


Figura 3.69 Detalhe da grelha dos componentes.

Fonte: OKALUX, 2009.

Outra variante inclui os painéis prismáticos para fachadas que são placas finas de acrílico transparente, de um lado lisas e de outro, recortadas em ziguezague. Controlam a luz transmitida por meio da refração. A direção da luz é redirecionada com a passagem pelo prisma ou vidro recortado de forma triangular. Normalmente, o sistema prismático que redireciona a luz para o teto consiste em duas folhas de prismas com as faces recortadas viradas para dentro, a fim de evitar acúmulo de poeira (**Figuras 3.70 e 3.71**).

Quando usadas para o sombreamento transformam a luz solar direta e transmitem a difusa. Consiste numa sequência de prismas acrílicos, onde existem dois ângulos que provocam a refração, muitas vezes, são inseridos entre dois vidros para eliminar a manutenção. Podem ser aplicados de diferentes maneiras, fixos ou móveis, nas aberturas laterais ou zenitais. São transparentes, porém distorcem a visão do exterior.

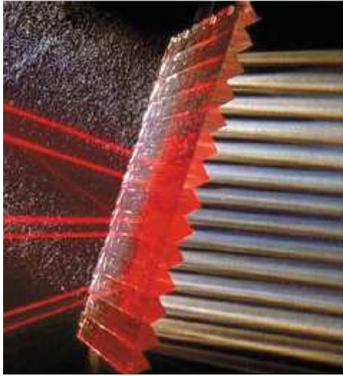


Figura 3.70 Painéis prismáticos para fachadas.
Fonte: LBNL, 2010a.

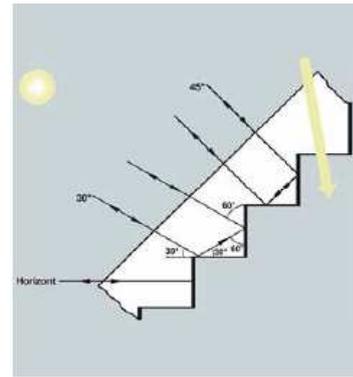


Figura 3.71 Detalhes da angulação dos painéis prismáticos.
Fonte: LBNL, 2010a.

Outros exemplos, como fachada do edifício Power (2005) localizado em Osaka no Japão contribui com uma economia energética em torno de 30%. Na "Eco-estrutura", colunas e vigas sobressaem cerca de 1,8m a partir da superfície de janela, o que contribui para bloquear a radiação solar das 10:00h a 14:00h, importante para promover o arrefecimento no período de verão. O uso de vidro *low-e* bloqueia a radiação solar direta e promove isolamento. O tipo de abertura da fachada reduz o fluxo de calor em direção ao exterior. Por meio desta tecnologia, as necessidades de arrefecimento são reduzidas em cerca de 2/3 (**Figuras 3.72 e 3.73**) (ASCHEHOUG; ANDERSEN, 2008).



Figura 3.72 Edifício Power, Osaka – Japão, 2005.
Fonte: ASCHEHOUG; ANDERSEN (2008).

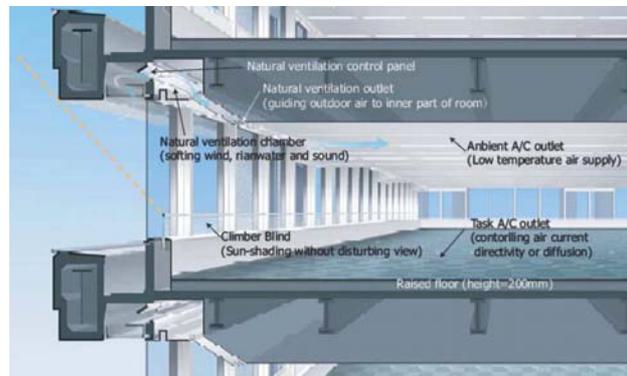


Figura 3.73 Detalhe da Fachada do Edifício.
Fonte: ASCHEHOUG; ANDERSEN, 2008.

Outro exemplo é a fachada do edifício *Nikken Sekkei Tokyo*, em Tóquio no Japão (2003) (**Figura 3.74**) que apresentou uma redução do consumo energético de 50% com a implementação de alguns elementos. O sistema utilizado no edifício combina estores venezianos eletrônicos instalados no exterior e uma camada dupla de vidro elétrico aquecedor. Ambos os elementos são controlados automaticamente por um sistema aberto de redes (**Figura 3.75**) (ASCHEHOUG; ANDERSEN, 2008).



Figura 3.74 Edifício Nikken Sekkei Tokyo (2003).

Fonte: ASCHEHOUG; ANDERSEN (2008).

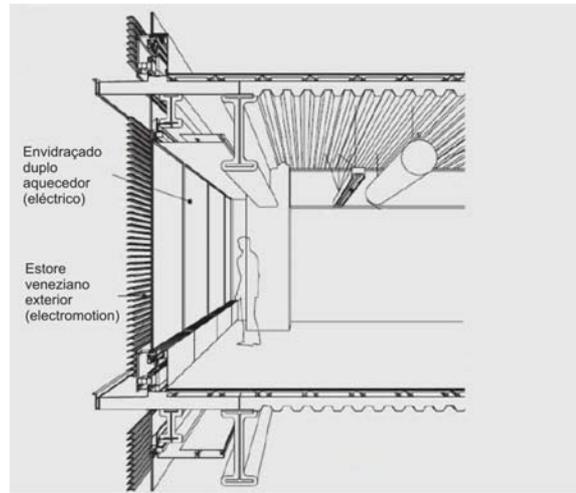


Figura 3.75 Detalhe da fachada do edifício.

Fonte: Adaptado de ASCHEHOUG; ANDERSEN, (2008).

O arrefecimento evaporativo é um dos sistemas normalmente usados no Japão no verão, principalmente em coberturas. Um material foto catalisador de dióxido de titânio (TiO_2) destinado a tal fim está sendo desenvolvido na área de ciência dos materiais no Japão. Esse material ao receber vaporização de água sobre sua superfície absorve a radiação ultravioleta. Com a aplicação deste material em paredes e envidraçados é possível fazer de forma eficiente a vaporização da água na superfície exterior para reduzir o ganho de calor proveniente da radiação solar através envolvente durante o verão. Foi construído um edifício de teste na Universidade de Ciências de Tóquio (**Figura 3.76**) para avaliar a eficiência de tal sistema. A superfície exterior das paredes e envidraçados recebe vaporização de água a partir de um sistema instalado no edifício (**Figura 3.77**). Resultados indicam uma diminuição de 5 a 10°C na temperatura da superfície do painel e também uma diminuição significativa da temperatura interior de 34°C para 28°C (ASCHEHOUG; ANDERSEN, 2008).



Figura 3.76 Edifício de testes com fachada revestida com material foto catalisador, Noda-shi, Chiba, Japão (2004).

Fonte: ASCHEHOUG; ANDERSEN (2008).

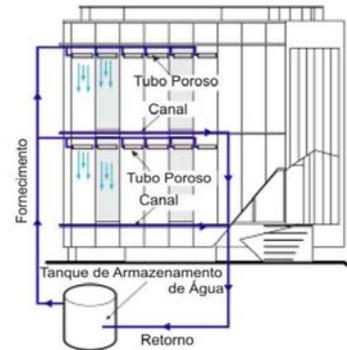


Figura 3.77 Esquema - Funcionamento do sistema de vaporização de água na fachada.

Fonte: Adaptado de ASCHEHOUG; ANDERSEN (2008).

Outro exemplo de iniciativas na área de fachadas é o projeto *Annex 50 Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings* (ANNEX 50, 2010). Os objetivos do projeto são o desenvolvimento e a demonstração de um conceito de reabilitação inovadora de toda a construção tendo como foco principal blocos de apartamentos típicos que representam aproximadamente 40% do parque habitacional Europeu. O desenvolvimento de tais sistemas será baseado em: Sistemas pré-fabricados com HVAC, telhado, água quente e sistemas solares integrados; com envolvente isolada e sistemas de distribuição de aquecimento, refrigeração e ventilação.

O projeto concentra-se: na minimização do consumo de energia primária (no intervalo de 30-50kWh/m².ano para aquecimento, arrefecimento e água quente, por área bruta andar); otimizar a integração da utilização da energia solar, aumentando o conforto além de um melhor uso do espaço; Garantir o bom conforto térmico, acústico, boa qualidade do ar interior e de iluminação natural. Os países participantes são a Áustria, Republica Tcheca, França, Bélgica, Portugal, Suécia, Noruega e Suíça.

Apresenta-se a seguir a proposta da Áustria para o Annex 50, que está em estágio avançado desenvolvimento. A **Figura 3.78** apresenta os resultados de reabilitação de um bairro social com 204 apartamentos em *Graz-Liebenau (Dieselweg)* na Áustria (1950). O resultado demonstrou o potencial da solução em termos técnicos, logístico e social. Foi realizada a reabilitação de todo o revestimento exterior (10.400m²), além de inserir energia solar e unidades descentralizadas de ventilação (GAP SOLUTION, 2009).

Algumas vantagens do sistema de fachadas austríaco: rapidez de execução, por ser um sistema pré-fabricado; não há necessidade de deslocar os moradores do edifício; o



sistema de fachada existente permanece inalterado; são eliminadas as pontes térmicas; além de vantagens por utilizar materiais renováveis (**Figura 3.79**) (GAP SOLUTION, 2009).



Figura 3.78 Graz-Liebenau (Dieselweg) na Áustria (1950), antes (esquerda) e depois (direita) da reabilitação.

Fonte: GAP Solution, 2009.

Figura 3.79 Detalhe do Painel.

Fonte: GAP SOLUTION, 2009.

Na Europa, a fachada fotovoltaica também está entre as soluções utilizadas para ganhos em eficiência energética e desempenho ambiental das edificações. Existe essa tendência, já que mais do que envolver o edifício, esse tipo de fachada aproveita a radiação solar como energia, contribuindo para o melhor desempenho energético-ambiental das edificações. Um exemplo disso são algumas empresas (BASF, Bosch, Merck e Schott) que tem trabalhado com o apoio dos governos para incrementar o uso desse tipo de sistema em grandes áreas e desenvolver em grande escala, até 2015, películas transparentes e flexíveis, capazes de transformar luz em energia. A ideia é obter materiais que, diferentemente das rígidas células fotovoltaicas atuais possa ser curvado, enrolado e conformado e tenha alta performance. Em alguns casos os painéis fotovoltaicos substituem os envidraçados das fachadas, os dispositivos de proteção solar e outros elementos dos edifícios, como é detalhado nos exemplos de utilização apresentados no **Quadro 3.17**.

Quadro 3.17 Soluções de Fachadas com Fotovoltaicos

Soluções de Fachadas com Fotovoltaicos			
Exemplo	Posição dos PVs	Tipo de Sistema	Características
	Vertical	Fachada cortina	É o mais utilizado, principalmente por ter menor custo. Os painéis podem ser utilizados em conjunto com materiais opacos e semitransparentes na fachada.
	Vertical	Proteção contra chuva	Esse tipo de fachada incorpora uma abertura para ventilação, na qual a vantagem é a liberação do calor. Esse mesmo espaço pode ser usado para passagem de cabos e instalações.
	Vertical e inclinado	Envidraçado ou Proteção contra chuva	Para esse tipo de utilização a eficiência dos painéis é melhorada, porém existe uma maior complexidade na execução da fachada. Os elementos podem funcionar como sombreadores, porém os painéis não devem ser sobrepostos.
	Inclinado	Envidraçado	É a solução mais aprimorada e permite uma maior eficiência quando comparado a painéis na posição vertical.
	Proteção solar fixa	Envidraçado	Pode ser interessante em termos arquitetônicos, porém confere uma perda da iluminação natural.
	Proteção solar móvel	Envidraçado	Também proporciona um aspecto interessante em termos de estética, mas pode propiciar uma diminuição da iluminação natural como no uso dos painéis como proteção fixa. O desempenho é superior se comparado a todos os sistemas fixos.

Fonte: Elaborado a partir de THOMAS & GRAINGER, 1999.

O uso de painéis fotovoltaicos em fachadas surge como uma solução alternativa ao consumo de energias fósseis e podem contribuir para a estética do edifício, de acordo com a configuração planejada para o arranjo dos painéis e com as características arquitetônicas que se pretende utilizar no edifício. São três os principais tipos de células fotovoltaicas que podem ser utilizadas em fachadas: as células de silício monocristalinas, as células de silício policristalinas e as células de silício amorfo, também conhecidas como filmes finos. Neste sentido, como neste trabalho de investigação pretende-se desenvolver um módulo fotovoltaico, serão apresentadas as principais características de cada um destes tipos de células fotovoltaicas.



As células monocristalinas são as mais usadas na composição das células fotovoltaicas, atingindo cerca de 60% do mercado. A uniformidade da estrutura molecular resultante da utilização de um cristal único é ideal para potenciar o efeito fotovoltaico. As células monocristalinas foram as primeiras a ser elaboradas a partir de um bloco de silício cristalizado num único cristal. Apresentam-se sob a forma de placas redondas, quadradas ou pseudo quadradas. Porém, apresentam preço elevado e elevado período de retorno de investimento (**Figura 3.80**) (ALTENER, 2004).

O silício policristalino, constituído por um número muito elevado de pequenos cristais da espessura de um cabelo humano, dispõe de uma quota de mercado de cerca de 30%. As descontinuidades da estrutura molecular dificultam o movimento de eletrões e encorajam a recombinação com as lacunas, o que reduz a potência de saída. O processo de fabricação é mais barato do que o do silício cristalino (**Figura 3.81**) (ALTENER, 2004).

As células amorfas (*thin film*) são compostas por um suporte de vidro ou de outra matéria sintética, na qual é deposta uma camada fina de silício (a organização dos átomos já não é regular como num cristal). O rendimento deste tipo de células é mais baixo do que nas células cristalinas, mas mesmo assim, a corrente produzida é razoável. A sua gama de aplicações são os pequenos produtos de consumo como relógios, calculadoras, mas podem também ser utilizadas em instalações solares. Apresentam como vantagem o facto de reagirem melhor à luz difusa e à luz fluorescente e, portanto, apresentarem melhores desempenhos a temperaturas elevadas (**Figura 3.82**) (FREITAS, 2008).

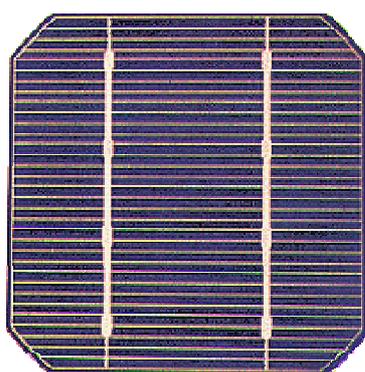


Figura 3.80 Célula Monocristalina.
Fonte: FREITAS, 2008.

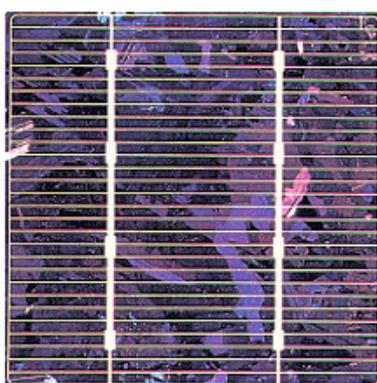


Figura 3.81 Célula Policristalina.
Fonte: FREITAS, 2008.



Figura 3.82 Célula Amorfa.
Fonte: FREITAS, 2008.

A **Tabela 3.3** apresenta os rendimentos típicos e teóricos obtidos com cada uma destas tecnologias apresentadas anteriormente e outras menos utilizadas.

**Tabela 3.3** Máxima Eficiência Fotovoltaica por Tecnologia.

Material da Célula	Eficiência da Célula η_z (Laboratório)	Eficiência da Célula η_z (Produção)	Eficiência da Célula η_M (Produção em Série)
Silício Monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício Policristalino	19,8%	15%	13%
Células de silício policristalino EFG	19,7%	14%	13%
Silício cristalino de película fina	19,2%	9,5%	7,9%
Silício amorfo*	13%	10,5%	7,5%
Silício micromorfo*	12%	10,7%	9,1%
Célula solar híbrida HCl	20,1%	17,3%	15,2%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
Telurieto de Cádmio	16,4%	10%	9%
Semicondutor III-V	35,8% **	27,4%	27%
Célula sensibilizadas com colorante	12,0%	7%	5% ***

* No estado estável.

** Medida com um fluxo concentrado de radiação.

*** Séries de produção limitada.

Fonte: ALTENER, 2004.

Existe atualmente uma série de ferramentas computacionais que permitem maiores estudos sobre o uso de painéis fotovoltaicos. Num estudo realizado por Gonçalves (2011) foram comparados resultados de rendimento da geração energética de simulações computacionais realizadas em dois softwares (Solterm e Sunny Design) e os dados obtidos em casos de estudo de edifícios Portugueses que utilizam esse tipo de sistema. Ao comparar as simulações computacionais realizados no software Português Solterm com casos de estudo realizados para o edifício Solar XXI e Natura Towers em Lisboa, verificou-se que se obtêm valores muito próximos da realidade. Observou-se nos resultados do Solterm, uma geração energética 8% inferior ao caso real para o edifício Solar XXI e 14% superior para o caso do edifício Natura Towers (GONÇALVES, 2011). É previsível uma discrepância entre as simulações e a realidade, porém, este tipo de ferramenta está cada vez mais próxima do real, o que indica que pode ser utilizada para estimativa de desempenho de geração energética para sistemas fotovoltaicos de fachadas.

A literatura da especialidade reporta que o plano inclinado fixo dos painéis fotovoltaicos, maximiza a radiação solar absorvida e deve ter uma inclinação aproximadamente igual à latitude do local. Deve também notar-se que no hemisfério norte os conversores fotovoltaicos devem ser orientados a sul. Recentemente se deu início a comercialização os primeiros sistemas de controlo da inclinação dos painéis de modo a



seguirem a posição do sol ao longo do dia. Estima-se que o ganho de produção anual seja da ordem de 20%, o qual é, no entanto, conseguido à custa de um aumento do investimento (CASTRO, 2011).

A disseminação da tecnologia de captação de energia solar para produção de energia elétrica constitui o panorama atual de desenvolvimento do conhecimento de tecnologias de produção de energia renovável. Além dos sistemas convencionais apresentados pode-se citar um exemplo recentemente divulgado, referente a um sistema que permite aumentar em 20% a eficiência de um painel fotovoltaico. Trata-se de um protótipo que adota o padrão espiral, baseando-se na sequência de Fibonacci, aproximando-se no seu formato, de elementos presentes na natureza como folhas e árvores (Figuras 3.83 e 3.84) (AIDAN, 2011).

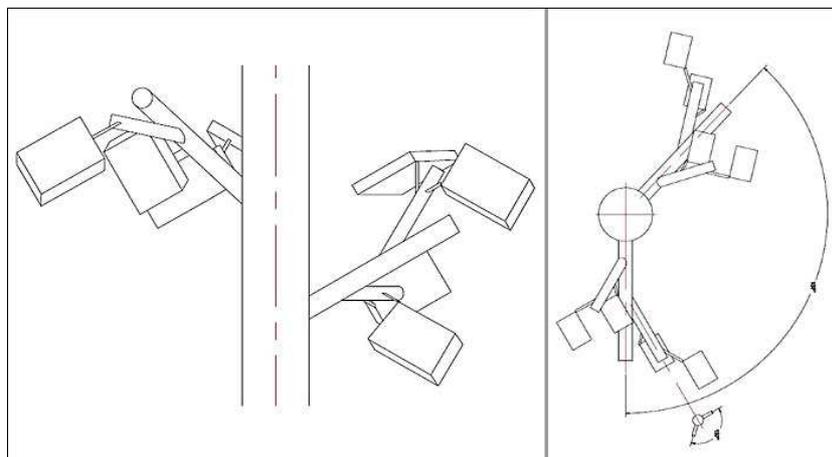


Figura 3.83 Esquema do painel em formato de árvore.
Fonte: AIDAN, 2011.



Figura 3.84 O protótipo em testes para coletar a radiação solar.
Fonte: AIDAN, 2011.

Nas novas tecnologias de fachadas, o futuro prevê o uso de materiais que possam desempenhar vários papéis. Os novos elementos que estão a ser introduzidos incluem aerodinâmica, filtragem e flexibilidade. Há também o desenvolvimento na área de membranas, nanotecnologia e moléculas destinadas tanto às tecnologias de fachada quanto a arquitetura de interiores e design (RITTER, 2007). São inúmeros os materiais dessas áreas que podem ser utilizados no desenvolvimento de fachadas de elevado desempenho¹⁵.

¹⁵ Alguns materiais que podem ser utilizados em fachadas, dos termos em inglês: *Thermal Expansion Materials* (TEM), *Expansion Materials* (EM), *Thermobimetals* (TB), *Shape Memory Alloys* (SMA), *Electroactive Polymers* (EAP), *Photochromic Materials* (PC), *Thermochromic/ Tropic Materials* (TC, TT), *Electrochromic/ Optic Materials* (EC, EO), *Titanium Dioxide* (TiO₂), *Light-Emitting Diodes* (LED), *Thick Film Electroluminescence*, *Electroluminescent Materials* (EI), *Organic Light-Emitting Diodes* (OLED), *Dye Solar Cells* (DSC), *Thermoelectric Generators* (TEG), *Piezoelectric Ceramics/Polymers* (PEC, PEP), *Phase Change Materials* (PCM), *Mineral Ad-/Absorbents* (MAD, MAB), *Absorbent/ Superabsorbent Polymers* (AP, SAP).

Alguns exemplos de materiais inteligentes que podem ser utilizados em fachadas são os materiais com películas de auto-limpeza (vidros, revestimentos, etc.), *Phase Change Materials* (PCM's) e aerogel (em placas e painéis). No caso de materiais de auto-limpeza por foto catálise, a matéria orgânica e sujidades depositadas na superfície são “decompostas”. Para dar início a esse processo é necessária a incidência de raios UV e posteriormente quando a água atinge a superfície forma-se um filme que faz a limpeza da superfície (**Figura 3.85**). Os *Phase Change Materials* podem ser utilizados como um meio de regular as temperaturas internas dos ambientes tanto para aquecimento quanto para arrefecimento (**Figura 3.86**). O aerogel é um material que proporciona isolamento térmico de alta performance. Existe ainda uma vertente conhecida como nanogel, que além do isolamento térmico, proporciona também isolamento acústico (**Figura 3.87**) (LEYDECKER, 2008).

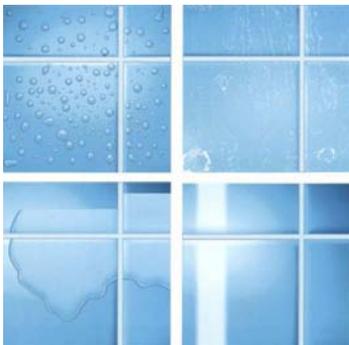


Figura 3.85 Exemplo de revestimento sem (superior) e com (inferior) cobertura de auto-limpeza.

Fonte: LEYDECKER, 2008.



Figura 3.86 Detalhe de PCM's embutidos em vidro.

Fonte: LEYDECKER, 2008.



Figura 3.87 Painel constituído por vidro e aerogel granulado.

Fonte: LEYDECKER, 2008.

Segundo Knaack & Klein (2008) a “envolvente do futuro” inclui isolamento, transparência, qualidade do ar, impermeabilização e permeabilidade flexível. A fachada do futuro engloba várias funcionalidades que incluem uma melhor integração entre os serviços, adaptação às mudanças climáticas e atendimento às necessidades dos utilizadores, bem como uma maior integração com a estrutura do edifício (KNAACK et al, 2007).

3.6 Sistema Modular de Fachadas

Tendo em vista as possibilidades atuais em termos de uso de tecnologias passivas e novos materiais, o ideal seria o desenvolvimento de um sistema de fachada dinâmico e flexível, adaptável às mudanças climáticas, às necessidades dos ocupantes e, além disso, adequado ao tipo de edifício ao qual seria utilizado.



Desta forma, seria possível obter um sistema que possibilitasse a configuração da fachada, agrupando elementos passivos, envidraçados e captação de energia solar, de forma a otimizar as condições de conforto de acordo com as necessidades climáticas do local e, além disso, elementos que possam ser configurados de acordo com as orientações solares e as funções necessárias.

Diante dessas premissas, a proposta deste trabalho de investigação de desenvolver um sistema modular de fachadas surge assim como uma tecnologia que se enquadra na nova e crescente necessidade de produtos que solucionam diretamente as exigências legais, funcionais e estéticas, e com tal seria possível:

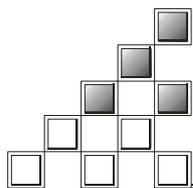
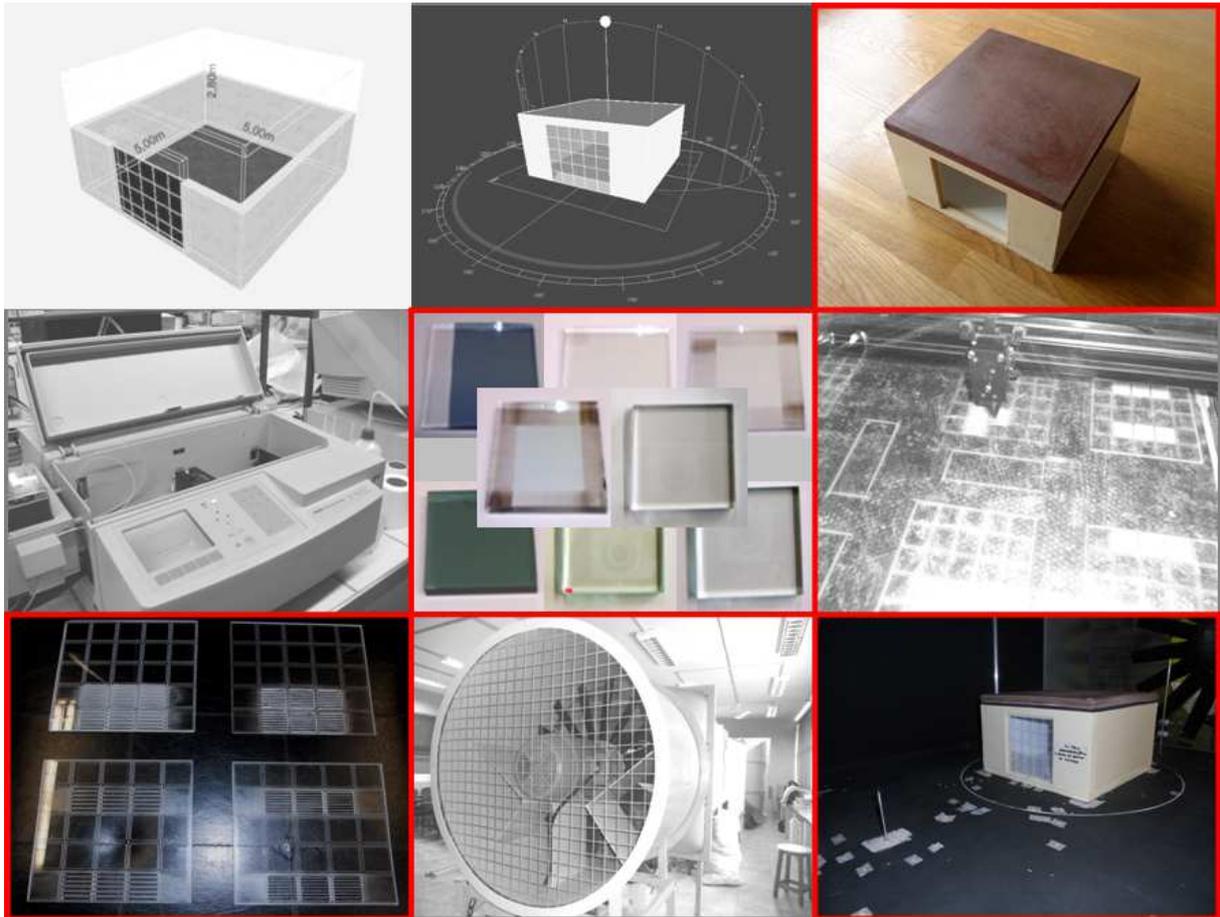
- Reduzir os gastos energéticos com a climatização e iluminação nos edifícios, potenciando os benefícios do aproveitamento da radiação solar;
- Obter versatilidade, inovação e estética e possibilidade de aplicação em todo o tipo de edifícios, quer já construídos (soluções de reabilitação), quer a construir (edifícios novos), permitindo aos arquitetos uma aplicação ativa no desenho e aplicação dessa solução;
- Aplicação e adaptação a diferentes tipos de clima.

O sistema surge da ideia de criar uma “tecnologia acessível” e aplicável. O desenvolvimento de tal sistema teve enfoque na redução dos gastos energéticos com climatização dos espaços em resposta às seguintes exigências funcionais das fachadas: aquecimento e arrefecimento passivo; iluminação natural; melhoria da qualidade do ar (através da ventilação) e acústica.

No presente capítulo foi apresentado o tema arquitetura bioclimática e as fachadas, contextualizando as estratégias passivas indicadas para uso em fachadas, além dos recentes desenvolvimentos em termos de sistemas atuais e inovadores. Apesar de existir uma gama de soluções aplicáveis, observou-se algumas lacunas em termos de possibilidades das tecnologias desenvolvidas. O fato de em grande parte dos sistemas de fachada desenvolvidos possuir um módulo de fachada de maiores dimensões que funciona em conjunto, padroniza o edifício em termos estéticos e, além disso, diminui de certa forma a liberdade de criação dos arquitetos. A pesquisa sobre sistemas de fachadas existentes e tecnologias forneceu assim uma base para elaboração de uma proposta para desenvolvimento deste trabalho de investigação.

"O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano."

Isaac Newton



CAPÍTULO 4. Metodologia de Investigação



Neste capítulo serão apresentadas todas as etapas da metodologia utilizada para o desenvolvimento do sistema de fachadas proposto. A metodologia deste trabalho de investigação consistiu na definição das etapas necessárias para o desenvolvimento do sistema da fachada, relativamente à forma e funcionalidades, estudos paramétricos iniciais, previsão do desempenho, caracterização de alguns materiais componentes, recolha e tratamento de dados provenientes das simulações computacionais e ensaios de caracterização.

A metodologia utilizada foi tal que permitisse desenvolver, nomeadamente:

- Composições de fachada de modo que cumpram e atinjam os objetivos de eficácia térmica (prioridade), iluminação natural, para nove diferentes climas portugueses, quatro orientações solares e de acordo com a normalização vigente;
- Comprovação por meio de simulação computacional da eficiência do sistema desenvolvido, tendo como prioridade o desempenho térmico.
- Caracterização experimental de alguns elementos componentes, sendo para os vidros realização de ensaios espectrofotométricos e para o módulo de ventilação execução de ensaios em túnel de vento;
- Apresentação da proposta do sistema de fachadas modular, pormenorização e dimensionamento dos módulos, componentes e definição de materiais.

Serão indicadas e descritas neste capítulo as seguintes etapas consideradas necessárias para o desenvolvimento deste trabalho de investigação:

- Definição do Conceito do Sistema de Fachadas;
- Definição dos Componentes dos Módulos de Fachada;

Elaboração do Modelo Teórico do Sistema

- Características dos Envidraçados Selecionados
- Determinação da Espessura dos Vidros
- Seleção dos Materiais para os Módulos de Fachada

Estudo da Integração dos Componentes

- Caracterização Climática de Portugal e Definição dos Climats para Estudo do Sistema de Fachada
- Definição do Modelo Base



- Ganhos Internos
- Período de Funcionamento dos Sistemas
- Condições de Referência
- Visão Geral das Simulações Computacionais
- Simulações de Desempenho Térmico
- Simulações de Desempenho Lumínico
- Simulações de Desempenho da Microgeração Energética do Módulo Fotovoltaico
- Previsão de Desempenho Acústico
- Otimização das Características Físicas dos Componentes;
 - Ensaios de Caracterização espectrofotométrica de Vidros
 - Ensaios em Túnel de Vento para o Módulo de Ventilação
- Proposta do sistema modular de fachadas: pormenorização e potencial de aplicação;
 - Definição do Sistema de Fachadas
 - Pormenorização do Sistema de Fachadas
 - Síntese das Recomendações para o Sistema de Fachadas
 - Análise Económica Simplificada

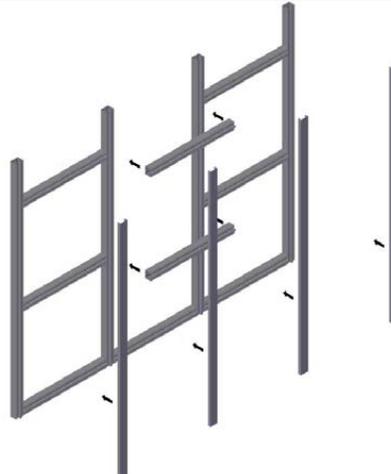
4.1 Definição do Conceito do Sistema de Fachadas

Neste trabalho de investigação foi desenvolvido um sistema de fachadas modular, cujos elementos principais são envidraçados de elevado desempenho. Após maiores estudos e a realização de algumas simulações de teste foram determinadas as soluções em termos de módulos que seriam componentes do sistema.

O sistema é composto pelos seguintes componentes: grelha estrutural para montagem dos módulos; módulo padrão (fixo e móvel - projetante); módulo de proteção solar; módulo de ventilação; módulo parede de Trombe, módulo estufa e módulo fotovoltaico “girassol”. Todos os detalhes sobre a conceção do sistema e sua pormenorização serão apresentados no “Capítulo 6. Proposta do Sistema Modular de Fachadas: Pormenorização e Potencial de Aplicação”. O **Quadro 4.1** apresenta uma versão prévia dos módulos propostos.



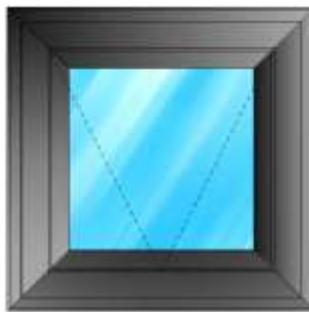
Quadro 4.1 Versão final dos módulos que compõem o sistema de fachadas proposto.



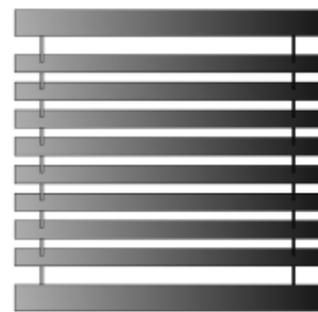
Grelha Estrutural



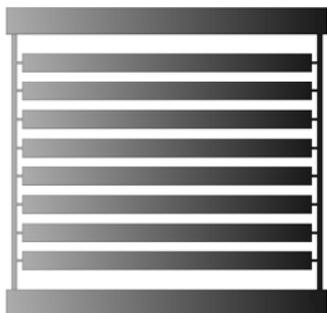
Módulo Padrão Fixo



Módulo Padrão Projetante



Módulo de Proteção Solar Opção 01



Módulo de Proteção Solar Opção 02



Módulo de Ventilação



Módulo Parede de Trombe



Módulo Estufa



Módulo Fotovoltaico "Girassol"



4.2 Definição dos Componentes dos Módulos de Fachada

A definição dos componentes dos módulos de fachada foi feita com base nos elementos principais de composição de cada módulo. Compreendeu as seguintes subtarefas: elaboração do modelo teórico do sistema, estudo da integração dos componentes, otimização das características físicas dos componentes e pormenorização dos detalhes construtivos.

4.2.1 Elaboração do Modelo Teórico do Sistema

O modelo teórico do sistema compreendeu a definição conceptual das funções e esboço inicial dos componentes: tipos de módulos, tipo de estrutura, vidros, grelha de ventilação, dispositivo de proteção solar, dispositivos de oclusão, massas de armazenamento térmico, etc. A conceção do sistema de fachada constituiu a fase inicial de desenvolvimento da ideia. Pretendeu-se adicionar algumas soluções solares passivas capazes de melhorar o desempenho de um compartimento ao nível da sua eficiência energética.

4.2.1.1 Características dos Envidraçados Seleccionados

Os envidraçados indicados para uso neste trabalho de investigação foram seleccionados principalmente de acordo com suas características em termos de coeficiente de transmissão térmica e transmissão luminosa.

De acordo com o RCCTE, os requisitos de qualidade térmica são impostos ao nível do coeficiente de transmissão térmica (U), limitando esses valores a máximos admissíveis ($U_{\text{máx}}$) e recomendando valores de referência (U_{ref}). Os coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis em zona corrente ($U_{\text{máx}}$) e os valores de referência (U_{ref}) para os elementos da envolvente de edifícios são apresentados na **Tabela 4.1**.

Tabela 4.1 Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis e Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência.

Elemento da Envolvente	$U_{\text{máx}}$ (W/m ² .°C)					
	Zona Climática I ₁		Zona Climática I ₂		Zona Climática I ₃	
Elementos exteriores em zona corrente:	$U_{\text{máx}}$	U_{ref}	$U_{\text{máx}}$	U_{ref}	$U_{\text{máx}}$	U_{ref}
Zonas opacas verticais	1,80	0,70	1,60	0,60	1,45	0,50
Zonas opacas horizontais	1,25	0,50	1,00	0,45	0,90	0,40
Envidraçados	U_{ref} (W/m ² .°C)					
	Zona Climática I ₁		Zona Climática I ₂		Zona Climática I ₃	
	-	4,30	-	3,30	-	3,30

Fonte: RCCTE, 2006.



A partir dessas informações, de forma a atender o máximo de zonas, o ideal é que o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados não ultrapasse o valor de **3,30W/m².°C**.

Além disso, são recomendados fatores solares máximos admissíveis (g_{\perp}). Nenhum vão envidraçado da envolvente de qualquer edifício, desde que não orientado a norte (entre noroeste e nordeste), com área total superior a 5% de área útil de pavimento do espaço que serve, pode apresentar um fator solar correspondente ao vão envidraçado com os respectivos dispositivos de proteção 100% ativos que exceda os valores indicados (**Tabela 4.2**).

Tabela 4.2 Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados não orientados a norte com mais de 5% da área útil do espaço que servem.

Classe de Inércia Térmica	Fator Solar Máximo Admissível		
	Zona Climática V ₁	Zona Climática V ₂	Zona Climática V ₃
Fraca	0,15	0,15	0,10
Média	0,56	0,56	0,50
Forte	0,56	0,56	0,50

Fonte: RCCTE, 2006.

No caso deste trabalho, como serão testadas as fachadas para as quatro orientações, estes valores serão considerados. Será apresentado posteriormente em maior detalhe a célula a ser simulada, cuja área total é 25m². A fachada inicialmente proposta para o estudo possui as dimensões de 2,5 x 2,5 (6,25) m², sendo que a área envidraçada poderá ser de 8% da área do piso (1/3 da fachada em módulos envidraçados); 12,5% da área do piso (1/2 da fachada envidraçada) ou 25% do piso (toda a fachada envidraçada). Ou ainda outros valores incluídos nesse intervalo de 8% a 25% de área envidraçada em relação à área do piso, portanto os valores de fator solar devem obedecer à **Tabela 4.2** apresentada anteriormente. Considerando uma inércia média pode-se selecionar como fator solar máximo admissível de **0,50**, de forma a abranger todas as zonas climáticas de verão, desde que a inércia seja média ou forte, o que é esperado para o setor residencial.

Outro aspeto está relacionado com a fração envidraçada para os diferentes tipos de caixilharias. Essa fração traduz a diminuição da transmissão de energia solar associada à existência de caixilharia, que nesse caso é dada pela relação área envidraçada/ área total do vão envidraçado. A previsão para os módulos em questão é que essa fração seja em torno de 70 a 80%. Porém esses valores são apenas de referência (**Tabela 4.3**).

**Tabela 4.3** Fração envidraçada para diferentes tipos de caixilharia.

Tipos de Caixilharia	Fg	
	Caixilho sem quadrícula	Caixilho com Quadrícula
Janelas de alumínio ou aço	0,70	0,60
Janelas de Madeira ou PVC	0,65	0,57
Fachadas-cortina de alumínio ou aço	0,90	-

Fonte: RCCTE, 2006.

Em síntese, de acordo com o RCCTE – Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios e de forma a abranger o máximo possível de zonas para as quais se pretende simular, as características principais relacionadas com os envidraçados são (**Tabela 4.4**):

Tabela 4.4 Síntese - Características necessárias para os envidraçados das fachadas.

Características Necessárias para o Envidraçado das Fachadas		
Coefficiente de transmissão térmica dos envidraçados $U_{máx}$ (W/m ² .°C)	Fator Solar Máximo Admissível (Abrangendo todas as Zonas)	Fração envidraçada
3,30W/m ² .°C	0,50	de 70 a 80% aproximadamente

Salienta-se que os valores dos coeficientes de transmissão térmica dos envidraçados duplos utilizados para compor os módulos do sistema de fachada desenvolvido devem estar abaixo deste valor de 3,30W/m².°C.

4.2.1.2 Determinação da Espessura dos Vidros

A proposta para o desenvolvimento deste sistema modular de fachadas seria o uso de pequenos módulos envidraçados. Supondo inicialmente um módulo padrão envidraçado de 0,50mx0,50m. Foi determinada o valor da espessura necessária para os módulos envidraçados com tais dimensões e, no caso de um módulo duplo (0,50x1,00m), se as cargas seriam suportadas.

Existem alguns fatores que devem ser levados em consideração na determinação da espessura do vidro para fachadas, entre eles: região onde se encontra a construção; altura do vidro acima do solo; pressões do vento; inclinação do envidraçado; tipo de fixação do vidro; tipo de caixilho; tipo de vidro aplicado, entre outros.

Primeiramente foi calculada a ação do vento sobre o módulo de fachada. De acordo com o RAS - Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes, a ação do vento será definida pelos seguintes fatores (RAS, 1993):

- Zonamento do território;
- Rugosidade aerodinâmica do solo;



- Quantificação da ação do vento;
- Pressão dinâmica do vento;
- Zonamento do território.

Para efeitos de quantificação da ação do vento, considera-se Portugal dividido em duas zonas seguintes:

- Zona A: A generalidade do território, exceto as regiões pertencentes à zona B;
- Zona B: Os arquipélagos dos Açores e Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitude superiores a 600 m. No caso, porém, de locais na zona A cujas condições de orografia determinam exposição ao vento particularmente desfavorável, como pode acontecer em alguns vales e estuários, tais locais devem ser considerados como pertencentes à zona B.

Rugosidade aerodinâmica do solo

Para ter em conta a variação da ação do vento com a altura do solo consideram-se dois tipos de rugosidade aerodinâmica do solo: Rugosidade do tipo I: rugosidade a atribuir aos locais situados no interior de zonas urbanas em que predominam edifícios de médio e grande porte e Rugosidade do tipo II: rugosidade a atribuir aos restantes locais, nomeadamente zonas rurais e periferia de zonas urbanas.

Quantificação da ação do vento

A ação do vento resulta da interação entre o ar em movimento e as construções, exercendo-se sob a forma de pressões aplicadas nas suas superfícies. O vento pode em geral ser considerado como atuando na horizontal, devendo admitir-se que pode ter qualquer rumo.

Pressão dinâmica do vento

Os valores característicos da pressão dinâmica do vento, W_k , estão indicados na **Tabela 4.5** para as zonas A e B, em função da altura h acima do solo e do tipo de rugosidade.

**Tabela 4.5** Pressão Dinâmica do Vento

Pressão Dinâmica dos Vidros				
h (m)	Valor Característico da Pressão Dinâmica W_k (kN/m ²)			
	Zona A		Zona B	
	Rugosidade I	Rugosidade II	Rugosidade I	Rugosidade II
0	0,70	0,90	0,84	1,08
10	0,70	0,90	0,84	1,08
15	0,70	0,84	0,84	1,25
20	0,79	0,96	0,95	1,34
25	0,85	1,19	1,02	1,43
30	0,91	1,25	1,09	1,50
35	0,96	1,30	1,15	1,56
40	1,01	1,35	1,21	1,62
50	1,09	1,44	1,31	1,73
60	1,17	1,52	1,40	1,82
70	1,24	1,59	1,49	1,91
80	1,31	1,65	1,57	1,98
100	1,43	1,76	1,72	2,11
120	1,54	1,86	1,85	2,23

Fonte: RSA, 1993.

O capítulo 3 do DTU 39 versão de maio 1993¹⁶ especifica as equações para o cálculo das espessuras para vidros de dimensões máximas a 6 x 3,20 metros situados a menos de 100m de altura, e as pressões convencionais a considerar.

Para os vidros simples, recozidos, não aramados em caixilho móvel, adota-se a espessura nominal, tal que a espessura mínima "e_m" de fabricação, seja pelo menos igual ao valor "e" calculada pelas equações (**Tabela 4.6**) abaixo descritas, nas quais:

Tabela 4.6 Equações - Espessura dos Vidros

Vidro Encastrado em 4 Lados	
Se: $e = \frac{L}{l} \leq 3$	Se: $e = \frac{L}{l} > 3$
$e = \sqrt{\frac{SP}{72}}$	$e = \frac{l \sqrt{P}}{4,9}$

Sendo:

e = Espessura do vidro (mm)

L = Maior lado do vidro (m)

l = Menor lado do vidro (m) (no sentido dos bordos livres para vidros apoiados em 2 lados)

S = Área do vidro (m²)

P = Pressão convencional (Pa)

¹⁶ NF P78-201-1 (DTU 39): *Travaux de bâtiment – Travaux de miroiterie-vitrierie – Partie 1: Cahier des clauses techniques + Amendement A1*, AFNOR, 1998.



Como a ideia inicial seria utilizar nesse sistema de fachadas pequenos módulos envidraçados, supondo um módulo padrão envidraçado de 0,50mx0,50m e um módulo envidraçado duplo com 0,5x1,0m², pode-se estimar a espessura de vidro necessária para utilização. Fazendo os cálculos para o módulo duplo e considerando o maior valor de pressão dinâmica dos vidros, por exemplo:

Como no caso dos módulos os vidros serão encastrados nos quatro lados e a razão

$$\frac{L}{l} = 2, \text{ tem-se que:}$$

$$\text{Usando } e = \sqrt{\frac{SP}{72}} = 3,94 = \mathbf{4mm}$$

Observou-se, portanto, que por serem envidraçados duplos, em grande parte dos casos, uma composição com dois panos de vidros de 4mm será suficiente para suportar as solicitações às quais a estrutura dos módulos será submetida, e além disso, ocorrerá uma diminuição de peso em cerca de 33,3%¹⁷ quando comparado com a utilização de vidros com 6mm de espessura, por exemplo. Além de economia em termos de custo dos módulos.

4.2.1.3 Seleção dos Materiais para os Módulos de Fachada

Dos elementos translúcidos e transparentes dos módulos fazem parte: o envidraçado duplo do módulo padrão fixo ou móvel, o envidraçado duplo do módulo da parede de Trombe e o envidraçado do módulo estufa¹⁸. No elemento envidraçado do módulo padrão utilizou-se vidro duplo de 4mm de espessura como apresentado anteriormente nos cálculos. Em relação à escolha dos envidraçados, os aspetos importantes a serem observados sob o ponto de vista de ganho e perda de calor, são: o fator solar¹⁹, o ganho de calor solar²⁰, o coeficiente de sombreamento (já definido anteriormente) e o coeficiente de ganho de calor

¹⁷ Salienta-se que um envidraçado duplo composto por vidros de 4mm pesa cerca de 20kg/m²; e um envidraçado duplo composto por vidros de 6mm pesa cerca de 30kg/m² (SGG, 2008).

¹⁸ O elemento envidraçado do módulos da estufa foi escolhido posteriormente, após definição da forma e execução de simulações de teste.

¹⁹ O Fator Solar (Transmissividade Total) é a soma da transmissão solar direta mais a parcela de energia solar absorvida pelo vidro e reirradiada para o interior. A última parcela é função das condições ambientais externas e internas (as condições padrão de verão da ASHRAE são: coeficiente de transferência de calor na superfície externa do vidro $h_e = 22,7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e $h_i = 8,3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). A fração da radiação solar com incidência normal que é transferida através do envidraçado diretamente por transmissividade e indiretamente pela energia absorvida que flui para dentro por reirradiação e convecção para o interior, assumindo que o vento exterior tem velocidade de 2m/s (temperaturas interior e exterior iguais entre si). A transmissividade solar de um vidro é medida de 350 a 2100nm e relatadas como uma percentagem da transmissividade através do ar ao nível do mar (ASTM designação E424) (BANCO DE DADOS DE VIDROS, 2010).

²⁰ O Fator de Ganho de Calor por Insolação (FGCI) ou *Solar Heat Gain Fator* (SHGF) corresponde a transmissividade total (fator solar) do vidro de referência DSA, nas condições ambientais de verão (ASHRAE) para o dia 21 de cada mês em determinada hora do dia. É fornecido em tabelas para cada latitude e orientações de fachada. Fator de ganho de calor por insolação máximo é o maior valor registrado dos fatores de ganho de calor por insolação nos dias típicos de cada mês (BANCO DE DADOS DE VIDROS, 2010).



solar²¹. Além disso, os valores do coeficiente U e a transmitância nas regiões do ultravioleta, visível e infravermelho também são características fundamentais para escolha dos envidraçados.

Os vidros selecionados para as simulações computacionais e posteriormente para os ensaios de caracterização espectrofotométrica são todos do fabricante *Saint-Gobain Glass*, principalmente pela disponibilidade de informações sobre os produtos e fornecimento das amostras. As propriedades dos vidros foram obtidas por meio do software *Window 6.2.33.0*²² (LBNL, 2010b), desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Berkeley (LBNL). Nesse software de simples utilização é possível determinar as propriedades solares e óticas de envidraçados e sistemas de janela.

Módulo Padrão Fixo e Móvel (Projetante)

No módulo padrão foram propostos envidraçados de baixa emissividade, também chamados na literatura internacional de “*low-e glazings*” que refletem os raios infravermelhos que são emitidos para o interior do espaço, permitindo desta forma conservar o calor no seu interior. Os vidros com baixo poder emissivo destinam-se ao isolamento térmico reforçado. Serão apresentadas algumas características dos vidros selecionados para serem testados primeiramente através de simulação computacional de desempenho térmico e posteriormente por ensaios espectrofotométricos.

O primeiro vidro selecionado foi o Planitherm. Trata-se de um vidro que reflete a radiação térmica de grande comprimento de onda, e mantém o calor no interior da edificação, e além disso, maximiza a iluminação natural. De acordo com o fabricante esse tipo de vidro possui um bom desempenho em termos de isolamento térmico, reduzindo a perda de calor, diminuindo a condensação e proporcionando o aumento da iluminação natural incidente (SGG, 2008).

A gama Planitherm é composta pelos seguintes vidros com capa:

- Planitherm Futur N: com capa de baixa emissividade, cor neutra, coeficiente U de 1,2 W/ (m²k) (Vidro duplo com configuração 4 (16) 4, repleto com Argon).
- Planitherm Futur N II: versão obrigatoriamente a temperar do Planitherm Futur N, mas suas características após a têmpera são idênticas às do Planitherm Futur N.

²¹ O coeficiente de Ganho de Calor Solar ou *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC) mede o quanto determinado envidraçado bloqueia a radiação proveniente da radiação solar, é a fração de calor que se transmite ao interior. Tal valor se expressa num intervalo de 0 a 1, quanto menor tal valor menos calor solar é transmitido (BANCO DE DADOS DE VIDROS, 2010).

²² Mais informações sobre o software *Window 6.2.33.0* podem ser obtidas no site <http://windows.lbl.gov/software>



- Planitherm Futur Ultra N: este produto tem uma emissividade extremamente baixa; coeficiente U de 1,1 W/ (m².K) (Vidro duplo com configuração 4 (16) 4, repleto com Árgon). Oferece um elevado isolamento térmico.
- Planitherm Total: vidro com capa de baixa emissividade que pode ser temperado; cor neutra indistinta antes e depois da têmpera; coeficiente U de 1,3 W/ (m².K) para envidraçados duplos. Possui grande durabilidade mecânica e química.

Salienta-se que inicialmente são apresentadas as propriedades dos envidraçados simples e posteriormente serão apresentados os coeficientes de transmissão térmica para as dez composições de envidraçados que foram objeto de estudo nas simulações computacionais.

Para a análise em questão, optou-se por selecionar os vidros **Planitherm Futur Ultra N** e o **Planitherm Total** para a composição do pano interior de envidraçados duplos do módulo padrão por serem vidros de baixa emissividade, mais indicados para climas temperados (**Tabela 4.7**).

Tabela 4.7 Vidros para módulo padrão - Pano Interior.

Propriedades		Planitherm Total	Planitherm Futur Ultra N
Térmicas	Espessura (mm)	4mm	4mm
	Condutividade Térmica (W/mK)	1	1
Ultravioleta	Transmitância Solar	0.596	0.585
	Reflectância - Solar Exterior	0.23	0.293
	Reflectância - Solar Interior	0.173	0.240
Visível	Transmitância Visível	0.854	0.884
	Reflectância - Visível Exterior	0.04	0.045
	Reflectância - Visível Interior	0.057	0.048
Infravermelho	Transmitância - Infravermelho	0	0
	Reflectância - Infravermelho-Exterior (Emissividade)	0.103	0.037
	Reflectância - Infravermelho-Interior (Emissividade)	0.837	0.837
Fator Solar g		0.657	0.628
Coeficiente de Sombreamento		0.775	0.722
Coeficiente U (W/m ² K)		5.740	5.727

Além do pano interior, foram selecionados outros tipos de vidros de 4mm para serem utilizados no pano exterior, são eles: Cool Lite KNT 155; Cool Lite KNT 155 Verde; Bioclean; Planistar; Planilux e Diamant. O Cool Lite é um vidro incolor ou colorido sobre o qual se deposita uma capa transparente de origem metálica que confere ao vidro características de controlo solar, No caso específico, os vidros do tipo “K” permitem passar o máximo de iluminação natural. Devido às suas prestações de controlo solar e baixa emissividade, ambos os vidros proporcionam um importante nível de conforto, ao mesmo tempo que reduzem os gastos energéticos, de acordo com informações do fabricante. Serão testados



os vidro Cool Lite KNT 155 e Cool Lite KNT 155 Verde para verificar a influência da cor nas condições de conforto térmico (**Tabela 4.8**).

Tabela 4.8 Vidros Cool Lite KNT 155 para módulo padrão - Pano Exterior.

Propriedades		Cool Lite KNT 155	Cool Lite KNT 155 - Verde
Térmicas	Espessura (mm)	4mm	4mm
	Condutividade Térmica (W/mK)	1	1
Ultravioleta	Transmitância Solar	0.360	0.267
	Refletância - Solar Exterior	0.220	0.217
	Refletância - Solar Interior	0.200	0.117
Visível	Transmitância Visível	0.535	0.474
	Reflectância - Visível Exterior	0.031	0.028
	Reflectância - Visível Interior	0.148	0.126
Infravermelho	Transmitância - Infravermelho	0	0
	Reflectância - Infravermelho Exterior (Emissividade)	0.156	0.156
	Reflectância - Infravermelho Interior (Emissividade)	0.837	0.837
Fator Solar g		0.511	0.453
Coefficiente de Sombreamento		0.587	0.521
Coefficiente U (W/m²K)		5.750	5.750

O Bioclean é um vidro de auto-limpeza, ideal para ser aplicado quando se pretende diminuir a frequência de limpeza e manutenção do envidraçado (**Tabela 4.9**). Apresenta uma cor muito neutra e praticamente impercetível. O processo de auto-limpeza depende da ação dos raios UV, presentes na radiação solar, além da água, que pode ser de chuva ou mesmo um simples jato de água. A camada do Bioclean, quando em contato com os raios UV do sol, torna este vidro: fotocatalítico: processo que gera a degradação da sujidade que se deposita na superfície do vidro; e hidrofílico: processo que forma um filme fino e uniforme de água para retirada das sujidades.

Tabela 4.9 Vidro Bioclean para módulo padrão - Pano Exterior.

Propriedades		Bioclean
Térmicas	Espessura (mm)	4mm
	Condutividade Térmica (W/mK)	1
Ultravioleta	Transmitância Solar	0.818
	Refletância - Solar Exterior	0.099
	Refletância - Solar Interior	0.096
Visível	Transmitância Visível	0.869
	Reflectância - Visível Exterior	0.111
	Reflectância - Visível Interior	0.109
Infravermelho	Transmitância - Infravermelho	0
	Reflectância - Infravermelho Exterior (Emissividade)	0.837
	Reflectância - Infravermelho Interior (Emissividade)	0.837
Fator Solar g		0.842
Coefficiente de Sombreamento		0.968
Coefficiente U (W/m²K)		5.869



O vidro Planistar é um vidro incolor de controlo solar com capa de baixa emissividade (reflete os comprimentos de onda longa); confere ao vidro duplo a função de conforto no inverno e verão (**Tabela 4.10**).

Tabela 4.10 Vidro Planistar para módulo padrão - Pano Exterior.

Propriedades		Planistar
Térmicas	Espessura (mm)	4mm
	Condutividade Térmica (W/mK)	1
Ultravioleta	Transmitância Solar	0.402
	Refletância - Solar Exterior	0.436
	Refletância - Solar Interior	
Visível	Transmitância Visível	0.788
	Refletância - Visível Exterior	0.063
	Refletância - Visível Interior	0.070
Infravermelho	Transmitância - Infravermelho	0.000
	Refletância - Infravermelho Exterior (Emissividade)	0.037
	Refletância - Infravermelho Interior (Emissividade)	0.837
Fator Solar g		0.460
Coefficiente de Sombreamento		0.529
Coefficiente U (W/m²K)		5.727

Os vidros Diamant (extra-claro) e o vidro Planilux (*float* incolor), também foram utilizados para montar os envidraçados do módulo padrão, de forma a ter uma comparação da performance de envidraçados duplos com características especiais (*low-e*) e envidraçados duplos compostos por vidros simples. Suas propriedades serão detalhadas posteriormente, pelo facto de também serem utilizados para o módulo parede de Trombe.

Módulo Parede de Trombe

Para o módulo da parede de Trombe pensou-se utilizar um envidraçado duplo²³. Foram selecionados inicialmente para as simulações o vidro Diamant, um vidro extra-claro; e o vidro Planilux um vidro *float* incolor, ambos de 4mm e cujas características são apresentadas na **Tabela 4.11**. Porém, como esses vidros possuem características muito semelhantes, optou-se por utilizar para as simulações de fachadas com parede de Trombe somente o vidro Diamant, e incluir o vidro Planilux nas simulações das fachadas configuradas com módulos padrão.

²³ Apesar de nas primeiras simulações de teste ter sido utilizado envidraçado simples para a parede de Trombe, observou-se posteriormente que o uso de um envidraçado duplo ocasiona uma diminuição do consumo energético para aquecimento superior.

**Tabela 4.11** Vidros Diamant (Modulo Parede de Trombe) e Planilux (Módulo Padrão).

Propriedades		Diamant	Planilux
Térmicas	Espessura (mm)	4mm	4mm
	Condutividade Térmica (W/mK)	1	1
Ultravioleta	Transmitância Solar	0.899	0.825
	Refletância - Solar Exterior	0.080	0.074
	Refletância - Solar Interior	0.080	0.074
Visível	Transmitância - Visível	0.912	0.896
	Refletância - Visível Exterior	0.082	0.081
	Refletância - Visível Interior	0.082	0.081
Infravermelho	Transmitância - Infravermelho	0	0
	Refletância - Infravermelho Exterior (Emissividade)	0.837	0.837
	Refletância - Infravermelho Interior (Emissividade)	0.837	0.837
Fator Solar g		0.900	0.850
Coefficiente de Sombreamento		1.040	0.980
Coefficiente de Transmissão Térmica U W/ (m².K)		5.800	5.800

O vidro Diamant, assim como o Planilux possuem um coeficiente de sombreamento alto permitindo deste modo o máximo de penetração de radiação solar, aspeto necessário para utilização em paredes de Trombe. Quanto maior o coeficiente de sombreamento de um vidro, maior o ganho de calor com sua utilização. Por exemplo, um vidro cujo coeficiente de sombreamento seja 0,26 transfere menos energia do que outro de 0,38.

Por fim, a **Tabela 4.12** apresenta uma síntese dos envidraçados (dez tipos e envidraçados do módulo parede de Trombe e módulo estufa) e os valores dos coeficientes de transmissão térmica, que foram utilizados nas simulações de desempenho térmico executadas no software *DesignBuilder*, de forma a obter as necessidades energéticas para diferentes composições de fachada, climas e orientações solares. Os valores dos coeficientes de transmissão térmica dos envidraçados duplos selecionados para compor os módulos do sistema de fachada estão abaixo do valor de 3,30W/m².°C apresentado pelo RCCTE.

As **Tabelas 4.13** e **4.14** apresentam os coeficientes de transmissão térmica, o fator solar, o coeficiente de sombreamento, a transmitância visível e o ganho relativo de calor dos envidraçados estudados. Posteriormente, na parte referente aos ensaios espectrofotométricos dos vidros serão apresentadas imagens das amostras utilizadas, fornecendo assim o aspeto visual do material selecionado.


Tabela 4.12 Síntese dos Envidraçados

Tipos de Envidraçados			
Módulo Padrão			
Envidraçados	Pano Exterior	Pano Interior	U (W/m²K)²⁴
Envidraçado 01	Cool Lite KNT 155 4mm	Planitherm Total 4mm	1.79
Envidraçado 02	Cool Lite KNT 155 4mm	Planitherm Futur Ultra N 4mm	1.70
Envidraçado 03	Cool Lite KNT 155 4mm Verde	Planitherm Total 4mm	1.79
Envidraçado 04	Cool Lite KNT 155 4mm Verde	Planitherm Futur Ultra N 4mm	1.66
Envidraçado 05	Bioclean 4mm	Planitherm Total 4mm	1.80
Envidraçado 06	Bioclean 4mm	Planitherm Futur Ultra N 4mm	1.72
Envidraçado 07	Bioclean 4mm	Planilux 4mm	2.72
Envidraçado 08	Planistar 4mm	Planilux 4mm	2.69
Envidraçado 09	Planilux 4mm	Planitherm Total 4mm	1.80
Envidraçado 10	Diamant 4mm	Diamant 4mm	2.72
Módulo - Parede de Trombe			
Envidraçado 11	Diamant 4mm	Diamant 4mm	2.72
Módulo – Estufa			
Envidraçado 12	Diamant 4mm	-	5.87

Tabela 4.13 Síntese das Propriedades dos Envidraçados Analisados I

Características		Envidraçados		
		Envidraçado 01	Envidraçado 02	Envidraçado 03
Panos	Exterior	Cool Lite KNT 155 4mm	Cool Lite KNT 155 4mm	Cool Lite KNT 155 4mm Verde
	Interior	Planitherm Total 4mm	Planitherm Futur Ultra N 4mm	Planitherm Total 4mm
U (W/m ² K)		1.79	1.70	1.79
Fator Solar g		0.36	0.35	0.30
Coeficiente de Sombreamento		0.41	0.40	0.34
Transmitância Visível (%)		0.46	0.48	0.41
Ganho Relativo de Calor (W/m ²)		273.71	264.66	227.63
Características		Envidraçados		
		Envidraçado 04	Envidraçado 05	Envidraçado 06
Panos	Exterior	Cool Lite KNT 155 Verde 4mm	Bioclean 4mm	Bioclean 4mm
	Interior	Planitherm Futur Ultra N 4mm	Planitherm Total 4mm	Planitherm Futur Ultra N 4mm
U (W/m ² K)		1.66	1.80	1.72
Fator Solar g		0.28	0.62	0.59
Coeficiente de Sombreamento		0.33	0.71	0.68
Transmitância Visível (%)		0.42	0.75	0.77
Ganho Relativo de Calor (W/m ²)		217.72	462.69	442.73

²⁴ Valores obtidos do software Window 6.2.33.0 software (LBNL, 2009b).

**Tabela 4.14** Síntese das Propriedades dos Envidraçados Analisados II

Características		Envidraçados		
		Envidraçado 07	Envidraçado 08	Envidraçado 09
Panos	Exterior	Bioclean 4mm	Planistar 4mm	Planilux 4mm
	Interior	Planilux 4mm	Planilux 4mm	Planitherm Total 4mm
U (W/m ² K)		2.72	2.69	1.80
Fator Solar g		0.75	0.40	0.63
Coeficiente de Sombreamento		0.86	0.46	0.72
Transmitância Visível (%)		0.79	0.71	0.77
Ganho Relativo de Calor (W/m ²)		563.41	311.28	469.47
Características		Envidraçados		
		Envidraçado 10	Envidraçado 11	Envidraçado 12
Panos	Exterior	Diamant 4mm	Diamant 4mm	Diamant 4mm
	Interior	Diamant 4mm	Diamant 4mm	-
U (W/m ² K)		2.72	2.72	5.87
Fator Solar g		0.83	0.83	0.90
Coeficiente de Sombreamento		0.95	0.95	1.04
Transmitância Visível (%)		0.84	0.84	0.91
Ganho Relativo de Calor (W/m ²)		622.90	622.90	697.41

Módulo Fotovoltaico

Diferentemente dos envidraçados, para o módulo fotovoltaico, não foi feita uma escolha inicial do tipo de célula fotovoltaica a ser utilizada. Esta análise baseou-se no software *Solterm 5.0* e no *Sunny Design 2.0*, e na eficiência de geração de energia elétrica, além dos aspetos como: facilidade de adaptação ao módulo, custo, durabilidade e a estética. Com base nos resultados das simulações computacionais foram estudados os tipos de painéis fotovoltaicos com melhor desempenho em termos de geração energética, como se pode ver no capítulo 6.

Módulo Estufa

Foi considerado para o módulo estufa um material com características próximas das do tipo de vidro utilizado no módulo da parede de Trombe, porém um envidraçado simples e não duplo, de forma a diminuir o peso do módulo que possui a maior área envidraçada dentre os demais. Trata-se novamente do vidro Diamant, um vidro extra-claro; cujas



características já foram apresentadas anteriormente na secção “4.2.1.3 Seleção dos Materiais para os Módulos de Fachada”.

Em relação aos perfis dos módulos e estrutura, a justificação pela escolha do alumínio como material componente se dá devido a alguns fatores como:

- O facto de ser um produto reciclável e resistente à humidade e maresia;
- Apesar da energia necessária para produção do alumínio ser elevada (BERGE, 2001) seu potencial de reciclagem é considerável, somente cerca de 5% da energia da produção inicial é necessária para produção do material igualmente utilizável (EAA, 1994).
- A durabilidade é fator determinante, uma vez que a manutenção das edificações é cada vez mais normalizada e os outros produtos concorrentes não tem como ponto forte a vida útil do material;
- As fachadas de alumínio possuem grande longevidade devido à resistência à corrosão, um atributo que se complementa com os tratamentos de superfície, como anodização ou pintura;
- Facilidade de montagem;
- A variedade de apresentação do alumínio permite explorar de forma criativa sua combinação com outros elementos das edificações, destacando-se por sua estética, harmonia de tons e volumes, que podem produzir um ambiente acolhedor e agradável ao convívio interno;
- Economia no consumo de energia devido a possibilidades de melhorias de isolamento térmico, utilizando detalhes que combinam perfis de alumínio com perfis de poliamida, por exemplo;
- Existe no mercado uma gama diversa de perfis destinados ao emprego em sistemas de fachada, o que de certa forma auxilia e facilita o desenvolvimento do sistema modular proposto.

4.2.2 Estudo da Integração dos Componentes

Para o desenvolvimento do sistema de fachadas modular foram utilizados programas computacionais de simulação para análise do desempenho térmico, iluminação natural e sistemas fotovoltaicos. Tais programas utilizados serão apresentados de forma mais detalhada posteriormente. A partir dos resultados quantitativos da simulação computacional do sistema foi realizado um estudo da sua interação e otimização do desempenho global ao



nível do comportamento térmico (prioridade), iluminação natural e microgeração energética (módulo fotovoltaico).

Em termos de simulações, primeiramente foram feitos estudos dos seguintes interfaces gráficas para uso no programa de simulação *EnergyPlus: DesignBuilder*, *OpenStudio* (*plugin* para *Google SketchUp* que gera ficheiro no formato do *EnergyPlus*) e *Ecotect* (Para simulação de iluminação natural).

Observou-se que o *plugin OpenStudio* auxilia em termos de desenho do modelo e soluções para as simulações, porém com exceção do desenho, praticamente todas as variáveis tem que ser adicionadas posteriormente no software *EnergyPlus*. Na versão utilizada na época as soluções de desenho do sistema são de certa forma limitadas (principalmente para a finalidade em questão de inserção de sistemas passivos).

O *Ecotect* apresenta uma interface gráfica, intuitiva e também permite exportar ficheiros no formato “idf” para o *EnergyPlus*, porém não possui uma gama muito variada de materiais como o *DesignBuilder* o que de certa forma o limita, pois para a adição de novos materiais ou propriedades tem que ser feitas no banco de dados de materiais. Portanto, o software *Ecotect* na versão utilizada é mais completo em termos de análise de iluminação natural e artificial do que de análise de desempenho térmico.

Observou-se, portanto que dentre as três opções, o software mais completo para este trabalho de investigação seria o *DesignBuilder*, uma vez que é principalmente destinado a análise de conforto térmico e eficiência energética, e além disso, possui um manual (DESIGNBUILDER SOFTWARE, 2008) que auxilia inclusive no desenvolvimento de modelos com soluções mais complexas, como soluções de parede de Trombe, estufas entre outras. Ao exportar seus ficheiros para o *EnergyPlus* não foram encontrados problemas e foi possível executar as simulações da mesma forma e os resultados apresentaram-se praticamente idênticos, isso para um modelo com uma célula simples.

Além da execução de todas as simulações computacionais foram realizados dois tipos de ensaios de caracterização de componentes. O primeiro foi de caracterização espectrofotométrica dos vidros a serem indicados para os módulos (por meio deste ensaio foi possível analisar os dados de transmissão dos vidros); e o segundo em túnel de vento, para o módulo de ventilação especificamente, de forma a determinar o tipo de grelha ideal e posicionamento a ser utilizado na fachada de forma a melhorar as condições de ventilação natural. Tais ensaios de caracterização serão também detalhados posteriormente.

A finalização do trabalho de investigação compreendeu a pormenorização dos detalhes construtivos, sendo eles: pormenores de montagem e de todos os componentes do sistema, além da especificação de materiais.



4.2.2.1 Caracterização Climática de Portugal e Definição dos Climas para Estudo do Sistema de Fachada

Será apresentada nesta secção uma caracterização climática de Portugal, a qual serve de base para a definição dos tipos de soluções passivas determinadas para serem incorporadas ao sistema de fachadas em questão.

Perante a crise energética atual, a busca pelo melhor aproveitamento da energia e uso de fontes renováveis é papel de todos os profissionais. No campo da arquitetura é preciso oferecer condições para que a energia seja solicitada da forma mais racional e menos dispendiosa possível. O estudo experimental das variáveis climáticas, humanas e arquitetónicas em um edifício, que demonstre soluções bem articuladas com o clima local, torna possível comprovar a eficiência de certas soluções para alcançar condições ideais de conforto e a diminuição do consumo de energia elétrica.

Devido ao tipo de clima de Portugal, pela duração e severidade do inverno, os edifícios apresentam maiores necessidades de consumo de energia para aquecimento do que arrefecimento. Embora seja possível compatibilizar estratégias de projeto de sistemas de fachada ativas e passivas, as soluções solares passivas conduzem a uma maior eficiência energética.

A temperatura do ar exterior e a radiação solar são as variáveis climáticas que mais influenciam os edifícios em termos de transferência de calor. A temperatura do ar, variável indutora das trocas de calor através da envolvente do edifício, determina o estabelecimento de fluxos energéticos do interior para o exterior, que ocorrem fundamentalmente no período de inverno, tratando-se neste caso de perdas térmicas, enquanto no verão o sentido do fluxo tem tendência a inverter-se e estar-se-á numa situação de ganhos térmicos (GONÇALVES; GRAÇA, 2004).

A caracterização do clima de Portugal e seus dados climáticos são instrumentos imprescindíveis de avaliação no planeamento e construção de um sistema de fachadas. Os dados climáticos influenciam no desempenho da edificação sob o aspeto da transferência de calor através dos materiais empregados, que alteram as condições dentro do ambiente interno, em termos da temperatura do ar, temperatura radiante média, ventilação e humidade.

Portugal Continental, localizado aproximadamente entre as latitudes de 37°N e 42°N e as longitudes de 9.5°W e 6.5°W, no extremo Sudoeste da Europa, situa-se na zona de transição entre o anticiclone subtropical (anticiclone dos Açores) e a zona das depressões



subpolares, sendo o clima fortemente influenciado pela proximidade ao Oceano Atlântico (MIRANDA et al, 2003).

Portugal apresenta clima temperado, caracterizado por invernos moderadamente frios, verões quentes e grandes amplitudes térmicas diárias. O clima apresenta variações significativas que podem ser observadas na classificação de zonas climáticas apresentada no RCCTE. Este considera três zonas de inverno (I1, I2 e I3) e três de verão (V1, V2 e V3) (**Figuras 4.1 e 4.2**).

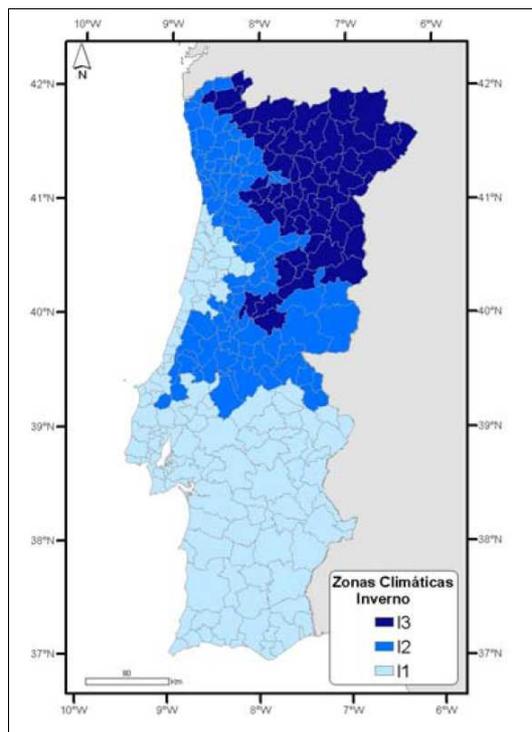


Figura 4.1 Portugal Continental. Zonas Climáticas de Inverno.

Fonte: RCCTE, 2006.

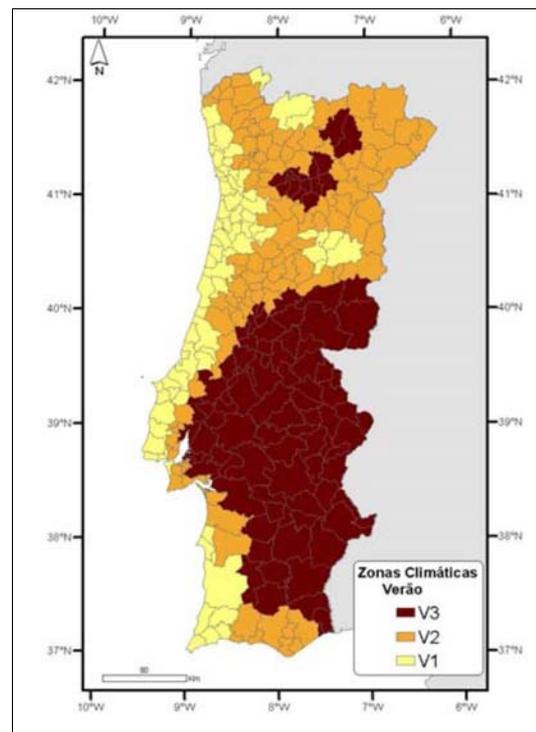


Figura 4.2 Portugal Continental. Zonas Climáticas de Verão.

Fonte: RCCTE, 2006.

As médias da temperatura mínima no inverno (meses de dezembro, janeiro e fevereiro) e da temperatura máxima no verão (junho, julho e agosto – JJA) são apresentadas na **Figuras 4.3 e 4.4** (Dados de observações no período 1961-1990). A temperatura mínima no inverno (**Figura 4.3**) é inferior aos 0°C na parte mais alta (Serra da Estrela), observando-se valores inferiores a 2°C em certas zonas do interior Norte e Centro. Os valores mais elevados da média da temperatura mínima no inverno (cerca de 10°C) ocorrem na costa Sul e na Península de Setúbal. No verão (**Figura 4.4**), a média da temperatura máxima varia entre 26-28°C, na Serra da Estrela, e valores superiores a 32°C na zona de Castelo Branco (interior Centro) e na região de Mourão - Amareleja (interior Sul). Em Trás-os-Montes (interior Norte) a média da temperatura máxima atinge valores superiores a 30°C.

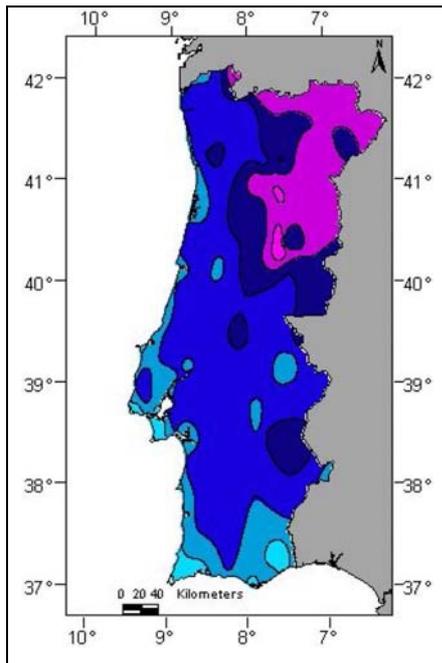


Figura 4.3 Valores médios da temperatura mínima do ar no inverno (dezembro, janeiro, fevereiro).

Fonte: MIRANDA et al, 2003.

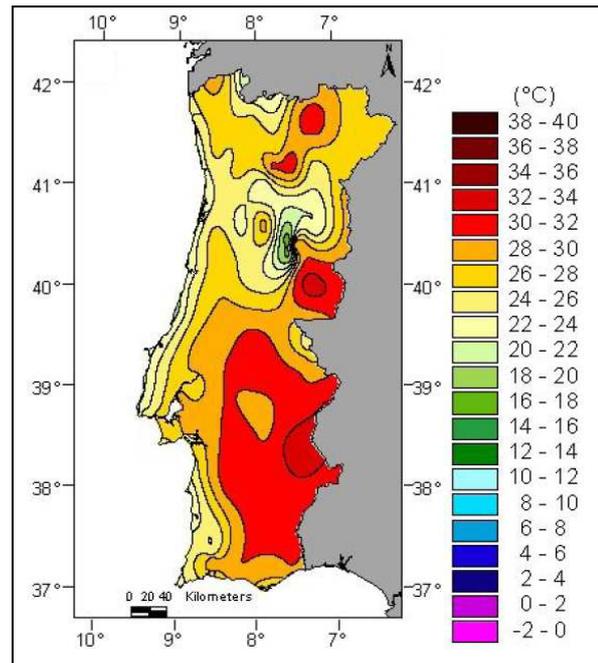


Figura 4.4 Valores médios da temperatura máxima no verão (junho, julho, agosto).

Fonte: MIRANDA et al, 2003.

Na **Figura 4.5** apresenta-se a temperatura média do ar à superfície observada no período 1961-1990. Nesse período, a temperatura média à superfície variou entre um mínimo de 7°C nas zonas altas da Serra da Estrela, e um máximo de 18°C na costa algarvia. A distribuição espacial do número médio de dias por ano com temperatura máxima acima de 35°C. Na **Figura 4.6** são apresentados os designados por “dias muito quentes” (com temperatura máxima superior a 35°C). O máximo absoluto ocorre na região de Mourão-Amareleja, com valores superiores a 30 dias (Dados de observações no período 1961-1990 do Instituto de Meteorologia - IP) (MIRANDA et al, 2003).

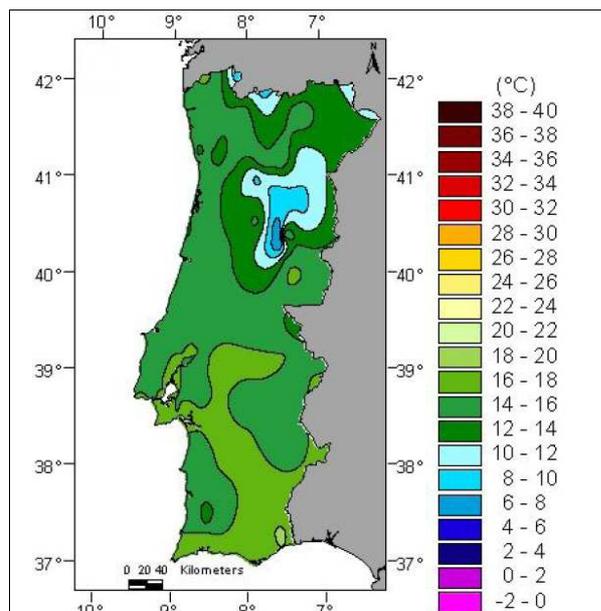


Figura 4.5 Temperatura do ar: Média anual.
Fonte: MIRANDA et al, 2003.

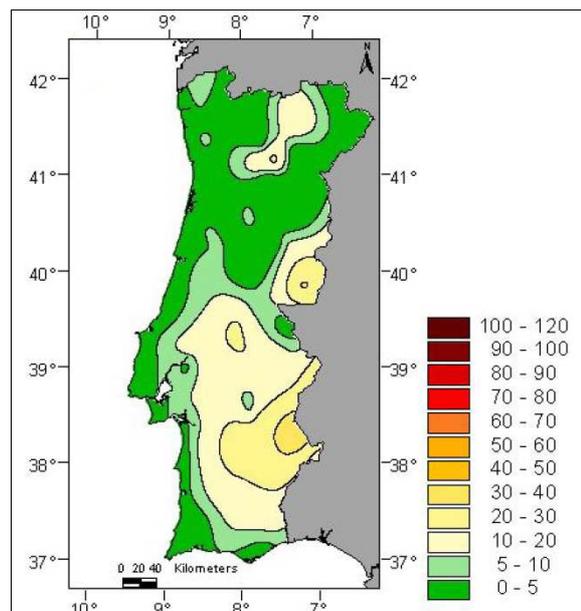


Figura 4.6 Número médio anual de dias muito quentes (com temperatura máxima superior a 35°C).
Fonte: MIRANDA et al, 2003.

Segundo Miranda et al (2003) é previsto um aumento significativo da temperatura média em todas as regiões de Portugal até ao fim do século XXI. No continente, são estimados aumentos da temperatura máxima no verão entre 3°C na zona costeira e 7°C no interior, acompanhados por um grande incremento da frequência e intensidade de ondas de calor.

A variação dos fatores climáticos referidos (latitude, proximidade ao oceano e orografia), embora sendo pequena em Portugal, é suficiente para induzir variações significativas na temperatura e, principalmente, na precipitação observadas em Portugal Continental. Em relação a precipitação, a região Noroeste (Minho) é uma das zonas da Europa que regista valores mais elevados de precipitação, atingindo a média da precipitação anual acumulada nalguns locais valores superiores a 3000 mm.

Os valores médios da radiação solar global em Portugal Continental aumentam, em geral de noroeste para sudeste. A latitude e a proximidade do mar são os principais fatores que explicam estas variações. As regiões do sul recebem maior quantidade de radiação solar devido á menor inclinação dos raios solares. A proximidade do mar faz aumentar a nebulosidade reduzindo a incidência da radiação solar. A **Figura 4.7** apresenta a radiação solar anual média (kWh/m²) incidente para o período de 1981-1990.

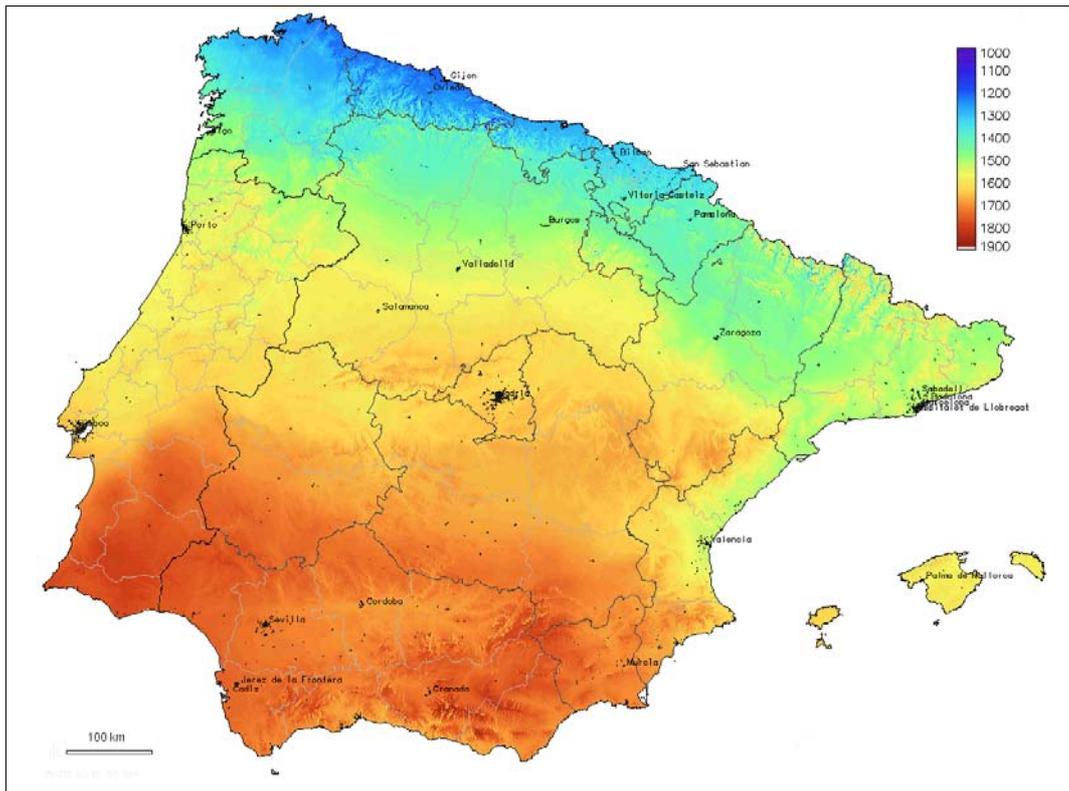


Figura 4.7 Valores médios da radiação solar global no plano horizontal para a Península Ibérica.

Fonte: EUROPEAN COMMISSION, 1981-1990.

Diante disso, observa-se que o potencial disponível para aproveitamento da radiação solar em Portugal para uso em soluções passivas de aquecimento é considerável, sendo um dos países da Europa com melhores condições para aproveitamento deste recurso.

Com base nessas informações, salienta-se que a definição de diferentes climas para serem considerados nas simulações computacionais abrange uma maior quantidade de zonas climáticas em Portugal continental e ilhas, de forma a observar se os mesmos influenciaram no número de soluções com melhor desempenho térmico.

Para o estudo das fachadas foram executadas primeiramente simulações computacionais com prioridade nos requisitos de conforto térmico, e a partir dos resultados obtidos para as necessidades anuais de aquecimento e arrefecimento, as fachadas com desempenho satisfatório foram analisadas sob o ponto de vista da iluminação natural e acústica.

No **Quadro 4.2** e **Figura 4.8** são definidos os climas para as simulações computacionais realizadas neste trabalho de investigação.

**Quadro 4.2** Climas para Simulações computacionais.

Cidades	Cidades	
	Zonas Climáticas	
	Inverno	Verão
Bragança	I ₃	V ₂
Coimbra	I ₁	V ₂
Évora	I ₁	V ₃
Faro	I ₁	V ₂
Funchal-Madeira	I ₁	V ₁
Guimarães	I ₂	V ₂
Lajes-Açores	I ₁	V ₁
Lisboa	I ₁	V ₂
Porto	I ₂	V ₁

**Figura 4.8** Mapa de Portugal Continental e Ilhas: Localidades para as simulações computacionais.

Para tal escolha baseou-se, nas diferentes zonas climáticas existentes em Portugal continental e ilhas, na localização em diferentes pontos do território e, além disso, na disponibilidade de ficheiros climáticos para utilização no software.

4.2.2.2 Definição do Modelo Base

Procurou-se ao estabelecer o modelo base para as simulações de desempenho térmico e iluminação natural, considerar uma célula, cujas dimensões estivessem próximas das recomendações do Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU)²⁵ (2007). De acordo com esse Regulamento, a altura mínima ou pé-direito dos andares, em edificações

²⁵ Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU), 1951. Decreto-Lei n.º 290/2007, de 17 de agosto.

correntes, destinados a habitação é de 2,80m (Art 65.º); Os compartimentos das habitações²⁶, não poderão ter área inferior a **9m²**; nas habitações com menos de cinco compartimentos, um, no mínimo, deverá ter área não inferior a **12m²**, e nas habitações com cinco ou mais compartimentos haverá, pelo menos, dois com **12m²** de área (Art. 66.º).

Além disso, os compartimentos das habitações deverão ser delineados de tal forma que o comprimento não exceda o dobro da largura e que na respetiva planta se possa inscrever, entre paredes, um círculo de diâmetro não inferior a 2m (Art. 69.º); deverão ser sempre iluminados e ventilados²⁷, por um ou mais vãos praticados nas paredes, em comunicação direta com o exterior, e cuja área, no seu conjunto, não seja inferior a 1/10 da área do compartimento, com o mínimo de 0,7m² (Art. 71.º).

Considerando as recomendações citadas acima, para a definição do “modelo base” para as simulações foi fixado um compartimento rés-do-chão isolado, com geometria regular 5,0 x 5,0²⁸ (25m²) (**Figura 4.9**) com pé direito de 2,80 m, e uma dimensão total inicial de 2,5 x 2,5 (6,25m²) para o conjunto de módulos da fachada.

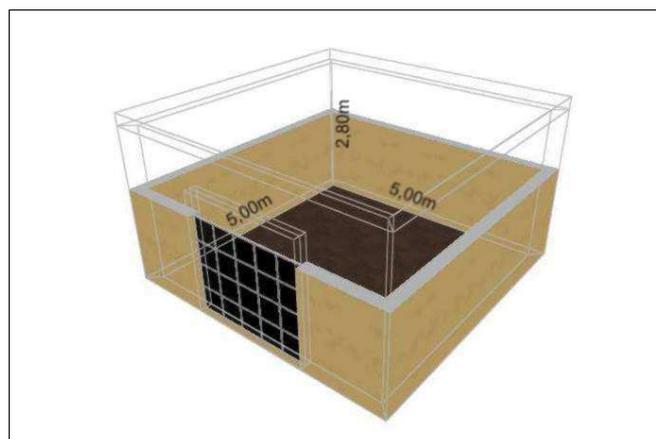


Figura 4.9 Modelo Base.

Envolvente Opaca do Modelo

Para compor o “modelo base” (célula rés-do-chão isolada) foram considerados dois sistemas de envolvente opaca, um deles é sistema construtivo convencional português em alvenaria dupla e o outro é um sistema construtivo típico construções em *light gauge steel framing*. Optou-se por selecionar dois tipos de sistemas de envolvente opaca para analisar a influência nas condições de desempenho. Salienta-se que nas simulações realizadas foi considerada a ausência de trocas térmicas com o solo, por esse motivo as propriedades de tal elemento não serão apresentadas. Além disso, não foi considerada a existência de

²⁶ Não se incluem os vestíbulos, retretes, casas de banho, despensas

²⁷ Não se incluem vestíbulos, corredores pouco extensos e pequenos compartimentos destinados a despensas, vestiários.

²⁸ Posteriormente, na fase de pormenorização observou-se a necessidade de uma maior dimensão dos módulos devido aos pormenores dos perfis de alumínio.



cobertura convencional em telhado, somente uma laje horizontal impermeabilizada, uma vez que o sistema de fachada modular que se pretende desenvolver também é destinado a soluções de reabilitação e o importante seria testar tal solução nas condições mais desfavoráveis²⁹.

O sistema construtivo convencional considerado é composto por lajes maciças de betão leve e paredes exteriores em alvenaria de tijolo furado duplo. A sua composição é apresentada nas figuras e tabelas a seguir (**Figura 4.10, 4.11 e 4.12 e Tabelas 4.15 e 4.16**):

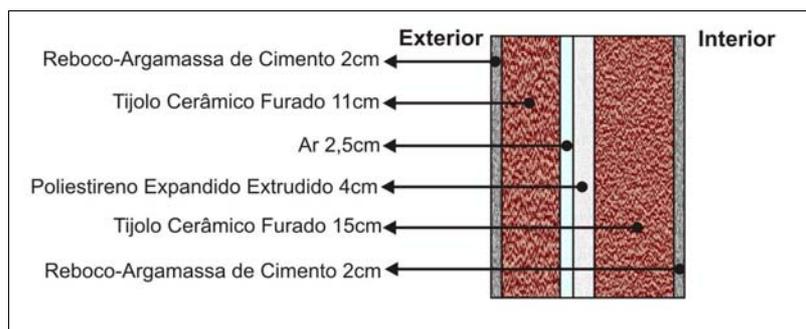


Figura 4.10 Paredes - Sistema Convencional Português.

Tabela 4.15 Composição da Parede-Sistema Convencional Português

Parede: Sistema Convencional Português				
Constituição	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Massa Volúmica (kg/m ³)	R (m ² .°C/W)
Reboco de Argamassa de Cimento	0,02	1,30	2800	0,02
Tijolo Cerâmico Furado 15cm	0,15	-	-	0,39
Camada de Ar	0,025	-	-	0,18
Poliestireno Expandido Extrudado	0,04	0,04	15	1,00
Tijolo Cerâmico Furado 11cm	0,11	-	-	0,27
Reboco de Argamassa de Cimento	0,02	1,30	2800	0,02
R _{Térmica Total} ³⁰	2,04			
U (W/m ² .°C)	0,49			

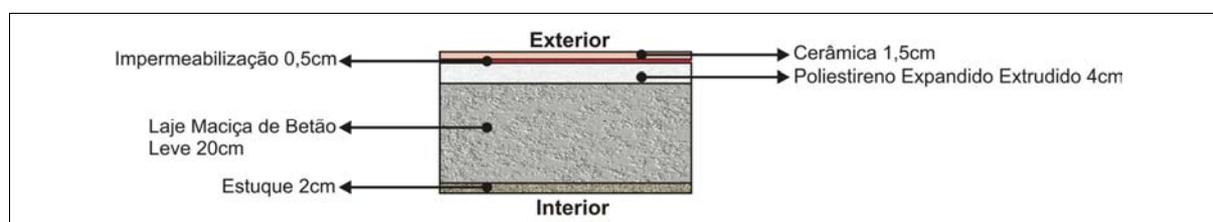


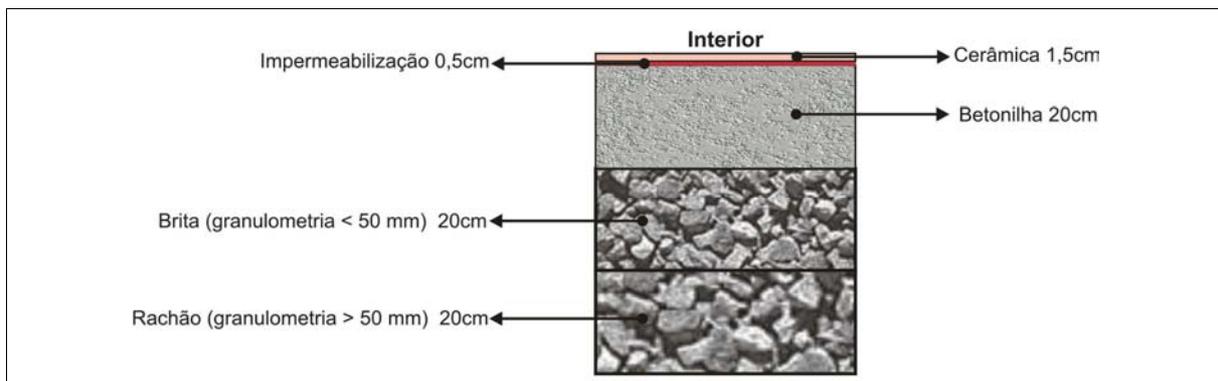
Figura 4.11 Laje de Cobertura - Sistema Convencional Português.

²⁹ As coberturas convencionais constituídas por um telhado inclinado e uma laje de esteira, formando um desvão com características mais ou menos isolantes e dependentes da ventilação do desvão. Ao considerar este tipo de cobertura, seria favorecido o desempenho térmico do modelo, pelo que se optou por utilizar somente uma laje horizontal impermeabilizada.

³⁰ Foi considerado como valor para Resistência Térmica Superficial para paredes: Exterior $R_{se}=0,04$ (m².°C)/ W e Interior $R_{si}= 0,13$ (m².°C)/ W.

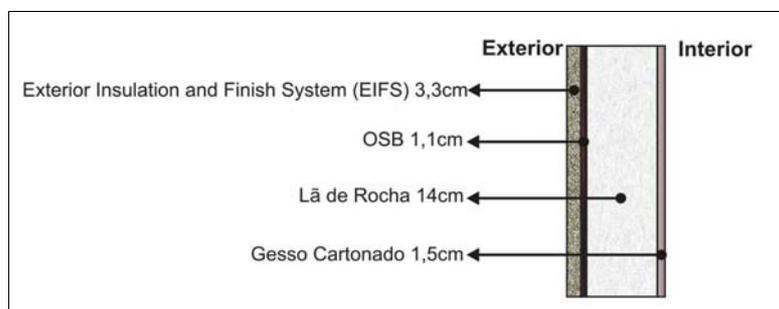
**Tabela 4.16** Composição da Laje de Cobertura-Sistema Convencional Português

Laje de Cobertura: Sistema Convencional Português				
Constituição	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Massa Volúmica (kg/m ³)	R (m ² .°C/W)
Cerâmica	0,015	1,30	2300	0,01
Impermeabilização (Lâmina de Betume)	0,005	0,23	1100	0,02
Poliestireno Expandido Extrudido	0,04	0,037	25	1,00
Laje Maciça de Betão Leve (<i>Cast Concrete-Lightweight</i>)	0,20	0,46	1200	0,53
Estuque	0,02	0,56	1300	0,04
R Térmica Total ³¹	1,79			
U (W/m ² .°C)	0,56			

**Figura 4.12** Laje do Pavimento - Sistema Convencional Português.

Como não foram consideradas nas simulações trocas térmicas com o solo, as propriedades térmicas da laje de pavimento não serão apresentadas.

As informações apresentadas a seguir detalham a envolvente do sistema *Light Gauge Steel Framing*³² que foi utilizado nas simulações computacionais (**Figuras 4.13, 4.14 e 4.15**; e **Tabelas 4.17 e 4.18**). A definição da composição da envolvente está baseada no trabalho de Santos et al (2009), com algumas modificações, neste caso específico a adição de uma camada de impermeabilização na laje de cobertura.

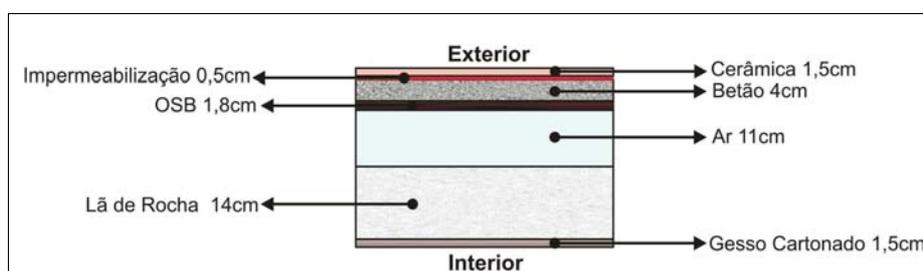
**Figura 4.13** Paredes-Sistema *Light Gauge Steel Framing*.

³¹ Foi considerado como valor para Resistência Térmica Superficial para lajes: Exterior $R_{se}=0,04$ (m².°C)/ W e Interior $R_{si}= 0,17$ (m².°C)/ W.

³² SANTOS, P., GERVÁSIO, H., SIMÕES DA SILVA, L.; GAMEIRO, A. Influence of climate change on the energy efficiency of Light steel residential buildings. *Energy Conversion and Management*. Elsevier, 2009.

**Tabela 4.17** Paredes - Sistema *Light Gauge Steel Framing*

Parede: Sistema <i>Light Gauge Steel Framing</i>				
Constituição	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Massa Volúmica (kg/m ³)	R (m ² .°C/W)
EIFS (<i>Exterior Insulation and Finish System</i>)	0,033	-	-	3,13
OSB (<i>Oriented Strand Board</i>)	0,011	0,13	650	0,08
Lã de Rocha (Parede)	0,14	0,04	40	3,50
Gesso Cartonado	0,015	0,25	900	0,06
R Térmica Total ³³	6,94			
U (W/m ² .°C)	0,14			

**Figura 4.14** Laje de Cobertura-Sistema *Light Gauge Steel Framing*.**Tabela 4.18** Laje de Cobertura- Sistema *Light Gauge Steel Framing*

Cobertura Sistema <i>Light Gauge Steel Framing</i>				
Constituição	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Massa Volúmica (kg/m ³)	R (m ² .°C/W)
Cerâmica	0,015	1,30	2300	0,01
Impermeabilização (Lâmina de Betume)	0,005	0,23	1100	0,02
Betão (<i>Cast Concrete</i>)	0,04	1,65	2000	0,02
OSB (<i>Oriented Strand Board</i>)	0,018	0,13	650	0,14
Camada de Ar	0,11	-	-	0,18
Lã de Rocha (Cobertura)	0,14	0,042	150	3,33
Gesso Cartonado	0,015	0,25	900	0,06
R Térmica Total ³⁴	3,98			
U (W/m ² .°C)	0,25			

Como nas simulações não foram consideradas trocas térmicas com o solo, as propriedades da laje de pavimento não serão apresentadas, sendo que a composição considerada é a mesma tanto para o sistema convencional quanto para o sistema *light gauge steel framing*.

³³ Foi considerado como valor para Resistência Térmica Superficial para Paredes: Exterior $R_{se}=0,04$ (m².°C)/ W e Interior $R_{si}= 0,13$ (m².°C)/ W.

³⁴ Foi considerado como valor para Resistência Térmica Superficial para Lajes: Exterior $R_{se}=0,04$ (m².°C)/ W e Interior $R_{si}= 0,17$ (m².°C)/ W.

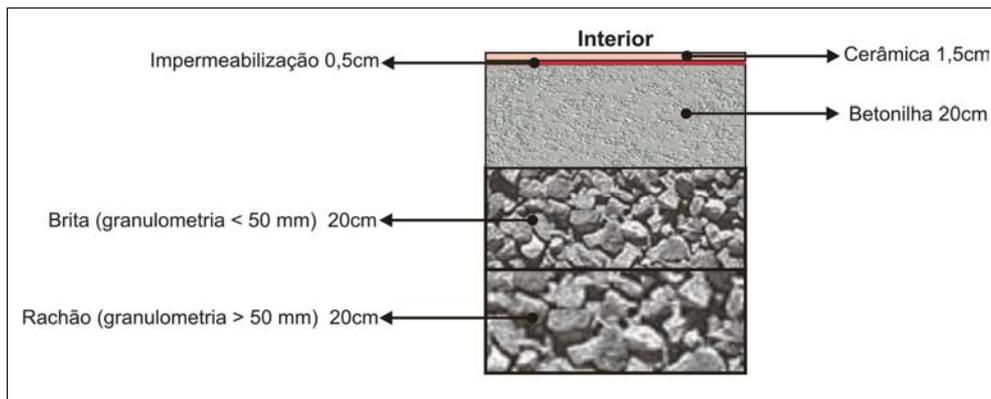


Figura 4.15 Laje do Pavimento-Sistema *Light Gauge Steel Framing*.

A **Tabela 4.19** apresenta uma síntese da envolvente de acordo com o tipo de sistema e os valores do Coeficiente de Transmissão Térmica ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) para paredes e laje de cobertura.

Tabela 4.19 Síntese - Coeficientes de Transmissão Térmica ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) de Referência

Coeficiente de Transmissão Térmica ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)		
Elemento-Envolvente	Sistema Convencional Português	
	Espessura Total (m)	U ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
Paredes Exteriores	0,365	0,49
Laje de Cobertura	0,280	0,56
Elemento-Envolvente	Sistema <i>Light Gauge Steel Framing</i>	
	Espessura Total (m)	U ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
Paredes Exteriores	0,199	0,14
Laje de Cobertura	0,343	0,25

4.2.2.3 Ganhos Internos

Nesta secção serão apresentados os ganhos internos considerados nas simulações computacionais de desempenho térmico em termos de ocupação, iluminação elétrica, equipamentos e aparelhos elétricos.

No RCCTE é apresentado um valor de $4W/m^2$ para as cargas internas referentes à soma de todos os perfis (ocupação, iluminação e equipamentos), porém devido as possibilidades e opções de simulação oferecidas pelo software *DesignBuilder* foram consideradas as cargas internas separadas para os perfis de ocupação, iluminação e equipamentos.

Como o RCCTE não contempla os perfis (dias da semana e horários) de ocupação, iluminação e uso de equipamento para edifícios de habitação, foram adotados valores



retirados do trabalho de investigação: “Obtenção dos perfis de utilização, iluminação e de equipamentos das habitações residenciais³⁵” que é adaptada à realidade portuguesa.

Ocupação

O calor libertado pelo metabolismo humano varia ao longo do dia e de acordo com a atividade que esta sendo realizada. Para estimar tal valor pode-se referir, por exemplo, a dados de Fanger (1972) e Guyton (1986), que indicam que uma pessoa em repouso pesando cerca de 70kg gera cerca de 75W de calor (SAILOR, 2010).

Neste caso, foi considerada uma carga térmica emitida pelos ocupantes com uma potência padrão de 70 W/pessoa, e, além disso, a ocupação de 2 pessoas. O período de ocupação é apresentado na **Figura 4.16** a seguir.

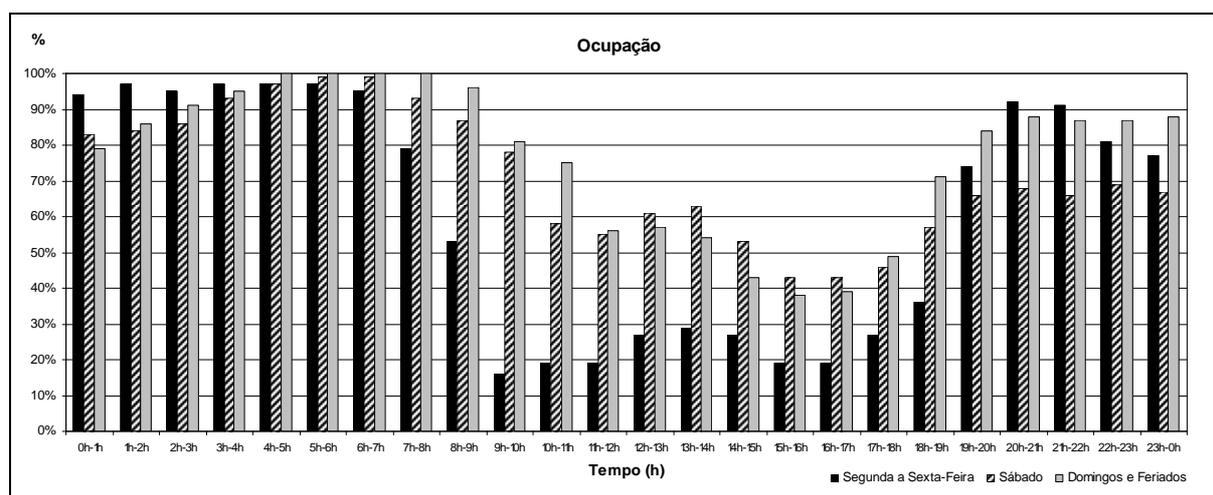


Figura 4.16 Período de Ocupação.

Fonte: Adaptado de SOUSA (2008).

Iluminação Elétrica

De acordo com a NBR 5413: Iluminância de interiores (ABNT, 1992), o nível de iluminância para a iluminação geral para áreas usadas para tarefas visuais simples e variadas, está entre 250 a 500 lux. Considerando então um valor iluminância de 300 lux, uma lâmpada fluorescente (40W) com eficiência de 80lm/W (40% de eficiência de distribuição) a potência térmica de iluminação será:

$$(300 \text{ lux} / 80 \text{ lm/W}) / 0,4 = 9,4 \text{ W/m}^2$$

³⁵ SOUSA, O. J. S. *Obtenção dos perfis de utilização, iluminação e de equipamentos das habitações residenciais*. Relatório de Projeto Individual. Universidade do Minho, 2008.



Sendo assim, um valor razoável para a quantificação da potência térmica de iluminação é de $9,4 \text{ W/m}^2$. O período de funcionamento da iluminação artificial foi adaptado de Sousa (2008) (Figura 4.17).

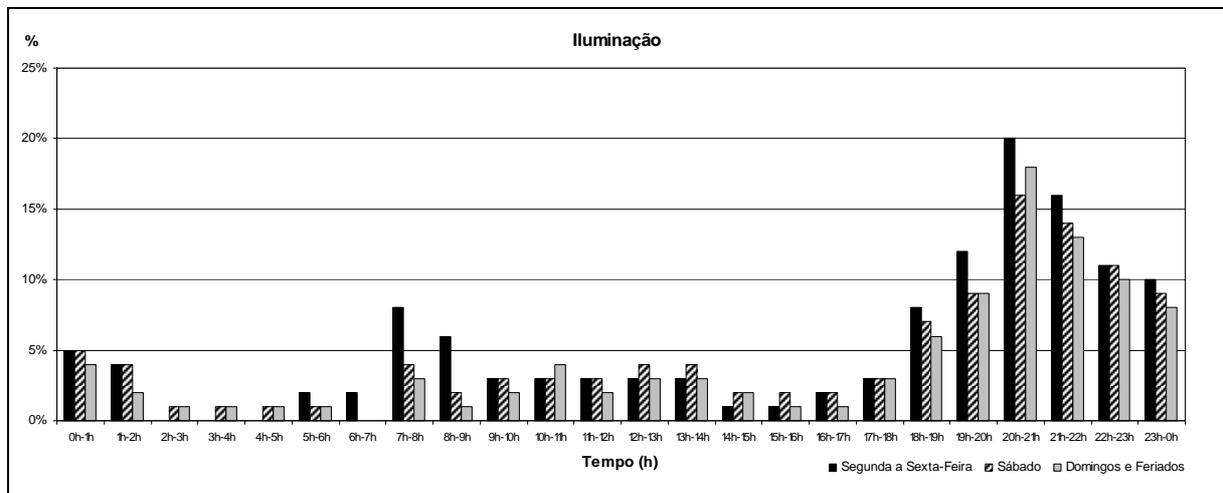


Figura 4.17 Período de Uso de Iluminação Elétrica.

Fonte: Adaptado de SOUSA (2008)

Equipamentos e Aparelhos Elétricos

Para o cálculo da potência elétrica total foram recolhidos dados referentes aos valores de cada equipamento e a partir da soma da potência total dividida pela área foi obtida a potência total dos equipamentos no ambiente (8W/m^2) (Tabela 4.23). O perfil de utilização dos equipamentos obedece às informações da Figura 4.20.

Tabela 4.20 Equipamentos Elétricos.

Equipamentos Elétricos	
Equipamentos	Potência
TV	100
Portátil	55
Hi-fi	15
DVD	30
Total	200W

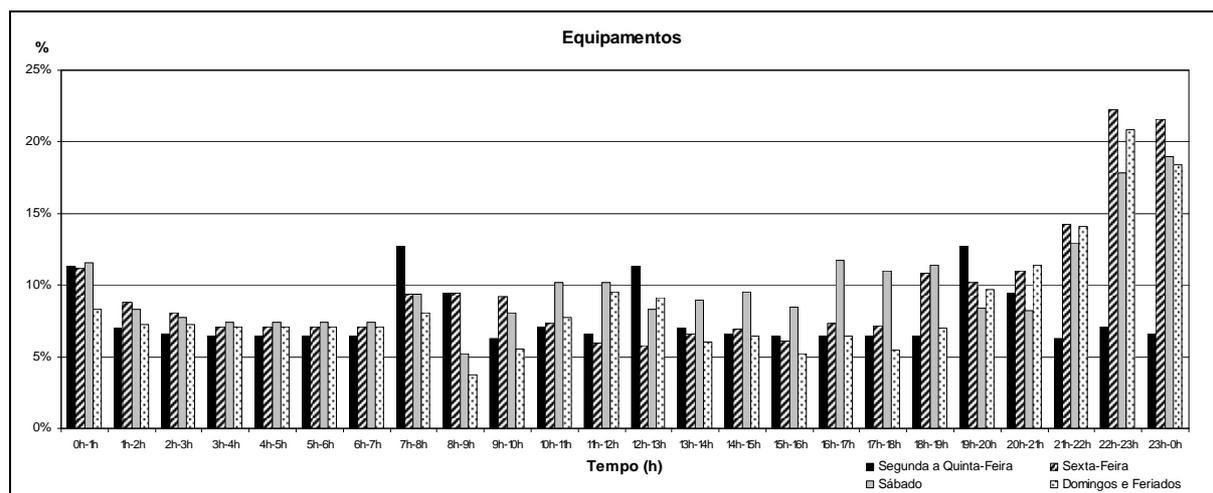


Figura 4.18 Período de Uso de Equipamentos.

Fonte: Adaptado de SOUSA (2008).

Em síntese, no que diz respeito aos ganhos internos considerou-se uma ocupação de tipo habitacional na qual o ambiente tem uma ocupação de 2 pessoas (carga térmica emitida pelos ocupantes de 70W por pessoa), densidade de iluminação de 9,4W/m², uma densidade de equipamentos de 8W/m² (calculada com base nos equipamentos existentes) (Tabela 4.21).

Tabela 4.21 Síntese dos Ganhos Internos.

Ganhos Internos		
Densidade de Iluminação	Densidade de Equipamentos	Pessoas
9,4W/m ²	8W/m ²	70W/pessoa

4.2.2.4 Período de Funcionamento dos Sistemas

Nas simulações o período de funcionamento dos sistemas é de extrema importância, para tal foi considerado o uso de equipamentos que funcionam de acordo com as estações convencionais de aquecimento e arrefecimento. Os equipamentos de HVAC são elétricos e possuem coeficiente de performance (COP)³⁶ igual a 1, esse coeficiente indica a eficiência dos equipamentos.

Com base no RCCTE a **estação convencional de aquecimento** (inverno) tem início no primeiro decêndio posterior a 1 de outubro, em que para cada localidade a temperatura média diária é inferior a 15°C e o termo é no último decêndio anterior a 31 de maio em que a referida temperatura ainda é inferior a 15°C. Já a **estação convencional de arrefecimento**

³⁶ O coeficiente de performance, COP, é um parâmetro fundamental na análise de sistemas de aquecimento e arrefecimento. Tal coeficiente indica a eficiência no consumo de energia. Quanto maior o COP maior a eficiência no uso de energia.



(verão) é o conjunto dos quatro meses de verão (junho, julho, agosto e setembro) em que é maior a probabilidade de ocorrência de temperaturas exteriores elevadas que possam exigir arrefecimento ambiente em edifícios com pequenas cargas internas.

Para o funcionamento dos dispositivos de proteção solar, nas soluções finais de composição de fachadas com melhor desempenho térmico de acordo com os climas e orientações solares será a seguinte: na estação de aquecimento este dispositivo permitirá a entrada da radiação solar entre as 9:00h e as 18:00h e ocultará o envidraçado nos restantes períodos do dia.

4.2.2.5 Condições de Referência

Para determinação do consumo energético de cada solução analisada nas simulações de desempenho térmico, foram considerados alguns parâmetros relacionados às temperaturas internas para verão e inverno, ventilação natural e necessidades energéticas que serão apresentadas nesta secção.

De acordo com o RCCTE (RCCTE, 2006) existem alguns parâmetros que devem ser atendidos para a temperatura do ambiente interior (inverno e verão), humidade relativa do ar e taxa de renovação do ar. As condições ambientes de conforto de referência são: uma temperatura do ar de 20°C para a estação de aquecimento (inverno) e uma temperatura do ar de 25°C para a estação de arrefecimento (verão) e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento. A renovação do ar fixada para garantia da qualidade do ar interior é de 0,6 renovações por hora, de acordo com o RCCTE (RCCTE, 2006). Os perfis de ativação da ventilação são de acordo com o apresentado na **Figura 4.19**.

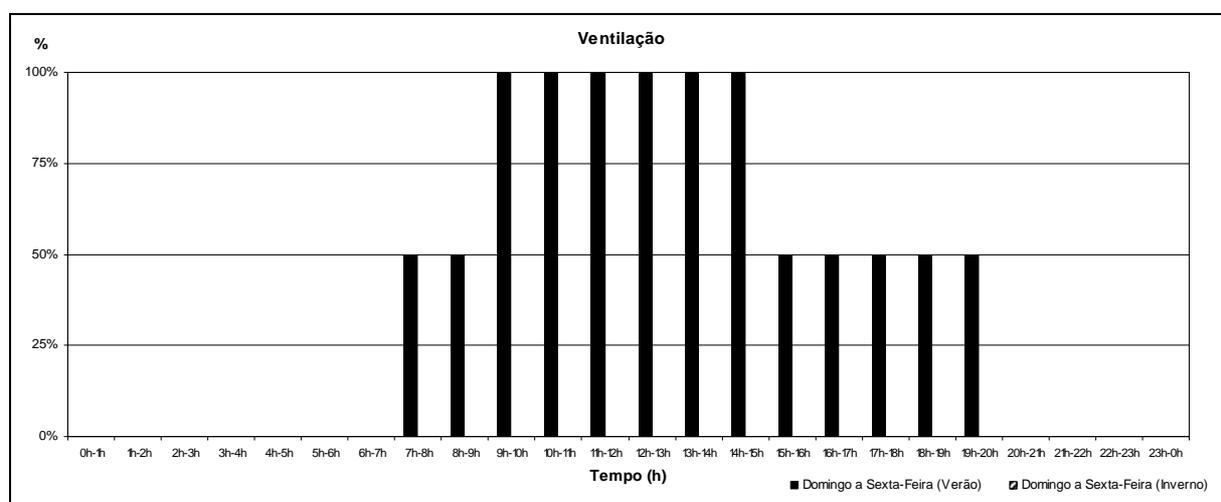


Figura 4.19 Período de Ventilação Natural.

Fonte: Adaptado com base nos perfis existentes no software.



Para comparação com os resultados das simulações computacionais está sendo considerado o valor máximo admissível das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_i) e o valor máximo admissível das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_v). Esses valores serão comparados com os resultados obtidos nas simulações para cada configuração de fachada, e, além disso, os resultados poderão ser comparados entre si com a variação de materiais e soluções passivas.

De acordo com o artigo 15º. do RCCTE, os valores limites das necessidades nominais de energia útil para aquecimento (N_i) de uma fração autônoma, em kWh/m².ano, dependem dos valores do fator de forma (FF) da fração autônoma e dos graus-dia (GD) do clima local. No caso do “modelo base” das simulações detalhado anteriormente (5 x 5m²; pé direito de 2,80m) o Fator de Forma (FF), será:

$$FF = [A_{ext} + \sum (\tau A_{int})_i] / V$$

$A_{ext} = 81\text{m}^2$ (Somatório das áreas da envolvente exterior)

$A_{int} = 0$ (Somatório das áreas da envolvente interior) (Não existe envolvente interior)

$V = 5 \times 5 \times 2,8 = 70\text{m}^3$ (Volume Interior)

Logo $FF = 1,16$

Para fator de forma entre $1 < FF \leq 1,5$

$$N_i = [4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD] (1,2 - 0,2FF)$$

Os valores nominais de energia útil para arrefecimento (N_v) de uma fração autônoma dependem da zona climática do local e tais valores são indicados no Artigo 15º. do RCCTE. A **Tabela 4.22** apresenta em síntese o número de graus-dia, as necessidades nominais de aquecimento e as necessidades nominais de arrefecimento das cidades selecionadas para execução das simulações.

Tabela 4.22 Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento de acordo com o RCCTE.

Necessidades Nominais de Aquecimento e Arrefecimento do Modelo Base			
Cidades	Número de Graus-dias (GD) (°C.dias)	Necessidade de Aquecimento (kWh/m ² .ano)	Necessidade de Arrefecimento (kWh/m ² .ano)
Bragança	2850	128,70	18,00
Coimbra	1460	68,13	18,00
Évora	1390	65,08	32,00
Faro	1060	50,69	32,00
Fuchal-Madeira	962	46,42	23,00
Guimarães	1770	81,64	18,00
Lajes-Açores	732,5	36,42	21,00
Lisboa	1190	56,36	32,00
Porto	1610	74,66	16,00



4.2.2.6 Visão Geral das Simulações Computacionais

Será apresentado nesta secção uma visão geral das etapas seguidas em termos de simulações computacionais para o desenvolvimento do sistema de fachadas modular proposto.

O desempenho térmico foi a prioridade das simulações computacionais. Juntamente com o sistema de fachadas modular foi analisado o uso de dois tipos de envolvente, uma do sistema convencional português (alvenaria dupla) e outra típica do sistema *light gauge steel framing*; quatro orientações solares: norte, sul, este e oeste e nove climas que inclui Portugal continental e ilhas, como detalhado anteriormente. As configurações de fachada, combinando os módulos para as quais for obtido melhor desempenho térmico foram também analisadas sob o ponto de vista da iluminação natural e, além disso, foram analisados sistemas fotovoltaicos para previsão de microgeração energética para o módulo fotovoltaico e feita uma previsão de desempenho acústico para os módulos envidraçados.

Após selecionado o software a utilizar foram executados testes e algumas simulações computacionais iniciais de desempenho térmico para algumas composições de fachadas, sendo elas: fachada envidraçada (envidraçado duplo *low-e*); fachada envidraçada e parede de Trombe (1 parede de Trombe; 1 parede de Trombe ventilada; 2 paredes de Trombe; 2 paredes de Trombe ventiladas), isso para os dois tipos de envoltentes, o sistema tradicional português o sistema *light gauge steel framing*, para a cidade de Guimarães. Foram estudadas as soluções de fachada e também a influência do tipo de envolvente nas condições de conforto.

Foram comparados os resultados das simulações executados no software escolhido (interface gráfica para *EnergyPlus*) e do mesmo ficheiro exportado para o *EnergyPlus*, de forma a verificar e testar a compatibilidade em termos de resultados. Para a análise dos resultados das simulações iniciais de teste foram comparadas as necessidades anuais de aquecimento da fachada com envidraçado duplo *low-e* às necessidades anuais de aquecimento com a incorporação de soluções passivas, neste caso inicial os tipos de paredes de Trombe citados anteriormente.

Posteriormente, após a escolha e verificação do software a utilizar nas simulações de desempenho térmico foram selecionadas dez composições de envidraçados duplos a ser utilizados nas simulações para apenas dois climas dos nove determinados, de forma a fazer uma triagem inicial dos envidraçados com melhor desempenho dentre as 10 composições para serem posteriormente selecionadas para executar as simulações para os sete climas restantes.



A análise dos resultados foi feita com base nos valores máximos admissíveis das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_i) e o valor máximo admissível das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_v) para cada localidade (RCCTE, 2006). Esses valores foram comparados com os resultados obtidos nas simulações de desempenho térmico.

Com base nos resultados das composições de fachadas que apresentaram melhor desempenho térmico de acordo com o tipo de clima e orientação foram realizadas simulações de composições de fachada pré-estabelecidas que incluíram soluções passivas de aquecimento e arrefecimento (módulo parede de Trombe - uma ou duas paredes; módulo estufa e módulo de ventilação, módulo de proteção solar) para os mesmos nove climas, desta vez considerando os módulos envidraçados com melhor desempenho térmico determinados anteriormente. Novamente foram executadas simulações para nove diferentes climas; dois tipos de envolvente; quatro orientações solares (norte, sul, este e oeste) e envidraçados.

Posteriormente, tendo os resultados das composições de fachadas que apresentaram melhor desempenho térmico de acordo com o tipo de clima e orientação solar e os resultados dos ensaios espectrofotométricos foram executadas simulações com o mesmo modelo base para avaliar o desempenho em termos de iluminação natural utilizando o software *Ecotect* versão 5.60.

Foi também avaliado o desempenho do módulo fotovoltaico nos software *Solterm* 5.0 e *Sunny Design* 2.0 para comparação dos resultados de microgeração com os consumos energéticos obtidos nas simulações de desempenho térmico. A partir dos resultados de rendimento da microgeração energética, tais valores puderam ser comparados em relação ao consumo energético observado nas simulações de desempenho térmico das fachadas com maior consumo, por exemplo, executadas anteriormente no software *DesignBuilder*.

4.2.2.7 Simulações de Desempenho Térmico

Primeiramente serão apresentados os detalhes envolvidos na execução das simulações computacionais de desempenho térmico. Para tais simulações foram consideradas as informações fornecidas anteriormente, nos itens: definição dos envidraçados e modelo base (envolventes opacas do modelo); ganhos internos (ocupação; iluminação elétrica, equipamentos e aparelhos elétricos); período de funcionamento dos sistemas e condições de referência, bem como a utilização do software *DesignBuilder* 1.8.



DesignBuilder 1.8

Essa ferramenta permite o desenho, a fácil modelagem de edificações em conjunto com simulações de conforto térmico e consumo energético. As ferramentas existentes permitem a modelagem de edifícios mais complexos, entre outras vantagens como: dados do comportamento físico e ambiental do edifício, bem como imagens/filmes, a qualquer estágio do desenvolvimento do modelo; possibilidade de se obter dados concretos de funcionamento do edifício e ferramenta útil no desenvolvimento de edifícios energeticamente eficientes e que agregam soluções passivas. E, além disso, permite a coleta de dados concretos sobre o funcionamento do edifício para utilização no processo de concepção. A versão do programa utilizada neste trabalho de investigação foi *DesignBuilder* v. 1.8. Trata-se de uma interface gráfica para o programa de simulação térmica *EnergyPlus*, na qual a inserção de dados de soluções mais complexas pode ser feita graficamente (**Figura 4.20**).

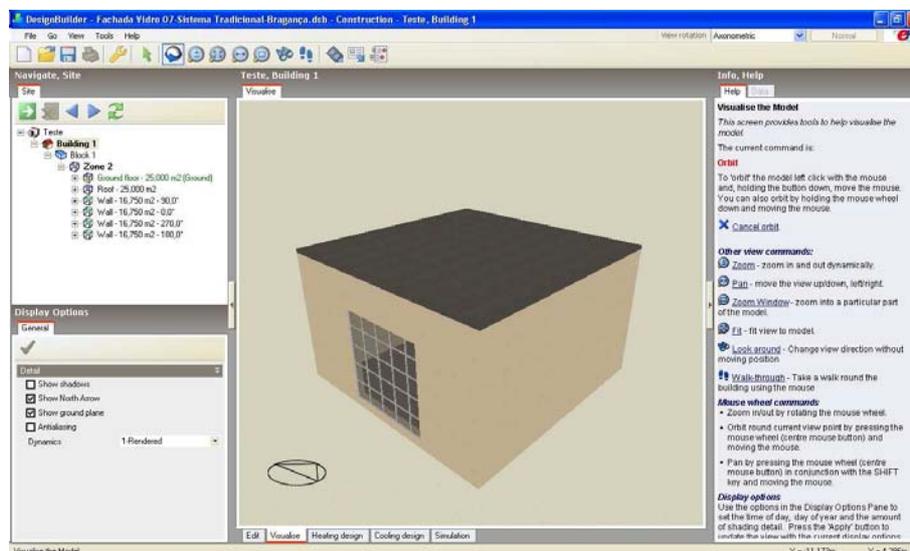


Figura 4.20 Exemplo da interface do software *DesignBuilder* com a visualização do modelo.

A plataforma de modelação em 3D do *DesignBuilder* é de fácil e rápida manipulação. Existem poucas limitações de geometrias além de ter disponíveis elementos realísticos que fornecem de forma visual e imediata detalhes como espessuras de paredes, janelas, coberturas, detalhes dos vãos envidraçados e ainda uma boa visualização das áreas e volumes gerados.

É possível atribuir aos modelos simulados os dados e as características dos edifícios analisados (possui um vasto banco de dados de materiais, bem com possibilita a inserção de novos materiais); características detalhadas em termos de ganhos internos; sistemas de AVAC; iluminação natural e artificial e ventilação, a partir de uma interface simples. O modelo inserido apresenta estrutura hierarquizada, permitindo a definição e alteração de



forma rápida das características do edifício, desde o nível mais geral, do edifício em si, ao nível mais detalhado como zonas, paredes, coberturas, etc. O programa oferece uma gama de dados de desempenho ambiental, tais como: consumo energético anual, temperaturas máximas de verão e dimensionamento dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado.

Os modelos feitos no *DesignBuilder* obedecem à seguinte hierarquia: Local de implantação, edifício, blocos, zonas, superfícies e aberturas. As características que são apresentadas “por defeito” no programa são herdadas do nível mais alto nesta hierarquia (Figura 4.21).

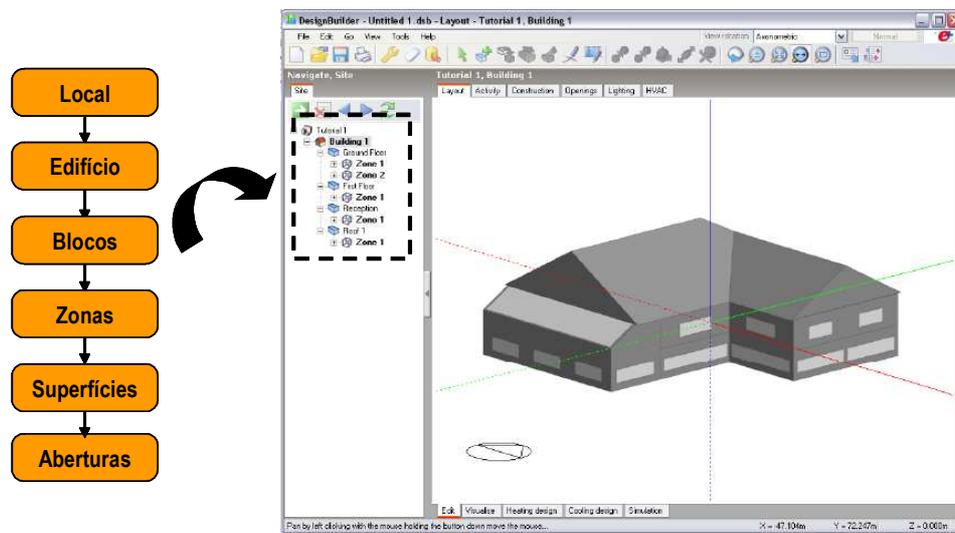


Figura 4.21 Hierarquia seguida pelo software *DesignBuilder*.

Alguns usos típicos são destinados ao cálculo do consumo energético dos edifícios; avaliação de opções de fachada para o superaquecimento e seu aspeto visual; simulação térmica dos edifícios com ventilação natural; simulação de sistemas de controlo de iluminação natural e cálculo da economia energética na iluminação elétrica; visualização de *layouts* e dispositivos de sombreamento; dimensionamento de equipamentos de aquecimento e refrigeração, entre outros. O programa oferece ainda a possibilidade de simular outros tipos de soluções mais complexas, tais como: modelos de grandes dimensões; simulação do local de implantação; simulação de modelos e seu entorno; simulação de envidraçados electrocrómicos, paredes de Trombe, fachadas duplas, entre outras opções (DESIGNBUILDER, 2008).

As facilidades de uso desse software incluem a possibilidade de inserção de tecnologias passivas que poderiam ser complexas de serem criadas diretamente no *EnergyPlus* e mesmo com auxílio de outras interfaces gráficas. Em comparação com as



demais interfaces o *DesignBuilder* é uma boa escolha devido ao seu vasto banco de dados de materiais (**Figura 4.22**).

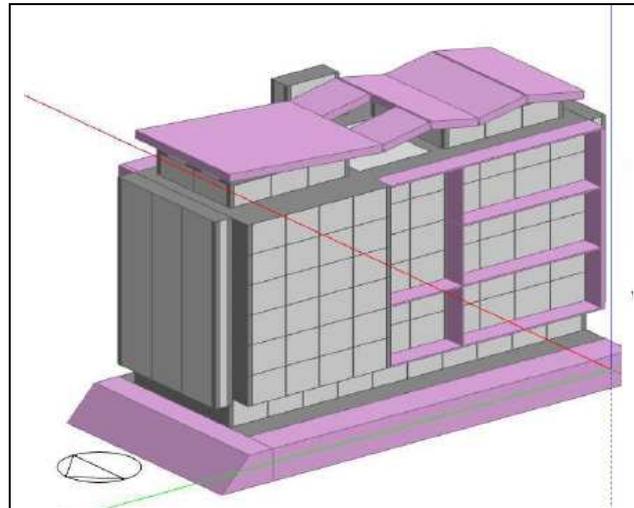


Figura 4.22 Modelo multipavimentos confeccionado no *DesignBuilder*.

Fonte: DESIGNBUILDER SOFTWARE, 2009.

O diagrama da **Figura 4.23** ilustra como deve ser feita a definição dos blocos componentes dos modelos a simular. Na execução dos modelos no software *DesignBuilder* deve-se considerar alguns aspetos como: o desenho dos blocos é feito considerando as dimensões externas; os blocos incluem a laje de piso, mas não a laje do bloco posicionado acima dele. Sendo assim, a altura do bloco é medida a partir da parte inferior da laje de piso até a base da laje do bloco acima; os pisos externos são colocados abaixo do bloco, por isso, ao desenhar um bloco com um piso externo, deve-se excluir a espessura do piso externo na altura e as dimensões da superfície da zona (mostrado nas linhas verdes pontilhadas da **Figura 4.23**) são medidas a partir arestas interiores das paredes exteriores e da linha de centro das paredes divisórias.

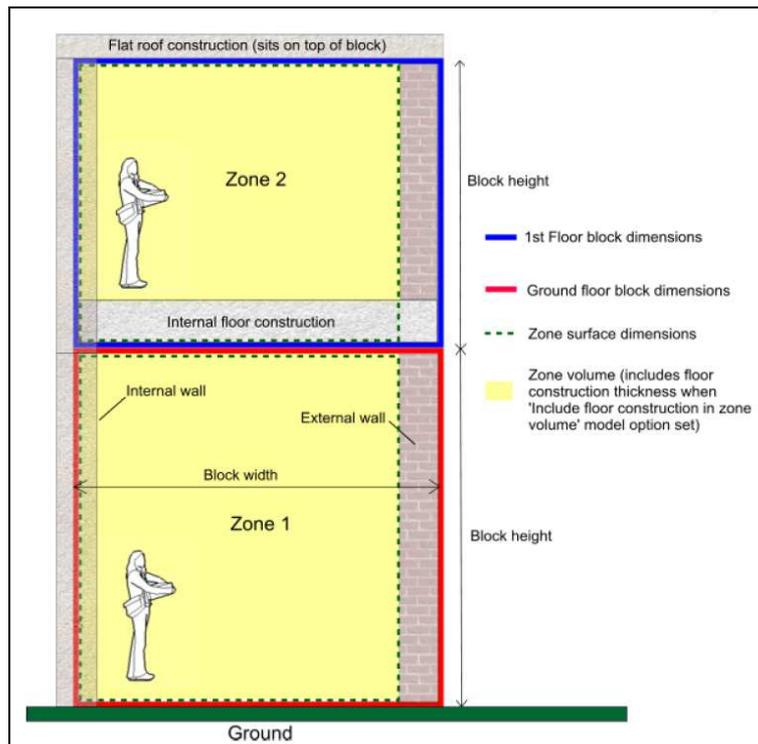


Figura 4.23 Esquema mostrando como o *DesignBuilder* considera os blocos e definição de zonas nos modelos simulados.

Fonte: DESIGNBUILDER SOFTWARE, 2008.

As zonas possuem dimensões internas determinadas a partir das espessuras das paredes. A espessura das paredes externas dos blocos é considerada para criar as zonas, caso contrário não há efeito térmico. As espessuras de divisórias internas não são consideradas nos cálculos. Em planta, o perímetro das zonas formadas no programa se limita às faces interiores das paredes externas e na linha central das paredes internas ao modelo, como apresentado na **Figura 4.24**.

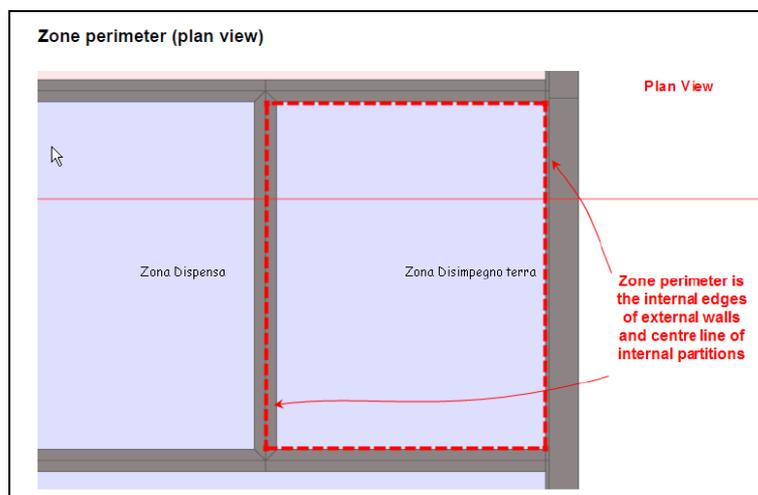


Figura 4.24 Planta: Perímetro das zonas formadas pelo *DesignBuilder*.

Fonte: DESIGNBUILDER SOFTWARE, 2008.



Para simular paredes de Trombe no programa, como no caso deste trabalho de investigação, deve-se utilizar uma opção de algoritmo de convecção do ar interior chamada "cavity" (cavidade). Nesta opção, a zona torna-se uma cavidade, formada pelo espaço entre o vidro e a parede massiva, como é o caso também de fachadas duplas. Este algoritmo calcula corretamente os coeficientes de convecção para uma cavidade vertical e estreita com base na ISO 15099³⁷. Tal algoritmo analisa a zona formada pela parede de Trombe de forma a descobrir quais são as duas grandes superfícies e define os coeficientes de convecção para essas superfícies. As outras superfícies menores recebem convecção desprezável (DESIGNBUILDER SOFTWARE, 2008).

No caso de paredes de Trombe ventiladas naturalmente, não há nenhum algoritmo específico para o cálculo dos coeficientes de convecção no interior da cavidade. Uma opção é usar o "detailed" (detalhado). Este algoritmo considera alguns efeitos de convecção, mas destina-se a uma zona de dimensões normais, diferentemente do algoritmo "cavity" que é específico para pequenas áreas desocupadas. O algoritmo "detailed" correlaciona o coeficiente de transferência de calor para a diferença de temperatura de acordo com diversas orientações.

É possível definir aberturas nas superfícies da parede Trombe, que podem ser controladas por perfis de ativação (DESIGNBUILDER SOFTWARE, 2008). No caso desta pesquisa foram testados nos estudos iniciais ambos os algoritmos para uso na parede de Trombe, mas devido a pequena área de ventilação (0.10x0.20m²) não foram observadas diferenças significativas no consumo energético para o modelo testado, sendo assim, optou-se por usar o algoritmo de convecção "cavity". Além disso, esse algoritmo considera a zona desocupada. O mesmo considerou-se para a simulação dos modelos com módulos estufa, devido às suas pequenas dimensões.

É importante também certificar-se que o algoritmo de distribuição solar esteja ajustado para "full interior and exterior" (interior e exterior completo), para que grande parte do fluxo de radiação solar seja direcionada sobre a superfície de absorção e não somente sobre a pequena área do piso da zona da parede de Trombe. Este algoritmo permite que a radiação solar seja distribuída com maior precisão nas superfícies da zona interna. A opção padrão "full exterior" (exterior completo) assume que toda a radiação solar incide no piso, o que não é adequado para a modelagem de absorção solar de uma parede de Trombe.

Em termos de simulação de ventilação natural, existe no *DesignBuilder* duas opções gerais para simulação da ventilação e infiltração nos edifícios, que são: "scheduled"

³⁷ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 15099: *Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2003.



(programado) e “*calculated*” (calculado). Na opção “*scheduled*” a taxa de ventilação natural é explicitamente definida para cada zona em termos de um valor máximo de renovações por hora e um perfil programado de funcionamento de acordo com as horas do dia e período do ano. É considerada também uma taxa de infiltração do ar, definida por um valor constante. Já na opção “*calculated*” a ventilação natural e infiltração são calculadas com base nas aberturas de janelas, rachaduras, diferenças de pressão do vento conduzido, etc. Geralmente escolhe-se a opção “*scheduled*” para a ventilação natural, quando é possível fazer uma estimativa razoável das taxas de ventilação e de infiltração para o modelo simulado, como foi o caso deste trabalho de investigação. De acordo com a complexidade do modelo, tais estimativas são mais complexas, tornando-se necessário calcular o fluxo de ar.

Porém, para melhores resultados de simulação de ventilação natural, o mais indicado seria a utilização de programas CFD “*Computational Fluid Dynamics*”, ou seja, fluidodinâmica computacional ou dinâmica dos fluidos computacional, que consiste na simulação numérica de processos físicos e/ou físico-químicos que apresentam escoamento. Através destes tipos de programas podem ser calculadas temperaturas, velocidades, pressão e outras características dos fluidos, por meio de modelos microscópicos baseados nos princípios de conservação de massa, da energia e da quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo. Alguns exemplos desses tipos de programas são: *DesignBuilder* CFD³⁸; *CFX*³⁹; *Phoenics*⁴⁰; *Open Foam* e *OpenFlow*⁴¹; *The Gerris Flow Solver*⁴²; *CFD Studio Sinflow*⁴³ e *Flow Science*⁴⁴

Os resultados do “*Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs*” (Método padrão de teste para avaliação do programas computacionais de análise energética edifícios) para o *DesignBuilder* indicou que resultados encontrados com o uso desta interface estão de acordo com resultados encontrados com o uso do *EnergyPlus*. Isso comprova que o *DesignBuilder* é confiável para gerar os dados de entrada para uso no *EnergyPlus*, bem como aumenta a confiabilidade na precisão dos

³⁸ É um software CFD que permite calcular e analisar a temperatura, a velocidade e outras propriedades de fluidos em 2D e 3D.

³⁹ O CFX é um software desenvolvido pela empresa ANSYS, Inc., utiliza tecnologias de ponta em nível mundial; resolve sistemas completos de equações simultaneamente. O CFX tem sido utilizado nos mais variados setores industriais.

⁴⁰ O *Phoenics* é um software com um código geral para simular escoamentos monofásicos ou bifásicos, transferência de calor e massa, fenômenos de reações químicas e interações fluido e sólido.

⁴¹ *OpenFoam* é um software CFD “*open-source*” na linguagem C++ usando uma programação orientada ao objeto. Inclui uma larga variedade de aplicações, por exemplo: processos de fluidos complexos que envolvem transferência química das reações, de turbulência e de calor, dinâmica contínua, até processos eletromagnéticos. Já a principal aplicação *OpenFlow* está na resolução de fluidos turbulentos, não-estacionários e incompressíveis usando equações de Navier-Stokes.

⁴² *The Gerris Flow Solver* é um software CFD “*open-source*”. Sua principal aplicação está na resolução de fluidos incompressíveis.

⁴³ O *CFD Studio* é um software que permite a simulação numérica de problemas 2D envolvendo escoamentos e transferência de calor. Foi desenvolvido com propósitos educacionais e pode ser usado em cursos de transferência de calor (condução e convecção) e cursos de Mecânica dos Fluidos Computacional.

⁴⁴ Pacote computacional em CFD, possuindo o *Flow-3D* com especialidade para fluidos de superfície livre, gerador e importador de malhas, pré-processamento, solver’s e pós-processamento, além da possibilidade de processamento em paralelo.



resultados gerados pelo conjunto *DesignBuilder/EnergyPlus* (ANSI/ASHRAE, 2010). Grande parte dos resultados encontrados em testes de simulação com o *DesignBuilder* correspondem aos resultados extraídos do relatório “*GARD Analytics*” para *EnergyPlus* executado em modo autônomo. Foram observadas diferenças mínimas entre os resultados (GARD, 2009). Além disso, Ellis (2003) executou a validação do uso do *EnergyPlus* para uma parede de Trombe sem ventilação. De acordo com o autor é recomendável o uso deste tipo de ferramenta para simulação de edifícios com sistemas passivos.

Metodologia: Simulações Computacionais de Teste

Em termos de desempenho térmico foram feitas inicialmente simulações de teste com diferentes tipos de envidraçados. Posteriormente foram propostos nesse modelo diferentes arranjos de módulos de fachada com uma solução passiva de parede de Trombe e dois tipos de envolvente, como foi citado anteriormente: sistema convencional português em alvenaria dupla e sistema *light gauge steel framing*. Tais simulações foram executadas considerando o “modelo base”, bem como os demais parâmetros apresentados anteriormente.

No caso dos testes iniciais com o uso de fachada envidraçada, foram feitas simulações iniciais para três tipos de envidraçados (envidraçado duplo de controlo solar; envidraçado duplo de auto-limpeza e envidraçado simples com vidro *float* extra-claro), considerando os solstícios de inverno (21 de dezembro) e de verão (21 de junho); isso para a orientação sul e para o clima de Guimarães. Posteriormente foi selecionado o envidraçado de controlo solar para a composição das fachadas das simulações iniciais, juntamente com a solução passiva de parede de Trombe.

Os módulos de fachada considerados nas simulações de teste foram:

- **Módulo Padrão:** composto basicamente por vidro duplo com espessura de 6mm (vidro de controlo solar e *low-e*, Planitherm Total) e 12mm de camada de ar⁴⁵;
- **Módulo Parede de Trombe:** Nesse módulo utilizou-se um vidro *float* extra-claro de 6mm (Diamant), com coeficiente de sombreamento alto permitindo deste modo o máximo de penetração de radiação solar, para a composição de parede de Trombe (0,5 x 2,50m²). Foi considerada a parede de Trombe com e sem abertura superior e inferior de ventilação (0,10 x 0,20m²) na massa de armazenamento. No inverno o período de funcionamento dessas aberturas foi das 9:00 as 18:00h e no verão, permaneceram

⁴⁵ Salienta-se que de início a proposta era a utilização de vidros com 6mm de espessura, porém posteriormente optou-se por uma menor espessura, no caso 4mm devido ao tamanho dos módulos (0,50 x 0,50m). Observou-se por meio de cálculos que o vidro de 4mm seria suficiente para suportar as cargas e além disso o peso e o custo dos módulos seria diminuído.



fechadas durante o dia e abertas durante a noite. E, além disso, na parede de Trombe foi considerada uma caixa-de-ar com afastamento de 5cm do envidraçado. O elemento de armazenamento da parede de Trombe foi composto por betão tradicional com 0,15m de espessura. A **Figura 4.25** apresenta as composições de fachada que foram simuladas para a cidade de Guimarães, Portugal.

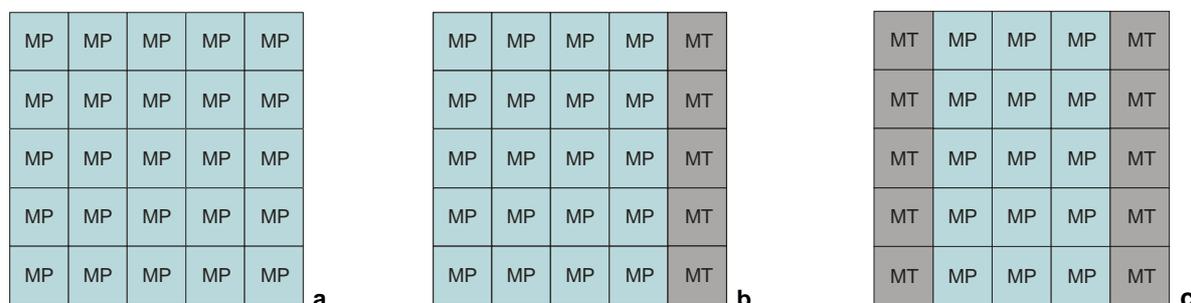


Figura 4.25 Módulos de Fachada: Simulações computacionais de teste.

- a. Fachada com Módulo Padrão MP (vidro duplo *low-e*);
- b. Fachada com Uma Parede de Trombe MT e módulos padrão MP;
- c. Fachada com Duas Paredes de Trombe MT e módulos padrão MP.

Metodologia: Simulações Computacionais com Dez Envidraçados

Após as simulações iniciais de teste indicarem o bom desempenho do software escolhido, foram considerados dois climas para ser analisado o desempenho dos envidraçados: Coimbra (Zona climática de inverno I_1 e de verão V_2) localizada ao centro e Faro (Zona climática de inverno I_1 e de verão V_2) ao sul de Portugal, de forma a observar se os resultados poderiam indicar melhor desempenho de diferentes envidraçados. Isso também de forma a não haver necessidade de executar simulações considerando os dez tipos de envidraçados para todos os nove climas, pois esperava-se em alguns casos que os resultados estariam próximos, por isso a análise de dois climas seria suficiente. Essas localidades, apesar de serem classificadas de forma idêntica em termos de zoneamento climático, possuem diferentes períodos de duração da estação de aquecimento e diferentes altitudes, além do posicionamento geográfico.

Foram analisados neste caso os dez tipos de envidraçados descritos anteriormente e consideradas: quatro orientações (norte, sul, este e oeste) e dois tipos de envolvente (sistema *light gauge steel framing* e sistema convencional português em alvenaria dupla). As simulações iniciais para avaliação dos envidraçados compreenderam um total de 160 simulações.



Metodologia: Simulações Computacionais com Três Envidraçados

A partir dos resultados das simulações para os dez envidraçados e dois climas, foram selecionados três tipos de envidraçados dentre os dez analisados anteriormente que apresentaram melhor desempenho térmico, que poderiam ser aplicados nos módulos. Sendo dois deles com melhor desempenho em termos de diminuição das necessidades nominais de aquecimento (Envidraçado 07 e Envidraçado 09) e um envidraçado com melhor desempenho em relação à redução das necessidades nominais de arrefecimento (Envidraçado 04). A **Tabela 4.23** apresenta as características principais dos três envidraçados analisados para os nove climas.

Tabela 4.23 Propriedade dos Envidraçados analisados para todas as cidades.

Características		Envidraçados		
		Envidraçado 04	Envidraçado 07	Envidraçado 09
Panos	Exterior	Cool Lite KNT 155 Verde 4mm	Bioclean 4mm	Planilux 4mm
	Interior	Planitherm Futur Ultra N 4mm	Planilux 4mm	Planitherm Total 4mm
U (W/m ² K)		1.66	2.72	1.80
Fator Solar g		0.28	0.75	0.63
Coeficiente de Sombreamento		0.33	0.86	0.72
Transmitância Visível (%)		0.42	0.79	0.77
Ganho Relativo de Calor (W/m ²)		217.72	563.41	469.47

Para a execução das simulações de desempenho térmico, todas as informações necessárias como ganhos internos (ocupação, iluminação e equipamentos) e condições de ventilação, bem como os perfis (dias da semana e horários) correspondentes foram as mesmas apresentadas anteriormente na metodologia.

Apresenta-se na **Tabela 4.24** uma síntese dos casos considerados para as simulações das fachadas envidraçadas e suas características.

**Tabela 4.24** Composição de Fachadas Envidraçadas para Simulações de Desempenho Térmico.

Simulações	Esquema	Descrição	Legenda
Caso E01	MP 04	Área Pav.= 25 m ² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 6,25 m ² WWR = 31,6% Volume= 70 m ³	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 10px;"> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div> <p>MP 04</p> <p>Módulo Padrão 04: Cool Lite KNT 155 Verde 4mm-Planitherm Futur Ultra N 4mm</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #FFFF99; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div> <p>MP 07</p> <p>Módulo Padrão 07: Bioclean 4mm-Planilux 4mm</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #ADD8E6; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div> <p>MP 09</p> <p>Módulo Padrão 09: Planilux 4mm-Planitherm Total 4mm</p> </div> </div> </div>
	MP 04		
Caso E02	MP 07	Área Pav.= 25 m ² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 6,25 m ² WWR = 31,6% Volume= 70 m ³	
	MP 07		
Caso E03	MP 09	Área Pav.= 25 m ² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 6,25 m ² WWR = 31,6% Volume= 70 m ³	
	MP 09		

Tais envidraçados foram então selecionados para compor as simulações para nove climas portugueses; quatro orientações solares (norte, sul, este e oeste); e dois tipos de envolvente (sistema *light gauge steel framing* e sistema convencional português em alvenaria dupla), totalizando 216 simulações.

Metodologia: Simulações Computacionais com Soluções Passivas

Como apresentado anteriormente, o sistema modular de fachada é composto por módulos variados, que inclui um módulo padrão fixo e móvel (envidraçado) que foi nesta etapa combinado com soluções passivas de aquecimento e arrefecimento que serão detalhadas posteriormente.

Como em todo o sistema, os módulos foram definidos inicialmente com uma dimensão de 0,50 x 0,50m (0,25m²), dimensão esta que implica em facilidade de transporte e instalação, e além disso a menor unidade e seus múltiplos possibilitam a utilização tanto em edifícios novos quanto em reabilitação. A configuração dos elementos modulares envidraçados e passivos (0,5 x 0,5m) foi disposta na fachada num espaço de 2,5 x 2,5m² de uma parede. As configurações passivas estudadas em combinação com os módulos envidraçados serão apresentadas a seguir.

Soluções Passivas de Aquecimento

As soluções passivas de aquecimento estudadas em conjunto com os módulos envidraçados selecionados e incluem: módulo padrão (ganho direto); módulo parede de Trombe (ganho indireto) e módulo estufa (ganho isolado).

Módulo Padrão

O módulo padrão para composição das fachadas com soluções passivas foi composto pelos envidraçados duplos que apresentaram melhor desempenho térmico nas simulações analisadas anteriormente, sendo o envidraçado 04 (Cool Lite KNT 155 Verde 4mm - Planitherm Futur Ultra N 4mm) e envidraçado 07 (Bioclean 4mm – Planilux 4mm), cujas características foram apresentadas anteriormente na metodologia das simulações de desempenho térmico dos módulos envidraçados (**Figura 4.26**). Trata-se de um sistema solar passivo de ganho direto muito utilizado, ainda que de forma empírica e não intencional. Neste caso, a absorção, armazenamento e libertação do calor são feitos de forma direta no compartimento, devido ao efeito de estufa.

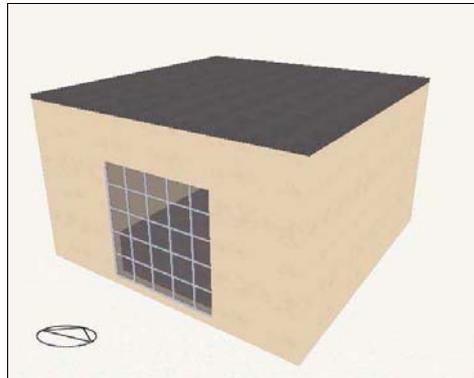


Figura 4.26 Modelo com módulos envidraçados.

Módulo Parede de Trombe

Nesse módulo foi considerado o uso de um envidraçado duplo com coeficiente de sombreamento elevado. Tal envidraçado é composto por dois panos do vidro Diamant de 4mm e com espaço de ar de 12mm, permitindo deste modo o máximo de penetração de radiação solar. As propriedades do envidraçado da parede de Trombe já foram apresentadas anteriormente na secção “4.2.1.3 Seleção dos Materiais para os Módulos de Fachada”.



Um conjunto de cinco módulos parede de Trombe dando origem a uma “parede de Trombe” completa, ou seja, a área de uma parede composta pelos cinco módulos será $0,5 \times 2,50\text{m}$ ($1,25\text{m}^2$). Sendo que na parede massiva composta por betão foi prevista abertura inferior e superior de ventilação cuja área considerada foi de $0,02\text{m}^2$ ($10 \times 20\text{cm}^2$). O período de funcionamento considerado para tais aberturas foi das 9:00 as 18:00h para o inverno; e durante o verão foi considerado que permanecerão fechadas durante o dia e abertas durante a noite. A parede de Trombe proposta é uma parede acumuladora que funciona com um sistema combinado de radiação e convecção com a aplicação de aberturas na parte inferior e superior.

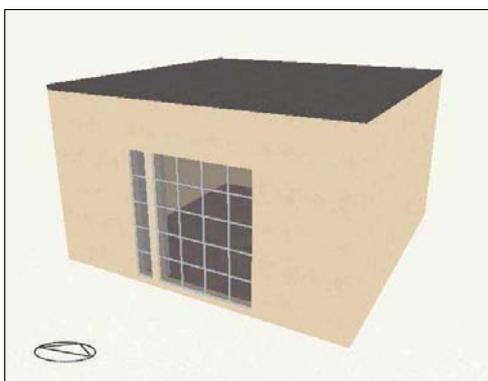


Figura 4.27 Modelo com módulos formando uma parede de Trombe.

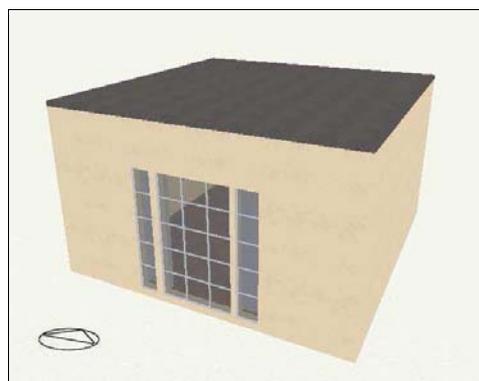


Figura 4.28 Modelo com módulos formando duas paredes de Trombe.

O elemento de armazenamento da parede de Trombe para as simulações iniciais foi composto em betão tradicional com $0,15\text{m}$ de espessura e superfície exterior escura ($\alpha=0.9$) e possui um afastamento de 5cm do módulo envidraçado. Maiores características sobre tal módulo serão apresentadas posteriormente na parte referente à pormenorização dos detalhes construtivos.

Módulo Estufa

Na proposta de estufas adossadas a espaços habitáveis, ocorre ganho indireto, sendo que o calor captado pela estufa pode ser diretamente libertado para o compartimento ou mesmo ser armazenado. Como ocorre nas paredes de Trombe, esta solução apresenta, como vantagem em relação ao ganho direto, a possibilidade de redução das perdas de calor pelos envidraçados.

Para este módulo o ideal seria o uso de um material com características semelhantes às do vidro utilizado no módulo da parede de Trombe, sendo assim optou-se pela utilização do mesmo tipo de material, sendo um envidraçado simples composto por vidro diamant de

4mm. Foi considerada a também a existência de um módulo envidraçado duplo⁴⁶ a separar a estufa do compartimento útil, e através dele um fragmento da radiação solar pode atravessar a estufa, sendo transmitido diretamente pelos envidraçados. As propriedades do envidraçado que compõe o módulo estufa foram apresentadas anteriormente na secção “4.2.1.3 Seleção dos Materiais para os Módulos de Fachada”.

Neste caso foi considerada também a existência de aberturas entre a estufa e o ambiente (para todos os módulos) como nos módulos da parede de Trombe. As mesmas diretrizes de funcionamento indicadas para a parede de Trombe foram utilizadas para a estufa. Sendo que, durante o inverno o funcionamento foi considerado de 9:00 as 18:00h; e durante o verão as aberturas permanecerão fechadas durante o dia e em funcionamento durante a noite.

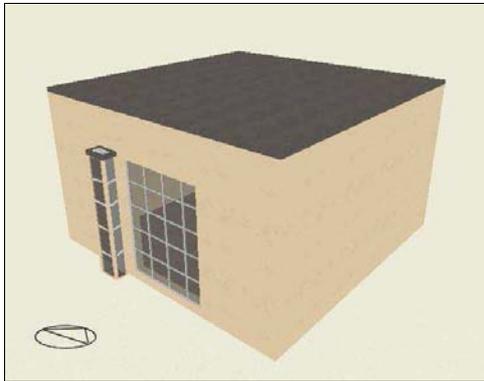


Figura 4.29 Modelo com módulos de estufa.

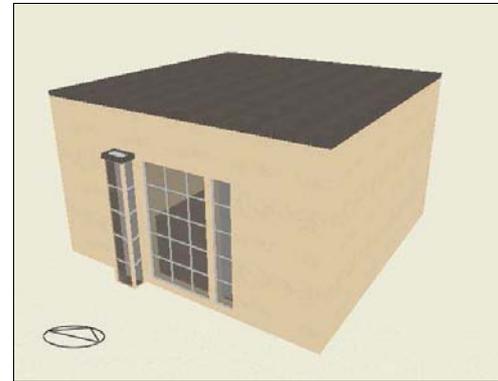


Figura 4.30 Modelo com módulos de estufa e módulos parede de Trombe.

Apresenta-se na **Tabela 4.25** uma síntese dos casos considerados para as simulações das fachadas com soluções passivas de aquecimento e suas características.

⁴⁶ O módulo de estufa pensado poderá ser encaixado num módulo envidraçado padrão móvel (para permitir a entrada do ar aquecido no compartimento), de preferência que possua a mesma composição que o módulo parede de Trombe, sendo que desta forma evita-se aumentar o número de módulos para a proposição do sistema.

**Tabela 4.25** Composição de Fachadas para Simulações com Soluções Passivas de Aquecimento.

Simulações	Esquema	Descrição	Legenda																									
Caso P01	<table border="1"> <tr><td>MT</td><td>MP 04</td><td>MP 04</td><td>MP 04</td><td>MP 04</td></tr> </table>	MT	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04	MT	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04	MT	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04	MT	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04	MT	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04	<p>Área Pav.= 25 m² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 5,0 m² 1 parede de Trombe=1,25 m² Volume= 70 m³</p>	<p> MP 04 Módulo Padrão 04: Cool Lite KNT 155 Verde 4mm-Planitherm Futur Ultra N 4mm</p> <p> MP 07 Módulo Padrão 07:Bioclean 4mm-Planilux 4mm</p> <p> MT Módulo Parede de Trombe</p> <p> ME Módulo de Estufa</p>
MT	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04																								
MT	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04																								
MT	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04																								
MT	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04																								
MT	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04																								
Caso P02	<table border="1"> <tr><td>MT</td><td>MP 04</td><td>MP 04</td><td>MP 04</td><td>MT</td></tr> </table>	MT	MP 04	MP 04	MP 04	MT	MT	MP 04	MP 04	MP 04	MT	MT	MP 04	MP 04	MP 04	MT	MT	MP 04	MP 04	MP 04	MT	MT	MP 04	MP 04	MP 04	MT	<p>Área Pav.= 25 m² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 3,73 m² 2 paredes de Trombe=2,50 m² Volume= 70 m³</p>	
MT	MP 04	MP 04	MP 04	MT																								
MT	MP 04	MP 04	MP 04	MT																								
MT	MP 04	MP 04	MP 04	MT																								
MT	MP 04	MP 04	MP 04	MT																								
MT	MP 04	MP 04	MP 04	MT																								
Caso P03	<table border="1"> <tr><td>MT</td><td>MP 07</td><td>MP 07</td><td>MP 07</td><td>MP 07</td></tr> </table>	MT	MP 07	MP 07	MP 07	MP 07	MT	MP 07	MP 07	MP 07	MP 07	MT	MP 07	MP 07	MP 07	MP 07	MT	MP 07	MP 07	MP 07	MP 07	MT	MP 07	MP 07	MP 07	MP 07	<p>Área Pav.= 25 m² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 5,0 m² 1 parede de Trombe=1,25 m² Volume= 70 m³</p>	
MT	MP 07	MP 07	MP 07	MP 07																								
MT	MP 07	MP 07	MP 07	MP 07																								
MT	MP 07	MP 07	MP 07	MP 07																								
MT	MP 07	MP 07	MP 07	MP 07																								
MT	MP 07	MP 07	MP 07	MP 07																								
Caso P04	<table border="1"> <tr><td>MT</td><td>MP 07</td><td>MP 07</td><td>MP 07</td><td>MT</td></tr> </table>	MT	MP 07	MP 07	MP 07	MT	MT	MP 07	MP 07	MP 07	MT	MT	MP 07	MP 07	MP 07	MT	MT	MP 07	MP 07	MP 07	MT	MT	MP 07	MP 07	MP 07	MT	<p>Área Pav.= 25 m² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 3,73 m² 2 parede de Trombe=2,50 m² Volume= 70 m³</p>	
MT	MP 07	MP 07	MP 07	MT																								
MT	MP 07	MP 07	MP 07	MT																								
MT	MP 07	MP 07	MP 07	MT																								
MT	MP 07	MP 07	MP 07	MT																								
MT	MP 07	MP 07	MP 07	MT																								
Caso P05	<table border="1"> <tr><td>ME</td><td>MP 04</td><td>MP 04</td><td>MP 04</td><td>MP 04</td></tr> </table>	ME	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04	ME	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04	ME	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04	ME	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04	ME	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04	<p>Área Pav.= 25 m² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 5,0 m² 1 estufa=1,25 m² Volume= 70 m³</p>	
ME	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04																								
ME	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04																								
ME	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04																								
ME	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04																								
ME	MP 04	MP 04	MP 04	MP 04																								
Caso P06	<table border="1"> <tr><td>ME</td><td>MP 04</td><td>MP 04</td><td>MP 04</td><td>MT</td></tr> </table>	ME	MP 04	MP 04	MP 04	MT	ME	MP 04	MP 04	MP 04	MT	ME	MP 04	MP 04	MP 04	MT	ME	MP 04	MP 04	MP 04	MT	ME	MP 04	MP 04	MP 04	MT	<p>Área Pav.= 25 m² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 3,75 m² 1 estufa=1,25 m² 1 parede de Trombe= 1,25 m² Volume= 70 m³</p>	
ME	MP 04	MP 04	MP 04	MT																								
ME	MP 04	MP 04	MP 04	MT																								
ME	MP 04	MP 04	MP 04	MT																								
ME	MP 04	MP 04	MP 04	MT																								
ME	MP 04	MP 04	MP 04	MT																								

Soluções Passivas de Arrefecimento

Neste caso, em termos de soluções passivas de arrefecimento foram utilizadas soluções baseadas em estudos de ventilação natural e dispositivos de proteção solar. Foi proposto o uso de quatro diferentes estratégias de posicionamento de módulos de ventilação. Dentre as quatro soluções de ventilação natural analisadas, duas das soluções de melhor desempenho (com variações) foram posteriormente analisadas em ensaios no túnel de vento com variação do tipo de grelha, de forma a confirmar a configuração mais eficiente.

Tal estudo foi executado para três climas (Bragança, Coimbra e Faro) das nove analisadas anteriormente, partindo do princípio de que se em três climas típicos diferenciados tal solução apresentasse bons resultados, poderia ser utilizada para os demais climas. Para tal foi escolhida a solução passiva de aquecimento que conduziu a um maior consumo energético para simular as estratégias de arrefecimento. Com a incorporação de soluções passivas de arrefecimento no modelo com maior consumo energético, seria possível observar a contribuição de tal solução para diminuir o consumo.

Módulo de Ventilação

Foram propostos para a simulação módulos de ventilação (**Figuras 4.31 a 4.34**) compostos por uma grelha horizontal, que a princípio será composta por alumínio, sendo que o nível de detalhamento do software não permite entrar em pormenores, esse aspeto será abordado no projeto do sistema de fachadas. A renovação do ar fixada para garantia da qualidade do ar interior foi de 0,6 renovações por hora, de acordo com o RCCTE. As condições de ventilação estiveram de acordo com o perfil apresentado anteriormente na secção “4.2.2.5 Condições de Referência”. Tal perfil de ativação da ventilação foi o mesmo que veio sendo utilizado ao longo de todas as simulações de desempenho térmico.

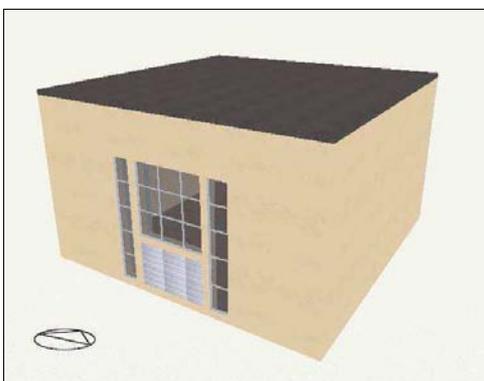


Figura 4.31 Modelo com módulos de ventilação, formando um peitoril ventilado.

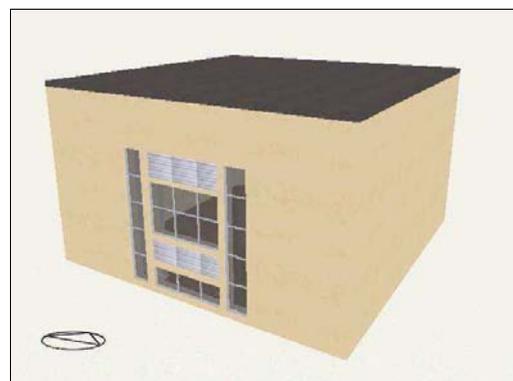


Figura 4.32 Modelo com módulos de ventilação superiores e inferiores.

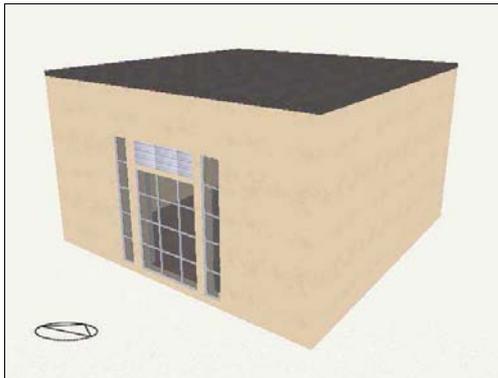


Figura 4.33 Modelo com módulos de ventilação superiores.

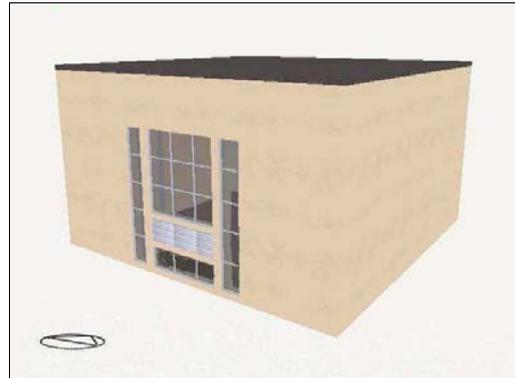


Figura 4.34 Modelo com módulos de ventilação inferiores.

Tais resultados foram posteriormente comparados aos resultados do desempenho dos protótipos ensaiados em túnel de vento, com variações na malha da grelha de ventilação e no posicionamento de tais módulos na fachada, da mesma forma que foram executadas as simulações.

A **Tabela 4.26** a seguir apresenta os casos de fachadas simulados considerando o uso de módulos de ventilação. Tais casos consideraram o uso de módulos de ventilação na parte inferior da fachada, superior e ambos, módulos na parte superior e inferior. Esses resultados serviriam posteriormente para comparação com os resultados dos ensaios em túnel de vento, e a partir de simulações computacionais e ensaios foi observado o posicionamento mais eficiente para os módulos de ventilação na fachada.



Tabela 4.26 Composição de Fachadas para Simulações de Ventilação Natural.

Simulações	Esquema	Descrição	Legenda
Caso V01	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07	Área Pav.= 25 m ² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 4,75 m ² 1 parede de Trombe=1,25 m ² Área Ventilação= 1,50 m ² Volume= 70 m ³	 Módulo Padrão 07:Bioclean 4mm-Planilux 4mm  Módulo Parede de Trombe  Módulo de Ventilação
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
	MT MV MV MV MP 07		
	MT MV MV MV MP 07		
Caso V02	MT MV MV MV MP 07	Área Pav.= 25 m ² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 4,75 m ² 1 parede de Trombe=1,25 m ² Área Ventilação= 1,50 m ² Volume= 70 m ³	 Módulo Padrão 07:Bioclean 4mm-Planilux 4mm  Módulo Parede de Trombe  Módulo de Ventilação
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
	MT MV MV MV MP 07		
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
Caso V03	MT MV MV MV MP 07	Área Pav.= 25 m ² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 5,50 m ² 1 parede de Trombe=1,25 m ² Área Ventilação= 0,75 m ² Volume= 70 m ³	 Módulo Padrão 07:Bioclean 4mm-Planilux 4mm  Módulo Parede de Trombe  Módulo de Ventilação
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
Caso V04	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07	Área Pav.= 25 m ² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 5,50 m ² 1 parede de Trombe=1,25 m ² Área Ventilação= 0,75 m ² Volume= 70 m ³	 Módulo Padrão 07:Bioclean 4mm-Planilux 4mm  Módulo Parede de Trombe  Módulo de Ventilação
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		
	MT MV MV MV MP 07		
	MT MP 07 MP 07 MP 07 MP 07		

Novamente, para a execução das simulações de desempenho térmico, todas as informações necessárias como ganhos internos (ocupação, iluminação e equipamentos) e condições de ventilação, bem como os perfis (dias da semana e horários) correspondentes foram as mesmas apresentadas anteriormente na metodologia das simulações iniciais.



Dispositivos de Sombreamento Horizontais

Como solução de arrefecimento foi proposto, além dos módulos de ventilação, o uso de um dispositivo de sombreamento de forma a auxiliar na diminuição de consumo energético no período de verão.

Além da orientação solar, existem outros fatores que condicionam a insolação dos vãos envidraçados, por exemplo, a existência ou não de obstruções à radiação solar direta. Estas obstruções podem resultar de edifícios próximos, saliências do próprio edifício e de vegetação.

O ideal para as fachadas envidraçadas é procurar maximizar a insolação dos vãos envidraçados nos períodos frios e minimizá-la nos períodos quentes e os dispositivos de proteção solar podem auxiliar nesse processo. Para propor a utilização de dispositivos de sombreamento torna-se necessário conhecer a trajetória aparente do sol para ser possível um correto e eficaz dimensionamento de tais elementos.

O software *DesignBuilder* permite simular, em termos de dispositivos de proteção solar, elementos ligados à fachada posicionados no interior ou no exterior do ambiente. Destinados ao interior existe como opções: persianas de vários tipos, painéis electrocrómicos, isolamento com elementos transparentes, etc. Dentre os dispositivos de proteção solar exterior à fachada tem-se elementos como palas laterais verticais, uma única pala horizontal, estores venezianos horizontais e ainda a combinação dessas três opções. É possível ainda a combinação de proteção solar no interior e exterior da fachada.

A configuração simulada consiste no agrupamento de pequenos *brises* horizontais posicionados na parte principal envidraçada da fachada. Pretendia-se simular também para pequenos *brises* verticais, porém esta opção não está disponível no software para elementos posicionados no exterior da fachada (**Figuras 4.35 e 4.36**).

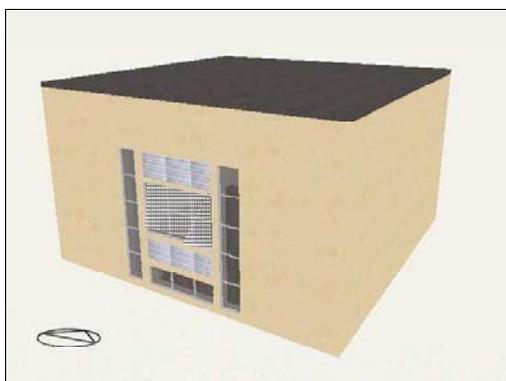


Figura 4.35 Modelo com módulos de ventilação superiores e inferiores e hachura indicando a posição dos dispositivos de proteção solar.

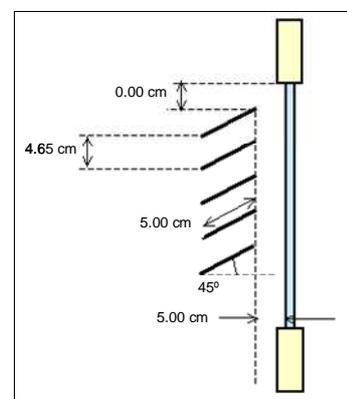


Figura 4.36 Esquema apresentando detalhes dos dispositivos de proteção solar horizontais.



Foram propostos para a simulação dispositivos de proteção solar horizontais compostos por perfis de alumínio, sendo que o nível de detalhamento da simulação não permite entrar em muitos pormenores, esse aspeto será abordado na pormenorização do sistema de fachadas. O perfil para ativação dos dispositivos de proteção solar considerado foi o mesmo que veio sendo utilizado para o período no qual é necessário arrefecimento nas simulações anteriores.

A **Tabela 4.27** apresenta os casos de fachadas simulados considerando o uso de módulos de dispositivos de sombreamento horizontal. Optou-se por selecionar o melhor caso simulado em relação à diminuição das necessidades nominais de arrefecimento com uso de ventilação, que corresponde ao uso de módulos de ventilação posicionados na parte inferior e superior da fachada. Nessa solução de fachada com ventilação foram inseridos os dispositivos de proteção solar horizontais.

Tabela 4.27 Composição de Fachadas para Simulações com Dispositivos de Proteção Solar Horizontais.

Simulações	Esquema	Descrição	Legenda
Caso D01		<p>Área Pav.= 25 m² Pé Direito= 2,80 m Área Env.= 4,75 m² 1 parede de Trombe=1,25 m² Área Ventilação= 1,50 m² Volume= 70 m³</p> <p>Dispositivos de Proteção solar de 5cm de largura, distância de 5cm entre palas e inclinação de 45°.</p>	<p> Módulo Padrão 07:Bioclean 4mm-Planilux 4mm</p> <p> Módulo Parede de Trombe</p> <p> Módulo de Ventilação</p> <p> Módulo Padrão 07:com dispositivos de proteção solar horizontais.</p>

Para a execução das simulações de desempenho térmico com uso de dispositivos de proteção solar, todas as informações necessárias como ganhos internos (ocupação, iluminação e equipamentos) e condições de ventilação, bem como os perfis (dias da semana e horários) correspondentes foram as mesmas apresentadas anteriormente na metodologia das simulações iniciais. Em termos de período de funcionamento, a configuração de módulo mais próxima do que se pretendia, disponível no *DesignBuilder*, não possibilitava configurar perfil para ativação. Sendo assim, nas simulações os dispositivos ficaram ativados durante todo o período simulado.



4.2.2.8 Simulações de Desempenho Lumínico

Nesta secção serão apresentadas todas as etapas seguidas e parâmetros considerados para a execução das simulações de desempenho lumínico, realizadas para os envidraçados que apresentaram melhor desempenho térmico. São apresentados os programas de simulação Ecotect 5.6 Desktop Radiance 1.0 utilizados, as propriedades das superfícies e a definição dos itens obtidos nas simulações de desempenho lumínico, sendo eles o fator luz do dia e os níveis de iluminância.

A iluminação natural disponível no interior de um compartimento depende da disponibilidade de luz natural no exterior. Os aspetos quantitativos da iluminação natural dependem das condições de nebulosidade do céu, do período do dia e do ano, das características geométricas do edifício e dos compartimentos; das dimensões e características espectrofotométricas dos vãos envidraçados, do grau de obstruções exteriores e ainda das características reflectométricas dos materiais superficiais interiores. Além dos aspetos relacionados com a expressão quantitativa da iluminação natural há ainda os fatores adicionais relacionados com os aspetos qualitativos que regulam o encandeamento, a atenção e a distração e que se manifestam no conforto visual dos ocupantes (SANTOS, 2001).

Para a previsão do desempenho lumínico do sistema de fachadas foram quantificados os valores das iluminâncias e os fatores de luz dia (FLD) num compartimento com as mesmas dimensões que as utilizadas para as análises de desempenho térmico (5x5 m²) e pé-direito de 2,80m.

Para tal, utilizou-se o programa de simulação *Ecotect* versão 5.6. Para o cálculo do valor da iluminância horizontal interior (E_{ext}) o programa considera dois modelos para a sua determinação, o modelo de Trapenza e o modelo da Latitude. Para o estudo, considerou-se o modelo da latitude por se tratar do modelo com o qual se obtinha condições de céu encoberto mais desfavoráveis em relação ao valor da iluminância horizontal interior (E_{ext}).

A determinação do Fator Luz do Dia restringiu-se às condições de nebulosidade de um Céu Encoberto-Padrão da CIE⁴⁷. Segundo Moore (1991) o céu encoberto corresponde à condição de céu na qual as nuvens preenchem toda a superfície da abóbada celeste. Caracteriza-se por esconder o sol e difundir a luz proveniente dele, através das nuvens. A abóbada apresenta-se como uma fonte de iluminação, na cor cinza claro e brilhante. A intensidade é três vezes maior na área do zénite, em relação à área do horizonte. Esta distribuição permanece constante ao longo do dia, porém a iluminância absoluta do céu

⁴⁷ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE (CIE), "Daylight. International Recommendations for the Calculation of Natural Light". Publication C.I.E. N° 16 (E-3.2), 1970.



varia com a altitude do sol, sendo que este tipo de céu encoberto é mais brilhante ao meio-dia (MOORE, 1991).

Para céu encoberto, as aberturas verticais têm performances luminosas nitidamente inferiores às aberturas horizontais, por exemplo. No entanto, aberturas laterais posicionadas na fachada sul transmitem um máximo de raios solares no inverno, o que favorece a utilização dos ganhos solares, limitando a penetração do sol na altura do verão e o sobreaquecimento produzido.

A avaliação das iluminâncias interiores (E_{int}) foi feita com base numa grelha de pontos situada num plano de trabalho a uma distância de 0,8m acima do pavimento espaçados aproximadamente 0,125m. A distância da grelha as paredes interiores foi cerca de 0,1m. O FLD apresentado é calculado a partir da média aritmética do conjunto de pontos definidos pela malha. A partir dos resultados verificou-se o cumprimento dos requisitos recomendados para condições aceitáveis de iluminação natural para o nível de iluminância e fator luz do dia (FLD).

Ecotect 5.6

O *Ecotect* é uma ferramenta de avaliação ambiental que permite simular um modelo em termos de térmica, acústica e iluminação em ambientes, combina várias funções de análise detalhadas com uma exibição altamente visual e interativa que apresenta resultados analíticos diretamente dentro do contexto do modelo do edifício. Os dados são gerados através de gráficos (dados quantitativos de temperatura, ganhos de calor interno e consumo energético). Possui ferramentas próprias de desenho, trabalhando com a importação de arquivos do tipo dxf e 3Ds, sendo de uso simples e de rápida aprendizagem, produzindo resultados interessantes. Tem como objetivo facilitar o projeto sustentável, permitindo uma compreensão fácil dos efeitos dos fatores climáticos, como o sol/sombra, temperatura, luminosidade, ventilação e ainda os efeitos da volumetria, características da envolvente construtiva e sistemas aplicados. Por meio do software podem ser quantificados, por exemplo, os valores das iluminâncias e os fatores de luz dia (FLD) com o uso de determinada configuração de fachada e verificar a eficiência.

Esse programa faz o cálculo automático com uma ampla gama de aplicações em projeto de edifícios, desde acústica de edifícios, conforto térmico, iluminação natural e artificial, etc. Como uma ferramenta de projeto, permite uma modelação rápida e de fácil utilização possibilitando o desenho de geometrias mais complexas. Neste software, a análise destas condições de iluminação natural pode ser realizada usando dois tipos de



céus (encobertos e uniformes) que correspondem a modelos normalizados pela “*Commission International of l'Eclairage*” (CIE).

Apesar das suas potencialidades o programa possui algumas limitações para determinar o nível de iluminação natural, dentre elas: usa o método do fator de luz do dia (FLD) do “*Building Research Establishments*” BRE que despreza as soluções de ganho indireto que resultam da reflexão da luz nas superfícies múltiplas para iluminar um espaço, considerando apenas as soluções de ganho direto (**Figura 4.37**).

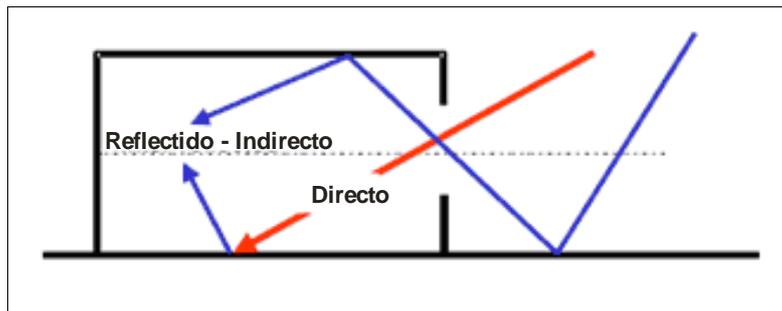


Figura 4.37 Esquema ilustrativo, em vermelho os ganhos diretos que são considerados pelo método do BRE que é utilizado no software *Ecotect*.

Este software foi desenvolvido para ser utilizado em ensino, por isso tem uma interface simples de ser utilizada. Este software faz análises de iluminação natural e artificial, insolação, conforto térmico e acústico. Para a confecção do modelo possui ferramentas próprias de desenho que são de fácil utilização, além de importar e exportar arquivos DXF e 3DS (ROBERTS; MARSH, 2001). Para cálculos de iluminação natural utilizam o método BRE de fator luz do dia e para o cálculo de iluminação artificial utiliza o método ponto-a-ponto. Para análises mais detalhadas o modelo deve ser exportado diretamente para ferramentas como o *Desktop Radiance* e *Daysim*.

A sua utilização é intuitiva, podendo ser selecionadas diferentes superfícies de materiais e rapidamente comparadas alterações nos resultados. Os dados gerados pelas simulações são armazenados no ficheiro de utilização, porém para qualquer alteração implementada no modelo, os cálculos devem ser gerados novamente.

A **Figura 4.38** apresenta um exemplo de utilização do *Ecotect* para cálculo de Iluminação natural. Para avaliação de desempenho em termos de iluminação natural, podem ser obtidos os valores do fator luz do dia e o nível de iluminância.

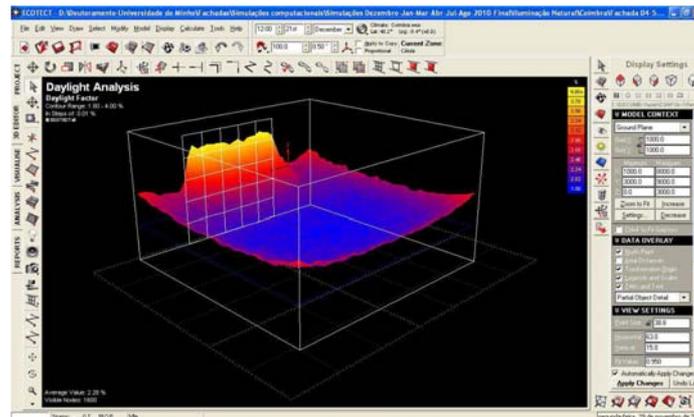


Figura 4.38 Exemplo da interface do *Ecotect*.

Existe uma série de informações disponíveis sobre a utilização do software, o que facilita a sua aprendizagem, sendo que para gerar as simulações de iluminação a níveis realísticos é sugerida a utilização do motor de cálculo *Desktop Radiance* ou *Radiance* que é mais completo.

Para a avaliação correta dos valores nas simulações computacionais de desempenho lumínico foi necessário gerar o ficheiro climático “.wea” a partir de ficheiro “.epw” do software *EnergyPlus*. A iluminância exterior é calculada pelo software de acordo com a latitude do local a ser simulado de forma a possibilitar a obtenção das luminâncias interiores. Embora a iluminância exterior obtida pelo software *Ecotect* apresente diferenças da situação real, sabe-se que tais valores dependem da latitude do local e não afetam o fator luz do dia obtido por simulação computacional.

Estudos realizados comprovam que o uso do software *Ecotect* para simulações de desempenho lumínico apresentam resultados mais próximos da realidade do que o software *Desktop Radiance* (CARDOSO et al., 2007). Portanto, o uso deste tipo de ferramentas pode auxiliar na escolha de soluções que implicam em melhor desempenho lumínico. Em outro estudo para o desenvolvimento da “Janela Eco-Eficiente” observou-se que os valores médios para as iluminâncias e Fator Luz do Dia (FLD) obtidos no *Ecotect* não se afastam muito dos valores medidos “*in situ*” variando neste caso entre 4% a 7% (CARDOSO, 2008).

Desktop Radiance 1.0

O desenvolvimento do software *Radiance* começou em 1984, no Lawrence Berkeley Laboratory (Berkeley, USA). Em 1990, o *Laboratoire d’Energie Solaire et de Physique Du Bâtiment* (LESO-PB in Lausanne, Switzerland) iniciou um projeto de ferramentas de simulação de luz natural (Sca94). Greg Ward Larson foi o principal autor do *Radiance*, juntou-se ao projeto por nove meses, durante os quais aumentou muito a capacidade do



software, especialmente para o propósito de simulação de luz natural (LARSON; SHAKESPEARE, 1997).

O *Desktop Radiance* que foi utilizado neste trabalho de investigação é um *plugin* do *Radiance* desenvolvido para ser utilizado no software AutoCAD e funciona como uma interface gráfica do *Radiance* na plataforma Windows. Este *plugin* funciona igualmente no software *Ecotect*, complementando as opções de simulação.

Este software utiliza métodos avançados de *ray tracing*⁴⁸ e oferece cálculos de iluminação e análise quantitativa e qualitativa dos resultados através da exibição dos níveis de iluminação obtidos, os quais podem ser analisados através de pontos na imagem, por meio de curvas isolux (*iso contour*) ou imagens *falsecolor* (**Figuras 4.39 e 4.40**) No caso deste trabalho o nível de iluminação é apresentado para os solstícios de inverno e verão através de imagens *falsecolor* (MISTRICK, 2000).

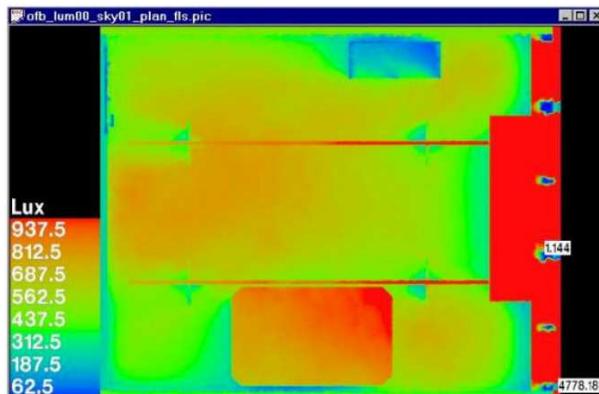


Figura 4.39 Exemplo de imagem “falsecolor” gerada pelo *Desktop Radiance*.

Fonte: DESKTOP RADIANCE, 2000.

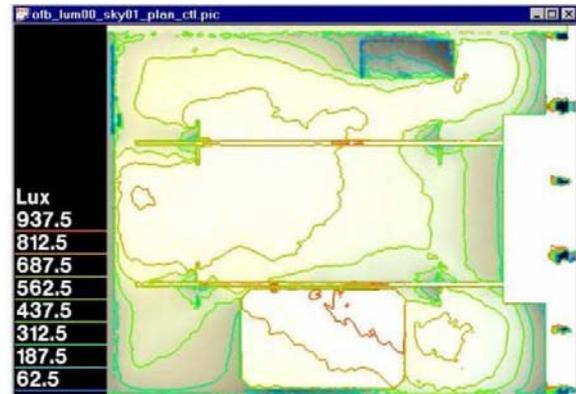


Figura 4.40 Exemplo de imagem “iso contour” gerada pelo *Desktop Radiance*.

Fonte: DESKTOP RADIANCE, 2000.

O *Desktop Radiance*, apesar de não ser tão sofisticado quanto o *Radiance*, oferece uma boa opção para obtenção de imagens, nas quais se pode observar a incidência solar dentro do ambiente nos diferentes horários e estações do ano, além de possibilitar outros tipos de visualizações. Oferece ainda a possibilidade de exportar os arquivos gerados pelo *Desktop Radiance* para outros programas. Outro recurso interessante é poder salvar as imagens em formatos jpg, gif, bmp, pct, tiff ou eps. Destaca-se também por ser um software livre de fácil instalação e utilização.

No trabalho de investigação cujo objetivo era estudar o projeto de iluminação para edifícios de escritórios no Rio de Janeiro realizado por Santos (2007), os valores obtidos

⁴⁸ A abordagem *ray tracing* de renderização das imagens segue os raios visuais a partir do foco virtual do olho ou da câmera através de pixels num plano de imagem imaginária dentro do ambiente. Esses raios geométricos cruzam-se matematicamente com os modelos geométricos e raios adicionais saem das fontes de luz e superfícies, num processo recursivo, para determinar as contribuições diretas e indiretas à iluminação (LARSON; SHAKESPEARE, 1997).



num modelo virtual aproximam-se do ambiente real, apontando uma diferença máxima de 12,0% às 13:00 horas. A proximidade dos valores encontrados entre as medições reais e as medições virtuais indica que a utilização do software *Desktop Radiance* é satisfatória para as simulações efetuadas. No caso do presente trabalho, as simulações foram executadas para o horário de 12:00. Tal horário conduziu a uma menor diferença (2,6%) entre o ambiente real e as medições feitas no *Desktop Radiance* (**Tabela 4.28**) (SANTOS, 2007). Isso indica que o software *Desktop Radiance* mostrou ser uma ferramenta adequada para a simulação da iluminação natural.

Tabela 4.28 Valores de iluminância (lux) medidos no ambiente real e no modelo virtual.

Hora	Ambiente Real (Lux)	Radiance (Lux)	Diferença (%)
10	2560	2785	8,1
11	2450	2317	5,4
12	2250	2191	2,6
13	2200	1935	12,1
14	1640	1737	5,6
15	1371	1505	8,9
16	1119	1188	5,8
17	845	774	8,4

Fonte: SANTOS, 2007.

Propriedades das Superfícies

Os valores das reflectâncias das superfícies que caracterizam o espaço em estudo são os apresentados na **Tabela 4.29** Estes valores encontram-se entre os recomendados (SANTOS, 2001) para as superfícies interiores de um compartimento.

Tabela 4.29 Reflectâncias dos Materiais

Superfícies Opacas	Cor	Textura/Aparência	Estado	Reflectâncias	Recomendado (SANTOS, 2001)
Paredes-Interior	Branco	reboco liso/ mate	limpo	0,6	0,60 – 0,70
Paredes-Exterior	Branco	reboco liso/ mate	limpo	0,7	-
Teto-Interior	Branco	reboco liso/ mate	limpo	0,7	0,70 - 0,85
Teto-Exterior	Castanho Claro	liso/ mate	limpo	0,3	-
Pavimento	Castanho Claro	liso/ mate	limpo	0,3	0,15 – 0,30

As propriedades dos envidraçados são as mesmas apresentadas anteriormente no estudo de desempenho térmico do compartimento. As configurações de fachadas selecionadas para as simulações de desempenho lumínico seguem os mesmos padrões das utilizadas para as simulações de desempenho térmico, considerando as opções com maior



área envidraçada com *window-to-wall ratio* (WWR) de 31,6% e a menor área envidraçada pela adição de soluções passivas com *window-to-wall ratio*⁴⁹ (WWR) de 19%. As propriedades dos envidraçados já foram previamente apresentadas na secção “4.2.1.3 Seleção dos Materiais para os Módulos de Fachada”.

Como os envidraçados 04 e 07⁵⁰ apresentaram melhor desempenho térmico, estes foram analisados em termos de iluminação natural, considerando as seguintes configurações de fachadas (**Tabela 4.30**):

Tabela 4.30 Configurações de Fachada para Simulações de Desempenho Lumínico.

Casos	Esquema	Dados	Observações
Caso L01		Envidraçado 04 Área Env.= 6,25 m ² WWR= 31,6%	- Módulo Padrão 50 x 50 cm - Sem Proteção Solar ativada no verão. - Orientação sul.
Caso L03		Envidraçado 04 Área Env.= 3,75 m ² WWR= 19,0%	- Módulo Padrão 50 x 50 cm - Sem Proteção Solar ativada no verão. - Orientação sul.
Caso DL 04		Envidraçado 07 Área Env.= 6,25 m ² WWR= 31,6%	- Módulo Padrão 50 x 50 cm. - Sem Proteção Solar ativada no verão. - Orientação sul.
Caso DL 06		Envidraçado 07 Área Env.= 3,75 m ² WWR= 19,0%	- Módulo Padrão 50 x 50 cm. - Sem Proteção Solar ativada no verão. - Orientação sul.

⁴⁹ É definida como a proporção entre a área envidraçada transparente e a área exterior da parede piso a piso (ASRAE, 2005). Trata-se da área envidraçada líquida (cerca de 80% da área bruta da janela) dividida pela área bruta de parede exterior que correspondente à altura de piso a piso.

⁵⁰ Envidraçado 04: Exterior Cool Lite KNT 155 4mm Verde – Interior Planitherm Futur Ultra N 4mm. Envidraçado 07: Exterior Bioclean 4mm – Interior Planilux 4mm.



Fator Luz do Dia

O Fator de Luz do Dia (FLD) é o parâmetro de uso mais generalizado na caracterização e quantificação das condições de iluminação natural nos edifícios. O FLD define-se como sendo o quociente (expresso em percentagem) entre a iluminância num dado ponto de um dado plano no interior de um compartimento devida a um céu de distribuição de luminâncias conhecida, e a iluminância exterior num plano horizontal proveniente de um hemisfério desobstruído desse céu. A contribuição da radiação direta para ambas as iluminâncias é excluída.

A representatividade do FLD restringe-se às condições de nebulosidade de um Céu Encoberto-Padrão da CIE⁵¹, cuja distribuição teórica de luminâncias apenas traduz com rigor as condições de céus completamente encobertos por nuvens espessas e escuras. Em regiões onde predominem as condições de céus não-encobertos, o FLD embora possa ser usado no estabelecimento de critérios de condições mínimas de iluminação natural, revela-se insuficiente na caracterização das condições de médias anuais.

O fator luz do dia pode ser um parâmetro significativo para quantificar a iluminação natural sob condições de céu encoberto. Porém, sob certas condições possui limitações. Por exemplo, sob condições de céu parcialmente nublado, o fator luz do dia pode ter 0,2 a 5 vezes o valor determinado para céu nublado (GOULDING et al., 1994). Por esse motivo, foi considerado nas simulações computacionais de desempenho lumínico as condições de nebulosidade de um Céu Encoberto-Padrão da CIE.

Se a iluminação natural for satisfatória em dias encobertos, provavelmente será adequada em dias ensolarados. Porém, o fator luz do dia de uma construção otimizada em termos de iluminação natural admite luz, tanto quanto possível, o que pode ir contra as exigências de conforto.

A **Tabela 4.31** apresenta os valores de fator luz do dia recomendados para edifícios residenciais

Tabela 4.31 Fator luz do dia recomendado em edifícios residenciais.

Fator Luz do Dia: Edifícios Residenciais					
Local	A Green Vitruvius (1999)		Goulding et al. (1994)	CIBSE (1999)	
	Mínimo	Médio		Mínimo	Médio
Quartos de dormir	0.3%	1%	0.5% (a $\frac{3}{4}$ do comprimento do compartimento)	0.3%	1%
Cozinhas	0.6%	2%	2% (ao meio do compartimento)	0.6%	2%
Salas de Estar	0.5%	1.5%	1% (ao meio do compartimento)	0.5%	1.5%

Fonte: A GREEN VITRUVIUS (1999); GOULDING et al. (1994); CIBSE (1999).

⁵¹ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE (CIE), "Daylight. International Recommendations for the Calculation of Natural Light". Publication C.I.E. N° 16 (E-3.2), 1970.



No entanto, o FLD não permite verificar se são atingidos os níveis de iluminância recomendados para a realização de uma determinada tarefa visual.

Níveis de Iluminância

Para um céu nublado, independente do tipo de orientação solar, o nível de radiação é o mesmo, portanto o efeito da orientação desaparece do cálculo do fator luz do dia. Porém a simplificação introduzida com o uso de tal fator não considera a localização e orientação do edifício, estação do ano, hora do dia, incidência direta de radiação e variação das condições e céu. Daí a necessidade de observar os níveis de iluminância em dias específicos, nos solstícios de inverno e verão, por exemplo, de forma a ter uma visão mais próxima do que ocorre nesses dois diferentes períodos.

Para a verificação dos níveis de iluminância (realísticos) no interior do espaço, foram considerados: os solstícios de verão (21 de junho) e de inverno (21 de dezembro) (**Figuras 4.41**); o horário de 12:00 e o céu encoberto padrão da CIE e orientação solar sul. Optou-se por fazer a análise para a orientação solar sul por esta ter apresentado os melhores resultados nos estudos de desempenho térmico executados anteriormente. Os resultados foram obtidos por meio do software *Ecotect 5.6* e da ferramenta *Desktop Radiance 1.0*.

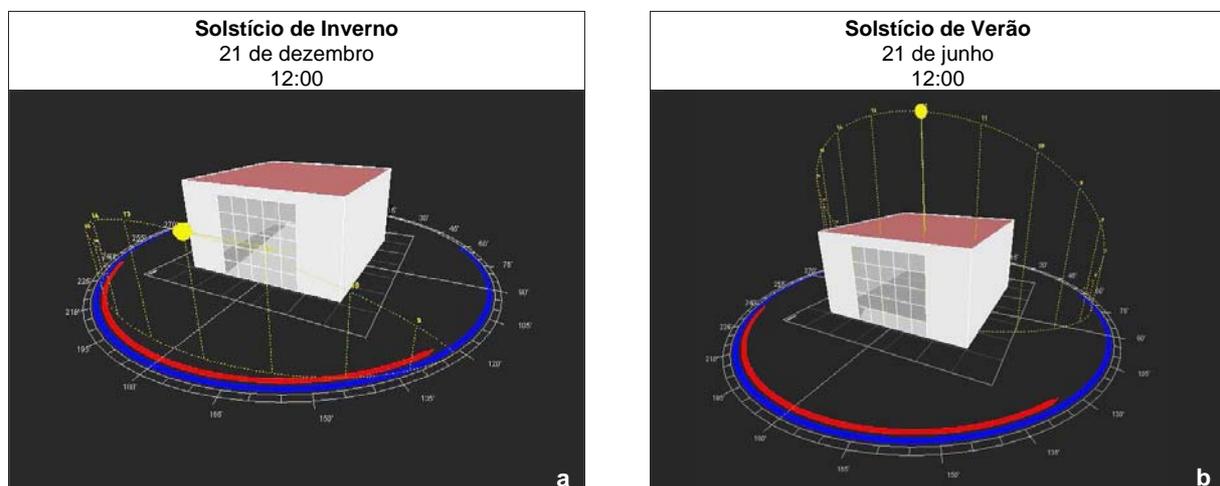


Figura 4.41 a-b. Condições de Simulação de Iluminação Natural: Esquemas ilustrativos 3D.

Para a determinação da iluminância e do FLD foi considerada uma distribuição de luminância de céu encoberto padrão da CIE. O nível de iluminação neste cenário foi calculado a partir da latitude do local, com valores distintos para cada cidade analisada e comparado a valores recomendados (**Figura 4.42**; **Tabelas 4.32** e **4.33**).

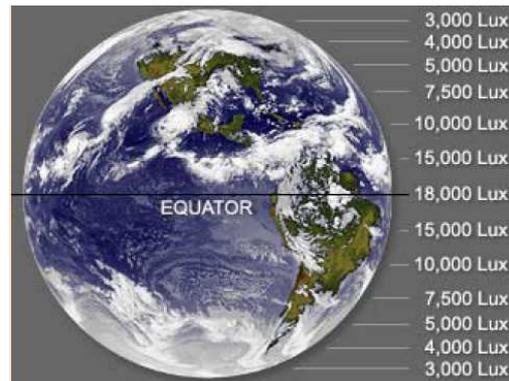


Figura 4.42 Nível de iluminação de acordo com a latitude do local. Tais valores aumentam com a proximidade da linha do Equador.

Tabela 4.32 Nível de Iluminação por Cidade.

Cidades		
Cidades	Latitude	Nível de Iluminação (lux) *
Bragança	N 41° 47'	6000
Coimbra	N 40° 12'	6500
Évora	N 38° 34'	7000
Faro	N 37° 1'	7500
Funchal-Madeira	N 32° 39'	8500
Guimarães	N 41 08'	6500
Lajes-Açores	N 38° 46'	7000
Lisboa	N 38° 43'	7000
Porto	N 41° 13	6500

Fonte: *SOFTWARE ECOTECH 5.6.

Tabela 4.33 Iluminâncias Recomendadas para Edifícios Residenciais.

Iluminância: Edifícios Residenciais			
Local	Goulding et al. (1994)	ABNT (1992)	CIBSIE (2002)
Zonas de	50-100	75 - 100 - 150	-
Quartos de Dormir	-	100 - 150 - 200	-
Salas de Estar	200	100 - 150 - 200	100-300
Salas de Jantar	100	100 - 150 - 200	100-300
Cozinhas	200	150 - 200 - 300	150-300

Fonte: GOULDING et al. (1994), ABNT (1992) e CIBSIE (2002).



4.2.2.9 Simulações de Desempenho de Microgeração Energética do Módulo Fotovoltaico

Nesta secção serão apresentados os programas utilizados nas simulações computacionais de microgeração energética para o módulo fotovoltaico SolTerm 5.0 e Sunny Design 2.0, bem como os critérios utilizados para definição do sistema fotovoltaico.

A análise do tipo de sistemas e células fotovoltaicas a utilizar no módulo fotovoltaico foi feita com base nos software *SolTerm* 5.0 e no software *Sunny Design* 2.0. Foram executadas simulações computacionais que obedeceram aos mesmos critérios nos dois programas, permitindo posteriormente uma comparação. A seguir é apresentada uma breve descrição dos programas de simulação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos utilizados neste trabalho de investigação.

A escolha do programa *Solterm* deve-se ao facto de constituir um programa, de uso obrigatório em Portugal pela legislação em vigor, ao quantificar-se a contribuição dos painéis solares para efeitos do RCCTE. A legislação refere explicitamente que este é o software que deve ser usado para o efeito.

No que se refere aos benefícios económicos que a implementação deste tipo de tecnologia apresenta atualmente, podem-se destacar dois tipos: os benefícios fiscais que isentam a tributação em sede de IRS sobre os rendimentos de venda de energia à rede inferiores a 5.000€ por ano; e os benefícios remuneratórios que podem ser obtidos através de dois regimes distintos, sendo um primeiro referente ao regime geral, o qual se caracteriza pela igualdade de preço de venda e de compra de eletricidade, não possuindo exigências específicas, e um segundo regime de carácter bonificado, que apresenta uma tarifa bonificada garantida durante 15 anos em que, para 2012, se apresentam em 0,326€Kwh nos primeiros 8 anos e 0,185€Kwh nos 7 anos seguintes (MICROGERAÇÃO EDP, 2012).

No Decreto-Lei n.º80/2006 é também referida a possibilidade de utilização de soluções alternativas aos coletores solares térmicos que se apresentem como formas renováveis de energia, capazes de captar anualmente energia equivalente à captada pelos coletores solares. A utilização destas alternativas pode ter outros destinos, se estes se apresentarem como mais convenientes e eficientes, que não o aquecimento de água (RCCTE, 2006), como é o caso do uso de painéis fotovoltaicos para a geração energética.



SolTerm 5.0

O Solterm é um software não gratuito de análise do desempenho de sistemas solares (térmicos e fotovoltaicos) que foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. (LNEG) na área da energia, especialmente ajustado às condições climáticas e técnicas de Portugal. Esta ferramenta integra apenas painéis fotovoltaicos certificados para Portugal.

A análise de desempenho de um sistema solar é feita no *SolTerm* via simulação energética sob condições quasi-estacionárias: isto é, são simulados os balanços energéticos no sistema em intervalos curtos (10 minutos), durante os quais se considera constante o estado do ambiente e o do sistema. Nestas simulações são usadas informações sobre: configuração / dimensionamento do sistema; estratégias de controlo e operação; radiação solar horizontal e temperatura ambiente em base horária; obstruções e sombreamentos; características técnicas dos componentes (tipo de celular, coletores, armazenamento, etc.) e consumo (ou “carga”) do sistema em base horária média mensal (INETI, 2007) (Figura 4.43).

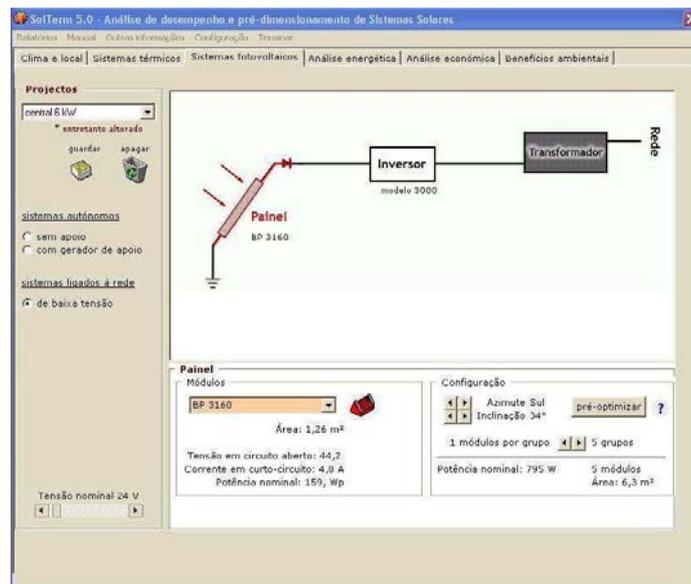


Figura 4.43 Exemplo da Interface do software *Solterm*.

O programa permite simular uma variedade de configurações de sistemas solares, inclusive em termos de custo e de benefícios ambientais, porém em relação aos painéis fotovoltaicos, o banco de dados de painéis está restrito a três tipos que são certificados para uso em Portugal.



No caso de sistemas fotovoltaicos, a interface do programa apresenta as seguintes colunas de valores mensais, bem como o valor anual (INETI, 2007):

- E (rad) – energia diária média na radiação solar global à face do painel fotovoltaico (kWh), portanto em geral num plano inclinado. Este valor não tem incluído o efeito do “modificador de ângulo”.
- E (pv) – energia diária média na radiação solar convertida pelos módulos do painel fotovoltaico (kWh).
- E (exc) – energia média diária que o painel fotovoltaico converte mas que o sistema tem de dissipar (kWh). O desperdício de energia recolhida surge quando a capacidade máxima de armazenamento foi atingida e há radiação solar disponível, mas não há solicitação do consumo.
- E (sist) - (no caso de sistemas autónomos sem apoio ou ligados à rede) - energia diária média que o sistema fornece para consumo (kWh). Trata-se de energia final útil, i.e. efetivamente entregue, no caso de sistemas autónomos com apoio; e de energia final no caso de sistemas ligados à rede, uma vez que a simulação do sistema vai apenas até ao primeiro transformador de elevação de tensão.
- E (apoio) (apenas no caso de sistemas autónomos com apoio) - energia média diária fornecida para consumo pelo sistema de apoio, ou auxiliar, para complementar a energia fornecida pelo sistema solar (kWh). Trata-se de energia final útil; o valor de energia final correspondente será superior, e ainda mais o valor de energia primária.
- Carga – valor diário da energia solicitada para consumo (kWh).

Quanto aos índices anuais são sempre apresentados:

- Produtividade - trata-se de uma energia específica, a energia de origem solar fornecida para consumo por unidade de potência nominal instalada (“ E (sist)”/ “potência nominal do painel” em valores anuais). Este índice é apresentado frequentemente, contudo é muito dependente dos detalhes do consumo, do nível de recurso solar e da tecnologia utilizada nos módulos.
- Rendimento do sistema – trata-se da razão entre a energia de origem solar fornecida para consumo e a disponível à face dos coletores (“ E (sist) ”/“ E (rad) ” em valores anuais). É, portanto uma medida da eficácia do sistema solar em transferir energia da radiação solar para a carga. Embora não seja



um índice habitualmente apresentado, é uma indicação interessante como guia para dimensionamentos, porque é menos dependente dos detalhes do consumo, e em particular menos do nível de recurso solar. Contudo é ainda dependente da tecnologia dos módulos.

Para sistemas autónomos sem gerador auxiliar é apresentado ainda a:

- Probabilidade de perda de carga – trata-se do número de horas em que o sistema não pôde atender à solicitação do consumo, expressa em percentagem do número de horas em que é solicitado consumo;
- Análise energética - possível conduzir simulações de otimização automática do dimensionamento dos sistemas.

Foram executadas 54 simulações computacionais com o software *Solterm* 5.0 que obedeceram aos critérios que serão apresentados a seguir.

Crítérios para o Sistema Fotovoltaico

Para as simulações do módulo fotovoltaico foram consideradas, nove cidades portuguesas, sendo: Bragança; Coimbra; Évora; Faro; Funchal-Madeira; Guimarães; Lajes-Açores; Lisboa e Porto igualmente às simulações computacionais de desempenho térmico e lumínico. Como a orientação solar ideal para este tipo de sistema é a sul, as simulações se restringiram a esta orientação, com duas variações, sendo elas considerando os painéis na vertical e outra com os painéis inclinados.

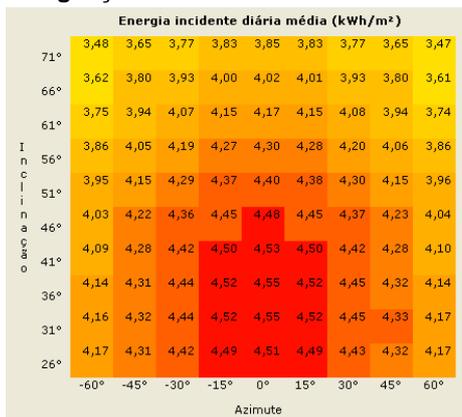
O critério para seleção das cidades se centra na sua diversidade de localização geográfica, principalmente a latitude, fator diretamente relacionado à radiação solar recebida e também nos valores de irradiação solar e, além disso, por serem as mesmas utilizadas nos estudos anteriores.

Esta inclinação varia por cidade, sendo que o programa permite executar uma otimização da inclinação que para Portugal geralmente está próxima aos 30°. As **Tabelas 4.34 a 4.36** abaixo apresenta os dados de otimização obtidos por meio do *Solterm* 5.0 e os ângulo de inclinação utilizado para localidade, determinado de acordo com o maior valor de energia incidente diária média (kWh/m²). Não foram consideradas obstruções do horizonte para o sistema, para que fosse possível comparar os resultados com outro software utilizado, no caso o *Sunny Design* no qual não é possível analisar a influência de obstruções sobre o sistema fotovoltaico.



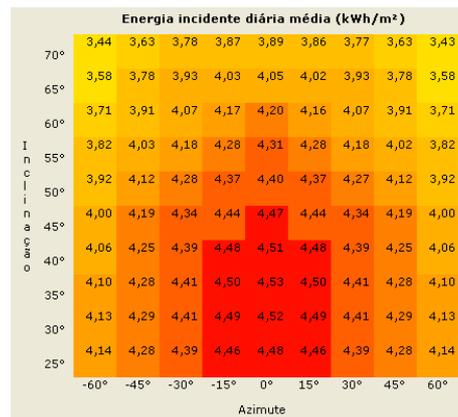
Tabela 4.34 Dados de otimização obtidos por meio do *Solterm 5.0 I*.

Bragança



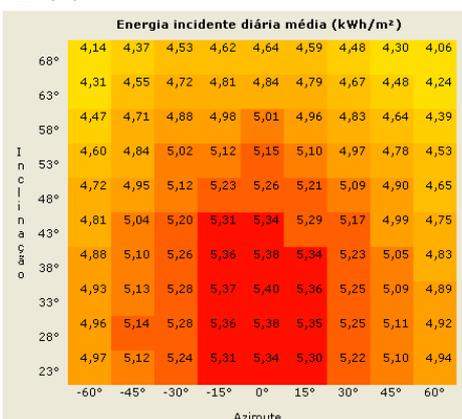
Azimute=0°
Inclinação Ideal= 31 ou 36°

Coimbra



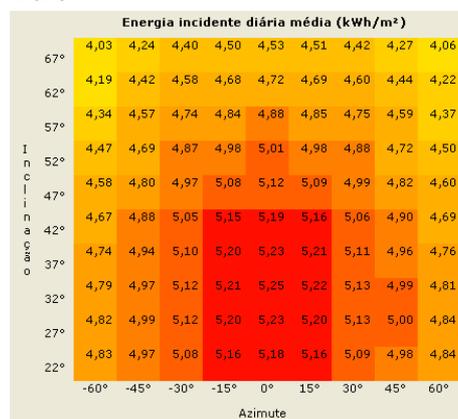
Azimute=0°
Inclinação= 35°

Évora



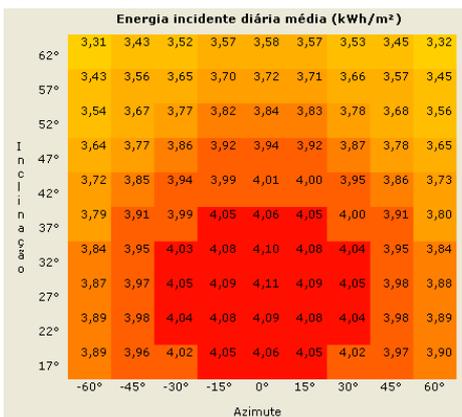
Azimute=0°
Inclinação Ideal = 33°

Faro



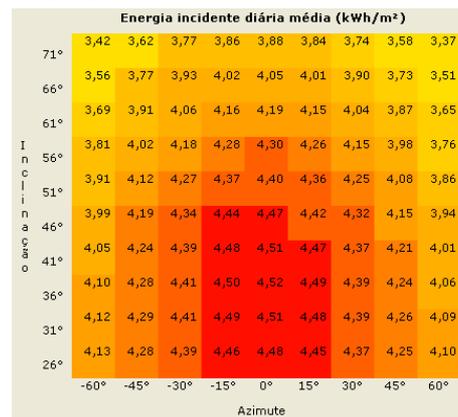
Azimute=0°
Inclinação= 32°

Funchal-Madeira



Azimute=0°
Inclinação= 27°

Guimarães



Azimute=0°
Inclinação Ideal = 36°



Tabela 4.35 Dados de otimização obtidos por meio do *Solterm 5.0 II*.

Funchal-Madeira										Guimarães											
Energia incidente diária média (kWh/m ²)										Energia incidente diária média (kWh/m ²)											
I n c l i n a ç ã o	62°	3,31	3,43	3,52	3,57	3,58	3,57	3,53	3,45	3,32	I n c l i n a ç ã o	71°	3,42	3,62	3,77	3,86	3,88	3,84	3,74	3,58	3,37
	57°	3,43	3,56	3,65	3,70	3,72	3,71	3,66	3,57	3,45		66°	3,56	3,77	3,93	4,02	4,05	4,01	3,90	3,73	3,51
	52°	3,54	3,67	3,77	3,82	3,84	3,83	3,78	3,68	3,56		61°	3,69	3,91	4,06	4,16	4,19	4,15	4,04	3,87	3,65
	47°	3,64	3,77	3,86	3,92	3,94	3,92	3,87	3,78	3,65		56°	3,81	4,02	4,18	4,28	4,30	4,26	4,15	3,98	3,76
	42°	3,72	3,85	3,94	3,99	4,01	4,00	3,95	3,86	3,73		51°	3,91	4,12	4,27	4,37	4,40	4,36	4,25	4,08	3,86
	37°	3,79	3,91	3,99	4,05	4,06	4,05	4,00	3,91	3,80		46°	3,99	4,19	4,34	4,44	4,47	4,42	4,32	4,15	3,94
	32°	3,84	3,95	4,03	4,08	4,10	4,08	4,04	3,95	3,84		41°	4,05	4,24	4,39	4,48	4,51	4,47	4,37	4,21	4,01
	27°	3,87	3,97	4,05	4,09	4,11	4,09	4,05	3,98	3,88		36°	4,10	4,28	4,41	4,50	4,52	4,49	4,39	4,24	4,06
	22°	3,89	3,98	4,04	4,08	4,09	4,08	4,04	3,98	3,89		31°	4,12	4,29	4,41	4,49	4,51	4,48	4,39	4,26	4,09
	17°	3,89	3,96	4,02	4,05	4,06	4,05	4,02	3,97	3,90		26°	4,13	4,28	4,39	4,46	4,48	4,45	4,37	4,25	4,10
		-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°			-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°
		Azimute											Azimute								

Azimute=0°
Inclinação= 27°

Azimute=0°
Inclinação Ideal = 36°

Lajes-Açores										Lisboa											
Energia incidente diária média (kWh/m ²)										Energia incidente diária média (kWh/m ²)											
I n c l i n a ç ã o	68°	3,38	3,54	3,66	3,73	3,74	3,71	3,64	3,52	3,35	I n c l i n a ç ã o	68°	3,79	4,01	4,18	4,27	4,29	4,25	4,14	3,96	3,73
	63°	3,52	3,69	3,81	3,89	3,90	3,87	3,79	3,66	3,49		63°	3,95	4,17	4,34	4,44	4,47	4,42	4,31	4,12	3,89
	58°	3,65	3,82	3,95	4,02	4,04	4,01	3,93	3,80	3,62		58°	4,09	4,31	4,49	4,59	4,62	4,57	4,45	4,27	4,03
	53°	3,76	3,94	4,06	4,14	4,16	4,13	4,05	3,91	3,74		53°	4,21	4,43	4,61	4,71	4,74	4,69	4,57	4,39	4,15
	48°	3,86	4,03	4,16	4,23	4,25	4,22	4,14	4,01	3,84		48°	4,31	4,53	4,70	4,80	4,83	4,79	4,67	4,49	4,26
	43°	3,94	4,10	4,23	4,30	4,32	4,30	4,21	4,09	3,92		43°	4,40	4,61	4,77	4,87	4,90	4,85	4,74	4,56	4,34
	38°	4,01	4,16	4,28	4,35	4,37	4,34	4,26	4,14	3,98		38°	4,46	4,66	4,81	4,91	4,93	4,89	4,78	4,62	4,41
	33°	4,05	4,19	4,30	4,37	4,39	4,37	4,29	4,18	4,03		33°	4,50	4,69	4,83	4,92	4,94	4,90	4,80	4,65	4,46
	28°	4,08	4,21	4,31	4,37	4,39	4,36	4,30	4,20	4,07		28°	4,53	4,69	4,82	4,90	4,92	4,88	4,80	4,66	4,48
	23°	4,09	4,21	4,29	4,34	4,36	4,34	4,28	4,20	4,08		23°	4,53	4,67	4,78	4,85	4,87	4,84	4,76	4,65	4,49
		-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°			-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°
		Azimute											Azimute								

Azimute=0°
Inclinação Ideal = 28 ou 33°

Azimute=0°
Inclinação Ideal = 33°

Tabela 4.36 Dados de otimização obtidos por meio do *Solterm 5.0 III*.

Porto

Energia incidente diária média (kWh/m ²)										
I n c l i n a ç ã o	71°	3,30	3,49	3,64	3,74	3,78	3,76	3,68	3,54	3,35
	66°	3,44	3,64	3,80	3,91	3,95	3,93	3,84	3,70	3,50
	61°	3,58	3,78	3,94	4,05	4,09	4,07	3,98	3,83	3,63
	56°	3,69	3,90	4,06	4,17	4,21	4,19	4,10	3,95	3,74
	51°	3,80	4,00	4,16	4,27	4,31	4,29	4,20	4,05	3,85
	46°	3,88	4,08	4,24	4,34	4,38	4,36	4,27	4,12	3,93
	41°	3,95	4,14	4,29	4,39	4,43	4,41	4,32	4,18	4,00
	36°	4,01	4,18	4,32	4,42	4,45	4,43	4,35	4,22	4,05
	31°	4,04	4,20	4,33	4,42	4,45	4,43	4,35	4,23	4,08
	26°	4,06	4,20	4,32	4,39	4,42	4,40	4,34	4,23	4,09
		-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°
		Azimute								

Azimute=0°
Inclinação Ideal = 31 ou 36°



A base de dados com que o *SolTerm* contém três tipos de módulos fotovoltaicos que são certificados para utilização em Portugal, por isso tais painéis foram utilizados nas simulações.

Estes três tipos de módulos fotovoltaicos, certificados para uso em Portugal, foram utilizados. São eles: o BP 3160⁵², composto por células de silício policristalinas, o Kyocera KC167G-2, composto também por células de silício policristalinas e o Siemens M75S⁵³ composto por células silício amorfo. Foi feita uma tentativa de inserir dados de outros tipos de módulos no software (existe tal possibilidade), porém, devido à grande quantidade de informações solicitadas, houve a necessidade de contactar os fabricantes para obter determinadas informações que em grande parte não poderiam ser fornecidas por serem confidenciais.

A **Tabela 4.37** abaixo apresenta os dados dos três tipos de painéis fotovoltaicos simulados para cada localidade.

Tabela 4.37 Painéis fotovoltaicos simulados I.

Painel	BP 3160 	M75S 	KC167G-2 
Fabricante	BP Solar	Siemens	Kyocera
Tecnologia	Silício Policristalino	Silício Monocristalino	Silício Policristalino
Potência _{max} (W)	160	74.8	167
Tensão Nominal (V)	24.0	12.0	12.0
Tensão de Circuito Aberto (V)	44.2	22.0	28.9
Corrente (A)	4.55	4.40	7.20
Corrente de Curto-Circuito (A)	4.80	4.80	8.00
Eficiência (%)	12.7	-	16.0

Em relação ao tipo de sistema fotovoltaico os projetos podem ser dos tipos: autônomo (com apoio e sem apoio) e central de 6kW, sendo que o último é um sistema da baixa tensão ligado à rede, caso utilizado neste trabalho. O tipo de inversor modelo 3000 que tem a plena carga potência de 3000W e eficiência de 98% e a 10% da carga tem potência de 800W e eficiência de 85% (**Figura 4.44**).

⁵² Pelos dados apresentados no software Solterm, trata-se de um painel com a tecnologia de silício amorfo, porém essa informação não está de acordo com o catálogo do fabricante (BP SOLAR, 2009), bem como com os resultados das simulações que serão apresentadas posteriormente. De acordo com a BP Solar tal painel possui a tecnologia policristalina. Se este painel fosse de silício amorfo esperava-se um desempenho de geração energética inferior aos dois outros tipos simulados e certificados para Portugal, o que não ocorre e será apresentado nos resultados.

⁵³ Pelos dados apresentados no software Solterm, trata-se de um painel com a tecnologia monocristalina. Se tal painel fosse monocristalino, esperava-se um desempenho de geração energética superior aos dois outros tipos simulados e certificados para Portugal. Isso que não ocorre e será apresentado nos resultados, ainda que não exista catálogo de fabricante deste painel, podendo-se inferir que se trata de um painel com tecnologia de silício amorfo, observando-se também sua potência inferior aos demais.

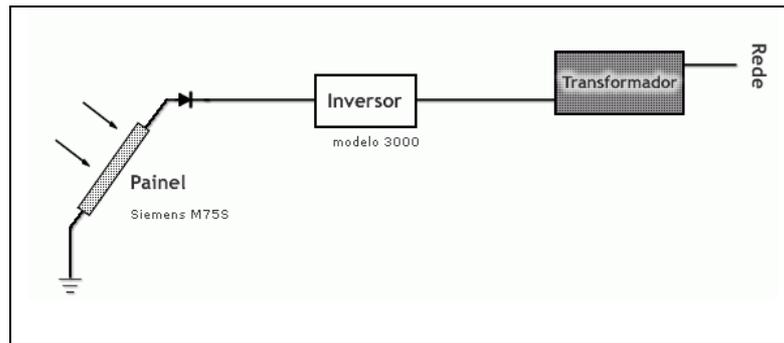


Figura 4.44 Sistema Fotovoltaico Simulado.
Fonte: *Solterm 5.0*

Sunny Design 2.0

O software *Sunny Design* é um software livre que permite o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de todas as potências em três etapas, sendo elas: definição do gerador fotovoltaico (Introdução de local de instalação, tipo de módulo, orientação do gerador e potência fotovoltaica ou número de módulos); Predefinição do tipo de inversor (assistente de introdução para seleção em função de determinadas características ou predefinição imediata do inversor) e avaliação (comprovação automática da configuração, identificação das características de desempenho durante um ano de funcionamento) (SUNNY DESIGN, 2008) (**Figura 4.45**). O resultado pode ser impresso em forma de relatório com conteúdo e conceção que podem ser editados.

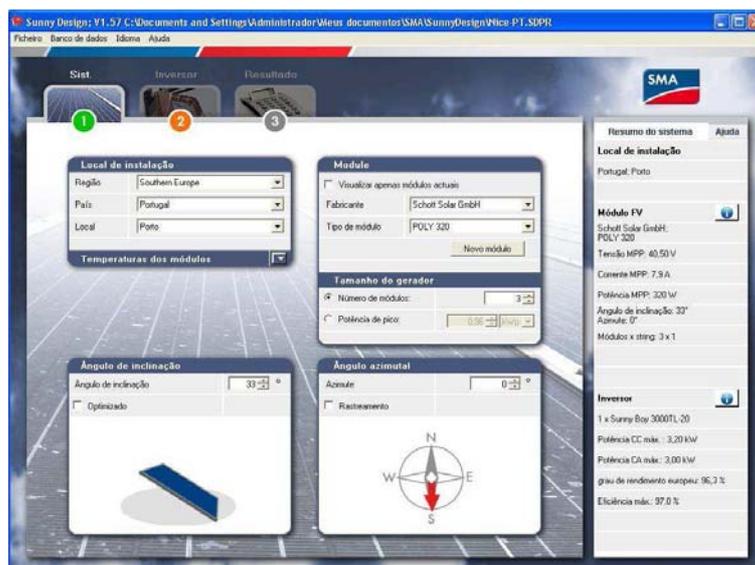


Figura 4.45 Exemplo de tela do software *Sunny Design*.

As principais características do software *Sunny Design 2.0* são: banco de dados de inversores que inclui todos os inversores da empresa desenvolvedora SMA (Sunny Boy,



Sunny Mini Central, Sunny Central); banco de dados de módulos fotovoltaicos com todos os módulos fotovoltaicos atuais e disponíveis; banco de dados locais de instalação com dados de radiação e meteorológicos reais em alta resolução.

Além disso, o programa possui suporte de sistemas e suporte de geradores fotovoltaicos (com qualquer inclinação, qualquer ângulo azimutal e rastreamento de um eixo); Verificação dos dados operacionais e preparação dos resultados em forma de lista de verificação do sistema e gráfico; avaliação energética de um ano de funcionamento; Suporte no dimensionamento de cabos e relatório de resultados individualmente configurável (SUNNY DESIGN, 2008).

Na parte referente ao Sistema fotovoltaico constam os dados relativos ao gerador fotovoltaico. Deve se selecionado, no mínimo, o local de instalação, o tipo de módulo e o número de módulos. A temperatura dos módulos fotovoltaicos pode ser introduzida nos dados, porém o *Sunny Design* propõe valores em função dos dados meteorológicos da localidade. Seleciona-se o fabricante e o tipo de módulo que deve ser utilizado para um projeto. Podem ser inseridos novos módulos como ocorre no *Solterm*. Por fim devem ser selecionados o ângulo de inclinação dos painéis, o azimute, o tipo de inversor e a configuração do sistema.

Como resultados têm-se os dados relativos ao gerador fotovoltaico; os dados relativos ao inversor; um teste de compatibilidade que permite a correção de erros; uma vista geral do rendimento estimado do sistema; uma previsão de como se traduzem os ajustes do layout na versão impressa, um layout onde é possível reunir ou alterar as informações da versão impressa. Como opção, também pode guardar o resultado e a lista de verificação em formato pdf.

O pré-dimensionamento de um sistema pode ser feito segundo vários critérios, podendo conduzir a resultados mesmo muito diferentes. Há basicamente dois tipos de critérios: energéticos e económicos. Entretanto, há outros fatores que também podem ser levados em conta, tais como normas e regulamentos, autonomia, redução da poluição causada por sistemas a combustíveis fósseis, ou mesmo questões estéticas. Com respeito aos critérios energéticos, a ideia básica é procurar a configuração que fornece ao utilizador o máximo de energia de origem renovável, desperdiçando, entretanto pouca ou nenhuma da energia captada.

Assim, a utilização desta ferramenta informática de origem alemã, deve-se essencialmente à intenção de comparar os resultados com os anteriormente obtidos pelo *Solterm*. Porém, o seu uso foi de grande importância para a comparação e validação dos



resultados de desempenho dos sistemas fotovoltaicos, obtidos pelos dois programas de simulação.

Outro detalhe importante é que para este programa para Portugal estão disponíveis somente os dados meteorológicos para Porto, Lisboa e Faro. Portanto, para as simulações do módulo fotovoltaico foram consideradas essas três cidades portuguesas. Novamente, como se sabe a orientação solar ideal para este tipo de sistema é a sul, as simulações se restringiram a esta orientação, com duas variações, sendo elas com os painéis na vertical e outra com os painéis inclinados. Esta inclinação varia nas três cidades, sendo que foram consideradas as mesmas utilizadas nas simulações para o *Solterm*: Porto 36°; Lisboa 33° e Faro 32°.

Foram executadas 36 simulações computacionais com o software *Sunny Design* que obedeceram a critérios mais próximos possíveis dos estabelecidos para o software *Solterm*. Porém, o painel M75S da Siemens não se encontra no banco de dados do *Sunny Design*, portanto os outros dois tipos que constam no banco de dados, sendo os módulos BP 3160 da BP Solar e o KC167G-2 da Kyocera foram simulados para permitir a comparação e validação dos resultados.

Além disso, foram efetuadas simulações considerando o uso de outros tipos de módulos fotovoltaicos de diferentes composições e eficiência energética que não estão disponíveis para o software *Solterm*. Os painéis escolhidos não são certificados para o uso em Portugal, porém a execução dessas simulações foi importante para aumentar a gama de possibilidades para a determinação dos tipos de painéis mais eficientes em termos de geração energética. O número de simulações nesse caso foram 30.

Para escolha dos tipos de painéis fotovoltaicos que seriam utilizados neste trabalho de investigação foi considerada uma pesquisa realizada pela Energy Focus (ENF). Trata-se de uma empresa fundada em 2005 que além de outros tipos de serviços, realiza pesquisa de mercado para a área de tecnologias solares e possui sede na Inglaterra e China. Nesta pesquisa foi realizado um inquérito junto às empresas de instalação em 45 países diferentes para determinar qual era considerado o melhor painel solar. Esse tipo de tecnologia evolui de forma muito rápida, porém, esse tipo de ranking dos melhores painéis solares pode servir como bom ponto de partida para a escolha. Nesta pesquisa foram escolhidos como os melhores painéis solares os painéis da Sunpower, Schott Solar e Solar World (ENF, 2007; RENEWABLE ENERGY UK, 2009).

De acordo com a pesquisa, o fabricante mundial nº. 1 de painéis solares é SunPower (EUA). Os painéis solares desse fabricante são os melhores do mundo em termos de eficiência, detinham o recorde mundial em eficiência de 2009. Os painéis solares desse



fabricante são 50% mais potentes que os painéis do seu concorrente mais próximo e até 2 a 4 vezes mais potentes do que a tecnologia de silício amorfo (*thin film*).

O segundo melhor fabricante de painéis solares segundo a pesquisa da ENF é a Schott Solar (Alemanha). Essa indústria produz tanto painéis solares elétricos, painéis solares fotovoltaicos e coletores solares. Sendo que painéis solares fotovoltaicos e coletores solares são destinados principalmente para aplicações em larga escala dentro de centrais de energia solar.

O terceiro melhor tipo de painel provém da Solar World (Alemanha), que produz uma grande variedade de painéis solares, como exemplo, kits para instalação denominados “Sunkits”. Esse kit contém os módulos solares, inversores, o quadro necessário de montagem e demais acessórios. A Solar World busca um alto nível de durabilidade do sistema, principalmente pela utilização de componentes feitos de aço inoxidável e alumínio na montagem do sistema. As **Tabelas 4.38** e **4.39** apresentam os painéis fotovoltaicos simulados e suas características principais.

Tabela 4.38 Painéis fotovoltaicos simulados II.

Painel	BP 3160	KC167G-2	Sunpower 210	Sunpower 305 E18	Schott ASI F 100
Fabricante	BP Solar	Kyocera	Sunpower	Sunpower	Schott
Tecnologia	Silício Policristalino	Silício Policristalino	Silício Monocristalino	Silício Monocristalino	Silício Amorfo (thin film)
Potência _{max} (W)	160	167	210	305	100
Tensão Nominal (V)	24.0	12.0	40.0	54.7	17.5
Tensão de Circuito Aberto (V)	44.2	28.9	47.7	64.2	23.8
Corrente (A)	4.55	7.20	5.25	5.58	5.71
Corrente de Curto-Circuito (A)	4.80	8.00	5.75	5.96	6.79
Eficiência (%)	12.7	16.0	16.9	18.7	6.9

Tabela 4.39 Painéis fotovoltaicos simulados III.

Painel	Schott Mono 190	Schott Poly 320	SolarWorld Mono SW 245	SolarWorld Poly SW 240	Solyndra SL200 Tube
Fabricante	Schott	Schott	SolarWorld	SolarWorld	Solyndra
Tecnologia	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Tubos Filme Fino (thin film tube)
Potência _{max} (W)	190	320	245	240	200
Tensão Nominal (V)	36.4	39.1	30.8	30.2	78.3
Tensão de Circuito Aberto (V)	45.2	48.1	37.7	37.2	99.7
Corrente (A)	7.16	7.16	7.95	7.96	2.55
Corrente de Curto-Circuito (A)	7.95	7.95	8.25	8.44	2.78
Eficiência (%)	14.5	12.7	14.6	14.6	10.0

O inversor utilizado neste caso foi o Sunny Boy 3000TL-20 o mais próximo comparado ao inversor modelo 3000 utilizado no software anterior. Suas características são: potência de 3000W e eficiência de 97% (pouco superior ao utilizado nas simulações anteriores). A **Figura 4.46** apresenta um esquema do sistema fotovoltaico simulado fornecido pelo *Sunny Design*, idêntico ao utilizado no software *Solterm*.



Figura 4.46 Sistema Fotovoltaico Simulado no Software *Sunny Design*.
 Fonte: SUNNY DESIGN 2.0

Os resultados são expressos na forma de um documento em formato pdf com os dados de geração de energia por ano. Tais dados foram distribuídos na forma de gráficos e comparados aos resultados do *Solterm*.

Salienta-se que os programas informáticos utilizados nas simulações computacionais são destinados ao dimensionamento e avaliação de sistemas fotovoltaicos com painéis de dimensões padronizadas e foram utilizados para simulações de um sistema destinado a fachadas, de forma que a base para a configuração do sistema foi estabelecida pela área de 6,5m² (2,5m x 2,5m) de fachada, que é equivalente a área máxima de fachada estabelecida para as configurações simuladas anteriormente para outras combinações de componentes.



Uma vez conhecida a área total ocupada por painéis fotovoltaicos, importa definir a potência instalada (kWp). Esta será a potência que irá determinar o volume de energia produzida (kWh) pela instalação. Contudo a potência instalada dependerá também das características dos módulos fotovoltaicos.

4.2.2.10 Parâmetros para Previsão de Desempenho Acústico

Nesta etapa do desenvolvimento do sistema de fachadas foi feita uma previsão de desempenho acústico para os módulos envidraçados com base nas informações recolhidas junto ao fabricante dos perfis (Technal) utilizados nos módulos na fase de detalhamento do sistema.

Para análise do desempenho acústico de sistemas de fachadas, no caso deste trabalho de investigação tem-se que a fachada é composta por dois grandes grupos de elementos, sendo um envidraçado e as paredes, sendo que cada um destes elementos apresentam um determinado coeficiente de transmissão sonora (**Figura 4.47**).

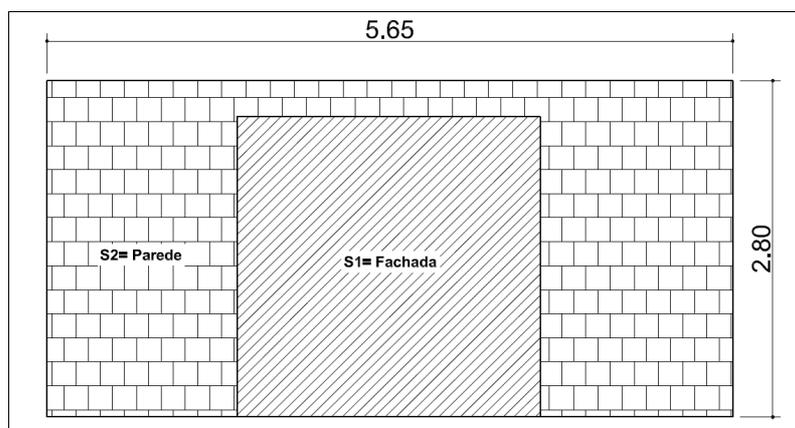


Figura 4.47 Esquema ilustrativo dos elementos que compõe a fachada estudada,

Porém, como o foco principal deste trabalho de investigação é o desempenho térmico e os elementos de maior importância são os módulos envidraçados, foram recolhidas informações junto ao fabricante (Technal) sobre o desempenho acústico, de acordo com os tipos de perfis de alumínio utilizados na composição de tais módulos, que podem ser fixos e móveis.

Para as novas habitações, a normalização de acústica prevê uma especificação dos níveis recomendados. O objetivo da diretiva é a proteção dos ocupantes contra o ruído proveniente do exterior da habitação (rua, patamar, vizinhos, tráfego aéreo, etc.) (RRAE, 2008). As alterações introduzidas em 2008 atualizam os parâmetros de



desempenho acústico dos edifícios e os indicadores do ruído de equipamentos e instalações, e estabelecem explicitamente procedimentos de avaliação de conformidade com as normas definidas no regulamento, visando a melhoria da qualidade habitacional, tanto para edifícios novos como para os edifícios existentes que venham a ser objeto de reconstrução, ampliação, ou alteração.

Índice de Atenuação Acústica

Os dados que serão apresentados verificam o desempenho acústico através de um índice de atenuação acústica R_w expresso em dB, medido em laboratório com um ruído "rosa" (que reproduz os ruídos interiores: voz, televisão, sistemas de alta fidelidade, entre outros) e um ruído de "estrada" (que simula o tráfego rodoviário).

Este índice é medido em laboratório, segundo a norma EN ISO 140 e representa as características de um dado elemento (neste caso uma janela) para cada faixa de 1/3 de oitava numa gama de frequências entre 100 e 3150 Hz (16 valores). Outras medições podem ser feitas a título facultativo para frequências de 50 a 100Hz e de 3150 a 5000Hz.

A partir destes 16 níveis de atenuação acústica em função da frequência, podem realizar-se cálculos que permitem exprimir de forma diferenciada as qualidades acústicas de um determinado elemento. O melhor desempenho acústico obtém-se quando existe um bom isolamento acústico em todas as frequências em que a fonte de ruído é mais forte. Até há pouco tempo, uma construção era avaliada com base num único índice, sem ter em conta as características da fonte de ruído, o que conduzia a erros.

Os valores normalmente utilizados são valores globais definidos segundo a norma EN ISO 717-1 para uma curva de referência e adaptados a dois espectros de ruído padronizados: o ruído rosa e o ruído de tráfego. O ruído rosa contém a mesma energia acústica em cada intervalo de frequência de medição e o ruído de tráfego rodoviário que caracteriza um ruído exterior de tráfego urbano.

Índice de atenuação ponderado R_w

O índice de atenuação ponderado R_w é calculado com base na comparação entre os valores R medidos (16 valores para 16 intervalos de 1/3 oitava, de 100 Hz a 3150 Hz) e uma curva de referência. Esta se posiciona de forma em que a média do desvio por defeito da curva medida seja inferior a 2dB. O valor pontual medido sobre esta curva, nesta posição,



relativo à frequência de 500 Hz designa-se R_w (dB). O R_w é um índice global: um mesmo índice pode corresponder a diferentes curvas de isolamento acústico. (SGG, 2011).

4.2.3 Otimização das Características Físicas dos Componentes

Nesta secção será apresentada a otimização das características físicas dos componentes, que engloba a caracterização espectrofotométrica dos vidros estudados para o módulo padrão (fixo e móvel) deste sistema de fachadas e a otimização do módulo de ventilação por meio de ensaios em túnel de vento. Tanto para os ensaios espectrofotométricos quanto para os ensaios em túnel de vento serão apresentados conceitos para melhor compreensão, além dos procedimentos seguidos na execução de tais ensaios.

Optou-se por fazer a caracterização espectrofotométrica dos vidros a serem indicados para os módulos porque grande parte deles é composta por esse material (módulo padrão fixo e móvel, módulo parede de Trombe, módulo estufa, etc.). Essas informações representam um maior detalhamento das características dos vidros a serem utilizados nos módulos. Por meio deste ensaio é possível obter dados de absorção, reflexão e transmissão dos vidros. No caso específico de obtenção de valores de transmissão, podem-se gerar gráficos com a percentagem de transmissão para as regiões de ultravioleta, visível e infravermelho próximo, e os resultados obtidos podem ser comparados entre si ou a um vidro simples incolor, por exemplo, e verificar a eficiência dos envidraçados em termos de nível de iluminância.

O segundo ensaio de caracterização de componentes que foi executado nesta etapa foi o ensaio em túnel de vento de protótipos do módulo de ventilação, de forma a determinar especificamente o tipo de grelha e posicionamento ideal a ser utilizado na configuração dos módulos, de modo a favorecer as condições de ventilação. O desenvolvimento de modelos em escala reduzida testados no túnel de vento permitiu a simulação das características de ventos naturais e suas cargas de pressão e sucção sobre as configurações do módulo de ventilação no sistema de fachadas.

4.2.3.1 Ensaios de Caracterização Espectrofotométrica de Vidros⁵⁴

A caracterização espectrofotométrica dos vidros a serem selecionados para os módulos foi o primeiro de dois ensaios de caracterização de componentes a ser executados. Como grande parte dos módulos é composta por vidros seria importante tal caracterização. De acordo com a ASTM (1993), o espectrofotômetro é o equipamento ideal para fornecer os dados de percentagem de transmissão para as regiões de ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Por meio dele, é possível realizar uma varredura no espectro apenas na região de interesse.

Para a execução deste ensaio foi utilizado o espectrofotômetro, um aparelho que faz passar um feixe de luz monocromática através de uma amostra, e mede a quantidade de luz que foi absorvida (**Figura 4.48**). Usando um prisma, o aparelho separa a luz em feixes com diferentes comprimentos de onda (tal como acontece no arco-íris com a separação das cores da luz branca). Pode-se assim fazer passar através da amostra um feixe de luz monocromática (de um único comprimento de onda, ou quase). O espectrofotômetro permite saber que quantidade de luz é absorvida a cada comprimento de onda e fornece dados de absorção, reflexão e transmissão do material, para ângulos variados de incidência.

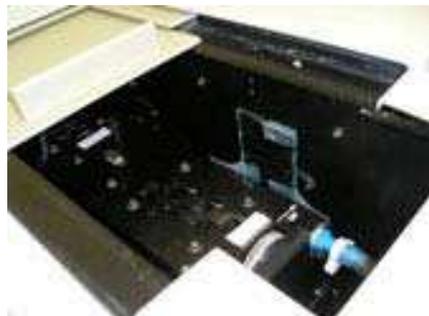


Figura 4.48 Amostra de vidro colocada no espectrofotômetro na vertical.

Fonte: SARDEIRO, 2007.

Com os dados obtidos via espectrofotômetro dos vidros foi possível criar curvas com os dados de transmissão e verificar a integração das áreas correspondentes a cada região do espectro (ultravioleta, visível e infravermelho) e também a integração da área total das curvas. Dessa maneira foi possível comparar a transmissão em intervalos característicos.

⁵⁴ Essa etapa foi desenvolvida com base em CARAM, R. M. **Caracterização Ótica de Materiais Transparentes e sua Relação com o Conforto Ambiental em Edificações**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. Campinas. 1998. 165p, bem como com o apoio desta pesquisadora especialista em vidros da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.



No caso específico da transmissão, podem-se gerar gráficos com a percentagem de transmissão para as regiões de ultravioleta, visível e infravermelho próximo, e os resultados obtidos podem ser comparados entre si ou a um vidro simples incolor, por exemplo, e verificar a eficiência dos envidraçados em termos de nível de iluminância (CARAM, 1998).

As informações dos fabricantes de vidros se limitam a valores de resistência mecânica, isolamento acústico e transmissão energética da radiação solar, sendo esta última tratada de forma generalizada, apresentando dados referentes à região do visível e ao fator solar, ignoram o comportamento do material na radiação ultravioleta e infravermelha. Os dados, usualmente, tratam apenas da transmitância para incidência da radiação normal à superfície, circunstância que acontece na realidade em um período de tempo mínimo. Algumas informações dadas são referentes ao coeficiente de ganho de calor solar, porém, referente ao infravermelho, nada é abordado. Tal fato dificulta uma correta análise do comportamento espectral do vidro individualmente (ultravioleta, visível e infravermelho) (CARAM, 2002).

Para melhor entendimento do ensaio de caracterização espectrofotométrica e seus resultados é importante apresentar algumas definições prévias que serão mostradas a seguir.

A transmissão através dos vidros depende principalmente de fatores como o ângulo de incidência da radiação, a espessura, a composição química e a característica superficial do vidro. O ângulo de incidência da radiação é considerado como sendo o ângulo entre a direção da radiação e a normal à superfície em análise (CARAM, 1998). A transmissão dos vidros depende também do comprimento de onda da radiação incidente. Para determinadas regiões do espectro, ele age como se fosse um material opaco, por exemplo, para comprimentos de onda inferiores a 300nm e superiores à 5000nm o vidro apresenta comportamento opaco, impedindo que a radiação atravessasse (CARAM, 2002).

Nas superfícies translúcidas ou transparentes acontecem as principais trocas térmicas, e a passagem da luz para o interior da edificação. Portanto, essas superfícies atuam diretamente no conforto térmico e luminoso. No caso de um vidro transparente, parte da energia proveniente da radiação solar (**Figura 4.49**) é transmitida diretamente para o interior do ambiente, facto que diferencia superfícies opacas de translúcidas. Nas superfícies translúcidas (**Figura 4.50**) também acontece à reflexão, absorção e transmissão, porém a transmissão ocorre de maneira diferente. A luz, ao penetrar através de um vidro translúcido, difunde-se e sai como uma luz difusa e não direta (SARDEIRO, 2007).

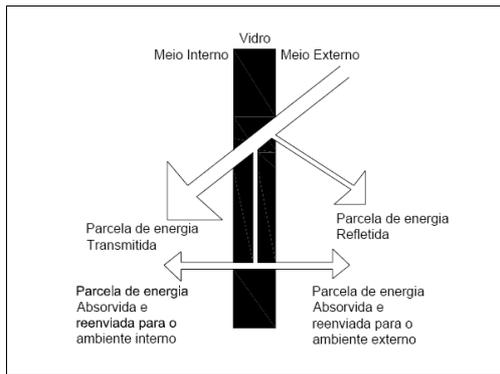


Figura 4.49 Esquema do comportamento da radiação ao incidir em uma superfície transparente.

Fonte: SARDEIRO, 2007.

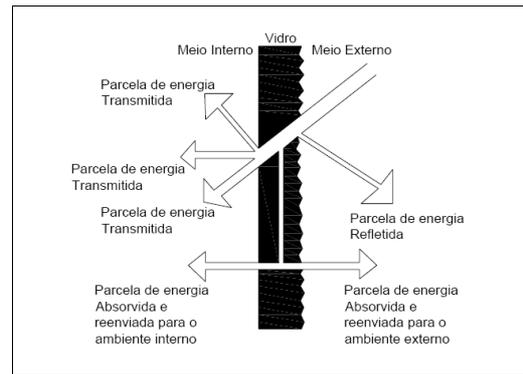


Figura 4.50 Esquema do comportamento da radiação ao incidir em uma superfície translúcida.

Fonte: SARDEIRO, 2007.

O valor total da radiação transmitida, refletida e absorvida pelos envidraçados é uma importante variável para o cálculo do ganho de calor solar, que depende das propriedades óticas do material, do fator solar, da radiação solar incidente, do coeficiente global de transferência de calor (fator U) e da diferença de temperatura entre os ambientes externos e internos. No caso específico deste trabalho foi obtida a percentagem de transmissão dos vidros anteriormente avaliados por meio de simulações computacionais de desempenho térmico. Tais resultados serão analisados sob o ponto de vista térmico e luminoso.

A radiação solar mais conhecida é a faixa do visível. Porém, outras duas faixas muito importantes são as do ultravioleta (UV) e do infravermelho (IV). A **Figura 4.51** apresenta a incidência de radiação solar dividida por espectros. Como ilustrado abaixo, o sol emite radiação em uma extensa faixa de ondas eletromagnéticas, porém só é perceptível uma estreita faixa do espectro solar.

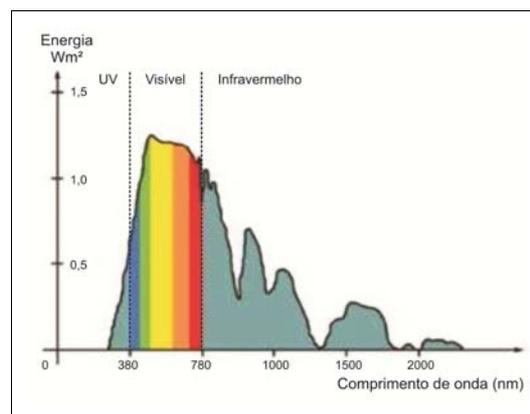


Figura 4.51 Espectro Solar.



O espectro solar é dividido da seguinte maneira: região do ultravioleta UV (100 a 380nm); região do visível (de 380 a 780nm) e região do infravermelho (780 a 3000nm).

A curva de *Parry Moon*, obtida a nível do mar apresenta a distribuição energética da radiação solar direta para uma altura solar de 30° em relação ao horizonte e céu claro (**Figura 4.52**). A radiação solar chega à superfície terrestre e reparte-se nas seguintes proporções, em função dos comprimentos de onda: ultravioleta de 1 a 5%, visível de 41 a 45% e infravermelho de 52 a 60%. Estas proporções variam de acordo com as condições atmosféricas, nebulosidade e presença de vapor de água (THORNDIKE, 1976; MEINEL, 1979).

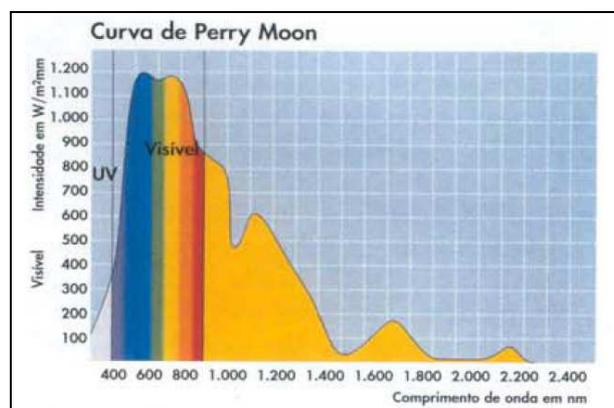


Figura 4.52 Curva de *Parry Moon* - Distribuição Espectral da Energia Solar.

Fonte: THORNDIKE, 1976; MEINEL, 1979.

Para o aproveitamento da energia solar, pode-se considerar somente a radiação cujo comprimento de onda esteja entre 290 e 1800nm, ou mais especificamente até 1500nm (CHEREMISINOFF & REGINO, 1974; THORNDIKE, 1976), pois os comprimentos de onda superiores a esse valor chegam de forma bastante reduzida à superfície terrestre, sendo absorvidos pelo vapor de água e dióxido de carbono presentes na atmosfera. Já os comprimentos de onda inferiores a 290nm, são absorvidos pela camada de ozônio (CARAM, 1998). Pode-se observar claramente, através da curva de Parry Moon, que os comprimentos de onda superiores a 1500nm chegam em pequena proporção à superfície terrestre.

Região do Ultravioleta (UV) (de 100 e 380nm)

A faixa do ultravioleta é mais energética que a luz (tem menor comprimento de onda) e por isso penetra mais profundamente na pele, causando queimaduras de acordo com o tempo de exposição à radiação solar. A porção de radiação ultravioleta que chega à superfície terrestre é aproximadamente de 1 a 5%, porém não pode ser desprezada devido aos efeitos que causa (CARAM, 1998).



No entanto, em algumas situações, a entrada dessa radiação pode ser importante, como em áreas de recuperação em hospitais, pois ela é responsável pela síntese de vitamina D através da pele e por possui efeito bactericida. No entanto, favorece o comprometimento da durabilidade dos materiais por meio de desbotamento ou descoloração de tecidos, pois possui capacidade fotoquímica. A região do ultravioleta que causa desbotamento dos materiais está compreendida entre 315 e 380nm os comprimentos de onda menores a estes valores provocam igualmente este efeito, porém quase não chegam a superfície terrestre. Este tipo de radiação também é responsável pelo bronzeamento.

A radiação ultravioleta é subdividida em 03 intervalos: UV-C (entre 100 e 280nm), UV-B (entre 280 e 320nm) e a UV-A (entre 320 e 380nm). A radiação UV-A (entre 320 e 380nm) causa bronzeamento direto da pele com eritema fraco, ou sub queimadura. A reação máxima do eritema é atingida em 72 horas, após exposição ao sol. Havendo exposição contínua, não somente se acelera o envelhecimento da pele, mas também ocorre implicação carcinogénica. A radiação UV-B causa resposta de eritema e, em associação, bronzeamento indireto da pele. Sob irradiação intensa e frequente, o UV-B pode produzir carcinomas de pele. Neste caso a reação máxima dá-se de 6 a 20 horas após exposição. A radiação UV-C não alcança a terra, uma vez que os comprimentos de onda abaixo de 290nm são absorvidos pela camada de ozônio da atmosfera. A radiação UV-C é germicida e mostra-se altamente danosa à pele humana, devido ao seu alto teor de energia (UNICAMP, 2010).

Região do Visível (de 380 a 780nm):

A região do visível está associada à intensidade de luz branca transmitida, influenciando diretamente no grau de iluminação natural de um ambiente, é a única determinante neste aspeto. A radiação visível também é chamada de luminosa, é aquela que nos proporciona a sensação visual do dia-a-dia. Constitui-se na parcela visível da radiação solar incidente na direção normal ao plano da superfície.

A luz visível carrega energia suficiente para estimular reações químicas nos olhos, permitindo o funcionamento do sistema da visão. Este comprimento de onda segue a sequência: violeta, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho, mas o sistema visual humano possui maior eficácia no comprimento de onda que corresponde às cores, verde e amarelo. Além de ser fundamental para o ser humano, também é indispensável para o desenvolvimento dos vegetais, devido ao processo da fotossíntese, pois para este processo há necessidade da luz visível. A clorofila, agente responsável pelo processo da respiração celular vegetal, absorve regiões específicas do espectro.



Infravermelho IV (780 a 3000nm)

A região do infravermelho é invisível ao sistema da visão, porém percebido na forma de calor, interfere nas condições internas do ambiente, através do ganho de calor solar, por isso não pode ser desconsiderado. É dividido em três faixas: infravermelho de ondas curtas ou infravermelho próximo, com comprimento de onda entre 780 a 1400nm; infravermelho de ondas médias de 1400 a 3000nm e, por fim, o infravermelho de ondas longas, que inclui a radiação resultante de corpos aquecidos, cujos comprimentos de onda são maiores que 5000nm.

O infravermelho próximo corresponde à grande parte do espectro solar que atravessa em proporções elevadas um vidro comum incolor, por exemplo. É comum serem vistas referências de alguns especificadores a esta região do espectro, nas quais geralmente é mencionada que o “vidro é opaco ao infravermelho de maneira geral”, porém trata-se de uma informação equivocada (CARAM, 2002).

Numa avaliação da transmissão de vidros por meio de ensaios espectrofotométricos, é possível analisar as diferentes regiões do espectro (ultravioleta, visível e infravermelho) individualmente, e não como um todo como ocorre com o uso dos parâmetros como o fator solar e coeficiente de sombreamento.

Dados dos Ensaios de Caracterização Espectrofométrica

O comportamento espectrofotométrico é um fator importante a ser considerado na especificação de materiais transparentes, pois tais informações possibilitam melhorias sensíveis nas condições de conforto térmico e visual de uma edificação.

Apesar dos vidros utilizados nas simulações computacionais serem de 4mm de espessura, só foi possível obter amostras com 6mm de espessura para serem analisadas nos experimentos, porém de acordo com informações de pesquisas realizadas anteriormente (CARAM, 1998; CARAM, 2002) a diferença de 2mm seria praticamente insignificante nos resultados. A seguir serão detalhados os dados referentes aos ensaios espectrofotométricos dos vidros.

Além dos vidros simples, foram ensaiadas três amostras das duas composições que se destacaram em termos de desempenho térmico, nas simulações realizadas anteriormente. Foram montados com auxílio de um dispositivo em papel madeira: o envidraçado 04 (Cool Lite KNT 155 – Verde, Planitherm Futur Ultra N) e o envidraçado 07 (Bioclean, Planilux) (**Figura 4.53 a-b**). Tal dispositivo permitiu a configuração dos envidraçados duplos com uma camada interior de ar. O espaço disponível no

espectrofotômetro para colocação das amostras não permitiu que o afastamento entre os vidros fosse de 12mm (como nas simulações), porém, apesar de ter sido feita uma camada de ar com metade desta espessura (6mm), os resultados seriam significativos para verificar a influência da camada de ar na transmissão dos vidros duplos (CARAM, 1996; CARAM, 2002).

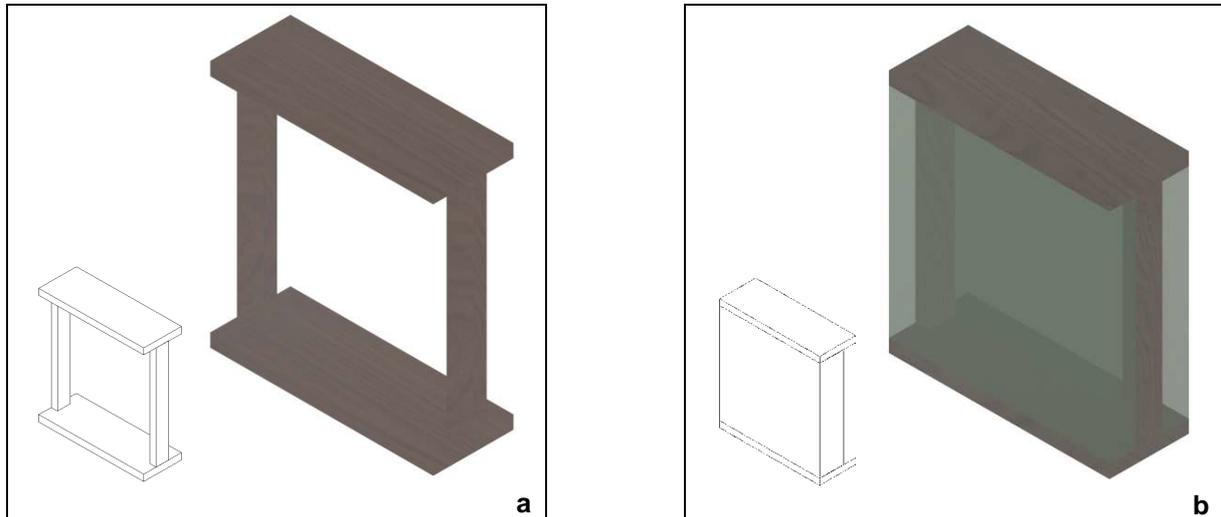


Figura 4.53 a-b. Dispositivo em papel madeira para conformação dos envidraçados duplos a; dispositivo com os vidros posicionados b.

Foram utilizadas nos ensaios amostras retangulares com 50mmx50mm de dimensão para todos os oito tipos de vidro utilizados anteriormente nas simulações computacionais de desempenho térmico. Tais amostras foram fornecidas previamente cortadas pelo fabricante *Saint-Gobain Glass*. O intervalo do espectro considerado foi de 200 a 1100nm, que compreende três regiões: o Ultravioleta (200 a 380nm), o Visível (380 a 780nm) e o parte do Infravermelho (780 a 1100nm).

A maior concentração de infravermelho está no intervalo de 780 a 1500nm e a percentagem que chega para comprimentos de onda maiores que 1500nm é bem pequena (CARAM, 1998). Isso comprova que é válida a realização das análises para o intervalo de 780 a 1100nm utilizado nesta pesquisa, sendo ainda este o intervalo limite no qual o aparelho utilizado faz a varredura.

O aparelho utilizado para execução dos ensaios foi o espectrofotômetro UNICAM UV/VIS. Este aparelho fornece dados de absorção, reflexão e transmissão dos materiais ensaiados. Nesta pesquisa, em virtude do objetivo foi trabalhado apenas com o modo transmissão. Foi utilizada lâmpada de tungstênio para todo o espectro. As amostras foram ensaiadas a 0° com a normal (feixe perpendicular à amostra) e a incidência do feixe foi de acordo com o tipo de capa das amostras, seguindo as recomendações de uso do fabricante



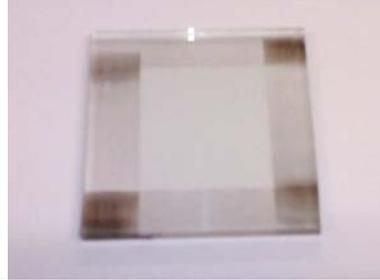
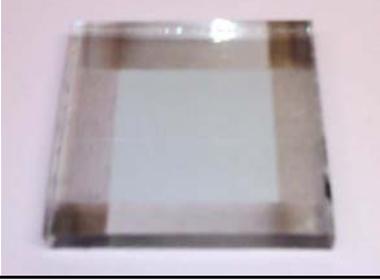
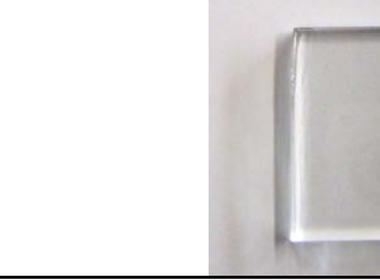
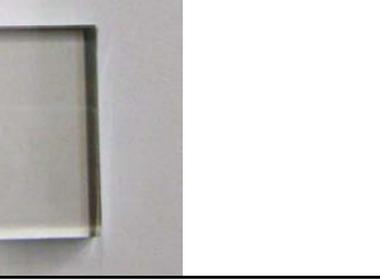
tanto para os vidros simples quanto para os envidraçados analisados. A **Tabela 4.40** apresenta as características das amostras ensaiadas.

Tabela 4.40 Características das Amostras de Vidro.

Identificação	Tipo de Vidro	Espessura	Número de Amostras	Posição da Capa
			Dimensão 10x50 mm	
1	Cool Lite KNT 155	6mm	3	Face 2
2	Cool Lite KNT 155 - Verde	6mm	3	
2	Bioclean	6mm	3	Face 1
4	Planitherm Total	6mm	3	Face 2
5	Planitherm Futur Ultra N	6mm	3	Face 2
6	Planistar	6mm	3	Face 2
7	Planilux	6mm	3	Não possui capa.
8	Diamant	6mm	3	Não possui capa.
9	Cool Lite KNT 155 – Verde	6mm	3	Cool Lite KNT 155 Verde e Planitherm Futur Ultra N: Ambos na Face 2
	Planitherm Futur Ultra N			
10	Bioclean	6mm	3	Bioclean: Face 1
	Planilux			
Observação	Esquema: Faces do Envidraçado Duplo			
	<p style="text-align: center;">Camada de ar: 6mm</p>			

O **Quadro 4.3** apresenta a imagem das amostras dos vidros selecionados fornecidas pela *Saint-Gobain Glass*. Pode-se observar pelas imagens que os vidros com capas de origem metálica, principalmente o Planitherm Total, Planitherm Futur Ultra N e Planistar oxidam, mesmo em contacto com o ar. Devido a este motivo, nas composições de envidraçado duplo a capa deve ser posicionada no interior. No caso das amostras, a parte oxidada corresponde a uma faixa de abrasão feita para mostrar a face com a película, para que os vidros fossem posicionados na forma correta nos ensaios de caracterização espectrofotométrica.

**Quadro 4.3** Imagens das Amostras dos vidros.

Amostras dos Vidros		
Cool Lite KNT 155	Planitherm Total	Planitherm Futur Ultra N
		
Cool Lite KNT 155 Verde	Bioclean	Planilux
		
Planistar	Diamant	
		

Procedimentos de Ensaio

Limpeza, Identificação e Fixação das Amostras no Aparelho

Antes de serem iniciados os ensaios, as amostras foram limpas com auxílio de acetona e papel. Optou-se por não usar água na limpeza, pois os minerais ferrosos presentes poderiam reagir com as películas de alguns dos vidros, danificando-os (**Figura 4.54**). A identificação das amostras foi feita por meio de um marcador permanente em sua espessura, pois as faces principais não poderiam ser obstruídas. Após a limpeza e identificação, as amostras eram armazenadas num recipiente plástico e cobertas por papel alumínio, de forma a não acumular sujidades até o momento do ensaio (**Figura 4.55**).



Figura 4.54 Limpeza das Amostras.



Figura 4.55 Armazenamento das amostras já limpas.

As amostras foram fixadas no aparelho com o auxílio de fita adesiva, de maneira cautelosa, para não prejudicar o ensaio, evitando desta forma que ficassem com alguma inclinação em relação à incidência do feixe ou que o feixe incidisse sobre a fita. As amostras de envidraçado duplo foram montadas com auxílio do dispositivo de papel madeira apresentado anteriormente e fixadas com auxílio de fita-cola.

Descrição do Ensaio Espectrofotométrico

Os ensaios foram iniciados da seguinte maneira: o espectrofotómetro era ajustado para 100% de transmissão, para efeito de calibração. Posteriormente foi determinada uma linha base, com o objetivo de excluir das medidas qualquer erro possível proveniente do conjunto do equipamento. Depois de calibrado, o equipamento era aberto para a colocação da amostra (**Figuras 4.56 e 4.57**).



Figura 4.56 Espectrofotómetro UNICAM UV/VIS.



Figura 4.57 Amostra posicionada no Espectrofotómetro.

Os vidros com películas especiais, com exceção do vidro de auto-limpeza, foram ensaiados com a face tratada, voltada para o interior e não em contacto com o feixe de luz proveniente do aparelho. Tal procedimento se explica pelo facto do fabricante especificar que em uso esta face deve ser voltada para o interior na composição do envidraçado, para manter a capa intacta, já que oxida facilmente em contacto com o ar.

O equipamento então era fechado, iniciando o processo de varredura a partir do software, iniciando em 200nm e encerrando em 1100nm. Neste ensaio de caracterização espectrofotométrica foi analisado o espectro de 200 a 1100nm e dentro desse intervalo, foi realizada outra divisão, gerando, assim, outros subintervalos, caracterizando as regiões do ultravioleta (300 a 380nm), visível (380 a 780nm) e parte do infravermelho (780 a 1100nm).

Durante este processo foi possível visualizar o gráfico sendo gerado com os resultados, à medida que ia sendo feita a varredura (**Figura 4.58 e 4.59**). Foram ensaiadas três amostras de cada tipo de vidro para posteriormente estabelecer um valor médio da transmissão por intervalo total. O processo foi realizado de maneira cautelosa, principalmente ao fixar a amostra, para não ser necessário o estabelecimento de uma nova linha de base. Cada ensaio teve duração de 3 a 4 minutos, excluindo-se o tempo de preparo e limpeza das amostras.



Figura 4.58 Início do ensaio.

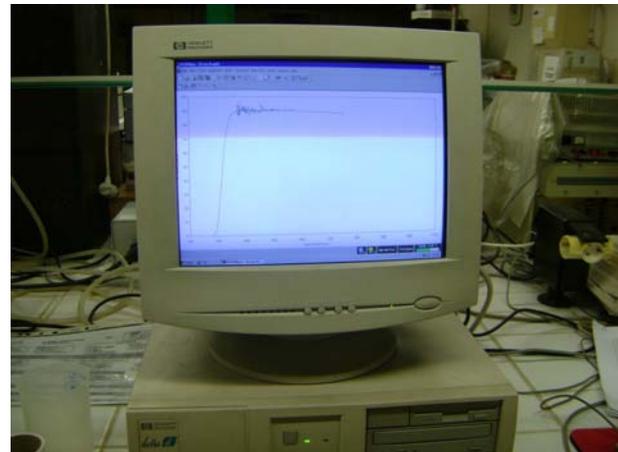


Figura 4.59 Detalhe do monitor com o traçado do gráfico dos resultados no momento do ensaio.

Para o ensaio das amostras de envidraçado duplo foram utilizados os mesmos procedimentos, com a única diferença na montagem das amostras com auxílio de fita-cola no dispositivo de papel madeira para posterior fixação do conjunto no espectrofotômetro. A partir dos dados obtidos via espectrofotômetro, criaram-se os gráficos com as curvas de transmissão e a integração das áreas correspondentes a cada região do espectro analisada e também a integração da área total das curvas obtidas que serão apresentadas nos resultados.



4.2.3.2 Ensaios em Túnel de Vento para Módulo de Ventilação

Nesta secção serão apresentadas todas as etapas para realização dos ensaios em túnel de vento, executados para quatro variações das fachadas em acrílico (dois tipos de módulo de ventilação e dois posicionamentos dos módulos) numa maquete em papel madeira que será detalhada posteriormente. Serão apresentadas definições iniciais para melhor compreensão dos ensaios, detalhes sobre o túnel de vento, a confeção da maquete e execução dos ensaios.

Os ensaios em túnel de vento constituem uma ferramenta confiável para a determinação dos efeitos de cargas de vento sobre estruturas de construção civil, e, além disso, para determinar a influência da ventilação natural na edificação, finalidade específica no caso deste trabalho de investigação. A ventilação natural renova o ar de um recinto fechado sem usar elementos mecânicos, com isso pode-se economizar a energia consumida por sistemas de acondicionamento de ar em um edifício e, além disso, prover qualidade de ar no ambiente. Como no caso dos ensaios espectrofotométricos algumas definições e informações teóricas são necessárias para o melhor entendimento da execução dos ensaios e resultados.

Em um túnel de vento, a velocidade e a direção do vento são controladas e modelos de pequenas dimensões são utilizados para simular os edifícios naturalmente ventilados. Existem alguns trabalhos nessa área em termos de medições da velocidade, pressão e taxa de renovação para analisar as características de ventilação cruzada (MURAKAMI et al., 1991). Outros trabalhos utilizam fumo colorido para visualizar as correntes de ar causadas pela ventilação (CHOINIERE & MUNROE, 1991). O trabalho realizado por Jiang et al. (2003), por exemplo, apresenta uma comparação de resultados obtidos de ensaios em túnel de vento e de simulações numéricas de corrente de ar. Tais simulações também podem ser consideradas para permitir o estudo de ventilação natural em edifícios.

Os ensaios em túnel de vento realizados com modelos a escala reduzida são importantes para:

- Aumentar a confiabilidade e a efetividade da construção e, também, reduzir os custos de projetos;
- Permitir a avaliação da influência de outras edificações e coberturas do solo próximas sobre a construção analisada (**Figura 4.60**);
- Avaliar a qualidade do ar interior em relação à dispersão de poluentes e contaminantes;

- Permitir um estudo mais eficiente sobre a ventilação dos ambientes internos e, portanto, otimizar a distribuição dos espaços para o melhor conforto ambiental (é o caso deste trabalho de investigação).

Além disso, nesse tipo de ensaios, pode-se, por exemplo, estudar casos como: ventilação direta e ventilação cruzada com a abertura posicionada a barlavento ou a sotavento; e o posicionamento da abertura em relação ao vento (se está posicionada à direção normal ou paralela em relação ao fluxo de ventilação).

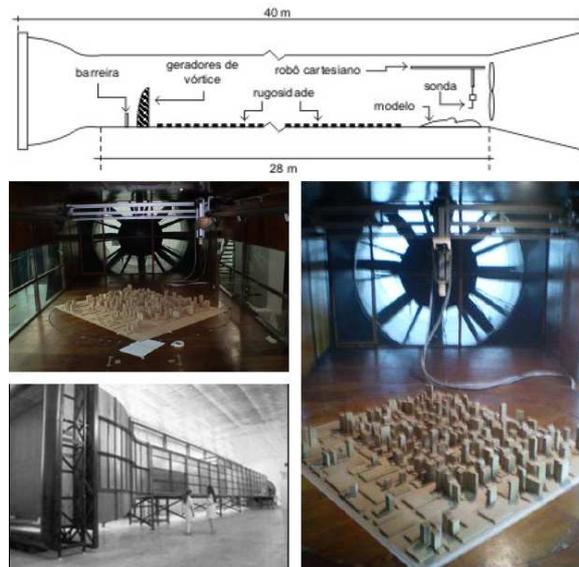


Figura 4.60 Esquema de componentes de um túnel de vento e exemplo de modelo urbano em escala reduzida.

Fonte: PRATA SHIMOMURA et al, 2007.

Na literatura, os diversos métodos simplificados existentes para o cálculo da ventilação natural em edificações empregam algumas das seguintes variáveis, como as dimensões das aberturas, localização, velocidade do vento, coeficientes de pressão interna e externa, temperaturas, coeficientes determinados empiricamente, etc. (ALLARD, 1998; ATHIENITIS & SANTAMOURIS, 2002; GIVONI, 1976; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, 1996; TOLEDO, 1999 citado por MATSUMOTO, 2008).

Em termos de velocidades internas, segundo Olgay (1998) e Evans (1957), velocidades do ar até 0,25m/s são imperceptíveis, não ocasionando sensação de resfriamento nos usuários. Para os autores, valores de velocidade entre 0.25 e 0.50m/s são agradáveis e proporcionam sensação de frescor. Evans e Schiller (1994) salientam que valores até 0,5m/s não possuem efeito de resfriamento, sendo que acima desse valor que surge um movimento perceptivo para efeito de resfriamento. Ainda segundo Evans (1957), quando a velocidade do ar é de 0,25m/s e 0,50m/s ocorre um resfriamento de 0,7 °C e 1,2 °C, respetivamente (LUKIANCHUKI, 2010).



A velocidade do ar necessário para o conforto é baseada nos itens relacionados às condições de saúde dos utentes, como o fornecimento de oxigênio e remoção de contaminantes. A máxima velocidade do ar interior é definida por fatores que vão além do conforto fisiológico, depende também do tipo de edifício e uso. Para escritórios e espaços comerciais, o limite é de 0,8 m/s, para espaços industriais 1,5m/s são aceitáveis, para auxiliar na remoção de substâncias tóxicas, calor ou outras condições prejudiciais. Já para edifícios residenciais a máxima velocidade do ar interior recomendada é de 1m/s (MILITARY HANDBOOK, 1990).

A definição das características do modelo em escala é de fundamental importância para o sucesso de ensaios em túnel de vento. Para que se possa estender os resultados de um experimento para uma outra situação é necessário saber se o fenómeno observado no modelo em escala e o que ocorre no protótipo (o edifício real) são equivalentes, ou seja, se as regras da física e as condições de contorno são similares. O modelo e o edifício não são iguais, porém a relação entre as partes, no caso a relação altura/comprimento, permite que se reconheça o protótipo no modelo e vice-versa (CÓSTOLA, 2006).

A manutenção destas relações internas é chamada similaridade e a partir de um fator de escala (por exemplo, $K=20$, para uma escala 1:20), pode-se reconstruir o edifício com base no modelo. Dois fenómenos são similares se é possível reconhecer um deles com base no outro e se as relações internas entre as partes (forças, propriedades dos materiais) se mantiverem em ambos os casos. O modelo a ser ensaiado deve reproduzir esta condição de contorno geométrica, do contrário não haverá similaridade. Além da similaridade geométrica, existem outros tipos de similaridade que um experimento em túnel de vento deve considerar; como é o caso da similaridade dinâmica e da similaridade térmica.

Quanto menor for o modelo, maior a velocidade necessária no túnel para que se obtenha similaridade dinâmica, estas questões se devem à impossibilidade de utilização de um “ar em escala”, onde as propriedades físicas do ar pudessem ser reduzidas da mesma maneira que a dimensão do modelo. Para manter o equilíbrio entre forças de inércia e forças viscosas é necessário aumentar a velocidade do fluido que incide no modelo em escala (CÓSTOLA, 2006). Givoni (1962) obteve em túnel de vento a velocidade média interna do ar em modelos de planta quadrada, num dos resultados, observou-se que tal velocidade foi 36% da velocidade externa do vento antes de incidir no modelo.

Os resultados obtidos do ensaio podem ser na forma visual (qualitativo) ou quantitativo. A visualização do escoamento através da injeção de fumaça pode ser registrada através de fotos ou filmagem. É ideal para escoamento externo na escala do edifício ou urbana, ou interno em modelos bem simples e não muito pequenos. É necessário



realizar o ensaio com velocidade baixa (em torno de 0,5 m/s) para que seja mantido o escoamento laminar e a fumaça não se misture rapidamente (MATSUMOTO & LUKIANTCHUKI, 2010).

No caso deste trabalho de investigação, a ideia principal para o módulo de ventilação é que o mesmo seja composto por perfis de alumínio e uma grelha regulável (semelhante a um estore veneziano). Os módulos de ventilação do sistema de fachadas proposto se caracterizam por uma dimensão inicial de 0,50 x 0,50m (0,25m²). Como nos estudos anteriores, tais elementos modulares foram distribuídos num espaço de 2,5x2,5m² da parede frontal da célula analisada.

Baseado nas recomendações citadas anteriormente, para a definição da maquete considerou-se o mesmo compartimento utilizado nas simulações computacionais executadas previamente: compartimento rés-do-chão isolado, com geometria regular 5,0 x 5,0 (25m²) com pé direito de 2,80m, e uma dimensão total de 2,5 x 2,5 (6,25m²) para o conjunto de módulos. Tal configuração foi a mesma considerada para a execução de simulações computacionais de desempenho térmico e lumínico.

Os ensaios em túnel de vento foram realizados para uma maquete em papel madeira e quatro variações das fachadas em acrílico (dois tipos de módulo de ventilação e dois posicionamentos dos módulos). Tais ensaios foram realizados na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), localizada na cidade de Campinas, São Paulo, Brasil. O propósito destes ensaios foi determinar a influência de tais variações nas condições de ventilação natural. No total foram executados oito ensaios que serão descritos posteriormente.

O Túnel de Vento

O túnel de vento de camada limite atmosférica instalado no Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LaCAF) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP funciona com um ventilador axial succionando o ar e foi utilizado O neste trabalho de investigação. As **Figuras 4.61 e 4.62** apresentam respetivamente uma vista do exterior do ventilador axial do túnel de vento e uma ilustração geral do túnel.

Na ilustração geral do túnel de vento de circuito aberto, a entrada de ar se dá através das telas fixadas na moldura vermelha; a parte verde, acoplada à moldura vermelha é chamada contração de entrada; a parte amarela é a câmara de ensaios; a parte verde é a contração na saída da câmara de ensaios e na parte em azul está o ventilador axial e motor (BARROS, 2008).



Figura 4.61 Túnel de Vento da UNICAMP.

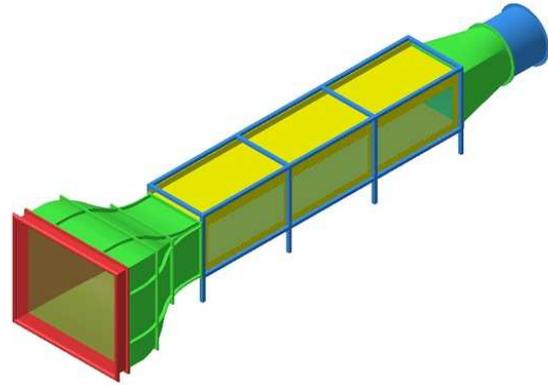


Figura 4.62 Ilustração geral do túnel de vento de circuito aberto da UNICAMP.

O túnel de vento da UNICAMP possui secção transversal da câmara de ensaios de 0,9m de largura e 0,8m de altura, com uma área de 0,72m². No interior do túnel de vento, a turbulência é gerada por meio de uma superfície rugosa e gradiente de pressão nulo, devido à necessidade de gerar uma camada limite turbulenta. O crescimento da camada limite deve ser acelerado artificialmente com dispositivos posicionados dentro do túnel (**Figuras 4.63**).

Além dessas características o túnel de vento possui outros detalhes, tais como:

- Comprimento total do túnel de 9,03m;
- Comprimento da secção de ensaio de 4,80m;
- Disco giratório para fixação da maquete na secção de ensaio de 0,50m de diâmetro;
- Diâmetro das pás do ventilador de 1,20m, sendo no total 16 pás;
- Diâmetro da saída do túnel de vento de 1,25m;
- Duas telas com malhas quadradas de 1,5mm, acopladas ao bocal de entrada;
- Velocidade máxima de projeto com a câmara de ensaios livre na secção de ensaio de 20m/s a 850rpm;
- Secção de contração de 2,36m de comprimento;
- Razão de contração entre o bocal de entrada e a secção de ensaios de 5,96;
- Comprimento do difusor de 1,87m;
- Motor de 220V de tensão, trifásico com potência de 12,5HP; frequência de rotação nominal de 860rpm e vazão de 52000m³/h;
- Inversor de frequência de 15HP para controlar a frequência de rotação do motor;

- Nove pontos de medida de pressão estática no teto da secção dos ensaios.



Figura 4.63 Vista Posterior da placa composta por tubos de PVC para simular a turbulência, próximo à entrada de ar do túnel de vento.

O escoamento no túnel de vento de camada limite atmosférica deve ter características semelhantes às que se encontra no ambiente atmosférico, próximo a superfície. Desta maneira, o gradiente vertical de velocidade na secção de ensaio do túnel deve variar de zero, na superfície, até o valor da velocidade do escoamento livre, sem a interferência da rugosidade da superfície. Esta camada, na qual a velocidade varia é chamada de camada limite atmosférica. Para produzir este gradiente de velocidades e turbulência no escoamento são utilizados geradores de turbulência, que são obstáculos localizados ao longo do trecho de entrada da secção de ensaio do túnel (MATSUMOTO, 2008).

Confeção da Maquete e Fachadas

Como as dimensões da secção de ensaio do túnel de vento são de 0,9m de largura por 0,8m de altura, totalizando uma área da secção transversal de 0,72m², a taxa de obstrução da secção de ensaio recomendada é de até 5%, aceitável até 7%. Portanto, a maquete deve obstruir até 7% desta área, ou seja, a área frontal da maquete, perpendicular ao vento, deve ter no máximo 0,05m². Já na direção horizontal ao longo do túnel, não há restrições de dimensões. Deste modo, a maquete foi construída na escala 1:20, com dimensões de 0,16m de altura, 0,28m de largura e 0,28m de comprimento e área frontal é de 0,045m². Sendo assim, a obstrução da secção transversal de ensaio será de 6,3%. A **Tabela 4.41** apresenta as dimensões em tamanho real e na maquete.

**Tabela 4.41** Dimensões da Maquete.

Medidas	Dimensões originais (m)	Dimensões do modelo (m)
Altura	3,20	0,16
Largura	5,65	0,28
Comprimento	5,65	0,28
Escala		1:20
Área da secção de ensaio (m ²)		0,72
Área frontal do modelo (m ²)		0,045
Obstrução da secção de ensaio (%)		6,3

Após definido a modelo de ensaio e a escala a ser utilizada, todas as partes foram planificadas no software gráfico AutoCAD. Tais planificações serviram de molde para a confeção da célula principal. A maquete foi constituída por dois tipos de materiais: papel madeira e acrílico (**Figuras 4.64 a 4.69**). A maquete em si (célula) destinada aos ensaios foi confeccionada em papel madeira com espessuras de 1, 2 e 3mm unidas por cola branca PVA.

**Figura 4.64** Maquete em papel madeira.**Figura 4.65** Maquete em papel madeira com teto aberto.**Figura 4.66** Detalhe da cobertura que foi deixada aberta para possibilitar a instalação de sensores e demais mecanismos necessários para execução do ensaio.**Figura 4.67** Aberturas que serão utilizadas na configuração dos ensaios: abertura maior para fixação das fachadas em acrílico e menor para porta.



Figura 4.68 Detalhe da camada interna do vão destinado à fachada, que se sobressai para fixação das fachadas em acrílico.



Figura 4.69 Detalhe da camada interna dos vãos destinados à fachada e à porta.

Posteriormente, as peças em acrílico (variações de fachadas com 2mm de espessura e 2,5mx2,5m) foram cortadas no Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção (LAPAC), da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da UNICAMP (**Figuras 4.70 e 4.71**). Em seguida foi montada cada configuração proposta para o ensaio, com todos os detalhes necessários. Para o encaixe das variações de fachadas no modelo foi previsto um vão de 2,50x2,50m como apresentado anteriormente nas figuras.

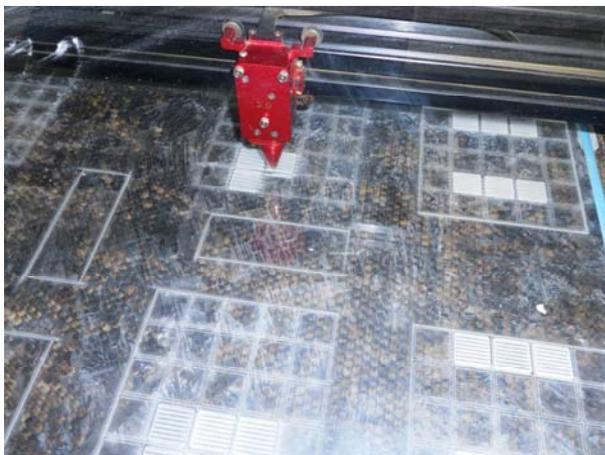


Figura 4.70 Confeção dos Protótipos das fachadas em acrílico, depois de vincar são iniciados os cortes na cortadora a laser.

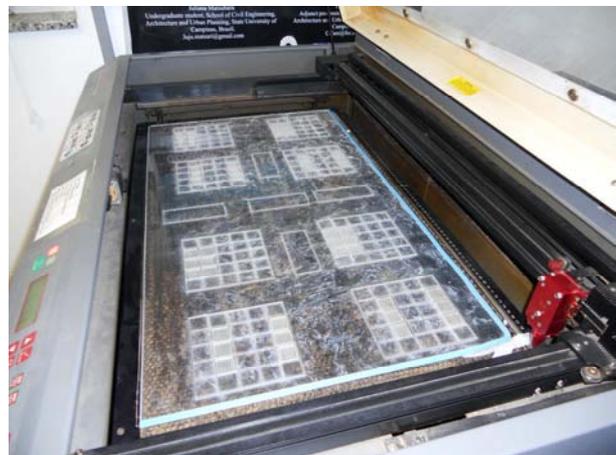


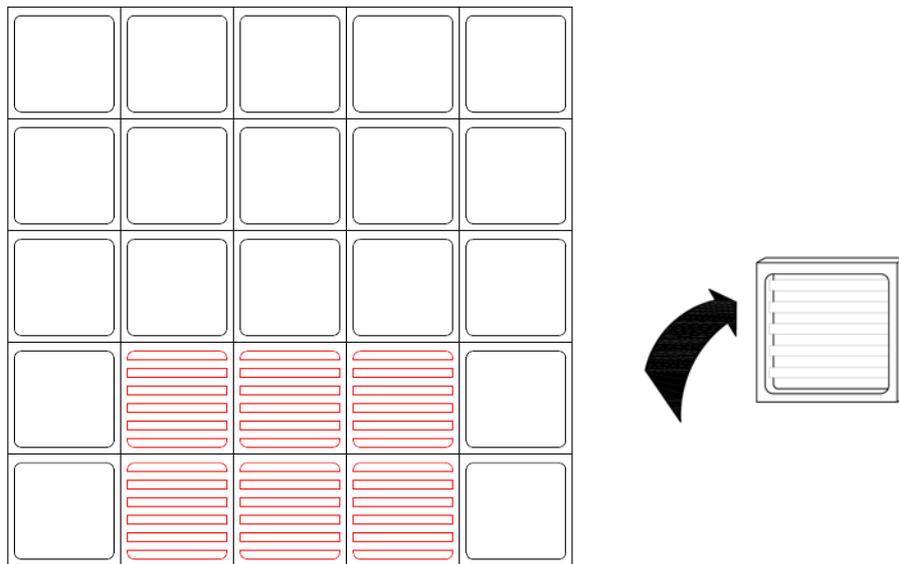
Figura 4.71 Uma das placas com os protótipos das fachadas cortados.

As fachadas propostas são móveis e substituíveis, de forma a aproveitar o mesmo modelo base para testar as possibilidades de ventilação. Foram construídas quatro variações de fachadas, cujas características serão apresentadas a seguir. Cada módulo de ventilação possui dimensão de 0,50 x 0,50m, sendo que para os ensaios em túnel de vento



foram propostos quatro casos com diferentes configurações de fachada (**Figuras 4.72 a 4.75**):

- **Caso 01A.** Fachada com 6 módulos de ventilação (tipo peitoril ventilado) com elementos da grelha posicionados na vertical;
- **Caso 01B.** Fachada com 3 módulos de ventilação posicionados na parte superior e inferior, com elementos da grelha posicionados na vertical;
- **Caso 02A.** Fachada com 6 módulos de ventilação (tipo peitoril ventilado) com elementos da grelha posicionados na horizontal;
- **Caso 02B.** Fachada com 3 módulos de ventilação posicionados na parte superior e inferior; com elementos da grelha posicionados na horizontal.

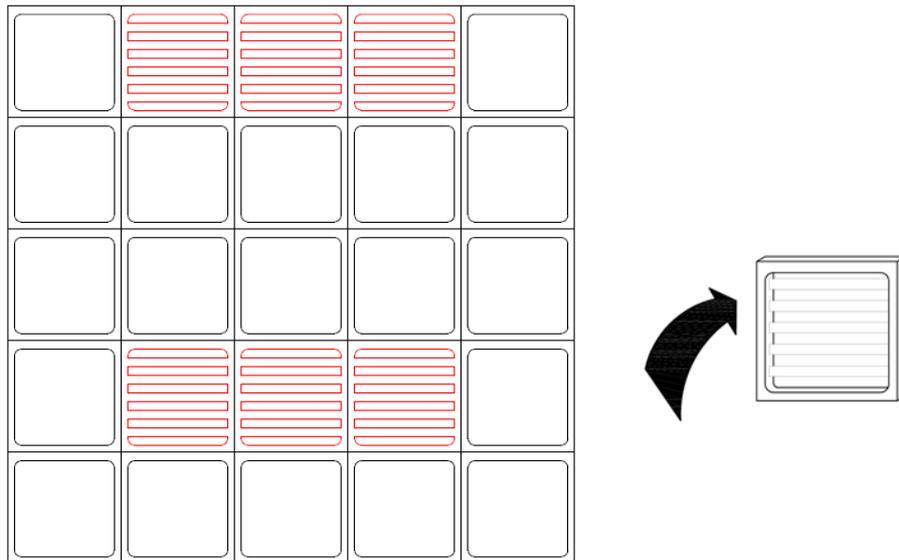


Fachada-Ventilação 01A



— Marca Leve
— Corte

Figura 4.72 Caso 01A: Fachada com 6 módulos de ventilação (tipo peitoril ventilado) com elementos da grelha posicionados na vertical.

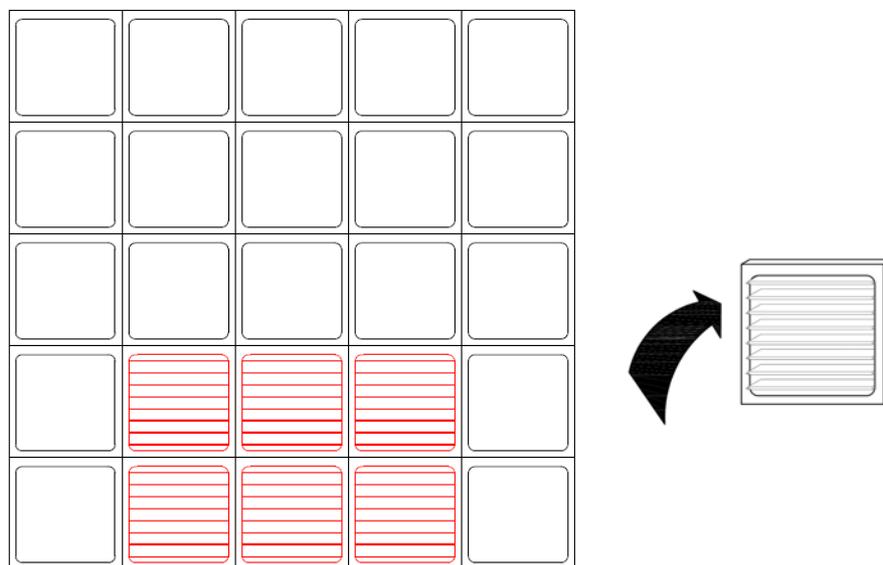


Fachada Ventilação 01B



— Marca Leve
— Corte

Figura 4.73 Caso 01B: Fachada com 3 módulos de ventilação posicionados na parte superior e inferior, com elementos da grelha posicionados na vertical.

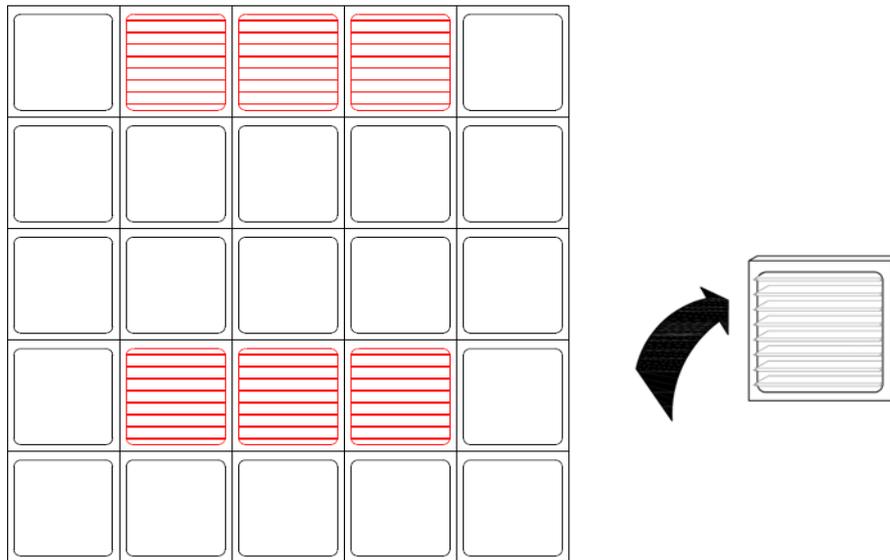


Fachada-Ventilação 02A



— Marca Leve
— Corte

Figura 4.74 Caso 02A: Fachada com 6 módulos de ventilação (tipo peitoril ventilado) com elementos da grelha posicionados na horizontal.

**Fachada Ventilação 02B**

— Marca Leve
— Corte

Figura 4.75 Caso 02B: Fachada com 3 módulos de ventilação posicionados na parte superior e inferior, com elementos da grelha posicionados na horizontal.

Houve grandes dificuldades em cortar a laser os protótipos com detalhes em menor espessura (Fachadas 02A e 02B), porém foi possível corta-los após quatro exaustivas tentativas, sendo necessário na última três varreduras do laser. As **Figuras 4.76 a 4.79** apresentam as fachadas em acrílico finalizadas.

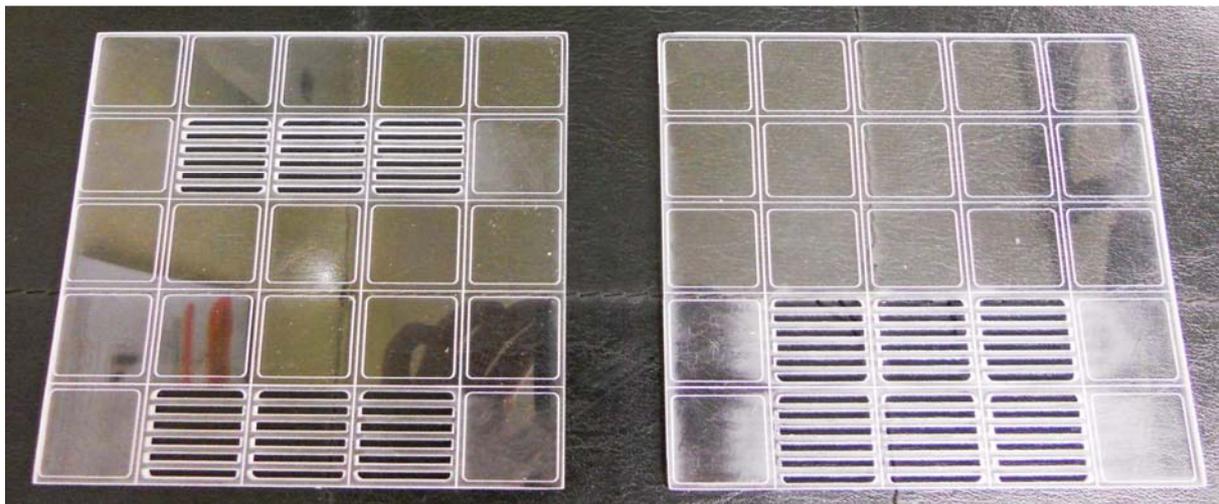


Figura 4.76 Fachada dos Casos 01A e 01B.

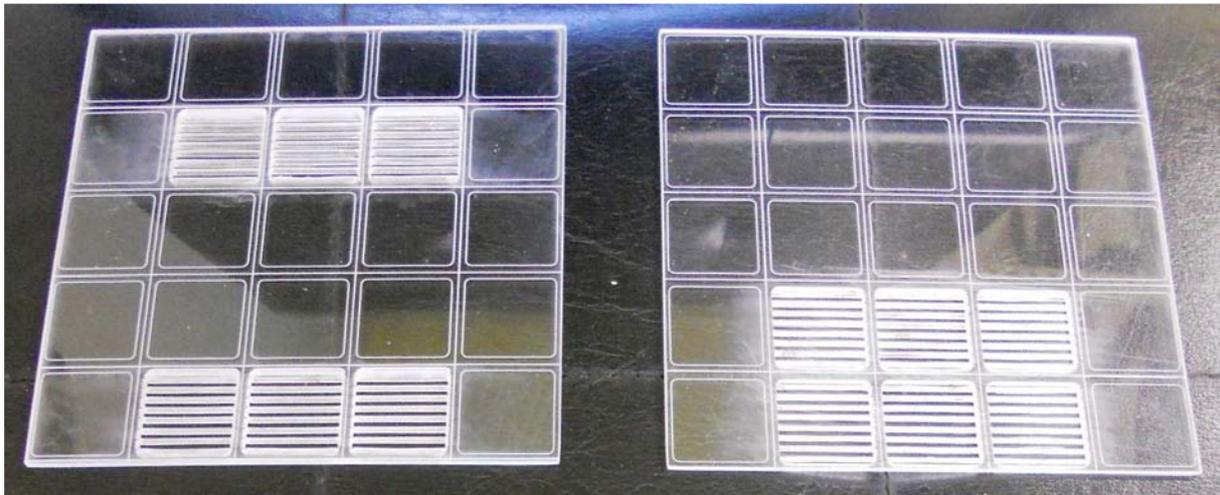


Figura 4.77 Fachada dos Casos 02A e 02B.

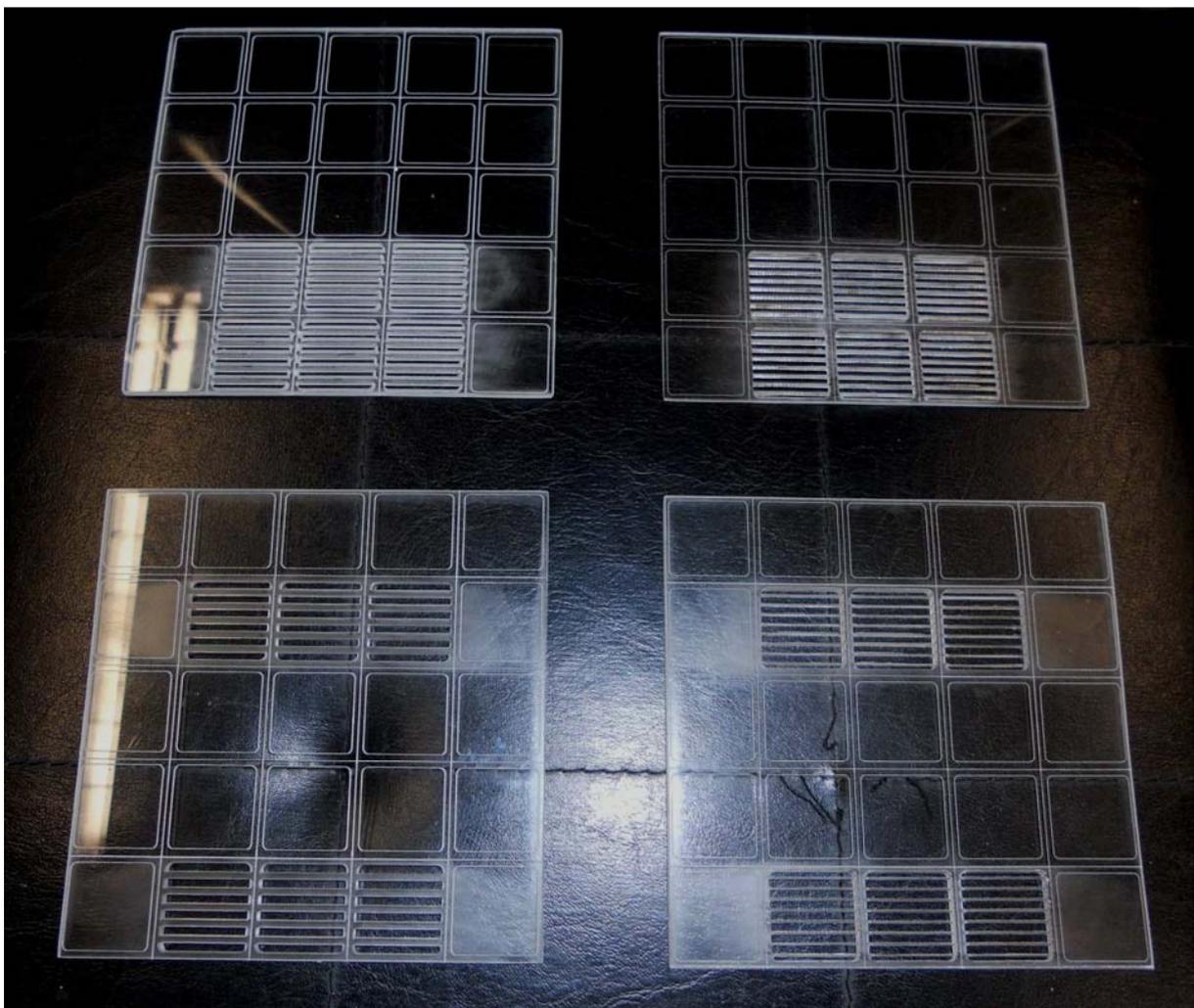


Figura 4.78 As quatro variações de fachadas ensaiadas.

Cada um desses quatro casos foi ensaiado duas vezes, considerando a porta de saída de ar posicionada na fachada posterior da maquete fechada ou aberta, totalizando 8 ensaios. O esquema apresentado abaixo faz uma síntese dos casos ensaiados em túnel de vento (**Figura 4.79**):

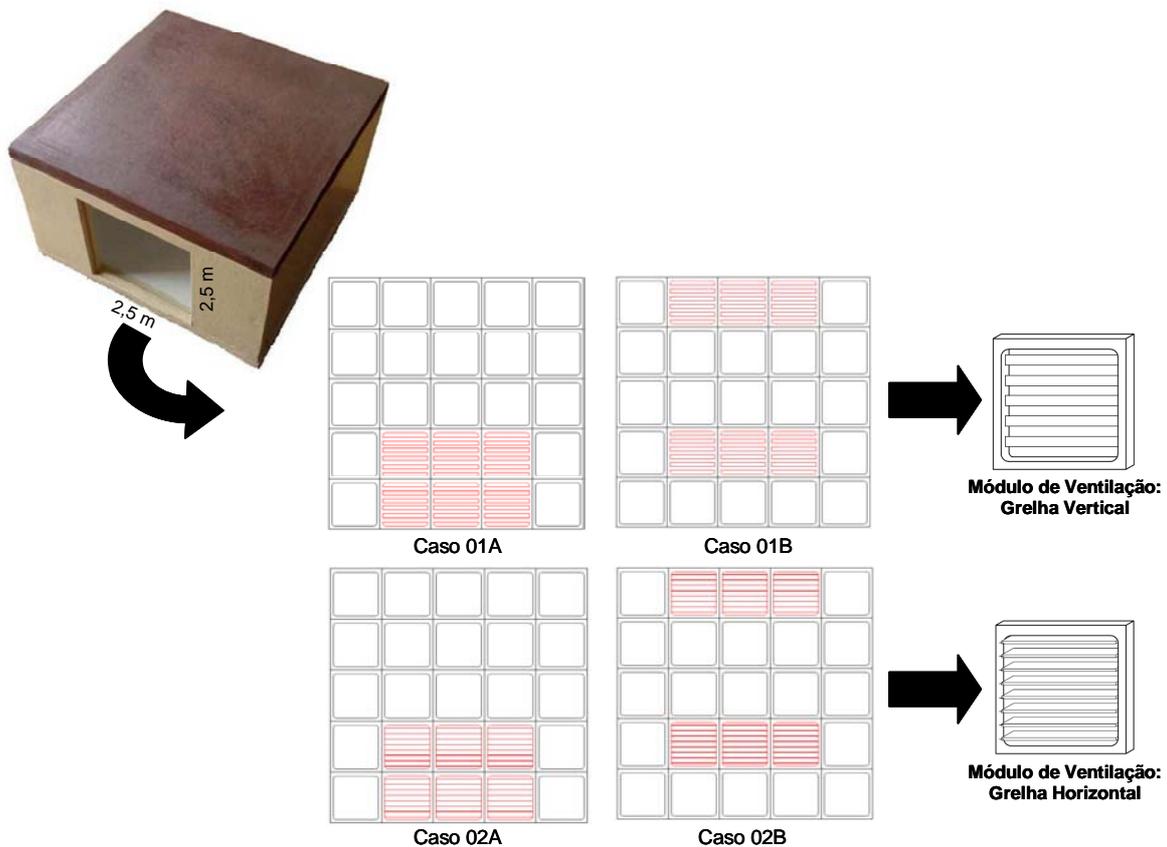


Figura 4.79 Esquema: Configuração de fachadas para ensaio em túnel de vento.

Para testar o módulo de ventilação, optou-se pela execução de um modelo na escala 1/20, no qual foram inseridas as configurações de fachada com ventilação. Salienta-se que a construção de um módulo de ventilação em escala real neste caso não era viável, uma vez que não é possível testá-lo em condições reais de uso no espaço disponível para testes em túnel de vento. Foi proposta também uma porta na outra extremidade do modelo da célula de teste de forma a observar as diferenças entre o ambiente com ventilação perpendicular a fachada e ventilação cruzada.

Execução dos Ensaios

Foram realizados ensaios no túnel de vento com a finalidade de avaliar a configuração de fachada com melhor eficiência em termos de ventilação natural. A análise foi feita através da construção de um modelo físico que foi ensaiado no túnel de vento do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada da Faculdade de engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).



O propósito para a realização destes ensaios foi avaliar as velocidades internas e externas para cada caso de configuração de fachada apresentado anteriormente. Esses ensaios foram importantes para ressaltar como tais variações influenciam na obtenção de uma ventilação natural mais eficiente.

No interior da maquete, a direção e a velocidade do vento foram determinadas através da utilização de um anemômetro de fio quente, em três pontos. Os sensores do anemômetro de fio quente foram posicionados no interior nos pontos definidos através de furos na base da maquete, que foram conectados ao módulo de aquisição de dados. A aquisição de dados possui seis sensores com leituras simultâneas, sendo esse número o máximo possível de pontos para fazer a leitura das velocidades.

Seguindo as recomendações da normalização portuguesa em relação às condições de ventilação procurou-se também, a partir dos resultados dos ensaios, estabelecer uma relação entre as velocidades do vento nos pontos medidos, e a taxas de renovação por hora. Foi verificada o valor de velocidade para uma taxa de ventilação de 0,6 renovações por hora (RCCTE, 2006).

Posicionamento de Sensores

Para a medição das velocidades internas da maquete no túnel de vento, foram instalados três sensores miniaturas do anemômetro de fio quente no interior, através de furos na parte inferior. Um sensor foi posicionado no ponto central, e os restantes nas extremidades, afastados a 1m de um dos vértices e outro próximo à saída de ar (**Figura 4.81**). Os sensores internos (P2, P3 e P4) foram posicionados a uma altura de 0.80m a partir do piso na escala de 1/20, altura do corpo do correspondente a uma pessoa sentada (**Figuras 4.80 e 4.81**).

Na fachada principal do modelo foi instalado um sensor (P1) com o propósito de medir a velocidade do vento externo antes de atingir o modelo físico. Tal sensor foi localizado na fachada frontal com alturas coincidindo com o ponto médio da fachada ($h=1.55m$), a uma distância de 6m, de forma a obter o valor do escoamento não perturbado. Foi considerada para os ensaios a incidência do vento perpendicular à fachada principal.

Além disso, foram instalados dois sensores externos na abertura de saída do ar (porta) (P5 e P6), de forma a obter as velocidades de vento ao deixar o modelo. Tais pontos de medição foram importantes para permitir calcular os dados para obtenção da relação entre as velocidades e a taxa de renovações/hora. Esses sensores estão posicionados à altura de 1.00m e 1,70m respetivamente a partir da base do modelo, que correspondem à divisão da altura total da abertura (porta) em três partes.

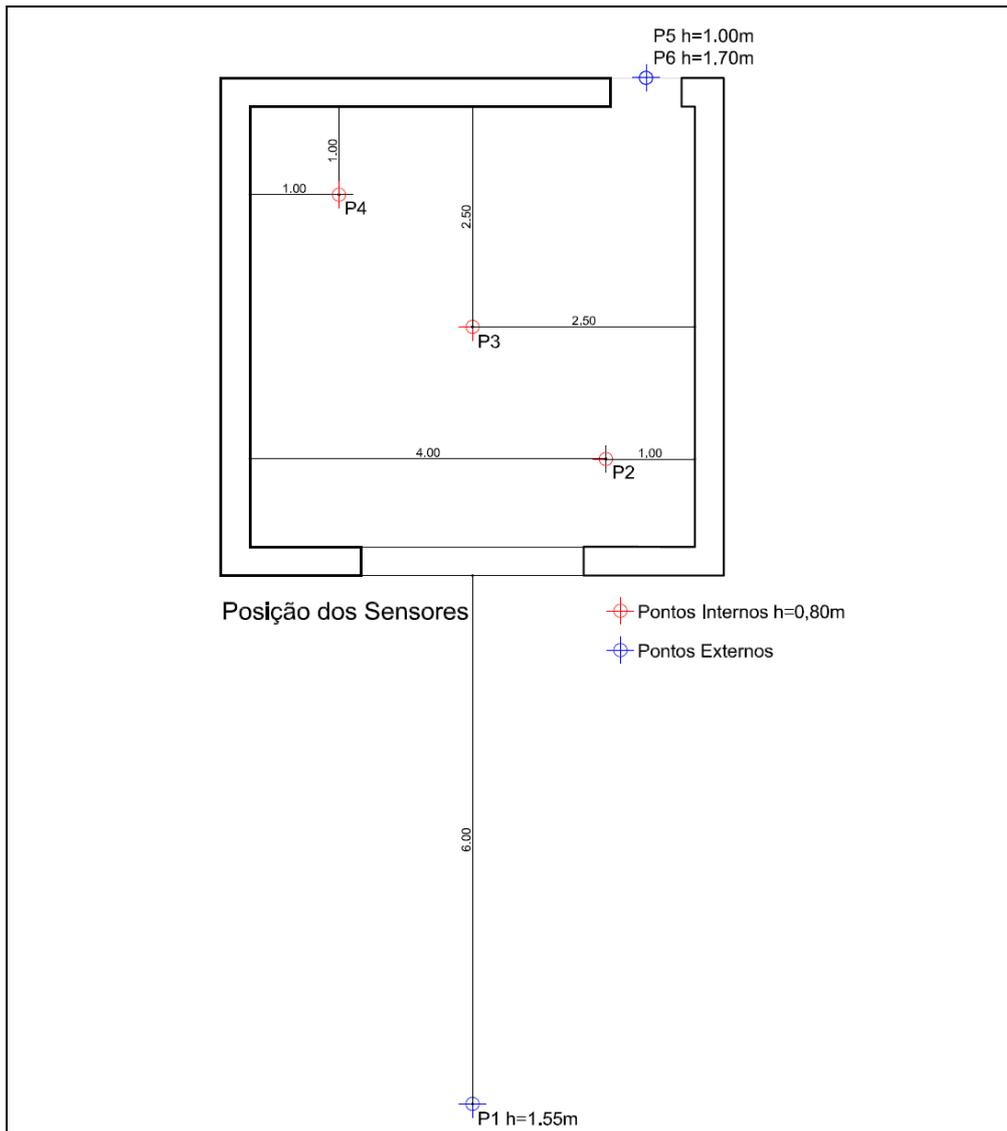


Figura 4.80 Planta: Posicionamento dos Sensores na Maquete.

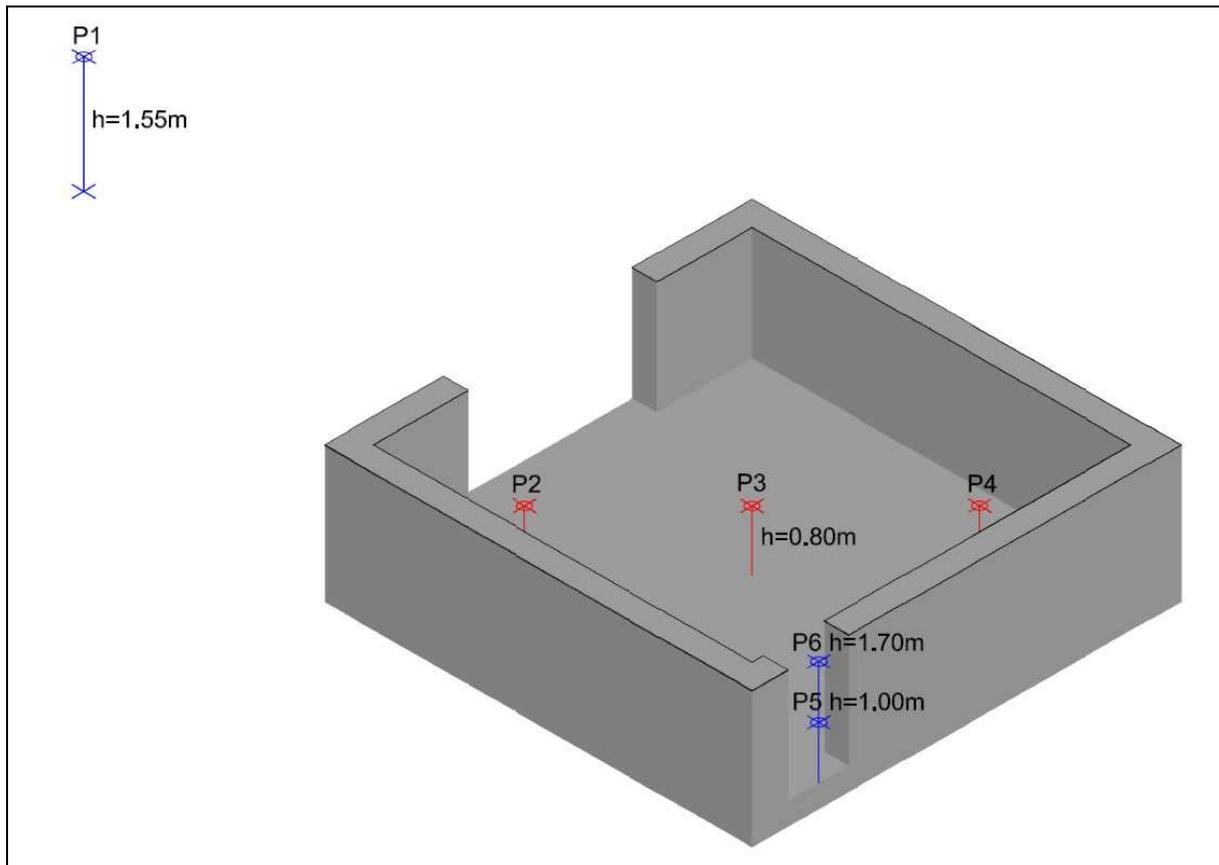


Figura 4.81 Perspetiva: Posicionamento dos Sensores na Maquete.

Para a fixação da maquete no túnel de vento foi necessária a perfuração de três pontos no em sua base. Além disso, para assegurar a vedação em relação ao ar, garantindo assim o fluxo somente através da entrada e saída propostas foi necessário fixar lâminas de borracha para vedar o encontro entre as paredes e a cobertura da maquete (**Figura 4.82**). A **Figura 4.83** apresenta a parte inferior do túnel de vento na qual estão os elementos para fixação da maquete e hastes metálicas dos sensores.



Figura 4.82 Detalhe da parte superior da maquete com as lâminas de borracha para vedação posicionadas.



Figura 4.83 Detalhe da parte inferior do túnel de vento.



A **Figuras 4.84** apresenta a maquete posicionada no interior do túnel de vento com o sensor frontal (P1) e a **Figura 4.85** apresenta os sensores internos posicionados na maquete (P2, P3 e P4). A **Figura 4.86** apresenta em detalhes um dos sensores (P4) e a **Figura 4.87** apresenta as hastes metálicas e sensores externos (P5 e P6) posicionados na saída de ar da maquete (porta).

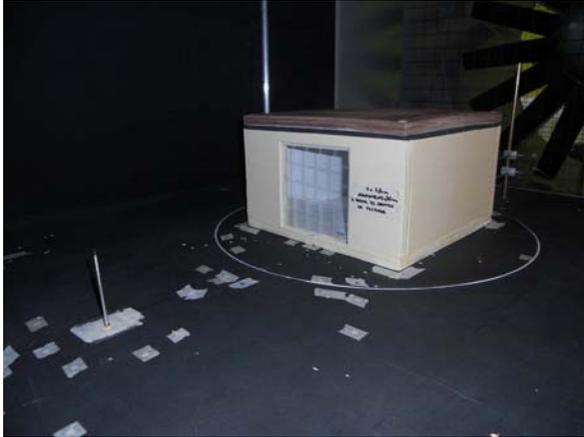


Figura 4.84 Maquete posicionada no interior do túnel e sensor externo em frente à fachada (P1).



Figura 4.85 Sensores internos (P2, P3 e P4) posicionados na maquete.



Figura 4.86 Detalhe de um sensor no interior da maquete (P4).



Figura 4.87 Hastes metálicas e sensores externos (P5 e P6) posicionados na saída de ar da maquete.

Essa etapa do trabalho de investigação foi desenvolvida em conjunto, com o apoio dos grupos de pesquisa da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU) - Universidade de São Paulo (USP), sendo que tanto a etapa de planeamento quanto de execução dos ensaios foi auxiliada pelo Físico Dr. Edson



Matsumoto⁵⁵ e pela professora Doutora Rosana Caram da área de conforto ambiental que atua em ambas as universidades.

4.2.4 Proposta do Sistema Modular de Fachadas: Pormenorização e Potencial de Aplicação

Nesta etapa foi apresentada de forma mais detalhada a definição do sistema de fachadas e seus componentes. A pormenorização dos detalhes construtivos do sistema incluiu o desenho do sistema; a integração arquitetônica; a análise das condições de montagem e elaboração do projeto do sistema de fachadas, incluindo boa parte dos pormenores.

São pormenorizados todos os elementos que compõem o sistema de fachadas modular proposto neste trabalho de investigação, sendo eles: grelha estrutural para montagem do sistema; módulo padrão (fixo e móvel-projetante); módulo de proteção solar; módulo de ventilação; módulo parede de Trombe, módulo estufa e módulo fotovoltaico “girassol”.

Os pormenores do sistema de fachada foram elaborados no software AutoCad 2010 2D e 3D e algumas imagens receberam tratamento no software gráfico Corel Draw X4. As dimensões indicadas nas imagens serão apresentadas em milímetros, quando for o caso, além de conter escalas gráficas. Em cada módulo do sistema de fachadas desenvolvido é explicada a base de informações utilizada para o desenvolvimento de cada elemento.

Posteriormente é apresentado em síntese para cada clima estudado, as recomendações em termos de envidraçados e soluções passivas de aquecimento e arrefecimento. O critério de determinação da solução ideal baseia-se no período de duração do inverno.

Apesar de não estar previsto inicialmente no cronograma deste trabalho de investigação, estimou-se também o custo dos elementos componentes do sistema de fachadas. Tal estimativa foi executada através do sistema “Gerador de preços para construção civil” da CYPE Ingenieros, S.A. (CYPE, 2011). Tal sistema está disponível *on-line* e inclui a composição de preços para a utilização em programas de medições, orçamentação, autos e controle financeiro da obra, instruções para a redação do manual de utilização e manutenção do edifício e informação comercial sobre produtos de fabricantes.

⁵⁵ Desenvolveu Pós-Doutoramento na Universidade de Campinas, cujo tema foi: “Calibração do túnel de vento de camada limite atmosférica e ensaios de aberturas em edificações utilizando modelos reduzidos”.



Além disso, os preços obtidos para os envidraçados foram confrontados com uma estimativa solicitada ao fabricante dos vidros indicados para os módulos (*Saint-Gobain Glass*) que foram bem próximos e por isso optou-se por utilizar os preços cotados no sistema da CYPE Ingenieros S. A. O custo para o módulo fotovoltaico foi baseado na estimativa apresentada pelo software *Solterm*, além de pesquisas em empresas fornecedoras de sistemas fotovoltaicos Portuguesas.

Além disso, o período de retorno de investimento foi determinado tendo por base as soluções de melhor desempenho em termos de diminuição do consumo energético para aquecimento e arrefecimento e foi realizado para três climas localizado nas regiões norte, centro e sul de Portugal (Bragança, Coimbra e Faro), cujos resultados já seriam significativos de forma geral.

Neste capítulo foram apresentadas todas as etapas da metodologia consideradas necessárias para o desenvolvimento do sistema de fachadas. Foram definidos os componentes dos módulos de fachada através da escolha de envidraçados, sua espessura e demais materiais para os módulos. Foram apresentados os itens necessários para o estudo da integração dos componentes, sendo eles: a caracterização climática de Portugal e posteriormente a definição dos climas para o estudo; a definição do modelo base para as simulações computacionais e demais parâmetros norteadores (ganhos internos, período de funcionamento dos sistemas, condições de referência, etc.). Em seguida apresentou-se todas as características das simulações computacionais realizadas (desempenho térmico, lumínico e microgeração energética do módulo fotovoltaico), além dos critérios para elaboração de uma previsão do desempenho acústico.

Todos os procedimentos necessários para os ensaios de caracterização espectrofotométrica dos vidros e dos ensaios em túnel de vento realizados também foram detalhados. Por fim, explicou-se como foi efetuada a definição do sistema de fachadas e a pormenorização dos elementos componentes e, ainda, como foram feitas as recomendações finais para aplicação do sistema de fachadas e a análise económica simplificada. No próximo capítulo serão apresentados os resultados iniciais determinados com base na metodologia descrita.