



Elsa Teresa Reis Martins

Caracterização de Sistemas de Reabilitação  
de Fachadas:  
Soluções Existentes e Inovadoras

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Elsa Teresa Reis Martins

Caracterização de Sistemas de Reabilitação  
de Fachadas:  
Soluções Existentes e Inovadoras

Tese de Mestrado  
Área de Conceção e Gestão Sustentável de Edifícios

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professora Maria Manuela de Oliveira Guedes de  
Almeida

outubro de 2013

## DECLARAÇÃO

Nome: Elsa Teresa Reis Martins

Endereço eletrónico: [elsatrm@gmail.com](mailto:elsatrm@gmail.com) Telefone: 917753822

Número do Bilhete de Identidade: 12484768

Título dissertação /tese

Caracterização de sistemas de reabilitação de fachadas: Soluções existentes e inovadoras

\_\_\_\_\_

Orientador (es):

Professora: Maria Manuela de Oliveira Guedes de Almeida

Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis – Especialização em Conceção e Gestão Sustentável de Edifícios

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, 30 / 10 / 2013

Assinatura: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Na conclusão de mais uma etapa do meu percurso académico quero expressar todo o meu agradecimento aos que me acompanharam e contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha orientadora, Professora Manuela Almeida, pela competência científica e orientação dada, assim como pelas críticas, correções e sugestões feitas durante o desenvolvimento do trabalho.

À Professora Sandra pelo apoio, disponibilidade, dedicação, paciência e pelos conhecimentos transmitidos, que em muito contribuíram para a execução desta tese.

Aos meus amigos Helenice Sacht, José Cunha, Conceição Monteiro, Joana Andrade, Liliana Esteves, João Tavares, entre outros, que com a sua amizade e com os seus conhecimentos contribuíram de forma inestimável para a elaboração deste trabalho.

Por fim, quero manifestar o meu profundo e sincero agradecimento aos meus pais e irmão, que sempre me incentivaram, acompanharam e apoiaram; pela compreensão e pela infinita paciência demonstradas ao longo de todo este percurso e sem os quais sei que não teria chegado onde cheguei.



## RESUMO

O setor da construção foi um setor de grande importância no desenvolvimento da atividade económica do país. Os desafios que a Europa e Portugal enfrentam devido à crise económica instalada levaram a uma nova visão acerca das reais necessidades e prioridades da sociedade. O setor da construção foi um dos que mais se ressentiu dos efeitos da crise, assistindo-se a uma estagnação do mercado de construção nova, devido à existência de demasiados edifícios novos sem qualquer ocupação e registando-se um ligeiro aumento gradual do mercado de reabilitação devido à necessidade de conservar e potenciar o desempenho do parque habitacional existente.

O objetivo do trabalho foi a caracterização de soluções de reabilitação de fachadas através da análise do seu desempenho energético e acústico e da sua viabilidade económico. Para a realização desta análise recorreu-se à utilização de ferramentas de simulação dinâmica como o DesignBuilder e o EnergyPlus e o programa de simulação acústica Acoubat Sound. Foi também avaliada a relação custo-benefício das soluções de forma a verificar a viabilidade económica das mesmas através da determinação do período de retorno do investimento na solução de reabilitação.

As soluções foram aplicadas a um edifício unifamiliar e a um edifício multifamiliar, considerando diferentes localizações. Foram estudadas diversas soluções como a solução de revestimentos independentes descontínuos com interposição de um isolante térmico na caixa-de-ar, sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimento sobre isolante, sistema de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados, contra-fachada de alvenaria, contra-fachada de gesso cartonado, painel sandwich de betão reforçado com fibra de vidro e a aplicação de um módulo de reabilitação desenvolvido na Universidade do Minho.

Após a análise dos resultados obtidos, para o edifício unifamiliar verificou-se que a aplicação do módulo de reabilitação desenvolvido na Universidade do Minho tem o melhor desempenho energético e as suas características adequam-se à região de Guimarães; a nível de perdas de calor devido a pontes térmicas, a contra-fachada de gesso cartonado apresenta os melhores resultados; nenhuma das soluções melhora o comportamento acústico da fachada, sendo a contra-fachada de alvenaria a que

apresenta os piores resultados; a contra-fachada de gesso cartonado é a mais vantajosa na avaliação da relação custo-benefício.

Para o edifício multifamiliar apenas a aplicação do módulo de reabilitação desenvolvido na Universidade do Minho permite bons resultados de desempenho energético para Bragança e Évora; a contra-fachada de gesso cartonado possui os melhores resultados com baixos valores de perdas de calor devido a pontes térmicas; a contra-fachada de alvenaria apresenta o pior desempenho acústico mas esta é a solução mais vantajosa no que respeita à análise económica para a maioria das localidades estudadas, exceto Coimbra cuja solução mais viável é a aplicação do módulo de reabilitação desenvolvido na Universidade do Minho.

Palavras-chave: Reabilitação de fachadas; simulação; desempenho energético; desempenho acústico; análise económica.

## ABSTRACT

The construction sector was one of the most important in the development of the economic activity in the country. The challenges that Europe and Portugal are facing due to the economic crisis led to a new vision about the real needs and priorities of society. The construction sector is the most affected by the crisis, witnessing a stagnant market for new construction due to the abundance of new buildings without any occupation. However, a slight gradual increase in the rehabilitation market is being observed due to the need to conserve and enhance the performance of the housing stock.

The aim of this work was the thermal and acoustic characterization of some retrofit solutions of facades as well as the evaluation of its economic viability. For this analysis it was used dynamic simulation tools such as EnergyPlus and DesignBuilder and an acoustic simulation program Acoubat Sound. It was also evaluated the cost-effectiveness of the solutions in order to verify the economic viability of these by determining the payback time of the investment in the retrofit solution.

The retrofitting solutions were applied to a single-family building and to a multifamily building, considering different locations in the country. Several solutions were studied like the discontinuous independent coatings with thermal insulation in the air gap; the external thermal insulation composite system; the thermal insulation with prefabricated disconnected elements system; the masonry counter-façade; the plaster counter-façade; the concrete sandwich panel reinforced with fiberglass; and a prefabricated retrofit module developed in University of Minho.

After analyzing the results obtained, for the single-family building the application of the prefabricated retrofit module developed in University of Minho led to the best energy performance and the characteristics suited to the region of Guimarães; in the heat losses evaluation due to thermal bridges, the plaster counter-façade presents the best results; none of the solutions improves the acoustic behavior of the facade, and the masonry counter-façade shows the worst results; the plaster counter-façade is the most cost-effective solution. For multifamily building, only the application of the prefabricated retrofit module developed in University of Minho allows a good energy performance for Bragança and Évora; the plaster counter-façade shows the best results regarding the heat

losses due to thermal bridges; the masonry counter-façade shows the worst acoustic performance but is the most efficient solution regarding the economic analysis for most of the studied areas, except Coimbra whose the most cost-effective solution is the application of the prefabricated retrofit module developed in University of Minho.

Keywords: Facade retrofit; simulation; energy performance; acoustic performance; economic analysis.

## ÍNDICE GERAL

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.3. ORGANIZAÇÃO .....	3
CAPÍTULO 2 – CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO: PANORAMA E CONCEITOS .....	5
2.1. CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO NA EUROPA .....	5
2.2. CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO EM PORTUGAL .....	9
2.3. EVOLUÇÃO DAS FACHADAS EM PORTUGAL.....	11
2.4. SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO DE FACHADAS.....	14
2.4.1. Soluções com isolamento térmico pelo exterior .....	15
2.4.2. Soluções com isolamento térmico pelo interior.....	19
2.4.3. Soluções com isolamento térmico na caixa-de-ar.....	21
2.4.4. Soluções inovadoras .....	21
2.5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FACHADAS .....	23
2.5.1. Térmica: regulamentação e conceitos .....	24
2.5.2. Acústica: regulamentação e conceitos .....	30
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	35
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO.....	35
3.1.1. Edifício unifamiliar.....	36
3.1.2. Edifício multifamiliar.....	38
3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO.....	42
3.2.1. Revestimento independente descontínuo com isolamento térmico na caixa- de-ar .....	43
3.2.2. Sistema de isolamento térmico compósito exterior .....	44
3.2.3. Sistema de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados .....	44
3.2.4. Contra-fachada.....	44
3.2.5. Painel sandwich de GRC .....	45
3.2.6. Módulo de reabilitação prefabricado .....	46
3.3. SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO .....	46
3.3.1. Análise do desempenho energético.....	48

3.3.1.1. Edifício unifamiliar .....	48
3.3.1.2. Edifício multifamiliar .....	52
3.3.2. Análise das pontes térmicas .....	54
3.3.2.1. Edifício unifamiliar e multifamiliar .....	57
3.4. SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO ACÚSTICO .....	59
3.4.1. Edifício unifamiliar .....	65
3.4.2. Edifício multifamiliar.....	67
3.5. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE ECONÓMICA .....	69
CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DO EDIFÍCIO UNIFAMILIAR.....	73
4.1. DESEMPENHO ENERGÉTICO .....	73
4.1.1. Necessidades de aquecimento.....	73
4.1.2. Necessidades de arrefecimento .....	76
4.1.3. Pontes Térmicas .....	79
4.2. DESEMPENHO ACÚSTICO.....	85
4.3. ANÁLISE ECONÓMICA .....	87
CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DO EDIFÍCIO MULTIFAMILIAR .....	91
5.1. DESEMPENHO ENERGÉTICO .....	91
5.1.1. Necessidades de aquecimento.....	91
5.1.2. Necessidades de arrefecimento .....	94
5.1.3. Pontes Térmicas .....	97
5.2. DESEMPENHO ACÚSTICO .....	103
5.3. ANÁLISE ECONÓMICA.....	105
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	109
6.1. CONCLUSÕES .....	109
6.2. PERSPETIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE TRABALHOS FUTUROS .....	113
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	115
ANEXOS.....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Edifícios concluídos nos países Euroconstruct, por tipologia .....	5
Figura 2: Investimento no sector da reabilitação em 2008 nos países Euroconstruct .....	6
Figura 3: Evolução dos diferentes mercados de construção nos países Euroconstruct ....	7
Figura 4: Perspetiva de crescimento do mercado residencial em 2014 face a 2011 .....	8
Figura 5: Perspetiva de crescimento da construção residencial nova em 2014 face a 2011 .....	8
Figura 6: Perspetiva de crescimento do mercado residencial de reabilitação em 2014 face a 2011 .....	9
Figura 7: Edifícios concluídos em Portugal por tipologia.....	10
Figura 8: Construção nova e reabilitação do edificado, 1995-2010.....	10
Figura 9: Evolução das fachadas em Portugal.....	12
Figura 10: Época de construção do parque habitacional português .....	12
Figura 11: Necessidades de reparação dos edifícios .....	13
Figura 12: Necessidades de reparação por tipo de elemento.....	13
Figura 13: Necessidades de reparação das fachadas dos edifícios .....	14
Figura 14: Revestimento independente descontínuo com isolamento térmico na caixa-de-ar .....	17
Figura 15: Sistema de isolamento térmico compósito exterior com revestimento espesso a) e delgado b) .....	18
Figura 16: Sistema de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados .	18
Figura 17: Contra-fachada de alvenaria a) e de gesso cartonado b) com isolamento na caixa-de-ar .....	20
Figura 18: Painel sandwich de GRC.....	22
Figura 19: Módulo de reabilitação prefabricado .....	23
Figura 20: Temperaturas de conforto previstas pelo método do PMV e medidas em campo, em edifícios ventilados naturalmente.....	25
Figura 21: Norma de conforto adaptativo proposta para a ASHRAE 55, para edifícios ventilados naturalmente.....	26
Figura 22: Valores recomendados da temperatura operativa interior para edifícios não climatizados, em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada	27
Figura 23: Planta do piso do edifício unifamiliar .....	36
Figura 24: Planta da cave do edifício multifamiliar .....	38

Figura 25: Planta dos pisos 1, 2 e 3 do edifício multifamiliar.....	39
Figura 26: Planta do sótão do edifício multifamiliar.....	39
Figura 27: Alçado principal do edifício unifamiliar no modo de visualização do DesignBuilder.....	49
Figura 28: Perspetivas do edifício unifamiliar no modo de visualização do DesignBuilder.....	49
Figura 29: Modelação das zonas do edifício unifamiliar no DesignBuilder.....	49
Figura 30: Colocação dos dados relativos à localização do edifício no DesignBuilder.	51
Figura 31: Apresentação dos resultados obtidos pelo DesignBuilder.....	52
Figura 32: Modelo do edifício multifamiliar no DesignBuilder.....	52
Figura 33: Modelação da cave, pisos e sótão do edifício multifamiliar no DesignBuilder.....	53
Figura 34: Editor de ficheiros IDF do programa EnergyPlus.....	54
Figura 35: Secção de corte da Solução 1.....	54
Figura 36: Solução 2 – identificação da secção analisada no THERM.....	55
Figura 37: Solução 3 – identificação da secção analisada no THERM.....	55
Figura 38: Solução 5 – identificação das secções analisadas no THERM.....	55
Figura 39: Solução 6 – identificação da secção analisada no THERM.....	56
Figura 40: Solução 7 – identificação da secção analisada no THERM.....	56
Figura 41: Exemplo de importação de “ <i>underlay</i> ”.....	57
Figura 42: Exemplo de um relatório de resultados obtidos no THERM™.....	59
Figura 43: Exemplo de um material existente na base de dados do Acoubat.....	64
Figura 44: Edifício unifamiliar – compartimentos analisados.....	65
Figura 45: Modelação dos compartimentos do edifício unifamiliar no Acoubat Sound.....	65
Figura 46: Edifício multifamiliar – compartimentos analisados.....	67
Figura 47: Modelação dos compartimentos do edifício multifamiliar no Acoubat Sound.....	68
Figura 48: Edifício unifamiliar: necessidades de aquecimento obtidas para Bragança.....	74
Figura 49: Edifício unifamiliar: necessidades de aquecimento obtidas para Guimarães.....	74
Figura 50: Edifício unifamiliar: necessidades de aquecimento obtidas para Coimbra.....	75
Figura 51: Edifício unifamiliar: necessidades de aquecimento obtidas para Évora.....	75
Figura 52: Edifício unifamiliar: necessidades de aquecimento obtidas para Lisboa.....	76
Figura 53: Edifício unifamiliar: necessidades de arrefecimento obtidas para Bragança.....	76
Figura 54: Edifício unifamiliar: necessidades de arrefecimento obtidas para Guimarães.....	77

Figura 55: Edifício unifamiliar: necessidades de arrefecimento obtidas para Coimbra .	77
Figura 56: Edifício unifamiliar: necessidades de arrefecimento obtidas para Évora .....	78
Figura 57: Edifício unifamiliar: necessidades de arrefecimento obtidas para Lisboa....	78
Figura 58: Solução 1, secção 1: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .	80
Figura 59: Solução 1, secção 2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .	80
Figura 60: Solução 1, secção 3: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .	80
Figura 61: Solução 2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora).....	81
Figura 62: Solução 3: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora).....	81
Figura 63: Solução 4: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora).....	82
Figura 64: Solução 5, S1: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	82
Figura 65: Solução 5, S2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	82
Figura 66: Solução 6: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora).....	83
Figura 67: Solução 7: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora).....	83
Figura 68: Necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar localizado em Bragança .....	92
Figura 69: Necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar localizado em Guimarães .....	92
Figura 70: Necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar localizado em Coimbra .....	93
Figura 71: Necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar localizado em Évora .....	93
Figura 72: Necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar localizado em Lisboa .....	94
Figura 73: Necessidades de arrefecimento do edifício multifamiliar localizado em Bragança .....	94
Figura 74: Necessidades de arrefecimento do edifício multifamiliar localizado em Guimarães .....	95
Figura 75: Necessidades de arrefecimento do edifício multifamiliar localizado em Coimbra .....	95
Figura 76: Necessidades de arrefecimento do edifício multifamiliar localizado em Évora .....	96
Figura 77: Necessidades de arrefecimento do edifício multifamiliar localizado em Lisboa .....	96
Figura 78: Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 1: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	98

Figura 79: Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	98
Figura 80: Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 3: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	99
Figura 81: Edifício multifamiliar – Solução 2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	99
Figura 82: Edifício multifamiliar – Solução 3: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	100
Figura 83: Edifício multifamiliar – Solução 4: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	100
Figura 84: Edifício multifamiliar – Solução 5, S1: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	101
Figura 85: Edifício multifamiliar – Solução 5, S2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	101
Figura 86: Edifício multifamiliar – Solução 6: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora) .....	101
Figura 87: Edifício multifamiliar – Solução 7: temperaturas ao longo da (Bragança e Évora) .....	102
Figura 88: Edifício unifamiliar – Solução 1 – Secções 1, 2 e 3 simuladas no THERM .....	122
Figura 89: Edifício unifamiliar – Solução 1, secção 1: pormenor dos fluxos de calor	122
Figura 90: Edifício unifamiliar – Solução 1, secção 2: pormenor dos fluxos de calor	122
Figura 91: Edifício unifamiliar – Solução 1, secção 3: pormenor dos fluxos de calor	123
Figura 92: Edifício unifamiliar – Solução 2 – Secção simulada no THERM .....	123
Figura 93: Edifício unifamiliar – Solução 2: pormenor dos fluxos de calor .....	123
Figura 94: Edifício unifamiliar – Solução 3 – Secção simulada no THERM .....	124
Figura 95: Edifício unifamiliar – Solução 3: pormenor dos fluxos de calor .....	124
Figura 96: Edifício unifamiliar – Solução 4 – Secção simulada no THERM .....	124
Figura 97: Edifício unifamiliar – Solução 4: pormenor dos fluxos de calor .....	125
Figura 98: Edifício unifamiliar – Solução 5 – Secções 1 e 2 simuladas no THERM ..	125
Figura 99: Edifício unifamiliar – Solução 5, S1: pormenor dos fluxos de calor .....	125
Figura 100: Edifício unifamiliar – Solução 5, S2: pormenor dos fluxos de calor .....	126
Figura 101: Edifício unifamiliar – Solução 6 – Secção simulada no THERM .....	126
Figura 102: Edifício unifamiliar – Solução 6: pormenor dos fluxos de calor .....	126
Figura 103: Edifício unifamiliar – Solução 7 – Secção simulada no THERM .....	127
Figura 104: Edifício unifamiliar – Solução 7: pormenor dos fluxos de calor .....	127

Figura 105: Edifício multifamiliar - Solução 1 – identificação das secções 1, 2 e 3 analisadas no THERM.....	130
Figura 106: Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 1: pormenor dos fluxos de calor .....	130
Figura 107: Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 2: pormenor dos fluxos de calor .....	130
Figura 108: Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 3: pormenor dos fluxos de calor .....	131
Figura 109: Edifício multifamiliar – Solução 2 – identificação da secção analisada no THERM .....	131
Figura 110: Edifício multifamiliar – Solução 2 pormenor dos fluxos de calor.....	131
Figura 111: Edifício multifamiliar – Solução 3 – identificação da secção analisada no THERM .....	132
Figura 112: Edifício multifamiliar – Solução 3: pormenor dos fluxos de calor.....	132
Figura 113: Edifício multifamiliar – Solução 4 – identificação da secção analisada no THERM .....	132
Figura 114: Edifício multifamiliar – Solução 4: pormenor dos fluxos de calor.....	133
Figura 115: Edifício multifamiliar – Solução 5 – identificação das secções analisadas no THERM .....	133
Figura 116: Edifício multifamiliar – Solução 5, S1: pormenor dos fluxos de calor.....	133
Figura 117: Edifício multifamiliar – Solução 5, S2: pormenor dos fluxos de calor.....	134
Figura 118: Edifício multifamiliar – Solução 6 – identificação da secção analisada no THERM .....	134
Figura 119: Edifício multifamiliar – Solução 6: pormenor dos fluxos de calor.....	134
Figura 120: Edifício multifamiliar – Solução 7 – identificação da secção analisada no THERM .....	135
Figura 121: Edifício multifamiliar – Solução 7: pormenor dos fluxos de calor.....	135



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Vantagens da colocação de isolamento térmico pelo exterior da fachada ....	16
Quadro 2: Desvantagens da colocação de isolamento térmico pelo exterior da fachada	16
Quadro 3: Vantagens da colocação do isolamento térmico pelo interior da fachada.....	19
Quadro 4: Desvantagens da colocação do isolamento térmico pelo interior da fachada	20
Quadro 5: Características dos elementos construtivos utilizados no edifício unifamiliar .....	37
Quadro 6: Características das soluções de paredes exteriores do edifício multifamiliar	40
Quadro 7: Características das soluções de paredes divisórias e interiores do edifício multifamiliar .....	41
Quadro 8: Características das soluções de coberturas e pavimentos do edifício multifamiliar .....	42
Quadro 9: Caracterização da Solução 1 .....	43
Quadro 10: Caracterização da Solução 2.....	44
Quadro 11: Caracterização da Solução 3.....	44
Quadro 12: Caracterização da Solução 4.....	45
Quadro 13: Caracterização da Solução 5.....	45
Quadro 14: Caracterização da Solução 6.....	45
Quadro 15: Caracterização da Solução 7.....	46
Quadro 16: Dados relativos aos locais de implementação do edifício .....	50
Quadro 17: Condições-fronteira utilizadas no THERM.....	58
Quadro 18: Valores de acréscimo do isolamento pela existência de caixa-de-ar.....	62
Quadro 19: Frequências de ressonância e quebras que influenciam o traçado da curva de estimativa do isolamento sonoro – edifício unifamiliar .....	66
Quadro 20: Frequências críticas dos materiais e respetivas quebras que influenciam o traçado da curva de estimativa do isolamento sonoro – edifício unifamiliar .....	67
Quadro 21: Frequências críticas dos materiais e respetivas quebras que influenciam o traçado da curva de estimativa do isolamento sonoro – edifício multifamiliar.....	68
Quadro 22: Frequências de ressonância e respetivas quebras que influenciam o traçado da curva de estimativa do isolamento sonoro – edifício multifamiliar .....	69
Quadro 23: Valor de U da secção, U da zona corrente e perdas associadas à secção do edifício unifamiliar. ....	84
Quadro 24: Resultados obtidos nas simulações acústicas do Quarto 3 do edifício unifamiliar [dB] .....	85

Quadro 25: Resultados obtidos nas simulações acústicas da Sala do edifício unifamiliar [dB].....	86
Quadro 26: Custo de implementação das soluções de reabilitação no edifício unifamiliar .....	87
Quadro 27: Necessidades energéticas do edifício unifamiliar [kWh/m <sup>2</sup> .ano].....	88
Quadro 28: Custo de Exploração [€/ano] .....	88
Quadro 29: ΔCusto de Exploração [€/ano].....	89
Quadro 30: Período de Retorno Simples [anos] .....	89
Quadro 31: Valor de U da secção, U da zona corrente e perdas associadas à secção do edifício multifamiliar.....	102
Quadro 32: Resultados obtidos nas simulações acústicas do Quarto 4 do edifício multifamiliar [dB].....	104
Quadro 33 – Resultados obtidos nas simulações acústicas da Sala 2 do edifício multifamiliar [dB].....	104
Quadro 34: Custo de implementação das soluções de reabilitação no edifício multifamiliar .....	105
Quadro 35: Resumo dos resultados obtidos nas simulações energéticas [kWh/m <sup>2</sup> .ano] .....	106
Quadro 36: Custo de Exploração [€/ano] .....	106
Quadro 37: ΔCusto de Exploração [€/ano].....	107
Quadro 38: Período de Retorno Simples [anos] .....	107
Quadro 39: Valores de $D_{nT,W}$ para as diversas frequências – Quarto 3 do edifício unifamiliar [dB].....	128
Quadro 40: Valores de $D_{nT,W}$ para as diversas frequências – Sala do edifício unifamiliar [dB].....	129
Quadro 41: Valores de $D_{nT,W}$ para as diversas frequências – Quarto 4 do edifício multifamiliar [dB].....	136
Quadro 42: Valores de $D_{nT,W}$ para as diversas frequências – Sala 2 do edifício multifamiliar [dB].....	137

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E UNIDADES**

### **Abreviaturas**

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CEN – Comité Europeu de Normalização

COP – Coeficiente de Performance

CSTB – Centro Científico Técnico da Construção

EPBD – Diretiva para Desempenho Energético dos Edifícios

EPS – Poliestireno Expandido

ETICS – Sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior

GEE – Gases com Efeito de Estufa

GRC – Betão Reforçado com Fibras de Vidro

INE – Instituto Nacional de Estatística

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MRP – Módulo de Reabilitação Prefabricado

PMV – Voto Médio Previsto

PPD – Percentagem de Insatisfação Prevista

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RGR – Regulamento Geral do Ruído

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos para Climatização em Edifícios

SCE – Sistema de Certificação Energética de Edifícios

XPS – Poliestireno Extrudido

### **Símbolos e Unidades**

A – Subtotal de acréscimo do isolamento devido à existência da caixa-de-ar [dB]

$A_p$  – Área útil de pavimento [ $m^2$ ]

B – Subtotal de acréscimo de isolamento devido à existência de material absorvente na caixa-de-ar [dB]

C – Subtotal de redução de isolamento devido aos panos serem muito diferentes [dB]

c – Velocidade de propagação do som ao nível do mar [m/s]

$\text{custo}_{\text{aq}}$  – Custo das energias utilizadas para aquecimento [€/kWh]

$\text{custo}_{\text{ar}}$  – Custo das energias utilizadas para arrefecimento [€/kWh]

$\text{custo}_{\text{aqs}}$  – Custo das energias utilizadas para preparação de águas quentes sanitárias [€/kWh]

d – Espessura da caixa-de-ar [m]

$D_{2m, nT}$  – Isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado [dB]

$D_{2m, nT, w}$  – Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, entre o exterior do edifício e o interior [dB]

Dif – Acréscimo de isolamento que depende das características da caixa-de-ar e dos panos que compõem a parede [dB]

E – Módulo de elasticidade [ $N/m^2$ ]

$f_c$  – Frequência crítica [dB]

$f_r$  – Frequência de ressonância do conjunto [Hz]

$g_{\perp}$  – fator solar do vidro

$h$  – Espessura do elemento [m]

$L_{1,2m}$  – Nível médio de pressão sonora exterior, medido a 2m da fachada do edifício [dB]

$L_2$  – Nível médio de pressão sonora medido no local de receção [dB]

$m$  – Massa [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]

$N_{ac}$ ;  $N_{aqs}$  – Necessidades nominais de preparação de águas quentes sanitárias [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$ ]

$N_{ic}$ ;  $N_{ar}$  – Necessidades nominais de energia útil de aquecimento [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$ ]

$N_{tc}$  – Necessidades nominais globais de energia primária [kgep]

$N_{vc}$ ;  $N_{ar}$  – Necessidades nominais de energia útil de arrefecimento [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$ ]

PRS – Período de Retorno Simples [anos]

$R$  – Índice de redução sonora [dB]

$T$  – Tempo de reverberação [segundos]

$T_c$  – Temperatura interior de conforto [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{ext}$  – Temperatura exterior [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$U$  – Coeficiente de transmissão térmica [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ]

$\eta_{aq}$  – Eficiência nominal dos equipamentos utilizados para os sistemas de aquecimento

$\eta_{ar}$  – Eficiência nominal dos equipamentos utilizados para os sistemas de arrefecimento

$\rho$  – Densidade do material [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]



## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1. ENQUADRAMENTO**

O ser humano sempre demonstrou a necessidade de ter a sua habitação e de a adaptar às exigências da época e do local onde se encontrava. Na sua forma mais primitiva, a habitação constituiu um elemento de proteção contra a agressividade do clima e animais; hoje em dia tem também associadas funções de privacidade, conforto e estética.

O elevado crescimento demográfico e a revolução industrial despoletaram o consumo de fontes de energia com origem fóssil. As novas habitações foram construídas sem preocupações relativamente à sua eficiência energética, consequência também da inexistência de legislação nesta matéria.

A crise petrolífera dos anos 1970 veio despertar as consciências para os elevados consumos energéticos dos edifícios e para as consequências que isso acarreta, nomeadamente, o esgotamento das fontes convencionais de energia. A crescente preocupação com o meio ambiente deu origem a um novo conceito – a sustentabilidade, inicialmente associada apenas ao contexto ambiental mas agora alargada ao âmbito social, económico e funcional. Apontou também para a criação de protocolos, normas e regulamentos que pretendem minimizar a dependência de energias primárias não renováveis, promover o uso racional de energia e a eficiência energética nos setores dos transportes, habitação, indústria, estado.

A nível europeu, foram definidas em 2008 pela Comissão Europeia três grandes metas para serem alcançadas até 2020: poupar 20% no consumo anual de energia primária melhorando a eficiência energética, reduzir em 20% as emissões dos GEE e aumentar em 20% a utilização de energia proveniente de fontes de energia renováveis. Estes objetivos são conhecidos pelas “metas 20-20-20” e abrangem os sectores dos transportes, residencial e serviços, indústria e estado [CEC, 2008]. Sendo o sector residencial responsável por grande parte do consumo de energia primária, a Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 (EPBDrecast), que veio reformular a diretiva de 2002/91/CE do Parlamento Europeu e

do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 (EPBD), define um conjunto de medidas que visam melhorar a eficiência energética dos edifícios.

Em Portugal, a EPBD levou à implementação do Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE) que consta no Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril, do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril, e do Regulamento dos Sistemas Energéticos para Climatização em Edifícios (RSECE), Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril [SCE,2006; RCCTE, 2006; RSECE, 2006].

A reabilitação dos edifícios a fim de os dotar de características satisfatórias a nível regulamentar permite reduzir significativamente o seu consumo energético. A EPBDrecast vem acrescentar medidas mais exigentes do ponto de vista da eficiência energética atribuindo uma importância substancial à reabilitação.

Mas a busca pela qualidade de vida no interior dos edifícios não se resume apenas à sua eficiência energética. O aumento do tráfego urbano, os estabelecimentos de diversão noturna ou estabelecimentos comerciais junto a residências vieram enfatizar as preocupações devido ao ruído. A preocupação pela acústica dos edifícios deixou de estar exclusivamente ligada às salas de espetáculo, de cinema, igrejas e estúdios para hoje em dia estar ligada também às salas de aula, escritórios e residências.

Essa crescente preocupação contribuiu para a publicação de Diretivas e Normas Europeias que conduziram à criação de alguns regulamentos sobre a prevenção e controlo de ruído e o conforto acústico nos edifícios, nomeadamente o Regulamento Geral do Ruído (RGR) Decreto-Lei n.º 09/2007 de 17 de Janeiro [RGR, 2007] e o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho [RRAE, 2008; Mateus, 2008].

Por outro lado, assiste-se a uma forte queda na construção de novos edifícios e a crise económica que se instalou na Europa desde 2008 acentuou ainda mais essa queda empurrando os países para uma conjuntura económico-financeira e social ruinosas. É necessário poupar e uma grande parte da fatia das despesas da população prende-se com a sua habitação: água, eletricidade, gás, reparações. A reabilitação dos edifícios permite dotar os mesmos de uma maior eficiência de forma a permitir poupanças nos gastos e ao mesmo tempo aumentar o bem-estar e conforto no seu interior.

A fachada é o elemento que juntamente com a cobertura faz a interface entre o ambiente exterior e o interior, e sendo o elemento da envolvente com maior superfície é o principal responsável pela eficiência energética e qualidade acústica do edifício. Torna-se assim relevante avaliar quais os sistemas de reabilitação mais apropriados e quais os custos associados à sua implementação.

É neste contexto que surge este trabalho.

## **1.2. OBJETIVOS**

Uma vez que existe uma tendência clara para a reabilitação de edifícios face à construção nova, devido a imposições regulamentares, à conjuntura económico-financeira do país e ao excesso de edifícios existentes, é importante, antes de se proceder à reabilitação, realizar o estudo dos diversos sistemas de reabilitação.

Este trabalho tem por objetivo estudar e avaliar o desempenho de um conjunto de sistemas de reabilitação de fachadas, utilizando para o efeito ferramentas de simulação dinâmica como o DesignBuilder, o EnergyPlus e o programa de simulação acústica Acoubat Sound. Tendo em conta o crescente peso atribuído ao investimento que é feito, também se pretende determinar os custos inerentes à implementação de cada sistema e respetiva viabilidade económica face às melhorias introduzidas pelo mesmo.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO**

No Capítulo 1 é feita uma introdução geral com o enquadramento da temática do trabalho, são apresentados os objetivos que se pretendem alcançar e a forma como o trabalho está estruturado.

O Capítulo 2 contempla um conjunto de dados estatísticos e outras informações a nível europeu e nacional que vêm demonstrar a primazia da reabilitação em vez da construção nova, complementando com algumas informações que justificam a necessidade de reabilitar os edifícios existentes. Também são apresentados alguns conceitos gerais ligados ao estudo do desempenho térmico e acústico dos edifícios, particularmente das suas fachadas, bem como a regulamentação existente aplicada a cada área.

A metodologia para a avaliação do desempenho dos sistemas de reabilitação é explicada no Capítulo 3. Neste capítulo são identificados e descritos cada um dos sistemas de reabilitação estudados e os casos de estudo onde serão aplicados. Posteriormente são descritos os modelos, ficheiros climáticos e parâmetros utilizados nos respetivos programas de simulação energética. É descrito todo o processo de cálculo necessário para a obtenção das curvas de isolamento acústico de cada solução e para a simulação acústica. Por fim, é detalhado o processo usado na análise económica de cada solução.

Os capítulos 4 e 5 centram-se na avaliação de cada um dos casos de estudo (Edifício unifamiliar e Edifício multifamiliar) desde o comportamento térmico e acústico das soluções de reabilitação propostas para cada edifício até a sua análise económica, sendo apresentados os resultados obtidos nas simulações e uma análise geral dos mesmos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho de acordo com a análise aos resultados obtidos nos capítulos anteriores, indicando também as perspetivas para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Por fim, encontra-se a listagem das referências bibliográficas que constam ao longo da dissertação e os anexos contendo as imagens das secções utilizadas no programa THERM e os quadros com os resultados obtidos na simulação acústica dos casos de estudo.

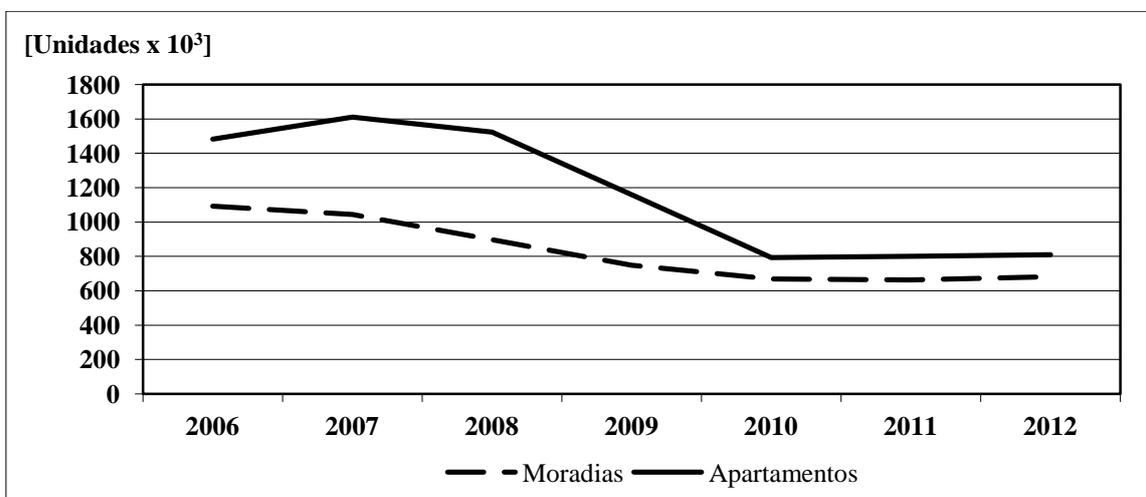
## CAPÍTULO 2 – CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO: PANORAMA E CONCEITOS

Neste capítulo são apresentadas algumas informações estatísticas relativamente ao panorama do setor de construção e reabilitação na Europa, nomeadamente nos países pertencentes ao Euroconstruct, e em Portugal. É ainda analisado o estado de conservação dos edifícios existentes no parque habitacional português focando as necessidades de reabilitação das fachadas e fundamentando assim a importância do desenvolvimento e análise de soluções de reabilitação destes elementos construtivos.

### 2.1. CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO NA EUROPA

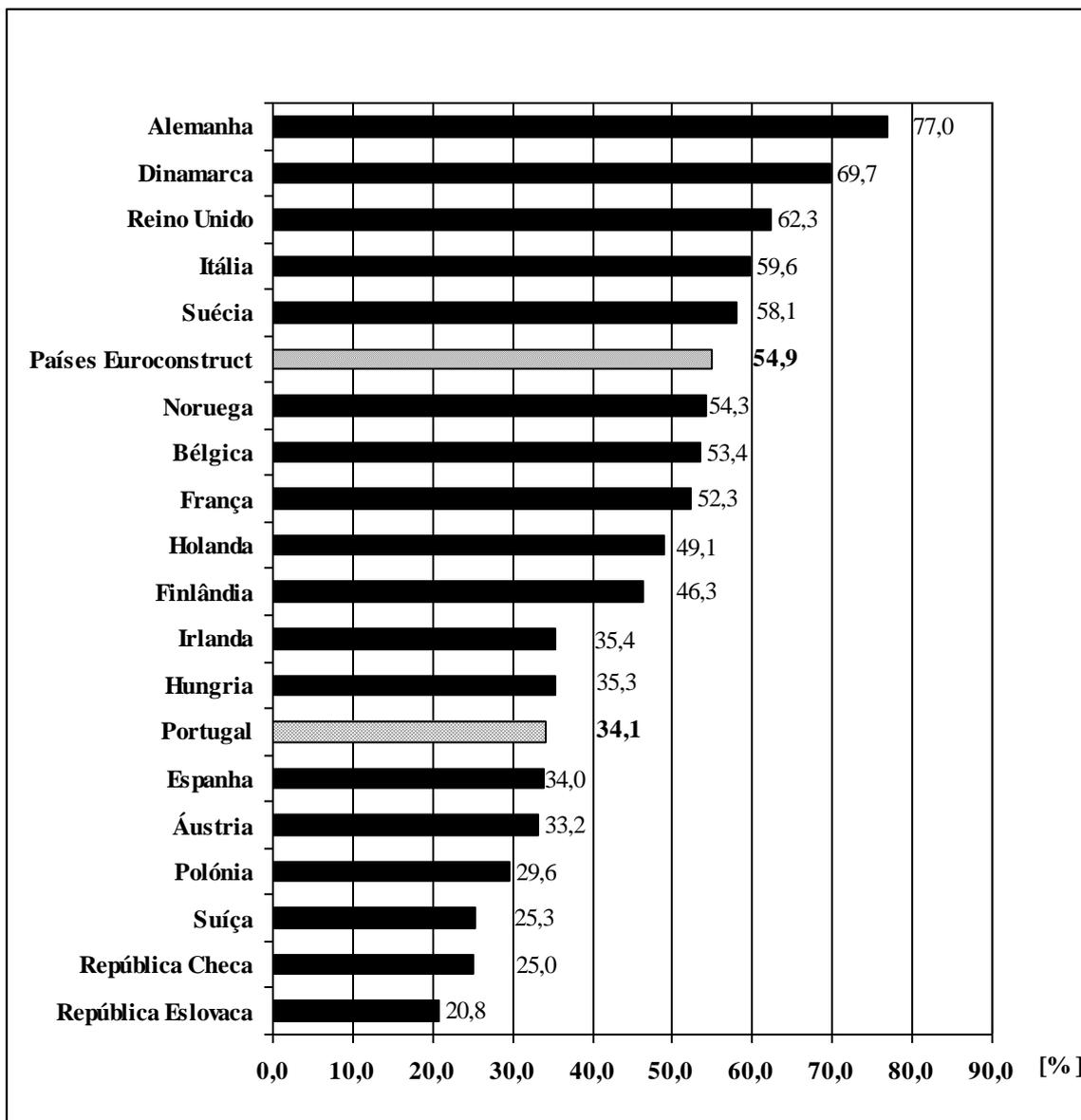
A crise económica e financeira que se abateu sobre a Europa por volta de 2008 está a afetar significativamente os mercados de construção e de reabilitação. As políticas orçamentais implementadas pelos diversos países agravaram as perspetivas de crescimento económico para 2012, sendo as obras públicas (obras de engenharia civil e edifícios não residenciais) as mais vulneráveis aos planos de austeridade impostos [Euroconstruct, 2011].

O parque habitacional nos países pertencentes ao Euroconstruct contava em 2008 com aproximadamente 215 milhões de edifícios de habitação (Figura 1), correspondendo grande parte da construção nova a edifícios de apartamentos.



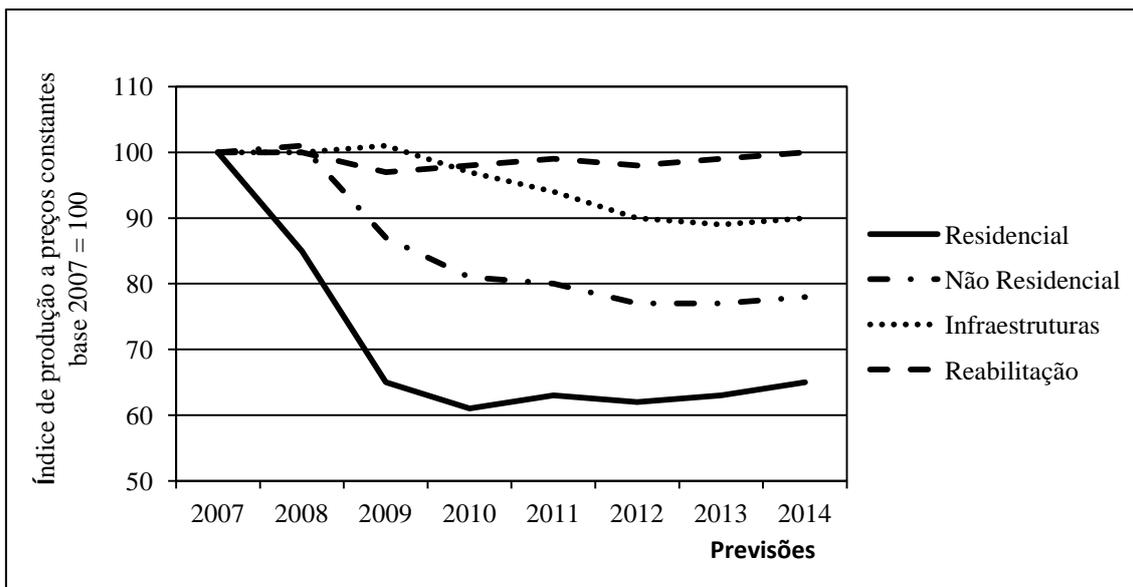
**Figura 1:** Edifícios concluídos nos países Euroconstruct, por tipologia (Fonte: Euroconstruct, 2010)

A média europeia da reabilitação em 2008 situava-se nos 54,9% como se pode comprovar pelo gráfico apresentado na Figura 2. De notar que Portugal, neste estudo, tem uma percentagem de 34,1% o que representa um valor muito abaixo da média europeia.



**Figura 2:** Investimento no sector da reabilitação em 2008 nos países Euroconstruct (Fonte: Euroconstruct, 2010)

Dados mais recentes analisados na 73ª Conferência do Euroconstruct indicam que para o período de 2012/2014 o setor da construção estará estagnado, ainda que com um ligeiro crescimento do mercado residencial (Figura 3) [InCI, 2012].

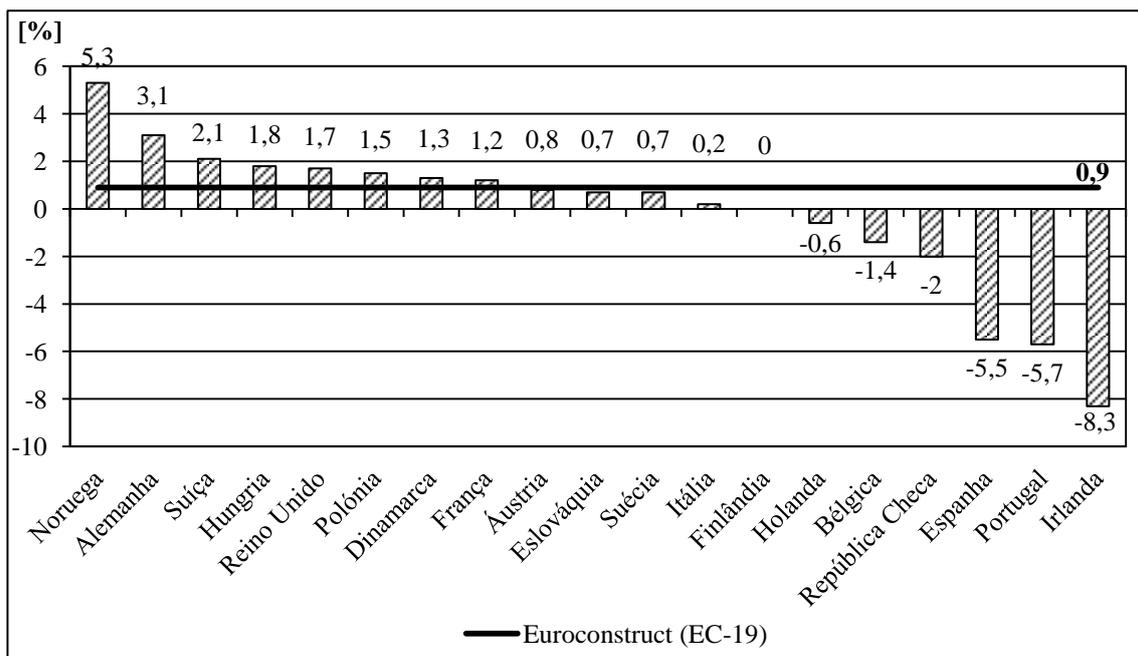


**Figura 3:** Evolução dos diferentes mercados de construção nos países Euroconstruct (Fonte: ITeC, 2012)

No conjunto dos 19 países que integram o Euroconstruct prevêem-se quatro grupos de países com diferentes níveis de evolução até 2014 tendo por base o ano de 2011 [Euroconstruct, 2012]:

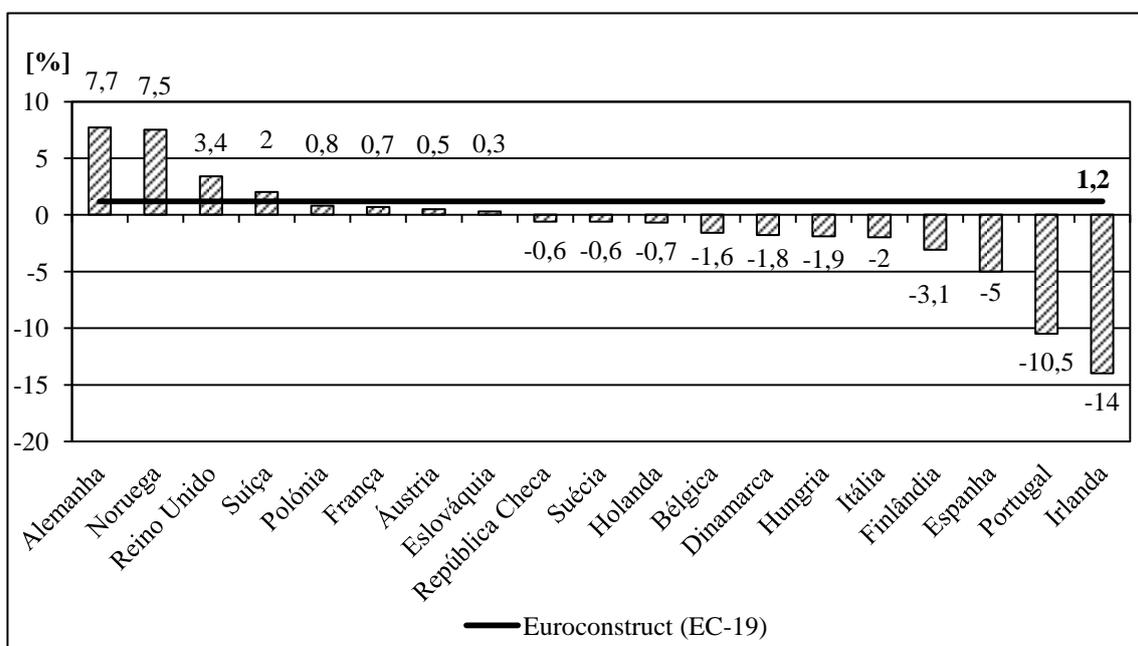
- O grupo constituído pela Noruega e Dinamarca onde se espera um crescimento anual em média superior a 2%;
- O grupo constituído pela Alemanha, Áustria, Eslováquia, França, Hungria, Polónia, Reino Unido, Suécia e Suíça com crescimento anual moderado entre 0,1% e 2%;
- No grupo constituído pela Bélgica, Finlândia, Itália, República Checa e Holanda prevê-se uma evolução negativa até 3% por ano;
- Por fim, no grupo constituído pela Irlanda, Portugal e Espanha espera-se uma recessão superior a 3%.

No mercado residencial as previsões para o período de 2011-2014 apontam para um crescimento médio anual de 0,9%, sendo os países que dão maior impulso positivo a Noruega, a Alemanha e a Suíça (Figura 4).



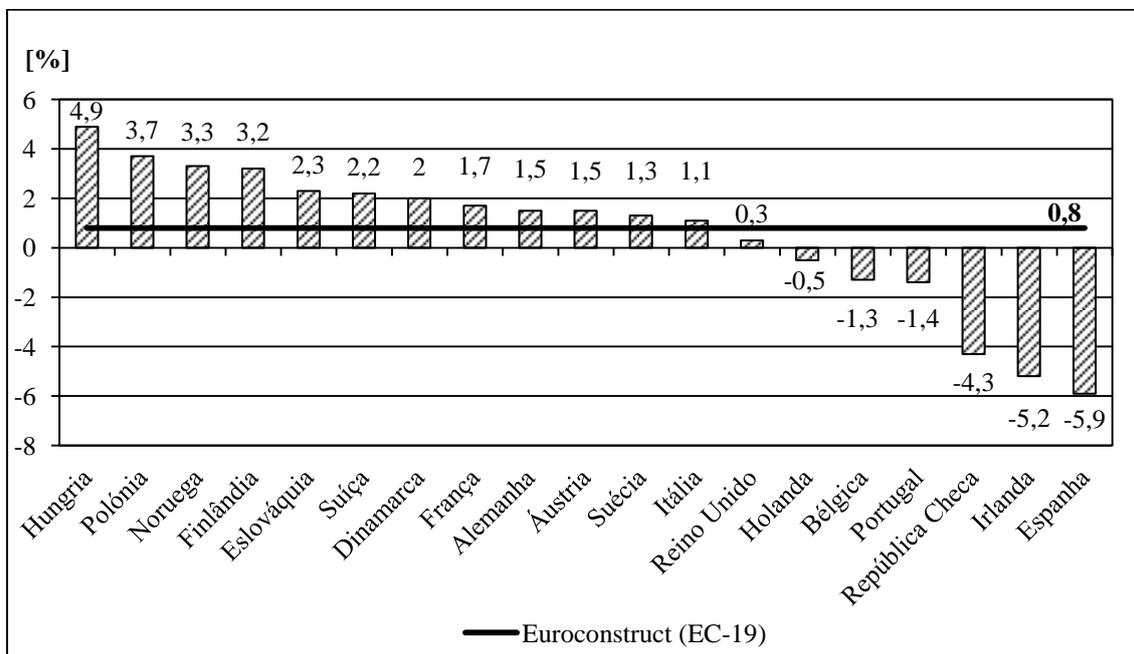
**Figura 4:** Perspetiva de crescimento do mercado residencial em 2014 face a 2011 (Fonte: InCI, 2012)

Relativamente ao sector da construção nova, o crescimento médio esperado para os países do Euroconstruct é de 1,2%, para o período de 2011 a 2014 (Figura 5). Os países que mais contribuem para este valor são a Alemanha, a Noruega e o Reino Unido. Note-se que a maioria dos países tem médias inferiores ao valor apurado para os países do Euroconstruct.



**Figura 5:** Perspetiva de crescimento da construção residencial nova em 2014 face a 2011 (Fonte: InCI, 2012)

Quanto à renovação, o valor médio dos 19 países é de 0,8% (Figura 6) mas apesar de ser um valor inferior à média da construção nova existe um maior número de países com previsões positivas, destacando-se a Hungria, a Polónia e a Noruega.



**Figura 6:** Perspetiva de crescimento do mercado residencial de reabilitação em 2014 face a 2011 (Fonte: InCI, 2012)

## 2.2. CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO EM PORTUGAL

Segundo os dados das Estatísticas da Construção e Habitação publicados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), o parque habitacional português em 2011 foi avaliado em 3,5 milhões de edifícios e 5,8 milhões de fogos, registando face ao ano anterior um acréscimo de 0,5% em ambos os casos [INE, 2011].

Em 2011, cerca de 59,7% das obras concluídas correspondem a edifícios em construções novas para habitação, sendo 91,1% moradias (Figura 7). Embora grande parte da totalidade das construções diga respeito a construção nova verifica-se que a reabilitação de edifícios tem vindo a assumir um papel cada vez mais importante no sector da construção em Portugal. Segundo o mesmo estudo efetuado pelo INE este facto pode resultar de uma saturação do mercado de novas habitações, levando as empresas de construção a apostarem mais na reabilitação do edificado [INE, 2011].

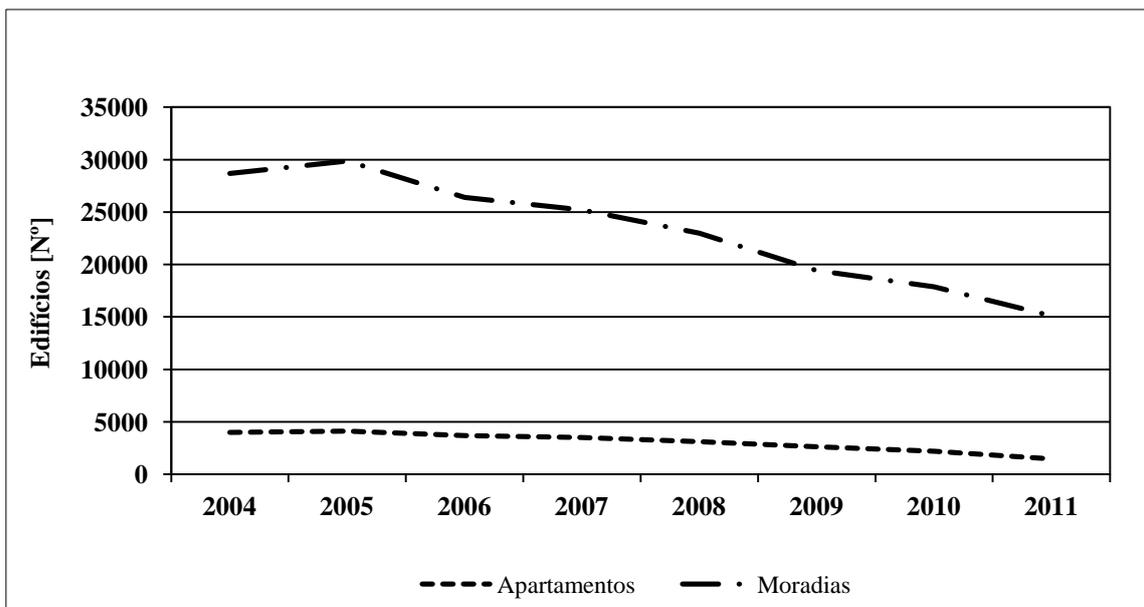


Figura 7: Edifícios concluídos em Portugal por tipologia (Fonte: INE)

Dos 27 790 edifícios concluídos em 2011, cerca de 6 930 correspondiam a reabilitação do edificado (cerca de 25%). A reabilitação engloba obras de alteração, ampliação e reconstrução. Verificou-se relativamente ao ano de 2010 um acréscimo de 3,1% do número de edifícios reabilitados [INE, 2011].

Analisando a Figura 8 é possível verificar que o peso da reabilitação em relação ao total de obras concluídas tem aumentado, o que se deve sobretudo ao decréscimo das construções novas.

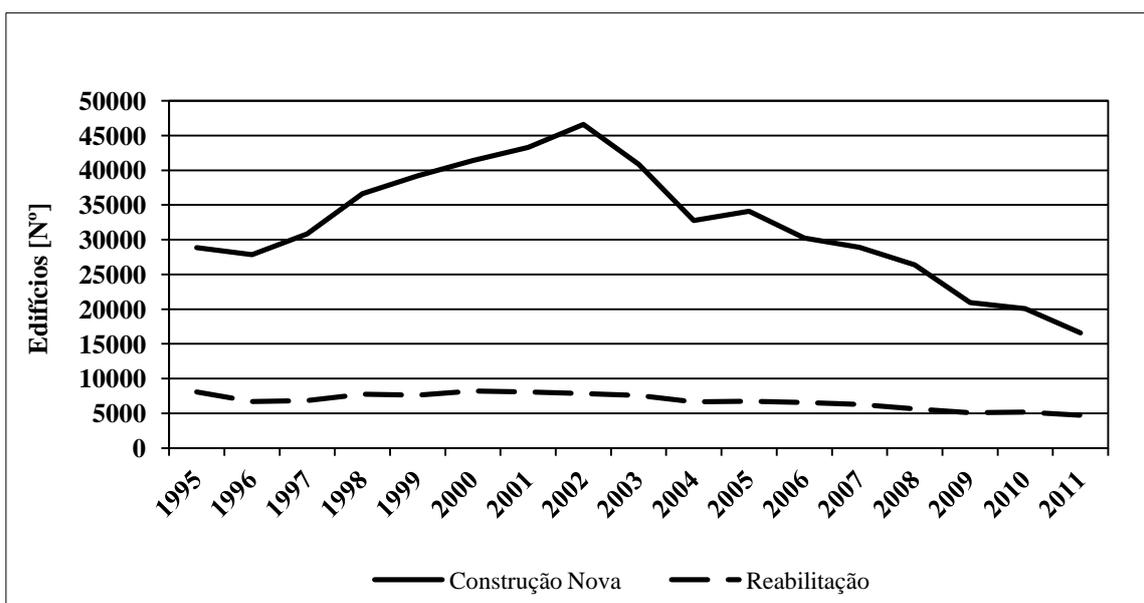


Figura 8: Construção nova e reabilitação do edificado, 1995-2010 (Fonte: INE)

### **2.3. EVOLUÇÃO DAS FACHADAS EM PORTUGAL**

As fachadas e coberturas são parte integrante da envolvente exterior de um edifício, estando mais vulneráveis a degradações provocadas pelas ações externas a que estão sujeitas. São também a parte mais visível do edifício sendo o elemento protetor dos espaços interiores responsável por garantir as condições de conforto e a privacidade de quem nele habita.

Ao longo dos anos as soluções construtivas das paredes exteriores evoluíram de modo a cumprir as exigências impostas quer pelos utilizadores dos edifícios, quer pela regulamentação existente. As soluções construtivas de paredes simples de elevada espessura em pedra ou tijolo maciço utilizadas até aos anos 1940 foram evoluindo, moldando-se às exigências de cada época [Freitas, 2002].

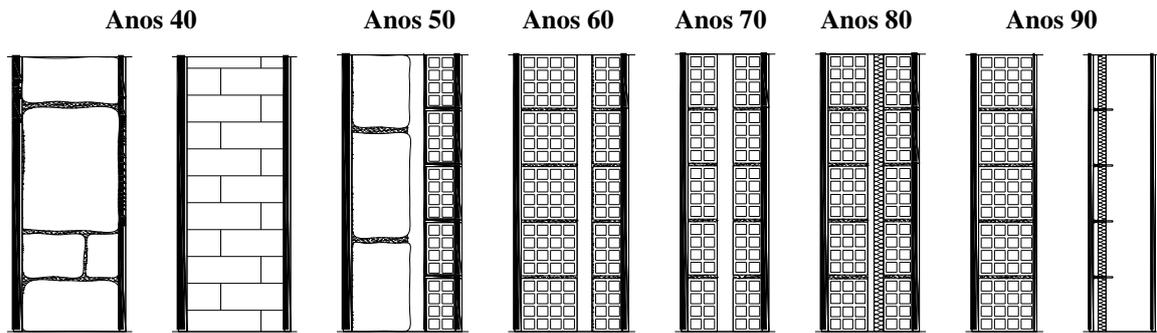
Nas décadas de 1950 e 1960 é introduzido o tijolo vazado nas soluções construtivas de paredes duplas e com o sistema de pórtico pilar-viga a fachada em alvenaria de pedra foi substituída pela alvenaria de tijolo.

Assiste-se assim ao aligeiramento da fachada quer pela utilização do tijolo quer pela redução da espessura das paredes, evoluindo até às soluções de paredes duplas com isolamento introduzidas nos anos 1980.

Após a entrada em vigor do primeiro Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) em 1991, as preocupações com o isolamento térmico dos edifícios e tratamento das pontes térmicas aumentam substancialmente.

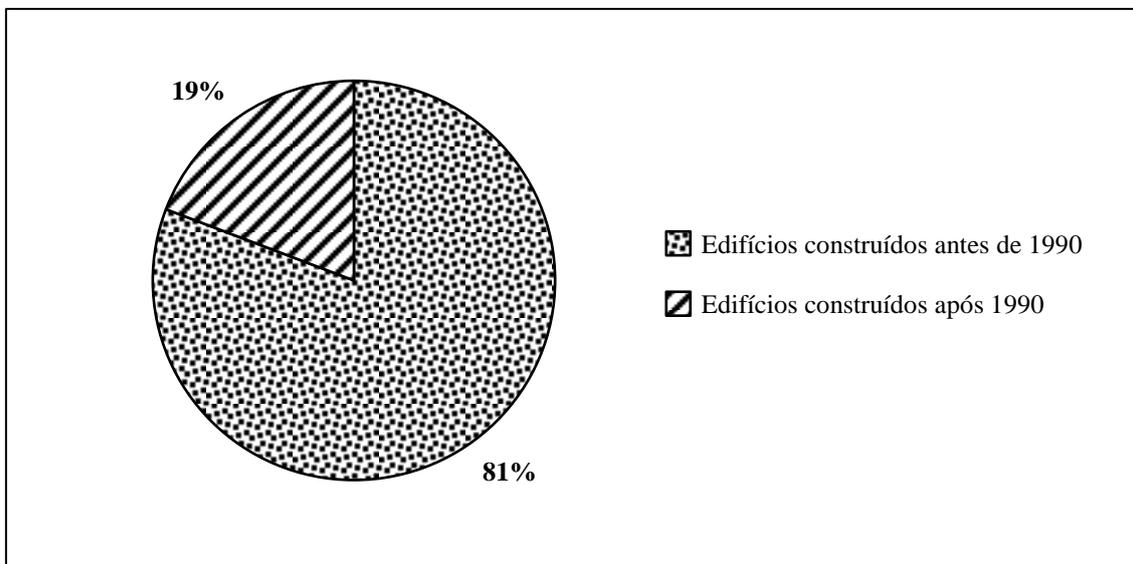
Na década de 1990 as soluções mais recorrentes prendem-se com o isolamento térmico pelo exterior (ETICS) e a fachada ventilada [Freitas, 2002].

Na Figura 9 é ilustrada a evolução das fachadas em Portugal desde as soluções de paredes de elevada espessura comuns na década de 1940 até às soluções mais aligeiradas utilizadas a partir da década de 1990.



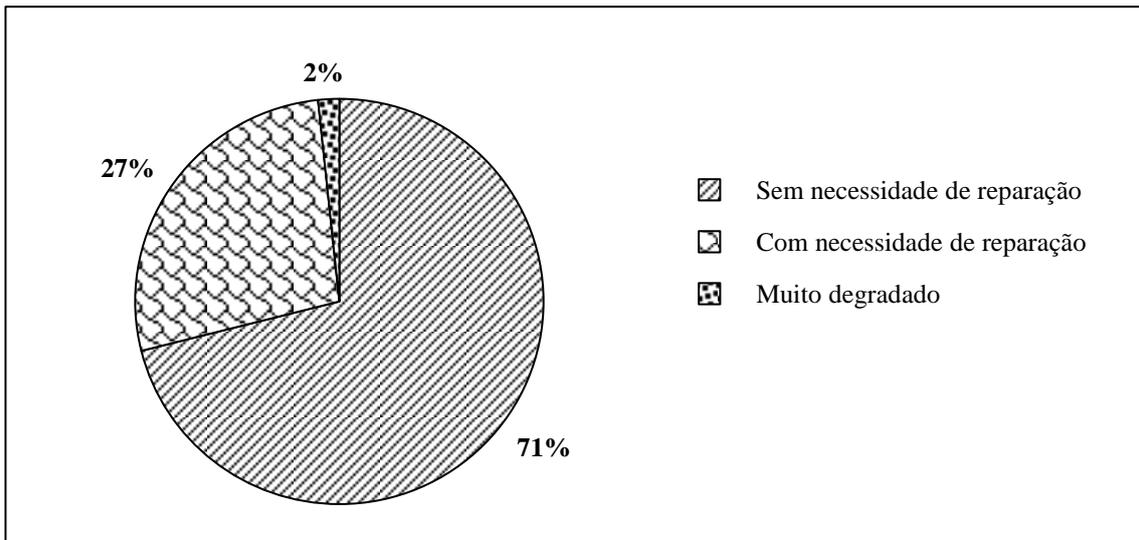
**Figura 9:** Evolução das fachadas em Portugal (Adaptado de: APICER, 1998; Freitas, 2002)

Dados do INE mostram que a maioria dos edifícios existentes em Portugal foi construída antes da publicação do primeiro regulamento térmico (Figura 10).



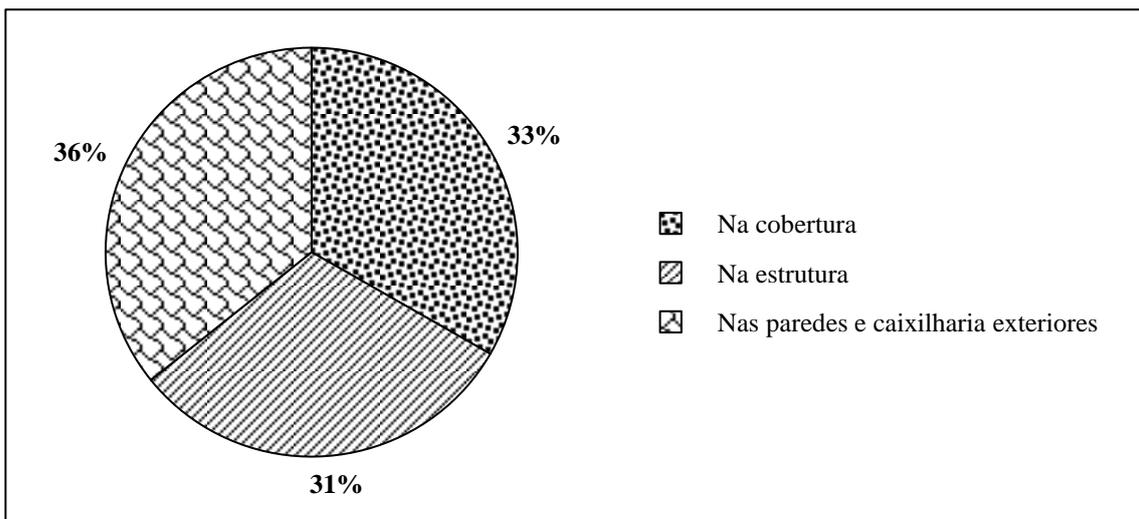
**Figura 10:** Época de construção do parque habitacional português (Fonte: INE, 2001)

Os Censos efetuados em 2011 indicam que 29% do parque habitacional português encontra-se bastante degradado ou carece de algum tipo de reparação, tornando-se necessária a sua reabilitação (Figura 11).



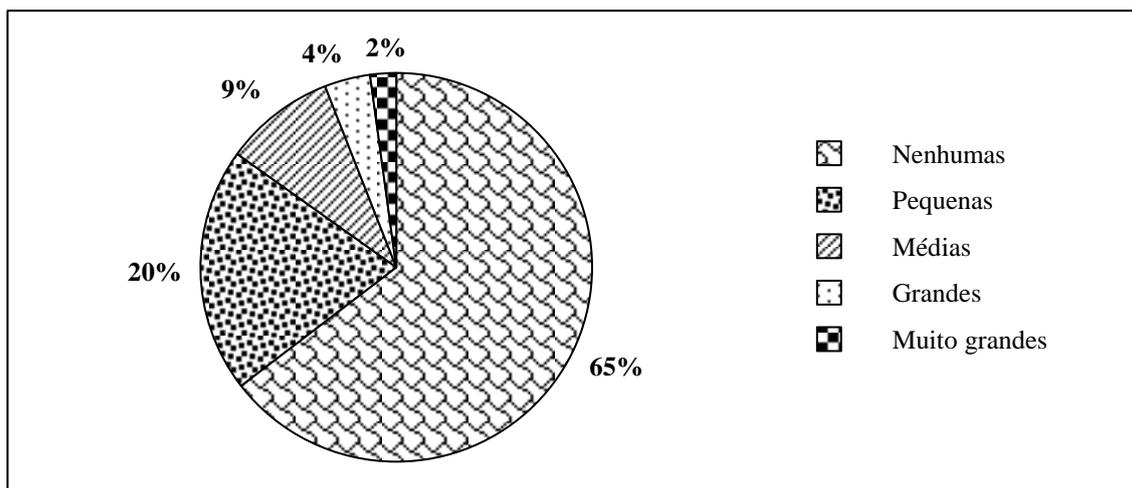
**Figura 11:** Necessidades de reparação dos edifícios (Fonte: Dados do INE, 2011)

Como se constata pela análise do gráfico da Figura 12, as paredes e caixilharias exteriores são os componentes com maiores necessidades de reparação.



**Figura 12:** Necessidades de reparação por tipo de elemento (Fonte: Dados do INE, 2011)

Relativamente às fachadas, o seu estado de conservação encontra-se esquematizado no gráfico da Figura 13, onde se verifica que cerca de 35% das paredes e caixilharias exteriores carecem de reparações.



**Figura 13:** Necessidades de reparação das fachadas dos edifícios (Fonte: Dados do INE, 2011)

As soluções de reabilitação de fachadas implementadas nos edifícios devem ser capazes de colmatar as necessidades de reparação do mesmo, melhorando o seu desempenho global e as suas condições de habitabilidade. Antes da sua implementação devem ser realizados estudos que antevejam quais as melhorias introduzidas por cada uma das possíveis soluções de reabilitação e permitam optar pela solução que mostre ser mais adequada para o edifício analisado.

#### 2.4. SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO DE FACHADAS

A durabilidade dos edifícios após a sua construção depende dos cuidados de manutenção e reabilitação que têm ao longo da sua vida útil.

A reabilitação é uma atividade complexa que deve ter em conta questões de carácter técnico, cultural e económico; permitindo uma rápida intervenção, que evite tanto quanto possível demolições, seja de fácil implementação e cause o menor incómodo possível aos utilizadores do edifício.

De um modo geral, as intervenções realizadas nas fachadas de edifícios residenciais podem ser de dois géneros: reabilitação estética e reabilitação funcional.

A reabilitação estética confere ao edifício um aspeto visual mais atrativo e moderno. Permite a recuperação dos revestimentos existentes (evitando a sua substituição) utilizando técnicas e materiais adequados ao cenário encontrado, não negligenciando

determinadas especificidades das fachadas como por exemplo a impermeabilidade e a resistência a agentes agressivos [Pereira, 2006].

A reabilitação funcional visa prover o edifício de características que proporcionem um melhor desempenho do mesmo, aumentando o conforto e qualidade de vida no seu interior.

Com vista a uma melhoria da eficiência das fachadas dos edifícios residenciais, têm sido desenvolvidas e implementadas várias soluções de reabilitação que na sua maioria visam reforçar o isolamento térmico. O isolamento térmico pode ser colocado no interior ou exterior da parede ou na caixa-de-ar das paredes duplas.

São de seguida apresentados diversos tipos de soluções construtivas de fachadas, de acordo com o local onde é colocado o isolamento térmico, referindo as vantagens e desvantagens de cada sistema, bem como a sua constituição.

#### **2.4.1. Soluções com isolamento térmico pelo exterior**

A escolha de soluções de isolamento térmico pelo exterior em detrimento das restantes opções é aconselhada no caso em que o paramento exterior se encontre deteriorado e não seja uma condicionante mantê-lo ou caso as áreas no interior do edifício sejam demasiado pequenas.

Este tipo de soluções, comparativamente às soluções de isolamento pelo interior, tem como principais vantagens um isolamento térmico mais eficiente devido à continuidade da camada de isolamento, eliminando pontes térmicas e reduzindo a probabilidade de ocorrência de condensações. O isolamento pelo exterior aumenta a capacidade térmica da parede, melhorando a inércia térmica do edifício. A utilização de soluções deste tipo permite a manutenção das dimensões interiores dos compartimentos e não implica a desocupação dos edifícios durante os trabalhos.

No Quadro 1 são apontadas algumas vantagens das soluções com isolamento térmico colocado pelo exterior incluindo as que foram acima referidas.

**Quadro 1:** Vantagens da colocação de isolamento térmico pelo exterior da fachada [Ferreira, 2006]

<b>Vantagem</b>	<b>Causa/Consequência</b>
<b>Redução das pontes térmicas</b>	Necessidade de menor espessura de isolamento
<b>Maior proteção da envolvente exterior</b>	Diminuição do risco de condensações Melhoria da impermeabilidade e estanquidade
<b>Maior inércia térmica interior</b>	Maior conforto interior Maior eficiência energética
<b>Manutenção da área útil interior</b>	Menor incomodidade dos habitantes Sem necessidade de desocupação do edifício
<b>Melhoria estética</b>	Possibilidade de correção de patologias existentes Variedade de soluções de acabamento

Por outro lado, tem como inconvenientes o condicionamento dos trabalhos pelo estado do tempo, o risco de vandalismo ocasionando a degradação do paramento, a alteração do aspeto exterior do edifício (que em determinadas situações pode ser vantajoso). Poderá também existir alguma dificuldade na realização de remates em zonas de ângulos e ressaltos.

No Quadro 2 encontram-se as desvantagens da colocação de isolamento térmico pelo exterior da fachada.

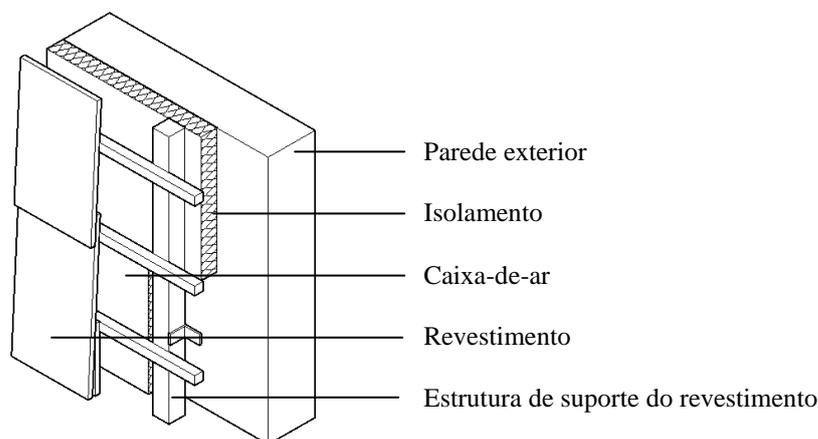
**Quadro 2:** Desvantagens da colocação de isolamento térmico pelo exterior da fachada [Paiva, 2006]

<b>Desvantagem</b>	<b>Causa/Consequência</b>
<b>Maior custo</b>	Devido à pormenorização adequada do sistema
<b>Aplicação condicionada</b>	Necessidade de equipas especializadas Necessidade de condições climáticas favoráveis
<b>Reduzida resistência ao choque</b>	Necessidade de reforço nas zonas suscetíveis a atos de vandalismo (no caso de ETICS)
<b>Alteração do exterior da fachada</b>	Condicionante para alguns edifícios de valor histórico e patrimonial
<b>Risco de condensações internas</b>	Desenvolvimento de fungos e algas Aparecimento de manchas nos primeiros anos após a aplicação do sistema

As soluções mais comuns podem ser agrupadas em três tipos:

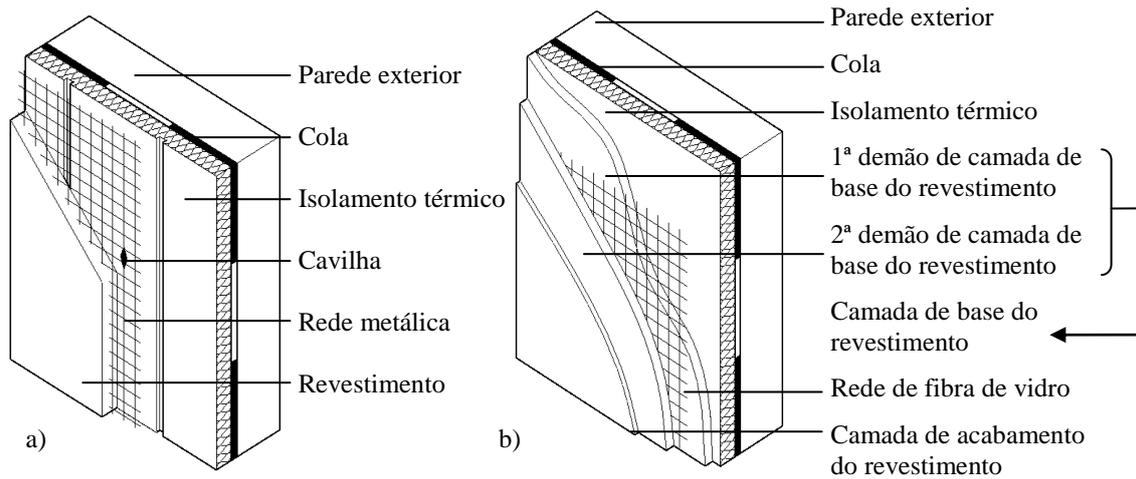
- Revestimentos independentes com interposição de isolamento térmico na caixa-de-ar;
- Sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior;
- Revestimentos isolantes.

Os revestimentos independentes descontínuos com interposição de um isolante térmico na caixa-de-ar são compostos por um isolamento térmico que é fixado à parede exterior existente, e por um revestimento descontínuo que é fixado à parede exterior através de uma estrutura de suporte (Figura 14). Esta estrutura de suporte, metálica ou de madeira, permite a criação de uma caixa-de-ar fortemente ventilada entre o revestimento e o isolamento.



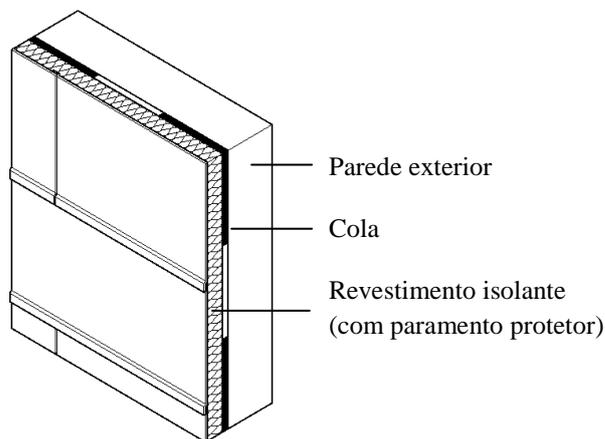
**Figura 14:** Revestimento independente descontínuo com isolamento térmico na caixa-de-ar (Fonte: Paiva, 2006)

Os sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimento sobre isolante, usualmente conhecidos pela sigla ETICS (External Thermal Insulating Composite Systems with rendering), são compostos por placas de isolamento térmico fixadas à parede exterior existente por colagem e/ou fixação mecânica, e por um revestimento contínuo armado (Figura 15). Este revestimento exterior pode ser espesso ou delgado. Nas zonas mais suscetíveis ao impacto é feito um reforço da rede metálica ou de fibra de vidro a fim de melhorar a sua resistência mecânica.



**Figura 15:** Sistema de isolamento térmico compósito exterior com revestimento espesso a) e delgado b) (Fonte: Paiva, 2006)

Os revestimentos isolantes podem ser revestimentos prefabricados isolantes descontínuos de fachada (*Vêtures*), rebocos isolantes ou revestimentos de espuma isolante projetada. Os painéis isolantes prefabricados são fixados diretamente à parede exterior através de colagem (Figura 16). Os rebocos isolantes têm a particularidade de incorporar na argamassa grânulos de reduzido diâmetro de um isolante térmico. Sendo a sua espessura semelhante à dos rebocos tradicionais, as melhorias a nível térmico não são equiparadas às melhorias implementadas pelas restantes soluções já apresentadas.



**Figura 16:** Sistema de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados (Fonte: Paiva, 2006)

### 2.4.2. Soluções com isolamento térmico pelo interior

As soluções de reabilitação de fachadas através da aplicação de isolamento térmico pelo interior são uma opção válida quando é imperativo preservar determinados aspetos arquitetónicos da fachada ou quando é necessário intervir apenas numa fração autónoma pertencente a um edifício multifamiliar.

Neste âmbito existem várias opções designadamente painéis isolantes prefabricados ou a execução de uma contra-fachada no lado interior da parede a reabilitar. As principais vantagens e inconvenientes que advêm da utilização deste tipo de soluções encontram-se nos Quadros 3 e 4.

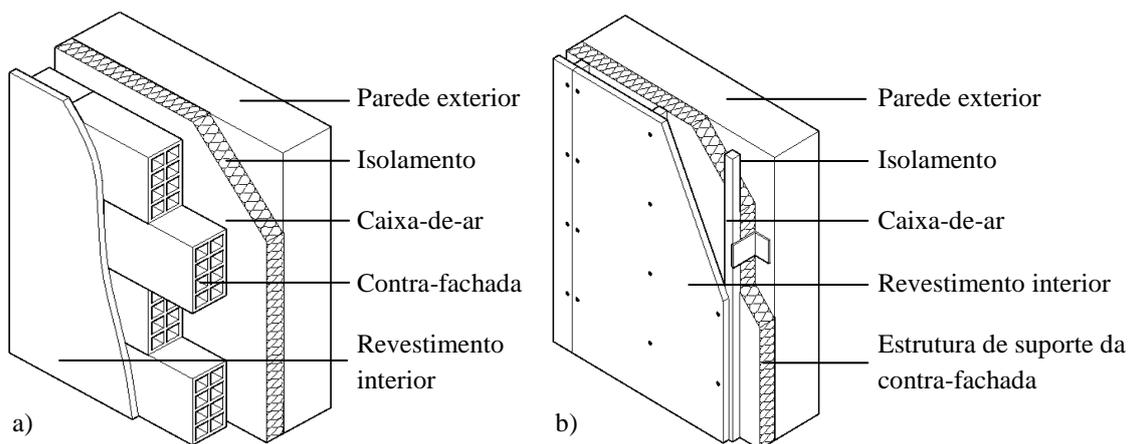
**Quadro 3:** Vantagens da colocação do isolamento térmico pelo interior da fachada [Ferreira, 2006]

<b>Vantagem</b>	<b>Causa/Consequência</b>
<b>Facilidade de aplicação</b>	Não depende das condições climáticas exteriores
<b>Manutenção aspeto exterior</b>	Preservação da identidade arquitetónica da fachada Possibilidade de intervenção individualizada num ou mais fogos de um edifício multifamiliar
<b>Menor custo</b>	Uso de menor quantidade de matéria-prima Na sua aplicação não necessita de recorrer a andaimes
<b>Fácil integração de instalações</b>	Permite a incorporação de tubagens sem deterioração do pano de parede
<b>Maior isolamento sonoro</b>	Diminuição da transmissão sonora por via marginal entre compartimentos Maior isolamento a ruídos aéreos provenientes do exterior
<b>Melhor comportamento ao fogo</b>	Resultante do uso de determinados elementos de revestimento (ex. gesso cartonado)

**Quadro 4:** Desvantagens da colocação do isolamento térmico pelo interior da fachada [Ferreira, 2006]

Desvantagens	Causa/Consequência
<b>Possibilidade de pontes térmicas</b>	Devido a configurações construtivas Requer medidas de correção
<b>Menor proteção da envolvente exterior</b>	Maior variação da incidência de radiação solar – choque térmico Menor estanquidade Maior risco de ocorrência de condensações internas
<b>Reduzida inércia térmica</b>	Devido à menor massa de armazenamento térmico (ex. gesso cartonado)
<b>Maior incomodidade</b>	Necessidade de desocupação do edifício Não manutenção de ornamentos interiores em edifícios antigos
<b>Menor área útil</b>	Perda da área útil interior Diminuição do valor do imóvel

A contra-fachada consiste num pano de alvenaria ou forro contínuo constituído por placas de gesso cartonado ou de outro material que em regra são fixadas contra uma estrutura secundária (Figura 17).



**Figura 17:** Contra-fachada de alvenaria a) e de gesso cartonado b) com isolamento na caixa-de-ar (Fonte: Paiva, 2006)

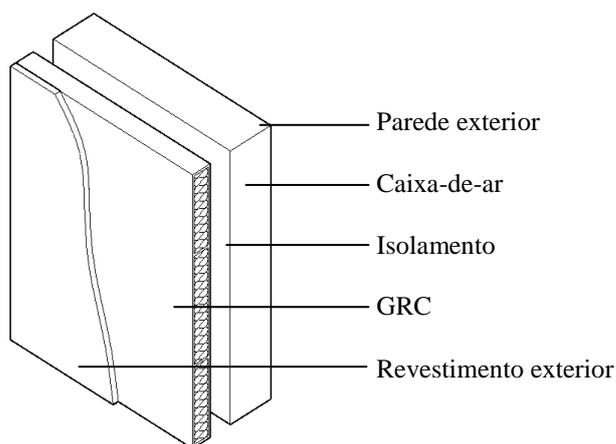
### **2.4.3. Soluções com isolamento térmico na caixa-de-ar**

As soluções de isolamento térmico na caixa-de-ar de paredes duplas consistem no reforço do isolamento por preenchimento da caixa-de-ar com materiais isolantes soltos ou espumas injetadas. Esta solução não altera o aspeto exterior nem o interior das paredes sendo apenas necessário vedar os furos de injeção. No entanto, é fundamental garantir a homogeneidade do isolamento térmico ao longo da parede para garantir um bom desempenho da solução e evitar a formação de pontes térmicas bem como deformações na mesma.

### **2.4.4. Soluções inovadoras**

Neste trabalho são designadas de soluções inovadoras aquelas que contêm particularidades que não permitem a sua colocação nas soluções gerais acima descritas. Uma dessas soluções é o painel prefabricado em GRC (Glassfibre Reinforced Concret – Betão Reforçado com Fibras de Vidro). O betão reforçado com fibras de vidro tem na sua composição cimento de alta resistência, areia siliciosa, água e aditivos na qual são dispersas fibras de vidro alcali-resistentes de pequeno comprimento [DRACE, 2001]. O seu reduzido peso e durabilidade impulsionam a sua aplicação em painéis leves prefabricados, quer para aplicação em obras novas, quer em reabilitação.

Uma das reticências colocadas quanto ao uso da prefabricação é a estética e a escassez de soluções de acabamento exterior permitidas por outros prefabricados. A utilização do GRC permite uma grande liberdade na escolha de formas, cores, desenhos e texturas [Silva, 1998]. Uma outra vantagem dos painéis de GRC prende-se com a geometria, pois ao contrário de outros materiais mais tradicionais que se confinam a peças quase exclusivamente planas e cujas dimensões máximas são determinadas pelas limitações legais dos transportes, nestes painéis de peso reduzido estes limites são pouco relevantes e as peças podem ter desenvolvimento poligonal ou curvo [Silva, 1998]. A melhoria das características térmicas e acústicas dos edifícios, a redução do peso das estruturas existentes, a baixa ou mesmo inexistente necessidade de manutenção são fatores que se associam ao leque de vantagens deste tipo de solução [Silva, 1998]. A Figura 18 ilustra um painel sandwich de GRC aplicado à fachada de um edifício.

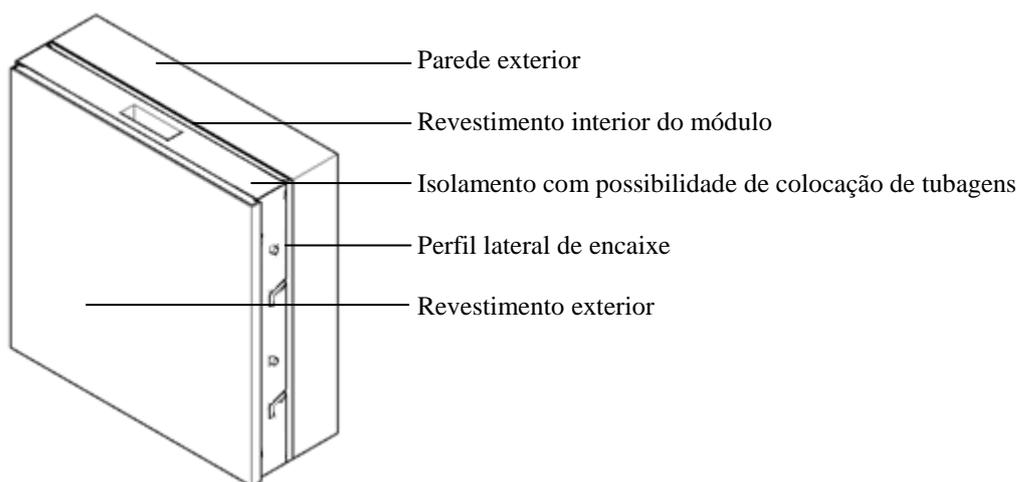


**Figura 18:** Painel sandwich de GRC

Para além do painel de GRC, também foi inserido neste item uma outra solução designada de Módulo de Reabilitação Prefabricado (MRP) para fachadas.

O MRP (Figura 19) foi desenvolvido, na Universidade do Minho pelo Eng. Pedro Silva, no âmbito do projeto Annex 50 da Agência Internacional de Energia (IEA – International Energy Agency) e foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto FCOMP-01-0124-FEDER-007189.

Este módulo tem como propósito o aumento da eficiência energética dos edifícios, a redução da duração dos trabalhos de reabilitação e conseqüente incómodo causado aos residentes, e adicionalmente a redução de encargos económicos inerentes. É totalmente prefabricado o que garante a sua qualidade e a rapidez de produção, é um painel leve e com dimensões que facilitam o seu manuseamento, transporte e colocação. No seu interior podem ser incorporadas tubagens e o revestimento exterior do módulo possui uma vasta gama de cores e texturas oferecendo ao utilizador variedade de escolha [MRP, 2012].



**Figura 19:** Módulo de reabilitação prefabricado

## 2.5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FACHADAS

As fachadas, quando comparadas com outros elementos da envolvente dos edifícios, revestem-se de enorme relevância devido à sua proporção e às suas características estéticas e funcionais.

O património habitacional existente foi em grande parte construído antes da entrada em vigor de qualquer tipo de regulamentação térmica e acústica, sendo a sua eficiência insatisfatória deste ponto de vista. A reabilitação deste património pode, e deve, implementar as melhorias necessárias ao cumprimento dos regulamentos atualmente existentes, reduzindo o consumo energético dos edifícios e aumentando nível de conforto no ambiente interior.

A avaliação do desempenho das soluções construtivas das fachadas nas vertentes da eficiência energética e de isolamento térmico e acústico é importante para definir e desenvolver propostas de intervenção adequadas às necessidades de cada edifício.

De seguida, são apresentados e desenvolvidos alguns conceitos associados ao desempenho térmico e acústico dos edifícios. É feito um apanhado acerca dos regulamentos que existiram sobre estas matérias e das regulamentações atualmente em vigor. São ainda apresentados alguns programas de simulação que permitem a avaliação destes parâmetros de desempenho dos edifícios.

### **2.5.1. Térmica: regulamentação e conceitos**

O estudo do comportamento térmico e energético dos edifícios prende-se com a necessidade de se assegurarem as condições de conforto térmico das pessoas no interior das habitações. O conforto térmico traduz-se pelo bem-estar das pessoas relativamente ao ambiente térmico que as envolve. Este conforto varia de pessoa para pessoa e depende de diversos fatores psicológicos, fisiológicos e socioculturais, pelo que se torna complicada a sua definição exata e a sua satisfação. No entanto, existem vários estudos que definiram critérios que visam assegurar que as condições existentes satisfaçam grande parte dos ocupantes [ASHRAE 55, 2010].

Os estudos podem seguir dois tipos de abordagem: realizados dentro de câmaras climáticas com ambiente controlado ou estudos de campo também designados de abordagem adaptativa. A abordagem adaptativa é assim designada devido à tendência natural das pessoas utilizarem alguns mecanismos para se adaptarem às variações da temperatura interior de forma a sentirem-se de novo confortáveis.

Os estudos de Fanger realizaram-se com salas de ambiente controlado e os resultados obtidos permitiram combinar numa equação um conjunto de variáveis como a atividade e roupa das pessoas, a temperatura do ar, temperatura média radiante, humidade e velocidade do ar. Uma vez que a equação é bastante complexa, Fanger resolveu-a para as combinações de variáveis mais relevantes e o resultado da aplicação da equação de conforto para diferentes níveis de atividade e vestuário foi apresentado em ábacos [Fanger, 1970]. A partir da equação de conforto foi desenvolvido um índice de conforto térmico denominado de voto médio previsto (PMV – Predicted Mean Vote) que traduz numa escala de sete pontos a sensação térmica, desde -3 (muito frio) a +3 (muito quente). A partir do resultado de várias experiências efetuadas a grupos de pessoas Fanger criou um outro índice – percentagem média de pessoas insatisfeitas (PPD – Predicted Percentage Dissatisfied), e relacionou-o com o parâmetro PMV considerando que as pessoas insatisfeitas são as que votam fora do intervalo de -2 (frio) a +2 (quente) [Fanger, 1970]. Estes modelos de cálculo dos índices PMV e PPD servem de base para a norma EN ISO 7730 que utiliza estes índices para a determinação analítica e a interpretação do conforto térmico [ISO 7730, 2005].

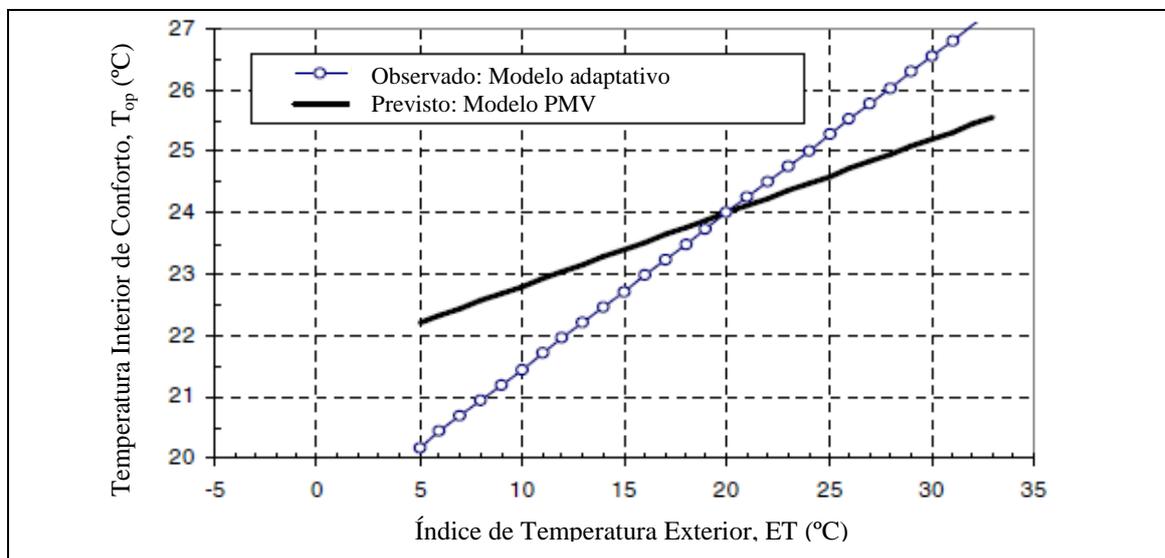
Estudos em campo realizados por Humphrey e Nicol resultaram em 1978 na formulação

de um modelo alternativo ao apresentado por Fanger e indicam que a temperatura interior em que as pessoas sentem conforto está relacionada com a temperatura existente no exterior [Humphreys, 1978]. Assim, através dos dados obtidos em campo a abordagem adaptativa permite determinar a temperatura interior de conforto ( $T_c$ ) em função da temperatura exterior (Equação 1):

$$T_c = a \times T_{ext} + b \quad \text{Eq. 1}$$

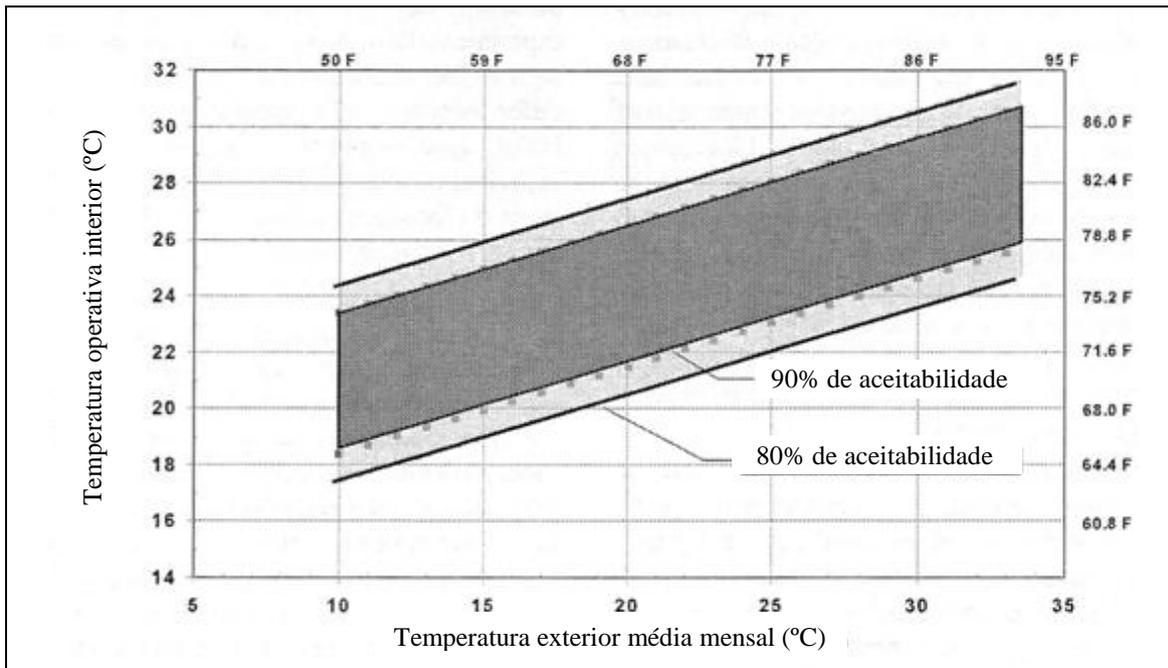
Onde  $a$  e  $b$  são constantes que resultam da análise estatística dos estudos de campo [Humphreys, 1978].

Gail S. Brager e Richard de Dear desenvolveram um estudo que mostrou que o modelo de PMV não se adequa a edifícios com ventilação natural [de Dear, 2001]. Esta análise tem por base um conjunto de 21000 dados compilados a partir do estudo de 160 edifícios, uns com sistemas AVAC e outros com ventilação natural, localizados em diversas zonas climáticas de quatro continentes [de Dear, 2001]. Como é possível observar na Figura 20, o valor previsto pelo modelo PMV não corresponde ao valor observado em campo.



**Figura 20:** Temperaturas de conforto previstas pelo método do PMV e medidas em campo, em edifícios ventilados naturalmente (Fonte: de Dear, 2001)

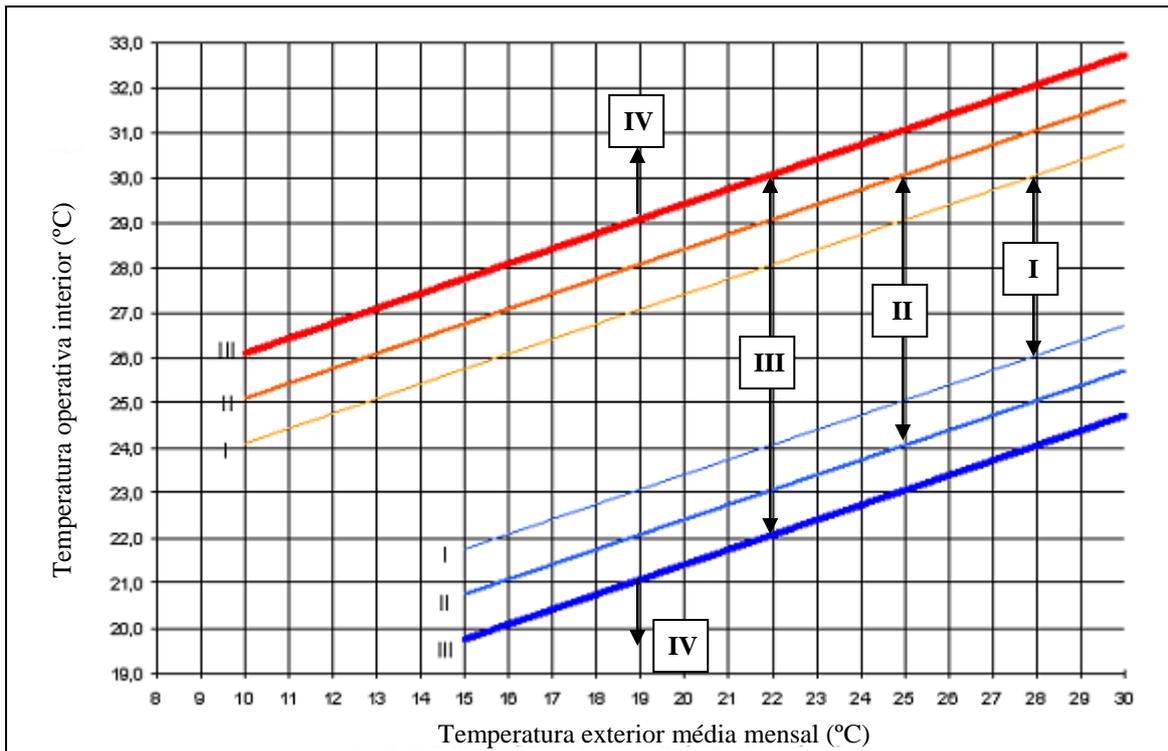
Partindo da relação existente entre os parâmetros PMV e PPD foram definidos os limites de temperaturas correspondentes a 90% e 80% de aceitabilidade (Figura 21).



**Figura 21:** Norma de conforto adaptativo proposta para a ASHRAE 55, para edifícios ventilados naturalmente (Fonte: de Dear, 2001)

Os estudos resultaram numa proposta de norma de conforto adaptativo que, para os edifícios ventilados naturalmente, seria uma alternativa ao método da EN ISO 7730 usado na norma ASHRAE 55-2010.

A norma EN 15251 elaborada pelo Organismo Europeu de Normalização (CEN) especifica os parâmetros e critérios recomendados para o ambiente térmico no interior dos edifícios, qualificando o conforto através de 4 categorias, de acordo com a sensação de conforto e grau de exigência dos utilizadores. No caso de edifícios não climatizados esta norma segue a abordagem adaptativa para definir as categorias de conforto (Figura 22).



**Figura 22:** Valores recomendados da temperatura operativa interior para edifícios não climatizados, em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada (Fonte: EN 15251, 2006)

Para além do estudo do comportamento humano relativamente às variações do clima também importa perceber qual o comportamento dos edifícios aquando dessas variações. Num edifício as trocas de calor ocorrem sempre que houver uma diferença de temperatura entre dois pontos; e pode dar-se por condução, convecção ou radiação. A transferência de calor por condução ocorre entre dois corpos em contato, por convecção dá-se quando um fluido se movimenta sobre um sólido e por radiação dá-se, entre dois corpos, através da propagação de ondas eletromagnéticas [Almeida, 2006].

O coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) de um elemento da envolvente é um conceito que importa reter pois indica a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ele separa [RCCTE, 2006].

Nas construções existem algumas singularidades que possibilitam uma maior perda de calor e que são locais propícios à existência de condensações, chamadas pontes térmicas. Estas pontes térmicas tornam o edifício energeticamente menos eficiente, pois para manter as condições de conforto dos utilizadores aumenta o seu consumo energético e os custos inerentes.

As diretivas, normas e regulamentação específicas que ao longo dos anos têm surgido vêm impor aos edifícios parâmetros cada vez mais rigorosos a fim de os adaptar às exigências da sociedade e do mundo atual.

A Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBDrecast) pretende a redução do consumo de energia e a maior utilização de energia proveniente de fontes renováveis de modo a reduzir a dependência energética da União Europeia e as emissões dos gases com efeito de estufa. *“Em relação à versão anterior, aprovada em 2002, a revisão da Directiva traz alterações significativas, como a abolição do limite de 1000m<sup>2</sup> 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”* [Cardoso, 2010; EPBD, 2010].

Esta nova diretiva pretende [EPBD, 2010]:

- O cumprimento das “metas 20-20-20” que consistem em até 2020 reduzir em 20% as emissões de gases com efeito de estufa, aumentar em 20% a eficiência energética dos edifícios e uma quota de 20% de energia proveniente de fontes renováveis;
- Estabelecer requisitos mínimos para o desempenho energético dos edifícios e soluções construtivas baseados na sua viabilidade económica ao longo do ciclo de vida do edifício;
- A manutenção e inspeção regular dos sistemas de aquecimento e de ar condicionado por pessoal qualificado;
- Aumentar o número de edifícios com necessidades quase nulas de energia já a partir de 2018 para novos edifícios públicos e a partir de 2020 para todos os novos edifícios;
- A afixação dos certificados de desempenho energético nos edifícios públicos com área útil total superior a 500m<sup>2</sup> e em 2015 superior a 250m<sup>2</sup>;
- A apresentação do certificado de desempenho energético para frações autónomas ou edifícios novos, vendidos ou arrendados;
- A apresentação da classe energética na publicidade a um edifício.

Em Portugal a regulamentação térmica relativa aos edifícios de habitação está disposta no Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril – Regulamento das Características de

Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Este regulamento aplica-se a cada uma das frações autónomas de todos os novos edifícios de habitação e de todos os novos edifícios de serviços sem sistemas de climatização centralizados e às grandes intervenções de remodelação ou de alteração na envolvente ou nas instalações de preparação de águas quentes sanitárias dos edifícios de habitação e dos edifícios de serviços sem sistemas de climatização [RCCTE, 2006].

A metodologia de cálculo do RCCTE impõe alguns requisitos mínimos a nível do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ), fator solar dos envidraçados ( $g_{\perp}$ ) e instalação de coletores solares térmicos.

Permite a determinação das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, para arrefecimento e as necessidades globais de energia primária, sendo este último parâmetro utilizado para a definição da classe energética da fração autónoma ou edifício.

As necessidades nominais de energia útil de aquecimento ( $N_{ic}$ ) exprimem a quantidade de energia útil necessária para manter em permanência um edifício ou uma fração autónoma a uma temperatura interior de referência durante a estação de aquecimento.

As necessidades nominais de energia útil de arrefecimento ( $N_{vc}$ ) exprimem a quantidade de energia útil necessária para manter em permanência um edifício ou uma fração autónoma a uma temperatura interior de referência durante a estação de arrefecimento.

As necessidades nominais globais de energia primária ( $N_{ic}$ ) por sua vez traduzem a quantidade de energia primária correspondente à soma ponderada das necessidades nominais de aquecimento ( $N_{ic}$ ), de arrefecimento ( $N_{vc}$ ) e de preparação de águas quentes sanitárias ( $N_{ac}$ ), tendo em consideração os sistemas adotados ou, na ausência da sua definição, sistemas convencionais de referência, e os padrões correntes de utilização desses sistemas [RCCTE, 2006].

As exigências impostas pela nova diretiva levaram à revisão da regulamentação térmica portuguesa, tendo esta sido aprovada em Agosto de 2013 (Decreto-Lei 118/2013) com entrada em vigor a 1 de Dezembro de 2013. A nova diretiva reforça também a importância da reabilitação dos edifícios e do estudo de soluções para esse efeito tendo em conta a relação custo/melhoria.

A forma mais rápida e eficaz de elaborar o estudo das diferentes possibilidades para uma reabilitação eficiente é através da utilização de ferramentas de simulação dinâmica. Para a simulação energética do edifício existem no mercado várias opções: DesignBuilder, EnergyPlus, Ecotect, eQUEST, Visual DOE, etc.. Algumas destas ferramentas foram utilizadas neste trabalho para estudar o desempenho do edifício quando são aplicadas na sua fachada determinadas soluções de reabilitação.

### **2.5.2. Acústica: regulamentação e conceitos**

A acústica, outrora pensada como ciência para estudar a correta distribuição do som num determinado espaço para melhorar a qualidade de audição, hoje é também utilizada como instrumento para estudar o isolamento dos edifícios a sons considerados desagradáveis e incomodativos pelos ocupantes, denominados de ruídos.

Nos meios urbanos e suburbanos tem-se registado um aumento considerável dos valores dos níveis sonoros, com todas as consequências negativas para a saúde, como por exemplo, stress, falta de concentração e cansaço, dando origem ao desenvolvimento de ações de avaliação e correção, por parte de várias entidades envolvidas na problemática do meio ambiente [Patrício, 2010].

A qualidade acústica dos edifícios e o desempenho acústico dos espaços é hoje em dia uma exigência social para o conforto e bem-estar.

Segundo Patrício [2010], a qualidade acústica dos edifícios prende-se essencialmente com a integração urbanística, isolamento sonoro a sons aéreos, isolamento sonoro a sons de percussão, ruído de equipamentos e de instalações e qualidade acústica de espaços fechados.

Neste contexto existem no país leis que visam a redução dos níveis de ruído. Surgiram a Lei de Bases do Ambiente através da Lei n.º 11/87 de 7 de Abril e o primeiro Regulamento Geral do Ruído (RGR) aprovado pelo Decreto-Lei n.º 251/87 de 24 de Junho. A Lei de Bases do Ambiente introduz no Artigo 22º alguns princípios para salvaguardar a saúde e bem-estar das populações dos efeitos nocivos do ruído [LBA, 1987].

O Regulamento Geral do Ruído (RGR) procurou reunir matérias que se encontravam dispersas em várias legislações, e para edifícios de habitação estabeleceu requisitos técnico-funcionais mínimos para o isolamento sonoro médio das fachadas e os índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea e a sons de percussão [RGR, 1987]. Este regulamento foi revisto pelo Decreto-Lei n.º 292/2000 de 14 de Novembro, cujas orientações foram o alargamento do âmbito de aplicação do regulamento, a articulação com a restante disciplina jurídica, nomeadamente urbanística, o reforço do princípio da atuação preventiva, a adoção de figuras de planeamento específicas, a regulação de atividades temporárias geradoras de ruído e do ruído de vizinhança, o aperfeiçoamento do regime sancionatório e a previsão de medidas cautelares [RGR, 2000].

O Decreto-Lei n.º 146/2006 de 31 de Julho transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de Junho de 2002 relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente, e estabelece a elaboração de mapas estratégicos de ruído que determinem a exposição ao ruído ambiente exterior; a prestação de informação ao público sobre o ruído ambiente e seus efeitos e a aprovação de planos de ação baseados nos mapas estratégicos de ruído [DL146, 2006]. O anexo I deste Decreto-Lei foi retificado pela Declaração de Retificação n.º 57/2006 de 31 de Agosto.

O Regulamento Geral do Ruído (RGR) atual foi revisto e aprovado pelo Decreto-Lei n.º 09/2007 de 17 de Janeiro. O regulamento obriga à definição e delimitação de zonas sensíveis e mistas, à elaboração de mapas de ruído municipais, impõe valores limites de exposição ao ruído ambiente exterior, estabelece procedimentos de controlo prévio das operações urbanísticas, regulação da instalação e do exercício das atividades ruidosas permanentes e atividades ruidosas temporárias, define o regime a que estão sujeitas as infraestruturas de transporte e as outras fontes de ruído [RGR, 2007]. Este Decreto-Lei foi retificado pela Declaração de Retificação n.º 18/2007 de 16 de Março e alterado pelo Decreto-Lei n.º 278/2007 de 1 de Agosto.

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) aprovado pelo Decreto-Lei n.º 129/2002 de 11 de Maio e revisto pelo Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho articula-se com o RGR. Aplica-se a edifícios habitacionais e mistos, comerciais industriais ou de serviços, escolares e de investigação, hospitalares, recintos desportivos e estações de transporte de passageiros [RRAE, 2008]. E visa a regulação do conforto

acústico no âmbito da edificação através da imposição parâmetros de desempenho acústico e indicadores de ruído [RRAE, 2008]. Para as reabilitações dos edifícios situados em zonas históricas permite o desagravamento das exigências para que a sua reabilitação seja exequível [RRAE, 2008].

No âmbito destes regulamentos importa definir alguns conceitos relacionados com o desempenho acústico dos edifícios.

Tempo de reverberação ( $T$ ) é o intervalo de tempo necessário para que a energia volumica do campo sonoro de um recinto fechado se reduza a um milionésimo do seu valor inicial [RRAE, 2008].

Isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado ( $D_{2m, nT}$ ) é a diferença entre o nível médio de pressão sonora exterior, medido a 2m da fachada do edifício ( $L_{1,2m}$ ) e o nível médio de pressão sonora medido no local de receção ( $L_2$ ) corrigido da influência das condições de reverberação do compartimento recetor [RRAE, 2008].

Ao valor do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado ( $D_{2m, nT}$ ) por vezes é necessário adicionar o valor do termo de adaptação  $C$  (ruído rosa) ou  $C_{tr}$  (ruído de tráfego rodoviário urbano). Estes termos de adaptação são correções definidas pela EN ISO 717-1, em função das características espectrais do ruído na emissão [RRAE, 2008].

Zona sensível é a área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou para escolas, hospitais ou similares, ou espaços de lazer, existentes ou previstos, podendo conter pequenas unidades de comércio e serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período noturno [RGR, 2007].

Zona mista é a área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja ocupação seja afeta a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível [RGR, 2007].

Para o estudo do desempenho acústico das fachadas dos edifícios habitacionais importa saber qual o seu índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos.

Existem diversos programas de simulação para estudar o impacto acústico em diferentes vertentes. Para a previsão do ruído ambiente é utilizado o software CadnaA; para a previsão de níveis sonoros no interior de salas e escritórios pode ser utilizado o programa CadnaR; o programa ZORBA é utilizado para estudar a absorção sonora dos sistemas porosos com forros perfurados; o ODEON Room Acoustics faz uma estimativa de parâmetros acústicos tais como o tempo de reverberação, nível de pressão sonora e índice de transmissão de som para salas de concerto e ópera, teatros, igrejas, escritórios, restaurantes, estações de metro e de caminhos-de-ferro, terminais de aeroportos, etc. [MRA, 2012]. O software INSUL faz estimativas de perdas de transmissão, índice de redução sonora e isolamento de ruído de impacto [MRA, 2012]. O BASTIAN calcula a transmissão entre quartos adjacentes considerando todos os elementos e sistemas relevantes de transmissão de ruído aéreo [MRA, 2012]. O Acoubat Sound permite calcular a propagação dos sons de condução aérea e de percussão para diversas soluções construtivas [Acoubat, 2010].



## **CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA**

A reabilitação de um edifício deve proporcionar ao mesmo uma melhoria substancial do seu desempenho, nomeadamente a nível térmico e acústico. Estas melhorias asseguram um maior conforto dos habitantes e um menor custo de utilização da habitação.

Neste trabalho é analisado o desempenho de várias soluções de reabilitação de fachadas, aplicando-as a dois casos de estudo: uma habitação unifamiliar e uma habitação multifamiliar. A localização dos edifícios em diferentes zonas do país permite verificar a influência do clima e local de implementação no desempenho das soluções.

Os casos de estudo são edifícios residenciais, pois estes são parte significativa do património edificado português. Inicialmente é feita uma caracterização das habitações originais com a apresentação das peças desenhadas, a descrição das soluções construtivas dos edifícios, materiais utilizados, etc..

Segue-se a definição e caracterização de cada uma das soluções de reabilitação que posteriormente serão aplicadas aos edifícios para serem analisadas quanto à sua performance. Esta análise é realizada com o auxílio de programas de simulação dinâmica no âmbito da térmica. O desempenho acústico das soluções será também estudado com recurso a programas adequados.

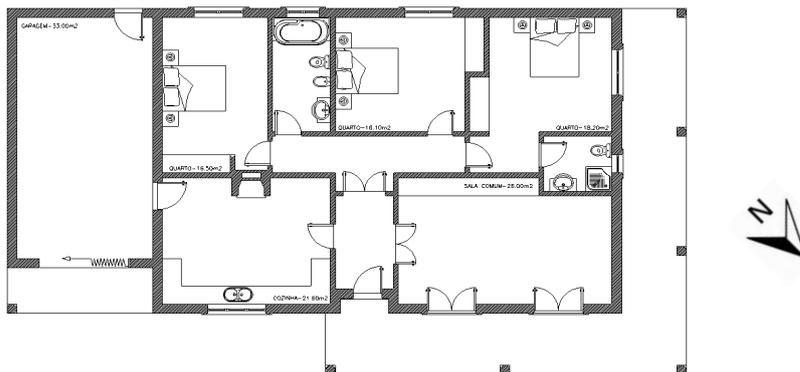
A par do conhecimento do desempenho de cada uma das soluções estudadas, é importante saber também qual o custo da implementação das mesmas, relação custo/qualidade, tempo de retorno do investimento feito, etc. pelo que é feita uma análise económica.

### **3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO**

Os edifícios escolhidos para aplicação das diversas soluções de reabilitação e posterior análise do desempenho das mesmas foram uma moradia unifamiliar e um edifício multifamiliar. Estes edifícios são de seguida caracterizados a nível da sua estrutura, geometria, soluções construtivas, sistemas de climatização, etc..

### 3.1.1. Edifício unifamiliar

A moradia unifamiliar é do tipo T3 (Figura 23), com fachada principal voltada para Nordeste, sendo constituída por um único piso com uma sala comum, uma cozinha, três quartos, duas instalações sanitárias e uma garagem. O edifício possui uma área útil de 122,7m<sup>2</sup> e tem uma área envidraçada de 16,04m<sup>2</sup>, ou seja, 9,37% da área da fachada.



**Figura 23:** Planta do piso do edifício unifamiliar

A fachada apresenta uma solução típica dos anos 1970, ou seja, parede dupla com dois panos de tijolo cerâmico vazado com 11cm de espessura, separados por uma caixa-de-ar de 5cm de espessura sem isolamento térmico.

As paredes divisórias são constituídas por reboco em argamassa de cimento de 2cm, pano de alvenaria de tijolo cerâmico vazado de 11cm e reboco em argamassa de cimento com 2cm.

No que respeita aos acabamentos, todas as paredes são pintadas exceto as da cozinha e instalações sanitárias que possuem revestimento cerâmico, o reboco exterior é em argamassa de cimento pintado de cor clara com 2cm de espessura.

A cobertura, do tipo inclinada, com desvão não habitável, não possui qualquer isolamento térmico na laje de esteira ou na vertente inclinada. O revestimento dos pavimentos é executado em parquet de madeira na zona dos quartos e em mosaico cerâmico nas restantes zonas.

Os vãos envidraçados têm um coeficiente de transmissão térmica (U) de 5,8W/m<sup>2</sup>.°C e um fator solar de 0,72 e são constituídos por vidro simples corrente de 4mm de

espessura, caixilharia em madeira sem quadrícula, com proteção solar feita com recurso a portadas exteriores de madeira de cor escura.

O Quadro 5 explica resumidamente as soluções construtivas que compõem o edifício unifamiliar, com a indicação das espessuras dos materiais e respetiva condutibilidade térmica e massa volúmica.

**Quadro 5:** Características dos elementos construtivos utilizados no edifício unifamiliar

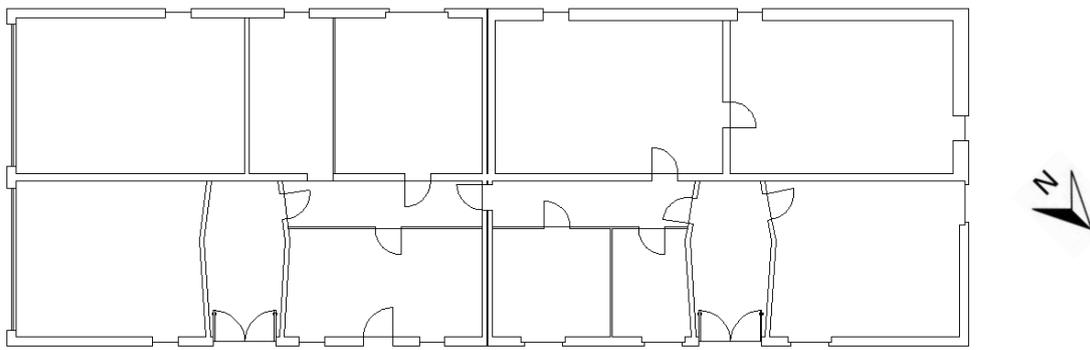
<b>Elementos</b>	<b>Materiais</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b>Condutibilidade Térmica [W/m°C]</b>	<b>Massa Volúmica [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Paredes Exteriores</b>	Reboco argamassa de cimento	0,02	1,30	1900
	Tijolo	0,11	0,27 m <sup>2</sup> C/W	1200
	Caixa-de-ar	0,05	0,18 m <sup>2</sup> C/W	-
	Tijolo	0,11	0,27 m <sup>2</sup> C/W	1200
	Reboco argamassa de cimento	0,02	1,30	1900
<b>Paredes Divisórias</b>	Reboco argamassa de cimento	0,02	1,30	1900
	Tijolo	0,11	0,18 m <sup>2</sup> C/W	1200
	Reboco argamassa de cimento	0,02	1,30	1900
<b>Revestimentos Paredes</b>	Estuque pintado	0,02	0,57	1200
	Cerâmico	0,02	1,30	2300
<b>Pavimento</b>	Betão armado	0,25	0,28 m <sup>2</sup> C/W	1200
<b>Revestimentos Pavimento</b>	Cerâmico	0,02	1,30	2300
	Parquet	0,02	0,18	700
<b>Laje de esteira</b>	Betão armado	0,25	0,28 m <sup>2</sup> C/W	1200
	Estuque	0,02	0,57	1200
<b>Cobertura</b>	Ripas madeira	0,015	0,13	500
	Caixa-de-ar	0,12	0,18 m <sup>2</sup> C/W	-
	Telhas cerâmicas	0,05	1,00	2000
<b>Portas</b>	Madeira densa	0,03	0,23	800
<b>Pilares</b>	Betão armado	0,3	2,00	2500

A ventilação processa-se de forma natural e o aquecimento das águas quentes sanitárias é feito recorrendo a um esquentador a gás com uma eficiência de 0,5.

### 3.1.2. Edifício multifamiliar

O edifício multifamiliar é composto por dois blocos com cave (espaço não útil), três pisos com apartamentos do tipo T2 e sótão com apartamentos do tipo T1 a Sudeste e Noroeste (Figuras 24, 25 e 26).

A fachada na cave é constituída por uma parede simples de betão armado com 30cm e as paredes divisórias deste piso são também simples de betão armado com 15cm de espessura.

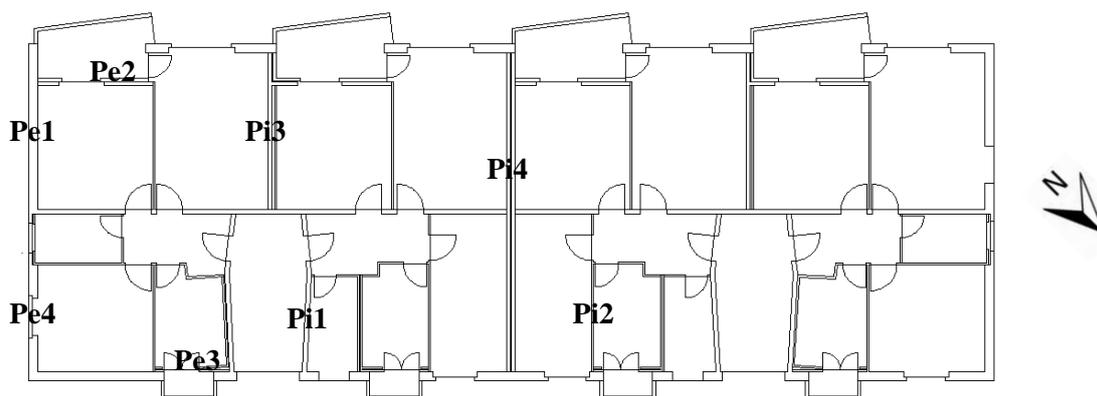


**Figura 24:** Planta da cave do edifício multifamiliar

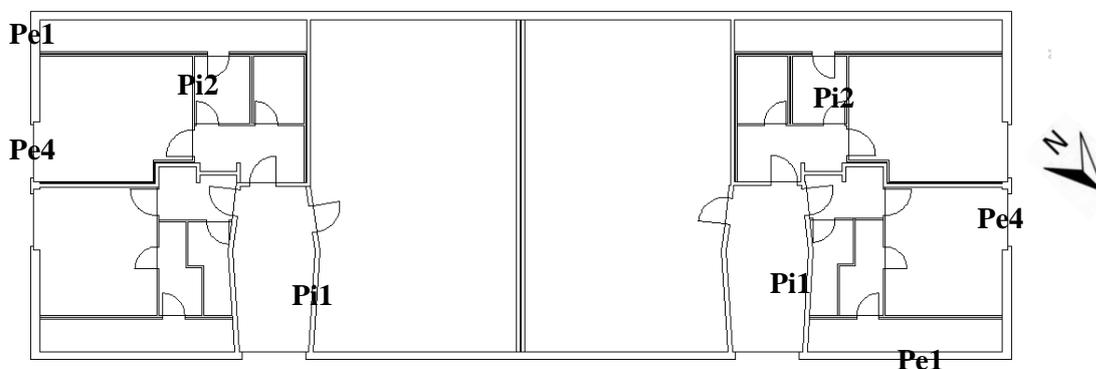
Nos restantes pisos existem paredes exteriores do tipo Pe1, Pe2, Pe3 e Pe4, identificadas nas Figuras 25 e 26. As paredes Pe1 são compostas por (do interior para o exterior) 1cm de estuque, tijolo de 30cm e 1,5cm de reboco mineral. As paredes exteriores que fazem a interceção entre os quartos e as varandas (Pe2) têm (do interior para o exterior) 1cm de estuque, tijolo de 12cm, uma caixa-de-ar de 3cm, tijolo de 10cm e 1,5cm de reboco mineral exterior. Na interceção entre cozinhas e varandas as paredes exteriores (Pe3) são duplas com (do interior para o exterior) 1cm de estuque, tijolo de 6cm, caixa-de-ar com 3cm, tijolo de 6cm e reboco mineral exterior de 1,5cm. As secções de parede onde foram colocados os radiadores (Pe4) são compostas por 1cm de estuque, tijolo de 12cm e reboco mineral com 1,5cm de espessura.

As paredes divisórias dos pisos e sótão diferem a sua constituição consoante a sua posição/função e podem ser do tipo Pi1, Pi2, Pi3 ou Pi4. Sendo assim, as paredes

interiores de interface entre caixa de escadas e apartamentos (Pi1) são compostas por tijolo de 12cm com acabamento em estuque de 1cm; no interior dos apartamentos as paredes divisórias (Pi2) possuem tijolo de 6cm com acabamento em estuque de 1cm em ambas as faces. As paredes de separação entre frações autónomas (Pi3) são duplas com 1cm em estuque, tijolo de 12cm, caixa-de-ar de 3cm, tijolo de 5cm e 1cm em estuque. Por fim, as paredes que fazem a separação entre os dois blocos (Pi4) são constituídas por um pano em tijolo de 12cm, 3cm de caixa-de-ar, tijolo cerâmico vazado de 12cm e acabamento de 1cm de estuque em ambas as faces.



**Figura 25:** Planta dos pisos 1, 2 e 3 do edifício multifamiliar



**Figura 26:** Planta do sótão do edifício multifamiliar

A cobertura inclinada de duas águas é constituída por ripas de madeira, 4cm de lã mineral sob as ripas e telhas cerâmicas (Cob1). Nos espaços não climatizados a cobertura não possui isolamento (Cob2).

Os pavimentos são constituídos por um revestimento inferior de 1cm de estuque, uma laje em betão armado de 30cm, 10cm de argamassa de cimento, com acabamento em parquet de madeira de 2cm em todos os compartimentos (Pav1) exceto cozinhas e

instalações sanitárias cujo acabamento é em mosaico cerâmico (Pav2).

Os vãos envidraçados são em vidro duplo de 6mm com câmara-de-ar de 8mm e caixilharia em madeira e têm um coeficiente de condutibilidade térmica (U) de 2,9 W/m<sup>2</sup>.°C e um fator solar de 0,65. A proteção solar é feita através de persianas exteriores de cor clara.

Nos Quadros 6, 7 e 8 estão compiladas as informações relativas às soluções de paredes exteriores, paredes divisórias e pavimentos e coberturas do edifício multifamiliar e são caracterizados os respetivos materiais.

**Quadro 6:** Características das soluções de paredes exteriores do edifício multifamiliar [Annex50, 2008]

Elementos	Materiais	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m°C]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Cave</b>	Betão armado	0,30	1,35	2400
<b>Pe1</b>	Estuque	0,01	0,70	1400
	Tijolo	0,30	0,47	1200
	Reboco mineral	0,015	0,87	1800
<b>Pe2</b>	Estuque	0,01	0,70	1400
	Tijolo	0,12	0,47	1200
	Caixa-de-ar	0,03	0,18 m <sup>2</sup> °C/W	-
	Tijolo	0,10	0,47	1200
	Reboco mineral	0,015	0,87	1800
<b>Pe3</b>	Estuque	0,01	0,70	1400
	Tijolo	0,06	0,47	1200
	Caixa-de-ar	0,03	0,18 m <sup>2</sup> °C/W	-
	Tijolo	0,06	0,47	1200
	Reboco mineral	0,015	0,87	1800
<b>Pe4</b>	Estuque	0,01	0,70	1400
	Tijolo	0,12	0,47	1200
	Reboco mineral	0,015	0,87	1800

**Quadro 7:** Características das soluções de paredes divisórias e interiores do edifício multifamiliar [Annex50, 2008]

<b>Elementos</b>	<b>Materiais</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b>Condutibilidade Térmica [W/m°C]</b>	<b>Massa Volúmica [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Cave</b>	Betão armado	0,15	1,35	2400
<b>Pi1</b>	Estuque	0,01	0,70	1400
	Tijolo	0,12	0,47	1200
	Estuque	0,01	0,70	1400
<b>Pi2</b>	Estuque	0,01	0,70	1400
	Tijolo	0,06	0,47	1200
	Estuque	0,01	0,70	1400
<b>Pi3</b>	Estuque	0,01	0,70	1400
	Tijolo	0,12	0,47	1200
	Caixa-de-ar	0,03	0,18 m <sup>2</sup> °C/W	-
	Tijolo	0,05	0,47	1200
	Estuque	0,01	0,70	1400
<b>Pi4</b>	Estuque	0,01	0,70	1400
	Tijolo	0,12	0,47	1200
	Caixa-de-ar	0,03	0,18 m <sup>2</sup> °C/W	-
	Tijolo	0,12	0,47	1200
	Estuque	0,01	0,70	1400

**Quadro 8:** Características das soluções de coberturas e pavimentos do edifício multifamiliar [Annex50, 2008]

Elementos	Materiais	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m°C]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Pav1</b>	Parquet	0,02	0,18	700
	Argamassa de cimento	0,08	0,87	1800
	Betão armado	0,30	1,35	2400
	Estuque	0,01	0,70	1400
<b>Pav2</b>	Mosaico cerâmico	0,02	1,30	2300
	Argamassa de cimento	0,08	0,87	1800
	Betão armado	0,30	1,35	2400
	Estuque	0,01	0,70	1400
<b>Cob1</b>	Telhas cerâmicas	0,05	1,00	2000
	Lã mineral	0,04	0,055	60
	Ripas de madeira	0,015	0,13	500
<b>Cob2</b>	Telhas cerâmicas	0,05	1,00	2000
	Ripas de madeira	0,015	0,13	500

O edifício não possui sistemas de ventilação mecânica. O aquecimento dos apartamentos é feito através de radiadores elétricos com uma eficiência de 80% e o aquecimento das águas quentes sanitárias recorre a uma caldeira a gásóleo com um rendimento de 0,7. A área útil de pavimento é de 452m<sup>2</sup> e a área envidraçada é de 148,09m<sup>2</sup>, que corresponde a 13,98% da área da fachada.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO

Um dos problemas encontrados nas fachadas dos edifícios residenciais mais antigos é a falta de isolamento. As soluções utilizadas neste trabalho basearam-se nas soluções apresentadas pelo Guia Técnico de Reabilitação Habitacional – Volume II e enquadraram-se em duas tipologias distintas: soluções com isolamento térmico pelo exterior e soluções com isolamento térmico pelo interior [Paiva, 2006].

As soluções com isolamento térmico pelo exterior compreendem:

- Revestimento independente descontínuo com isolante térmico na caixa-de-ar (solução 1);
- Sistema de isolamento térmico compósito exterior (solução 2);
- Sistema de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados (solução 3).

Dentro das soluções onde o isolamento térmico é feito pelo exterior encontram-se as denominadas soluções inovadoras:

- Painéis de betão reforçado com fibras de vidro – GRC (solução 6);
- Módulo de reabilitação prefabricado – MRP (solução 7).

As soluções com isolamento térmico pelo interior englobam:

- Contra-fachada de alvenaria com isolante na caixa-de-ar (solução 4);
- Contra-fachada de gesso cartonado com isolante na caixa-de-ar (solução 5).

Nos subcapítulos que se seguem caracterizam-se as soluções de reabilitação aplicadas aos casos de estudo. Note-se que as soluções representam uma opção num vasto conjunto de soluções possíveis, nomeadamente no que diz respeito à escolha de materiais e espessuras utilizados. No entanto, nas Soluções 6 e 7 foram mantidos os materiais e espessuras definidos pelos autores [DRACE, 2001; MRP, 2012].

### 3.2.1. Revestimento independente descontínuo com isolamento térmico na caixa-de-ar

No Quadro 9 apresentam-se as características dos materiais que integram a solução de revestimento independente descontínuo com isolamento térmico na caixa-de-ar.

**Quadro 9:** Caracterização da Solução 1

Elemento	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m°C]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
Isolamento - XPS	0,03	0,037	30
Caixa-de-ar	0,03	0,18 m <sup>2</sup> C/W	-
Estrutura de suporte - Alumínio	0,001	209	2700
Revestimento - Placas cerâmicas	0,02	1,300	2300

### 3.2.2. Sistema de isolamento térmico compósito exterior

Esta solução, correntemente denominada ETICS, é descrita no Quadro 10.

**Quadro 10:** Caracterização da Solução 2

Elemento	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m°C]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
Cola - Argamassa	0,003	0,750	1300
Isolamento - EPS	0,04	0,037	20
Camada de base - Argamassa	0,004	0,750	1300
Armadura - Rede de fibra de vidro	0,0005	-	320
Revestimento - Acrílico	0,002	0,517	1800

### 3.2.3. Sistema de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados

Os sistemas de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados também conhecidos por *vêtures* são detalhados no Quadro 11.

**Quadro 11:** Caracterização da Solução 3

Elemento	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m°C]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
Cola - Argamassa	0,003	0,750	1300
Revestimento isolante - EPS	0,05	0,037	20
Paramento protetor – Painel metálico	0,0005	50	7800

### 3.2.4. Contra-fachada

O sistema de contra-fachada no interior da parede a reabilitar pode ser composto por um pano de alvenaria leve (Solução 4) ou placas de gesso cartonado (Solução 5) fixadas à parede através de uma estrutura de suporte. As características de cada uma das soluções encontram-se nos Quadros 12 e 13.

**Quadro 12:** Caracterização da Solução 4

Elemento	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m°C]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
Isolamento - XPS	0,03	0,037	30
Caixa-de-ar	0,03	0,18 m <sup>2</sup> °C/W	-
Tijolo	0,11	0,18 m <sup>2</sup> °C/W	1200
Revestimento interior - Argamassa	0,015	1,300	1900

**Quadro 13:** Caracterização da Solução 5

Elemento	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m°C]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
Isolamento - XPS	0,03	0,037	30
Caixa-de-ar	0,03	0,18 m <sup>2</sup> °C/W	-
Estrutura de suporte - Alumínio	0,001	209	2700
Gesso cartonado	0,013	0,250	750
Revestimento interior - Argamassa	0,015	1,300	1900

### 3.2.5. Painel sandwich de GRC

O painel sandwich de GRC apresenta os materiais e características presentes no Quadro 14.

**Quadro 14:** Caracterização da Solução 6 [DRACE, 2001]

Elemento	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m°C]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
Face interior do painel – GRC	0,01	0,570	1990
Isolamento – EPS	0,08	0,047	12
Face exterior do painel – GRC	0,01	0,570	1990
Revestimento exterior – Argamassa	0,01	1,300	1900

### 3.2.6. Módulo de reabilitação prefabricado

O módulo de reabilitação prefabricado (MRP) é constituído pelos materiais indicados no Quadro 15.

**Quadro 15:** Caracterização da Solução 7 [MRP, 2012]

Elemento	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m°C]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
Estrutura de suporte – Aço	0,0015	50	7800
Revestimento interior – Alumínio	0,006	230	2700
Isolamento – Aglomerado negro de cortiça	0,06	0,040	130
Isolamento – XPS	0,12	0,037	30
Perfis laterais – Aço	0,0015	50	7800
Revestimento exterior – Alumínio	0,006	230	2700

### 3.3. SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO

Encontram-se disponíveis no mercado diversas ferramentas de simulação desenvolvidas por entidades ligadas às áreas da térmica e do desempenho energético que permitem o estudo do desempenho dos edifícios relativamente à sua eficiência energética e ao conforto térmico dos seus utilizadores. As ferramentas de simulação dinâmica utilizadas para avaliar o desempenho térmico dos casos em estudo foram o DesignBuilder, EnergyPlus e Therm.

O DesignBuilder é um *software* de interface gráfico do EnergyPlus que permite uma fácil introdução da geometria do edifício mesmo que este seja de maior complexidade, a análise de consumos de energia bem como o desempenho do modelo em estudo.

O programa utiliza o OpenGL para modelar os edifícios através da criação de blocos desenhados em 3D sendo também possível importar ficheiros de CAD para auxiliar na criação de geometrias 3D. A estrutura hierarquizada do programa permite a introdução ou alteração das características do edifício a vários níveis, desde o edifício a nível global até às soluções construtivas que o compõem.

Nas simulações são usados os ficheiros climáticos com informação horária do local onde se insere o edifício. É possível verificar qual o desempenho e definir o intervalo de tempo dos resultados obtidos: sub-horário, horário, diário, mensal ou anual.

Os parâmetros que o programa permite analisar são os seguintes:

- Consumo de energia discriminada por fim;
- Temperatura do ar interior, temperatura média radiante, temperatura operativa e humidade relativa;
- Índices de conforto térmico;
- Informação climatérica do local;
- Transmissão de calor através da envolvente do edifício;
- Cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento;
- Emissões de CO<sub>2</sub>.

Podem ser exportados ficheiros do tipo IDF (Input Data File) para serem utilizados em programas de simulação como o EnergyPlus. Também é possível a exportação do modelo gerado no DesignBuilder para outras aplicações, tais como o AutoCAD, Microstation, Sketchup, utilizando ficheiros num formato de desenho (dxf) [Manual DB, 2008].

O EnergyPlus é uma ferramenta de simulação desenvolvida pelo US Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy, Lawrence Berkeley National Laboratory e permite avaliar o desempenho térmico dos edifícios. Foi criado a partir dos programas BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2 (USA Department Of Energy) e utiliza a linguagem de programação Fortran90. É acompanhada por um programa de gestão da simulação (EP-Launch) e por um interface para a introdução de dados (IDF Editor).

Este *software* possibilita um maior rigor na modelação da geometria do edifício, a integração de modelos que facilitam os estudos de otimização energética e pode ser usado com diferentes interfaces e ferramentas de análise de resultados, permite a simulação simultânea e integrada das zonas térmicas do edifício e sistemas AVAC, com possibilidade de definir intervalos de tempo para a simulação entre 10 minutos até 1 hora. Os ficheiros de entrada e saída de dados, bem como os ficheiros climáticos são facilmente editáveis. O programa permite a modelação detalhada em várias vertentes

desde os sistemas de AVAC, ao conforto térmico dos ocupantes, modelo de céu anisotrópico, sistemas de iluminação, ventilação, etc. [Manual EP, 2008].

Os ficheiros de saída de dados mais importantes são:

- O ficheiro de erros (.err);
- O ficheiro com os resultados da simulação (.eso);
- O ficheiro com as variáveis de saída (.rdd);
- O ficheiro de desenho do edifício (.dxf).

Os ficheiros de resultados contêm os resultados em formato de texto separado por vírgula e podem ser facilmente exportados para uma folha de cálculo.

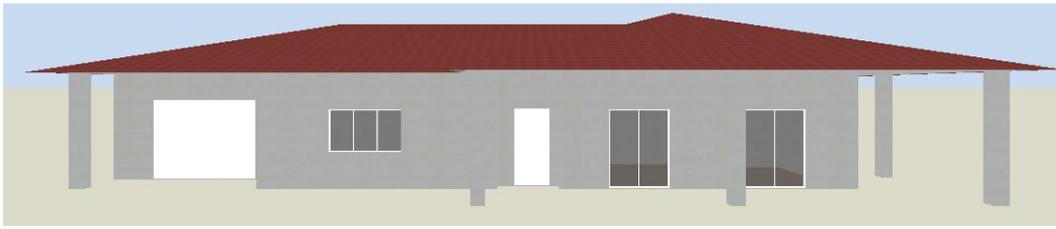
O THERM<sup>TM</sup>, desenvolvido pelo Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), é um programa de elementos finitos 2D que permite modular os efeitos de transferência de calor em componentes dos edifícios como janelas, paredes, fundações, coberturas, etc.. Esta análise permite identificar as pontes térmicas que possam existir no edifício, determinar o coeficiente de transmissão térmica (U) e a resistência térmica (R) de uma solução e as temperaturas diretamente relacionadas com problemas de condensação, humidade e integridade estrutural [Therm, 1998].

Para a análise 2D do programa foi escolhida para cada solução de reabilitação aplicada aos casos de estudo, uma ou mais secções onde devido à existência de determinadas singularidades possam surgir pontes térmicas. Nas Figuras 27 a 34 mostram-se as secções estudadas para cada solução de reabilitação.

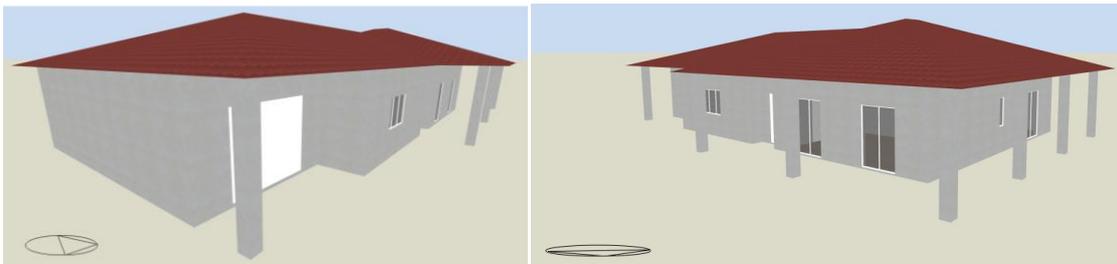
### **3.3.1. Análise do desempenho energético**

#### **3.3.1.1. Edifício unifamiliar**

O programa DesignBuilder foi utilizado para a modelação e simulação do edifício unifamiliar. As Figuras 27 e 28 apresentam algumas vistas da modelação da geometria do edifício unifamiliar feita no programa.

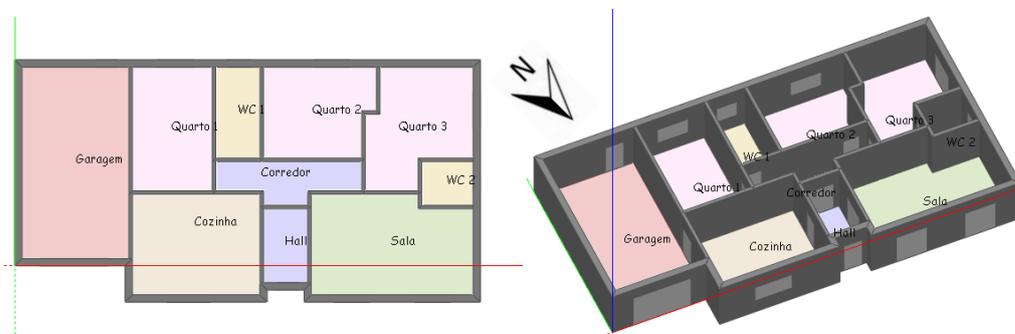


**Figura 27:** Alçado principal do edifício unifamiliar no modo de visualização do DesignBuilder



**Figura 28:** Perspetivas do edifício unifamiliar no modo de visualização do DesignBuilder

Apesar da vasta base de dados que o programa possui foi necessário introduzir alguns materiais e respetivas características, sendo posteriormente definidas as soluções construtivas existentes. Na Figura 29 mostram-se os compartimentos do edifício unifamiliar, onde a cada elemento (parede, pavimento, janela) foi atribuída a respetiva solução construtiva anteriormente definida.



**Figura 29:** Modelação das zonas do edifício unifamiliar no DesignBuilder

Os perfis de ocupação, iluminação e equipamentos foram definidos de acordo com os resultados obtidos por Osvaldo Sousa [Sousa, 2009] para edifícios semelhantes em termos de área e número de ocupantes.

Foram também considerados alguns aspetos regulamentares de referência, indicados pelo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios [RCCTE, 2006], nomeadamente no que diz respeito ao valor mínimo de renovações de ar por hora ( $0,6h^{-1}$ ); às temperaturas de conforto de referência durante a estação de

aquecimento e de arrefecimento (20°C e 25°C, respetivamente); a água da rede pública de abastecimento é disponibilizada a uma temperatura média anual de 15°C e deve ser aquecida a uma temperatura de 60°C; o sistema de arrefecimento ambiente considerado, uma vez que não estava previsto, foi uma máquina frigorífica com COP de 3 [RCCTE, 2006].

A iluminância para as atividades em cada espaço foi definida com base nas recomendações de António Santos (LNEC) para o plano de trabalho em edifícios residenciais [Santos, 2003].

Os locais de implantação do edifício para posterior simulação situam-se em Bragança, Guimarães, Coimbra, Évora e Lisboa. Os critérios para a sua escolha prendem-se com a severidade que o clima local apresenta (Bragança e Évora), a sua amplitude térmica, a disposição geográfica e o peso da população (Coimbra e Lisboa).

Os dados relativos ao local de implementação do edifício que se apresentam no Quadro 16 foram retirados dos ficheiros climáticos de cada local e correspondem à sua latitude, longitude, altitude e temperaturas médias mensais. Esses ficheiros são disponibilizados no *site* do programa EnergyPlus.

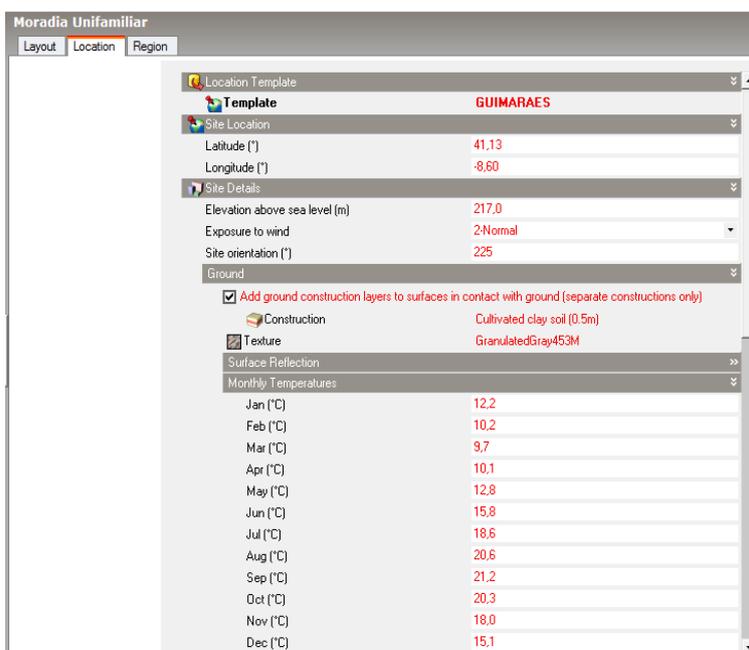
**Quadro 16:** Dados relativos aos locais de implementação do edifício

Dados	Bragança	Guimarães	Coimbra	Évora	Lisboa
Latitude [°]	41,80	41,13	40,20	38,57	38,72
Longitude [°]	-6,73	-8,6	-8,42	-7,9	-9,13
Altitude [m]	692	217	140	321	71
Janeiro [°C]	5,2	12,16	14,7	9,9	11,4
Fevereiro [°C]	4,5	10,19	12,2	9,4	10,9
Março [°C]	5,8	9,65	10,6	10,4	11,8
Abril [°C]	7,7	10,12	10,1	12	13,1
Mai [°C]	12,8	12,78	11,1	16,2	16,6
Junho [°C]	16,8	15,77	13,2	19,4	19,3
Julho [°C]	19,4	18,58	15,8	21,5	21,1

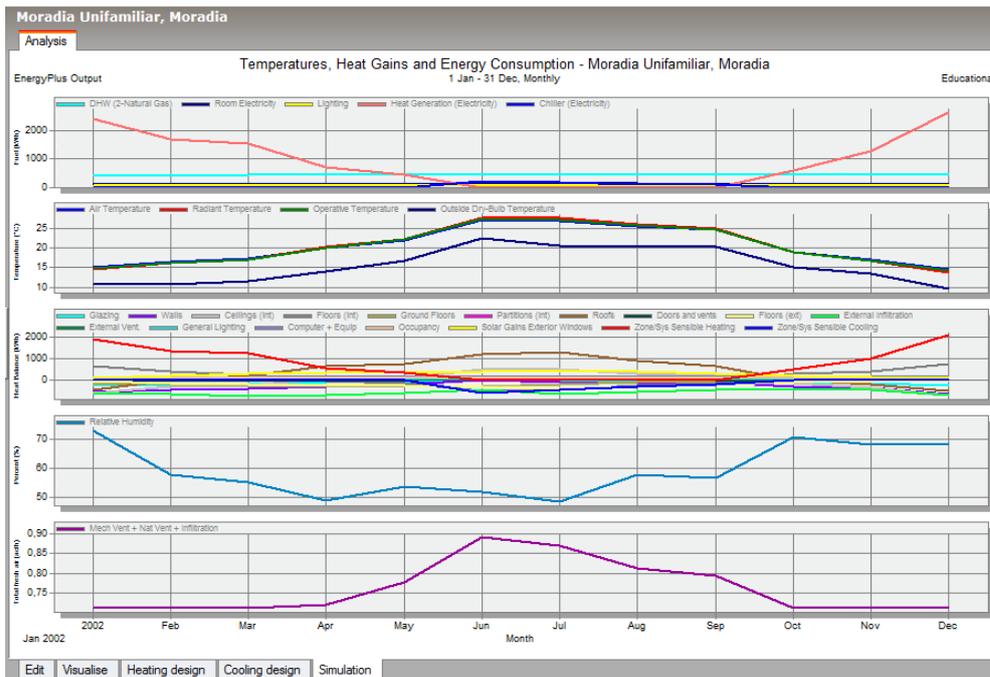
**Quadro 16:** Dados relativos aos locais de implementação do edifício (continuação)

Dados	Bragança	Guimarães	Coimbra	Évora	Lisboa
Agosto [°C]	20,2	20,62	18,4	22,2	21,7
Setembro [°C]	18,9	21,21	20,1	21,1	20,7
Outubro [°C]	15,8	20,25	20,5	18,6	18,6
Novembro [°C]	11,7	17,95	19,5	15,2	15,8
Dezembro [°C]	7,9	15,05	17,4	12,1	13,2

A Figura 30 mostra a colocação dos dados relativos à localização do edifício unifamiliar no programa DesignBuilder.

**Figura 30:** Colocação dos dados relativos à localização do edifício no DesignBuilder

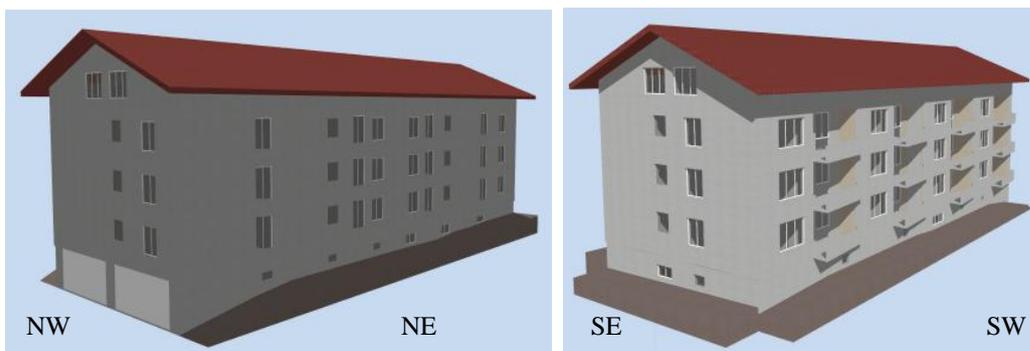
Na simulação usando o DesignBuilder é possível escolher quais as variáveis que se pretendem avaliar, qual o período de tempo a simular e apresentar os resultados obtidos sob forma de gráfico e/ou tabela (Figura 31). Estes resultados podem ser facilmente exportados para um ficheiro do tipo *.txt* ou *.dat* para posterior análise.



**Figura 31:** Apresentação dos resultados obtidos pelo DesignBuilder

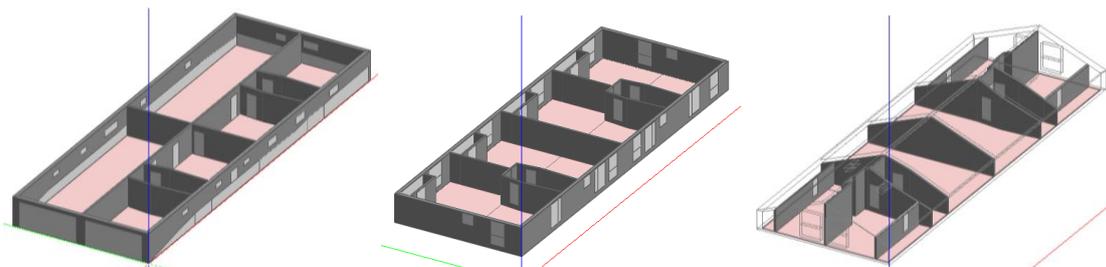
### 3.3.1.2. Edifício multifamiliar

O edifício multifamiliar foi inicialmente modelado no programa DesignBuilder (Figura 32), tendo sido depois exportados os ficheiros para o EnergyPlus para ajustar o modelo criado às características do edifício em estudo.



**Figura 32:** Modelo do edifício multifamiliar no DesignBuilder

O modelo do edifício multifamiliar foi desenvolvido de acordo com a sua geometria e as características das soluções construtivas (Figura 33).



**Figura 33:** Modelação da cave, pisos e sótão do edifício multifamiliar no DesignBuilder

No DesignBuilder foram criados os ficheiros com o funcionamento horário do equipamento para aquecimento, para arrefecimento e para aquecimento das águas sanitárias, respetivamente. A ocupação é introduzida no programa através do número de pessoas por metro quadrado. Sendo a densidade ocupacional do edifício multifamiliar é de 0,03 pessoas/m<sup>2</sup>. A taxa de consumo de água neste edifício é de 1,05 l/m<sup>2</sup>.dia e a taxa de renovação de ar é de 8,5 l/s pessoa [Annex50, 2008].

Visto que o espaço interior de cada apartamento é semelhante entre si, em vez de se criar uma zona para cada compartimento de cada apartamento, foi definido o apartamento como sendo uma zona. Isto permite reduzir a quantidade de informação a introduzir no modelo e assim diminuir o tempo de computação. As paredes divisórias suprimidas no modelo têm de ser posteriormente consideradas como massa interna.

Os locais escolhidos para a implementação do edifício multifamiliar são os mesmos que foram escolhidos para o edifício unifamiliar, ou seja, Bragança, Guimarães, Coimbra, Évora e Lisboa. Após a introdução de dados no DesignBuilder exportou-se o ficheiro de dados IDF para o programa EnergyPlus. Neste programa foi feito o ajuste do modelo, nomeadamente com a introdução da massa interna correspondente às paredes divisórias.

A Figura 34 mostra o editor de ficheiros do tipo IDF do EnergyPlus com a lista de tópicos de informação e a grelha de entrada de dados. No fim da lista existe um item (Report Variable) que permite a escolha das variáveis que serão colocadas no ficheiro de resultados.

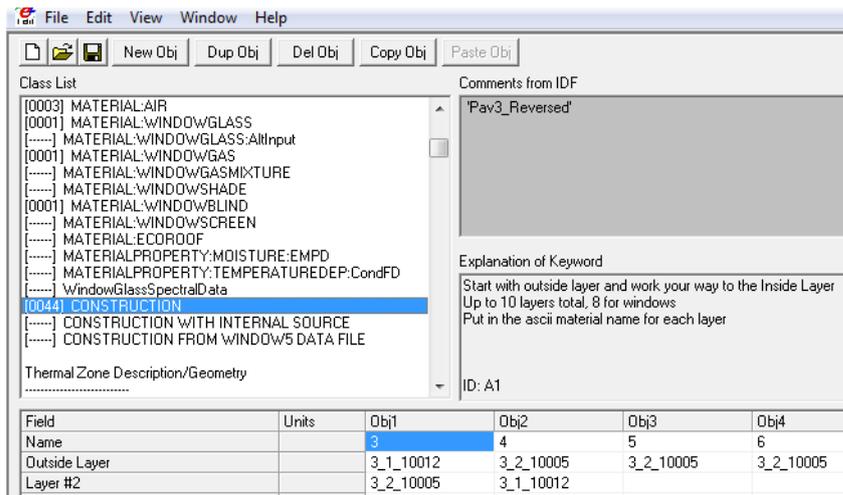


Figura 34: Editor de ficheiros IDF do programa EnergyPlus

### 3.3.2. Análise das pontes térmicas

Para a Solução 1 as secções analisadas foram a zona de encaixe do revestimento (1) e as zonas de ligação mecânica à parede existente (2 e 3) (Figura 35).

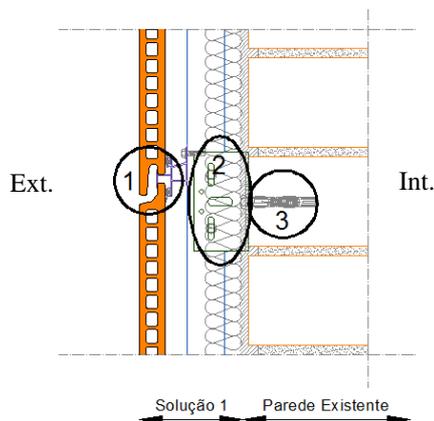
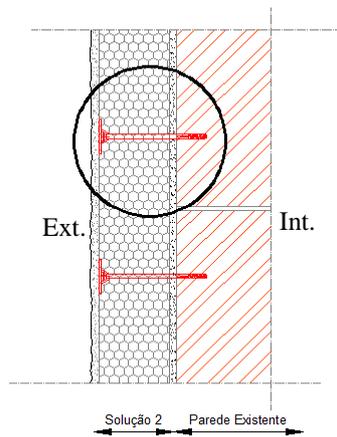


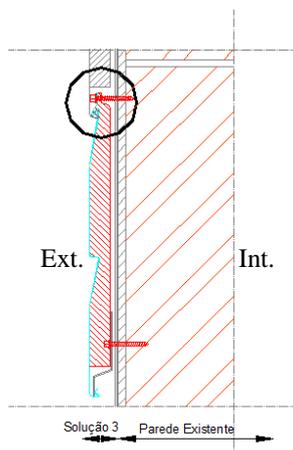
Figura 35: Secção de corte da Solução 1

Para a Solução 2 foi escolhida a zona de ligação mecânica entre a solução de reabilitação e fachada existente (Figura 36).



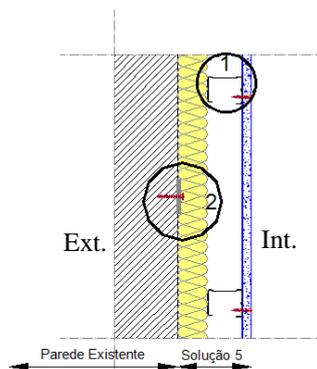
**Figura 36:** Solução 2 – identificação da secção analisada no THERM

Também para a Solução 3 foi escolhida a secção correspondente à zona de ligação mecânica da solução de reabilitação à fachada (Figura 37).



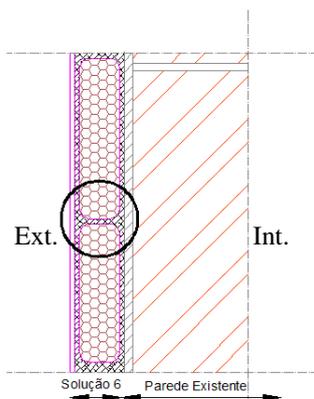
**Figura 37:** Solução 3 – identificação da secção analisada no THERM

Na Solução 4 foi escolhida a zona das juntas da alvenaria de tijolo (ver Anexos). Na Figura 38 estão identificadas as secções da Solução 5 referentes às ligações mecânicas.



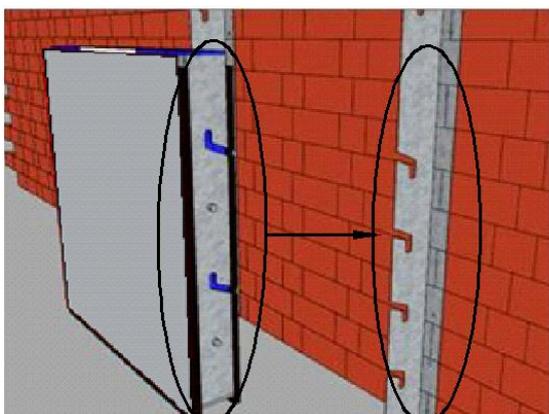
**Figura 38:** Solução 5 – identificação das secções analisadas no THERM

A Figura 39 representa o painel sandwich de GRC e a secção analisada corresponde às nervuras em GRC.



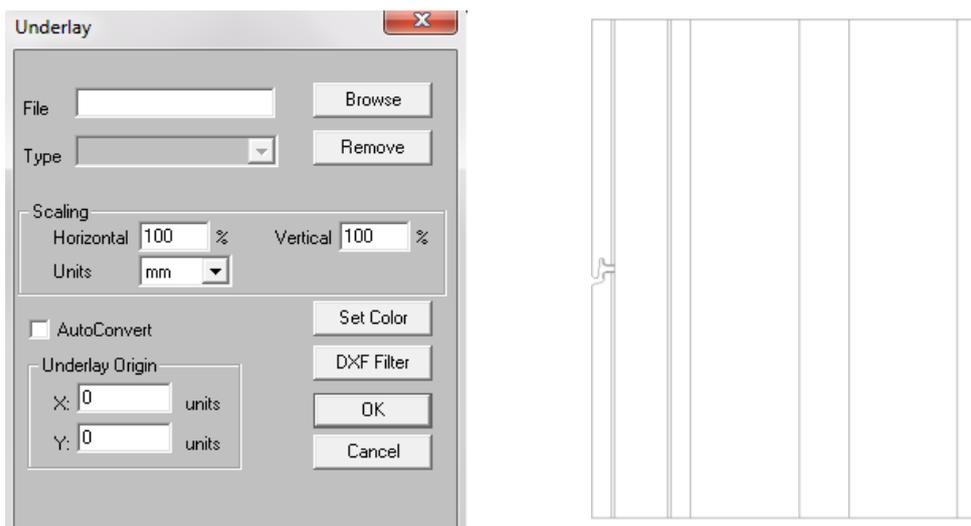
**Figura 39:** Solução 6 – identificação da secção analisada no THERM

A Solução 7 apresenta uma zona de encaixe do painel à estrutura de suporte e foi essa a secção escolhida para análise no THERM (Figura 40).



**Figura 40:** Solução 7 – identificação da secção analisada no THERM

Este programa permite importar de forma rápida um ficheiro do Autocad do tipo DXF como “*underlay*” facilitando o desenho da secção a estudar (Figura 41). Cada polígono fechado desenhado representa um material que pode ser escolhido na base de dados do programa ou definido e gravado pelo utilizador.



**Figura 41:** Exemplo de importação de “*underlay*”

O programa gera automaticamente uma malha e utiliza o método de elementos finitos para estudar a transferência de calor por condução em 2D. Os resultados podem ser apresentados sob a forma de linhas isotérmicas ou o seu respetivo diagrama de cores, vetores de fluxo de calor, temperaturas, linhas de fluxo constante ou respetivo diagrama de cores. O programa também calcula os valores do coeficiente de transmissão térmica (U) da secção em estudo.

### 3.3.2.1. Edifício unifamiliar e multifamiliar

O programa THERM foi utilizado para estudar a ocorrência de pontes térmicas nas fachadas dos edifícios unifamiliar e multifamiliar. Nas simulações foram escolhidas apenas duas localidades – Bragança e Évora – uma vez que, segundo o RCCTE [RCCTE, 2006], pertencem a zonas climáticas com Inverno mais rigoroso e Verão mais rigoroso, respetivamente.

Inicialmente para cada solução de reabilitação aplicada em cada um dos edifícios em estudo foi determinada qual a secção mais propícia à existência de pontes térmicas. Essas secções foram importadas do Autocad e redesenhadas no THERM tendo em conta o tipo de material. Após a escolha dos materiais é necessário atribuir as condições-fronteira à envolvente da secção, as quais o programa por definição considera adiabáticas, ou seja, sem trocas de calor por condução. Tal como para os materiais,

também é possível criar novas condições-fronteira diferentes das existentes na base de dados.

As condições-fronteira de convecção do modelo simplificado requerem apenas a temperatura e a condutibilidade térmica superficial (*film coefficient*).

Neste estudo (edifício unifamiliar e multifamiliar) para as temperaturas exteriores foram consideradas apenas as temperaturas extremas verificadas no país tendo sido considerada a temperatura mais baixa de Bragança (-11,7°C) e a mais elevada de Évora (38,4°C) e para o interior do edifício foram consideradas as temperaturas de conforto de referência do RCCTE [RCCTE, 2006], 20°C e 25°C, respetivamente. As temperaturas exteriores de Bragança e Évora foram retiradas dos ficheiros climáticos do programa EnergyPlus. A duração da estação de aquecimento e arrefecimento foi determinada de acordo com o definido no RCCTE [RCCTE, 2006]. A condutibilidade térmica superficial foi calculada com base nos valores de resistência térmica superficial apresentados pelo RCCTE [RCCTE, 2006].

As condições-fronteira, apresentadas no Quadro 17, mantêm-se quer para o modelo do edifício unifamiliar quer para o edifício multifamiliar.

**Quadro 17:** Condições-fronteira utilizadas no THERM

Condição-fronteira	Temperatura ambiente [°C]	Condutibilidade Superficial [W/m <sup>2</sup> .K]
<b>Interior Inverno</b>	20	7,69
<b>Interior Verão</b>	25	7,69
<b>Exterior Bragança Mínima</b>	-11,7	25
<b>Exterior Évora Máxima</b>	38,4	25

Após a definição da geometria da secção, os materiais que a constituem e a aplicação das condições-fronteira é possível efetuar as simulações. O programa cria ainda um relatório com todos os dados de entrada que foram introduzidos pelo utilizador e com os resultados da simulação (Figura 42).

```

U-factors
Name          Length  Basis      U-factor
              mm      W/m2-K
-----
U int         500.00  Total Length  0.9401
U ext         576.60  Total Length  0.8152

Solid Materials
Name          Conductivity  Emissivity
              W/m-K
-----
Argamassa    1.30         0.87
Tijolo       0.41         0.94
Aluminio - suporte  209.00      0.90
XPS          0.04         0.60
Cerâmico    1.30         0.94

Cavities
Name: Caixa-de-ar
Gas Fill: Air
Convection Model: NFRC
Radiation Model: Standard

Poly Heat      Side 1      Side 2      Dimension  Nu    Keff  Cavity
ID  Flow       Temp  Emis  Temp  Emis  Horz.  Vert.  #    W/m-K  Height
   Dir
-----
  6  Horizontal  15.00  0.90  5.00  0.90  50.00500.00  3.43  0.2919  N/A
 17  Horizontal  7.00  0.90 -4.00  0.90  4.07246.24  1.00  0.0398  N/A
 19  Horizontal  7.00  0.90 -4.00  0.90  4.07246.24  1.00  0.0398  N/A

Glazing Systems
None

Standard Boundary Conditions
Name          Temperature  Film Coefficient
              C      W/m2-K
-----
Interior Inverno  20.00      7.690
Ext Bragança Min -11.70     25.000

Calculation Specifications
-----
Mesh Parameter : 8
Estimated Error: 3.6%
Calculations done in Version 6.2.18.0
    
```

**Figura 42:** Exemplo de um relatório de resultados obtidos no THERM™

### 3.4. SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO ACÚSTICO

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) indica que os espaços onde deve ser verificado o isolamento a sons de condução aérea são os quartos e zonas de estar [RRAE, 2008]. No estudo do comportamento acústico de um edifício deve ser verificado o nível de isolamento sonoro a sons de condução aérea e a sons de percussão, ou seja, devem ser analisados compartimentos adjacentes e sobrepostos a fim de verificar o nível de isolamento sonoro conferido por paredes interiores e pavimentos interiores. O RRAE, no n.º 1 do artigo 5º indica que os edifícios de habitação têm de cumprir os seguintes requisitos acústicos relativamente ao índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos:

- $D_{2m, nT, w} \geq 33$  dB – Zonas mistas ou zonas sensíveis reguladas pelas alíneas c), d) e e) do n.º 1 do artigo 11º do Regulamento Geral do Ruído (RGR);
- $D_{2m, nT, w} \geq 28$  dB – Zonas sensíveis reguladas pela alínea b) do n.º 1 do artigo 11º do RGR;
- Aos valores limite acima referidos acrescem 3dB quando se verifica o disposto no n.º 7 do artigo 12º do RGR (zonas abrangidas por um plano municipal de redução de ruído ou desde que não exceda em mais de 5dB(A) os valores limite de exposição e que o projeto acústico considere valores de índice de redução sonoro a sons de condução aérea normalizado,  $D_{2m, n, w}$  superiores em 3dB aos valores indicados nas alíneas anteriores);
- Quando a área translúcida for superior a 60% da fachada deve ser adicionado ao índice  $D_{nT, w}$  o termo de adaptação apropriado  $C$  ou  $C_{tr}$  conforme o tipo de ruído dominante na emissão, mantendo-se os valores limite acima referidos.

No estudo do desempenho térmico das soluções de fachada importa apenas verificar qual o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado das mesmas ( $D_{2m, nT, w}$ ). O desempenho acústico dos edifícios unifamiliar e multifamiliar antes e após a aplicação de cada uma das soluções de reabilitação de fachada foi previsto através do *software* Acoubat Sound, que permite avaliar as características acústicas de uma solução construtiva [Acoubat, 2010].

O programa não permite a modelação dos espaços de acordo com a geometria exata dos mesmos (apenas permite definir espaços retangulares), por isso foi criado um espaço com volume, área de fachada opaca e área de envidraçado igual aos compartimentos avaliados.

Após a definição da geometria dos compartimentos aos quais o programa atribui soluções construtivas por defeito é necessário redefinir estas soluções de acordo com a opção estudada. As soluções de reabilitação estudadas não se encontram na base de dados do programa e por isso têm de ser adicionadas. Para isso, o programa requer a curva de estimativa de isolamento sonoro das diversas soluções construtivas que compõem o compartimento. Esta curva pode ser determinada através da realização de ensaios laboratoriais acústicos mas uma vez que não era possível a montagem das soluções e respetiva análise laboratorial, essa curva foi desenhada recorrendo à lei da massa.

A lei da massa teórica refere que para um determinado elemento, de rigidez nula, o índice de redução sonora para um som com determinada frequência, está diretamente relacionado com a massa desse elemento [Almeida, 2007]. A lei da massa experimental indica que para um elemento de separação duplo pesado, ou seja, com massa igual ou superior a  $200\text{kg/m}^2$  o isolamento sonoro para a frequência de  $500\text{Hz}$  ( $R_{(500\text{Hz})}$ ) é dado pela Equação 2.

$$R_{(500\text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} + \text{Dif} [\text{dB}] \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

m – Massa do elemento de separação [ $\text{kg/m}^2$ ];

Dif – Acréscimo de isolamento que depende das características da caixa-de-ar e dos panos que compõem a parede [dB] (Equação 3).

$$\text{Dif} = A + B - C [\text{dB}] \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

A – Subtotal de acréscimo do isolamento devido à existência da caixa-de-ar [dB];

B – Subtotal de acréscimo de isolamento devido à existência de material absorvente na caixa-de-ar [dB];

C – Subtotal de redução de isolamento devido aos panos serem muito diferentes [dB].

Os subtotais A, B e C usados para a determinação do valor de Dif encontram-se no Quadro 18.

**Quadro 18:** Valores de acréscimo do isolamento pela existência de caixa-de-ar [Mendonça, 2004]

<b>Panos desligados não muito diferentes</b>	
Características da Caixa-de-ar:	<b>A [dB]</b>
Caixa-de-ar de 1cm e panos de massas diferentes	2
Caixa-de-ar de 2 a 4cm	3 a 4
Caixa-de-ar de 5 a 10cm	5
Material absorvente na Caixa-de-ar:	<b>B [dB]</b>
1cm de material absorvente	1
2 a 4cm de material absorvente	2
5 a 10cm de material absorvente	3 a 4
<b>Panos muito diferentes</b>	<b>C [dB]</b>
Paredes mistas, tijolo + placas de gesso cartonado, pavimentos com teto falso	1 a 4
A + B = 1 a 4	2
A + B = 5 a 6	3
A + B = 7 a 9	4

À curva obtida é necessário introduzir correções devido aos modos próprios de vibração dos painéis, devido à frequência crítica dos materiais, devido à frequência de ressonância do conjunto da massa/caixa-de-ar e devido à frequência de ressonância da caixa-de-ar. As quebras obtidas apenas são consideradas quando afetam a gama audível (100Hz – 3150Hz).

As frequências obtidas para os modos próprios de vibração não afetam a gama audível (100Hz - 3150Hz) e por isso não foram contabilizados.

A frequência crítica ( $f_c$ ) é a frequência mais baixa a que ocorre o efeito de coincidência e é dada pela Equação 4.

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 \times h} \times \sqrt{\frac{\rho}{E}} \text{ [dB]} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

- c – Velocidade de propagação do som ao nível do mar [m/s];
- h – Espessura do elemento [m];
- $\rho$  – Densidade do material [kg/m<sup>3</sup>];
- E – Módulo de elasticidade [N/m<sup>2</sup>].

A frequência de ressonância é a frequência para a qual a amplitude de vibração, devido à sua própria natureza estrutural, é máxima. Segundo a norma NP 2073, deverá ser considerada se afetar a gama audível, isto é, se estiver entre os 100Hz e os 3150Hz [NP2073, 1983].

Nas soluções de paredes triplas a frequência de ressonância do conjunto massa/caixa-de-ar ( $f_r$ ) é determinada através da Equação 5.

$$(m_1 m_2 m_3) (f_r^2)^2 - [K_1 m_3 (m_1 + m_2) + K_2 m_1 (m_2 + m_3)] f_r^2 + [K_1 K_2 (m_1 + m_2 + m_3)] = 0$$

**Eq. 5**

Sendo K1 e K2 obtidos através da Equação 6 e da Equação 7, respetivamente.

$$K_1 = \frac{\rho \times c^2}{d_1}$$

**Eq. 6**

$$K_2 = \frac{\rho \times c^2}{d_2}$$

**Eq. 7**

Onde:

- $m_1, m_2, m_3$  – Massa superficial dos painéis [kg/m<sup>2</sup>];
- $f_r$  – Frequência de ressonância do conjunto [Hz];
- $\rho$  – Massa volúmica do ar ao nível do mar [kg/m<sup>3</sup>];
- c – Velocidade de propagação do som ao nível do mar [m/s];
- $d_1, d_2$  – Espessura da caixa-de-ar [m].

Para além da ressonância do conjunto do sistema é também necessário considerar ainda a ressonância da caixa-de-ar entre os panos. Essa frequência de ressonância é dada pela Equação 8.

$$f_n = n \frac{c}{2d} \text{ [Hz]} \quad \text{Eq. 8}$$

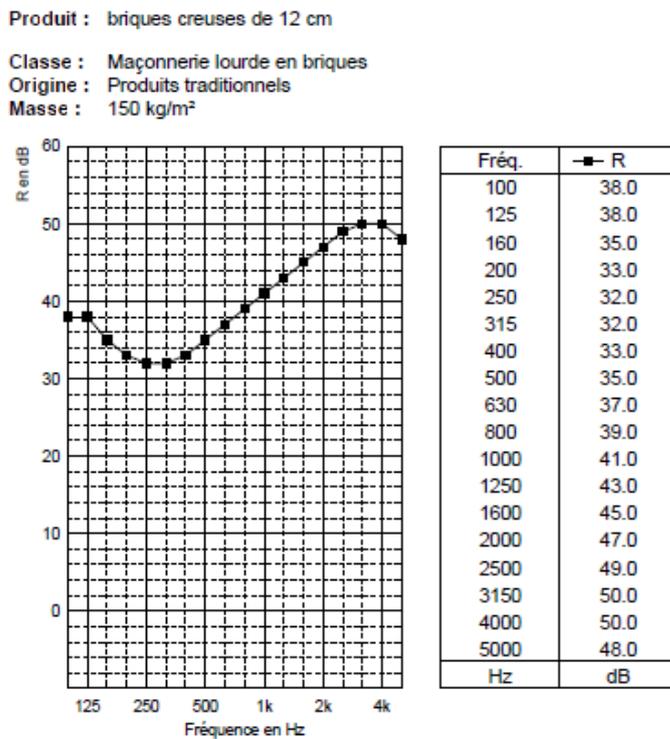
Onde:

$n = 1, 2, 3, \dots, n;$

$c$  – Velocidade de propagação do som ao nível do mar [m/s];

$d$  – Espessura da caixa-de-ar [m].

Após traçar a curva de estimativa de isolamento sonoro para cada uma das soluções é necessário adicionar essas soluções construtivas na base de dados do programa de forma a poderem ser associadas aos diversos elementos do edifício (Figura 43).



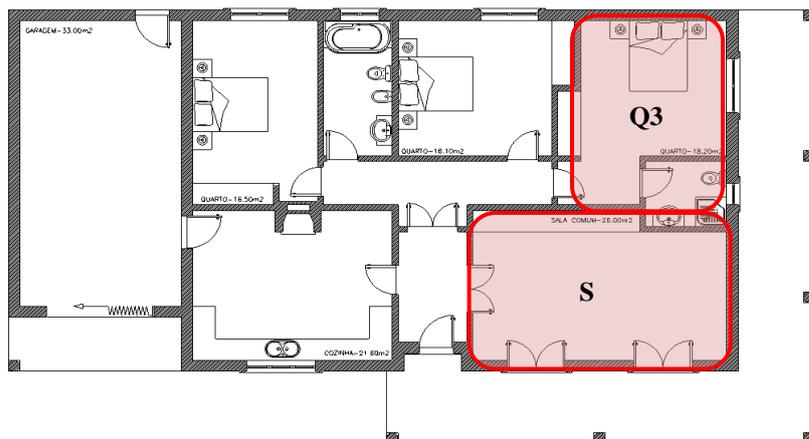
$R_w (C; C_{tr}) = 40 (0; -2) \text{ dB}$   
 $R_{\text{total}} = 41 \text{ dB(A)}$   
 $R_{\text{route}} = 37 \text{ dB(A)}$

**Figura 43:** Exemplo de um material existente na base de dados do Acoubat

Com a modelação dos compartimentos concluída é possível ao programa analisar o isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e os quartos ou salas.

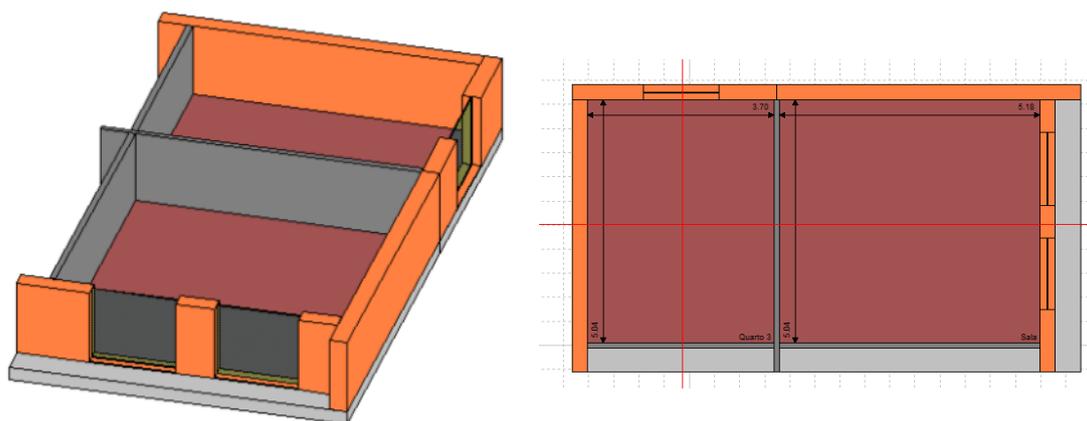
### 3.4.1. Edifício unifamiliar

No edifício unifamiliar existem três quartos e uma sala. Uma vez que as soluções construtivas são iguais para todos os compartimentos, basta simular apenas o mais desfavorável, isto é, o quarto que possui uma maior percentagem de área envidraçada em relação à área opaca da fachada. Assim sendo, os compartimentos analisados foram os que se encontram identificados na Figura 44 – o Quarto 3 e a Sala.



**Figura 44:** Edifício unifamiliar – compartimentos analisados

No programa Acoubat Sound selecionou-se o caso de estudo relativo a dois locais adjacentes com duas fachadas (Figura 45).



**Figura 45:** Modelação dos compartimentos do edifício unifamiliar no Acoubat Sound

A estimativa da curva de isolamento sonoro das soluções construtivas foi feita de acordo com a metodologia acima descrita.

No cálculo das correções foram determinadas as quebras do isolamento sonoro devido à

frequência crítica de alguns materiais; devido à frequência de ressonância do conjunto da massa/caixa-de-ar e devido à frequência de ressonância da caixa-de-ar.

Nas soluções de paredes duplas – solução de referência, solução 2, solução 3 e solução 7 – a frequência de ressonância do conjunto massa/caixa-de-ar não afeta a gama audível pelo que não foi considerada.

Para o edifício unifamiliar as diversas correções introduzidas na curva de estimativa de isolamento sonoro das soluções, devido às frequências e quebras de isolamento sonoro, são resumidas nos Quadros 19 e 20.

**Quadro 19:** Frequências de ressonância e quebras que influenciam o traçado da curva de estimativa do isolamento sonoro – edifício unifamiliar

Soluções	Frequência ressonância conjunto [Hz]	Quebra [dB]	Frequência ressonância caixa-de-ar [Hz]	Quebra [dB]
<b>S. Referência</b>	-	-	3400	4
<b>Solução 1</b>	168	7	3400	4
	357	7		
<b>Solução 2</b>	-	-	3400	4
<b>Solução 3</b>	-	-	3400	4
<b>Solução 4</b>	143	7	3400	4
	264	7		
<b>Solução 5</b>	170	7	3400	4
	380	7		
<b>Solução 6</b>	165	7	3400	4
	335	7		
<b>Solução 7</b>	-	-	3400	4

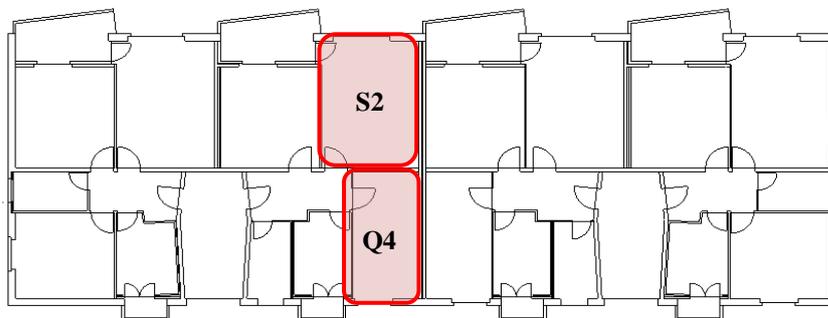
**Quadro 20:** Frequências críticas dos materiais e respectivas quebras que influenciam o traçado da curva de estimativa do isolamento sonoro – edifício unifamiliar

Material	Tijolo11	Gesso	GRC
Frequência crítica [Hz]	182	3077	2339
Quebra [dB]	9	7	5
Soluções	Todas	Solução 5	Solução 6

Com estes valores é possível traçar a curva de estimativa de isolamento sonoro para cada solução e inserir esses dados no programa para posterior simulação acústica.

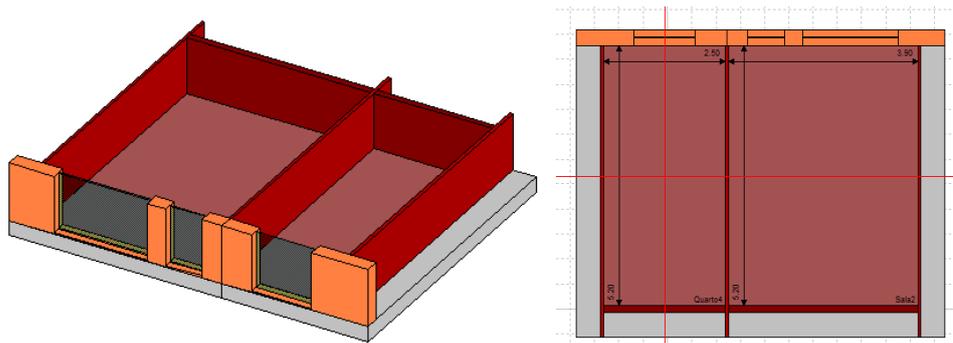
### 3.4.2. Edifício multifamiliar

Para o edifício multifamiliar, tendo em conta a percentagem de área de envidraçado relativamente à área opaca da fachada, a zona de estar e quarto mais desfavoráveis são a Sala 2 (S2) e o Quarto 4 (Q4) (Figura 46).



**Figura 46:** Edifício multifamiliar – compartimentos analisados

O caso de estudo selecionado para a modelação dos compartimentos do edifício multifamiliar foi o relativo a dois locais adjacentes com duas fachadas e dois locais sobrepostos (Figura 47).



**Figura 47:** Modelação dos compartimentos do edifício multifamiliar no Acoubat Sound

A análise do desempenho acústico da fachada do edifício multifamiliar segue a mesma metodologia descrita no subcapítulo anterior.

No edifício multifamiliar as diversas correções introduzidas na curva de estimativa de isolamento sonoro das soluções, frequências e quebras de isolamento sonoro apresentam-se nos Quadros 21 e 22.

Para este edifício as frequências de ressonância do conjunto massa/caixa-de-ar caem dentro da frequência crítica do tijolo de 30 e como não influenciam o traçado da curva de isolamento não se encontram no Quadro 21. A frequência de ressonância da caixa-de-ar apesar do seu valor se encontrar fora da gama audível, a sua quebra influencia um pouco a curva de isolamento sonoro da Solução 1 dentro dos valores de frequência da gama audível e por isso foi considerada e encontra-se no Quadro 22.

**Quadro 21:** Frequências críticas dos materiais e respetivas quebras que influenciam o traçado da curva de estimativa do isolamento sonoro – edifício multifamiliar

Material	Tijolo30	Tijolo11	Gesso	GRC
Frequência crítica [Hz]	67	182	3077	292
Quebra [dB]	9	9	7	5
Soluções	Todas	Solução 4	Solução 5	Solução 6

**Quadro 22:** Frequências de ressonância e respectivas quebras que influenciam o traçado da curva de estimativa do isolamento sonoro – edifício multifamiliar

Soluções	Frequência ressonância caixa-de-ar [Hz]	Quebra [dB]
Solução 1	5667	4

Após a introdução das curvas de estimativa de isolamento sonoro das soluções em estudo, são definidos os elementos construtivos dos compartimentos a analisar e é simulado o desempenho acústico de cada uma das soluções para o compartimento visado.

### 3.5. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE ECONÓMICA

Dada a atual conjuntura económica do país e no caso particular dos proprietários e/ou utilizadores dos edifícios, o estudo da viabilidade económica da implementação das soluções de reabilitação é essencial.

A análise económica deve ter em conta a relação custo/benefício de cada solução estudada, não se devem considerar apenas os gastos imediatos inerentes à execução de cada solução de reabilitação, mas é essencial contabilizar também os custos associados ao período de vida útil do edifício, quer a nível de manutenção, quer a nível de custos de exploração.

No presente trabalho, a viabilidade económica da implementação de cada uma das soluções de reabilitação é avaliada através do cálculo do período de retorno do investimento realizado.

O aumento do desempenho do edifício reabilitado relativamente ao edifício original é analisado através da comparação entre os consumos energéticos antes e após a reabilitação. É também necessário identificar os custos globais que a aplicação de cada uma das soluções de reabilitação acarreta. Os custos globais abarcam o custo inicial da solução (materiais, mão-de-obra e equipamentos), o custo de manutenção periódica da solução introduzida e o custo de exploração da mesma.

O cálculo do Período de Retorno Simples (PRS) foi efetuado de acordo com o

estabelecido no Decreto-Lei 79/2006. O PRS é obtido através do quociente entre o custo adicional de investimento (Ca) e a Poupança anual resultante da aplicação da alternativa. De acordo com o mesmo decreto-lei, o custo adicional de investimento é a diferença entre o custo inicial da solução base e o da solução mais eficiente. A poupança anual resultante da aplicação da alternativa mais eficiente é estimada com base em simulações anuais, detalhadas ou simplificadas do funcionamento do edifício e dos seus sistemas energéticos, conforme aplicável em função da tipologia e área útil do edifício, nos termos do Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), da situação base e da situação com a solução mais eficiente [RSECE, 2006].

O Período de Retorno Simples é determinado recorrendo à Equação 9.

$$\text{PRS} = \frac{\Delta \text{Custo de Investimento}}{\Delta \text{Custo de Exploração}} \text{ [anos]} \quad \text{Eq. 9}$$

A variação do Custo de Investimento (Equação 10) corresponde ao custo inerente à implementação de cada uma das soluções de reabilitação de fachada, uma vez que na solução base nada é substituído, apenas são adicionadas às paredes as soluções de reabilitação.

$$\Delta \text{Custo de Investimento} = \text{Custo de implementação da solução de reabilitação} \quad \text{Eq. 10}$$

O custo de implementação de cada uma das soluções foi determinado através do Gerador de Preços *on-line* da CYPE Ingenieros, S.A.. O Gerador de Preços contém uma base de dados paramétrica e interativa que permite ao utilizador obter o preço para uma dada solução atendendo aos materiais, equipamentos e processos construtivos selecionados [CYPE, 2012]. Os preços unitários de materiais, mão-de-obra, equipamentos e respetivos rendimentos referem-se, por defeito, a uma obra de referência com as seguintes características:

- Superfície total construída: 2 200 m<sup>2</sup>;
- Superfície do piso tipo: 500 m<sup>2</sup>;
- Número de pisos acima da rasante: 6;
- Número de pisos abaixo da rasante: 1;
- Acessibilidade: Boa;
- Topografia: Desníveis mínimos;

- Mercado: Crescimento sustentado (normal);
- Localização: Entre paredes meeiras;
- Tipo de edificação: Multifamiliar;
- Distância a aterro ou operador licenciado de gestão de resíduos: 50km.

A variação do Custo de Exploração corresponde à redução na fatura energética associada à introdução da solução de reabilitação de fachada (Equação 11).

$$\Delta \text{Custo de Exploração} = \text{Custo de exploração}_{\text{Base}} - \text{Custo de exploração}_{\text{Reab}} \quad \text{Eq. 11}$$

O Custo de Exploração é obtido a partir da Equação 12.

$$\text{Custo de Exploração} = \frac{N_{\text{aq}}}{\eta_{\text{aq}}} \times A_p \times \text{custo}_{\text{aq}} + \frac{N_{\text{ar}}}{\eta_{\text{ar}}} \times A_p \times \text{custo}_{\text{ar}} + N_{\text{aqs}} \times A_p \times \text{custo}_{\text{aqs}} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

$N_{\text{aq}}, N_{\text{ar}}, N_{\text{aqs}}$  – Necessidades energéticas de aquecimento, de arrefecimento e de preparação de águas quentes sanitárias, respetivamente [kWh/m<sup>2</sup>.ano];

$\eta_{\text{aq}}, \eta_{\text{ar}}$  – Eficiência nominal dos equipamentos utilizados para os sistemas de aquecimento e arrefecimento, respetivamente;

$A_p$  – Área útil de pavimento [m<sup>2</sup>];

$\text{custo}_{\text{aq}}, \text{custo}_{\text{ar}}, \text{custo}_{\text{aqs}}$  – Custo das energias utilizadas para aquecimento, arrefecimento e preparação de águas quentes sanitárias, respetivamente [€/kWh].

A colocação das soluções de reabilitação nas fachadas dos edifícios não irá influenciar as Necessidades de Aquecimento das Águas Quentes Sanitárias pelo que a parcela correspondente será suprimida dando origem à Equação 13.

$$\text{Custo de Exploração} = \frac{N_{\text{aq}}}{\eta_{\text{aq}}} \times A_p \times \text{custo}_{\text{aq}} + \frac{N_{\text{ar}}}{\eta_{\text{ar}}} \times A_p \times \text{custo}_{\text{ar}} \quad \text{Eq. 13}$$

Este método não inclui fatores variáveis ao longo do tempo, como é o caso de taxas de juro, taxas de inflação, variação dos custos de energia elétrica e combustíveis. Não sendo um método rigoroso, não calcula o tempo real de retorno do investimento realizado mas dá aos utilizadores um valor indicativo que serve como termo de comparação entre as soluções.



## **CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DO EDIFÍCIO UNIFAMILIAR**

No Capítulo que se segue é feita a avaliação do comportamento do edifício unifamiliar a nível do desempenho energético, acústico e económico. Esta avaliação permitirá posteriormente fazer uma análise de quais as melhorias verificadas com a implementação de cada uma das soluções de reabilitação de fachadas propostas.

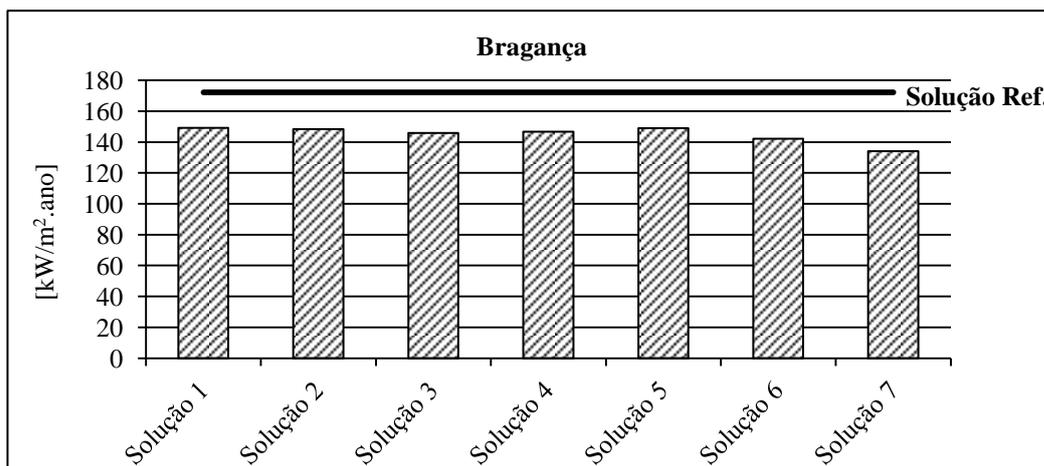
### **4.1. DESEMPENHO ENERGÉTICO**

Os consumos energéticos do edifício são responsáveis por uma parte significativa dos gastos durante a sua utilização. Sendo assim, é também um dos aspetos onde vale a pena investir na reabilitação, a fim de se conseguir a redução da fatura relativa aos consumos do mesmo. A simulação do desempenho térmico do edifício foi feita recorrendo ao programa DesignBuilder, já descrito no Capítulo 3. Neste caso interessa saber qual a energia necessária para manter o edifício a uma temperatura de conforto de 20°C no inverno e qual a energia necessária para manter o edifício a uma temperatura de conforto de 25°C no verão. O edifício foi simulado para o período de um ano.

#### **4.1.1. Necessidades de aquecimento**

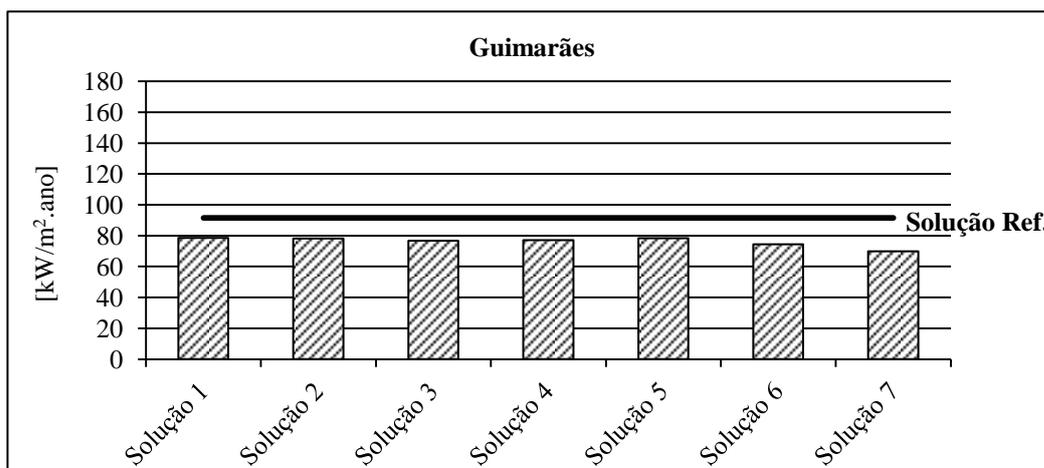
Os gráficos apresentados nas Figuras 48 a 52 mostram os resultados obtidos nas simulações relativamente às necessidades de aquecimento do edifício para cada uma das localizações. As necessidades de aquecimento antes da reabilitação do edifício são representadas pela linha com indicação de Solução de Referência.

A Figura 48 mostra que para Bragança durante a estação de aquecimento a melhor solução de reabilitação foi a Solução 7 Módulo de Reabilitação Prefabricado. Esta solução comparativamente à solução existente reduz em 22% as necessidades de aquecimento do edifício. As restantes soluções reduzem estas necessidades entre os 13,2% (Solução 1) e os 17,4% (Solução 6).



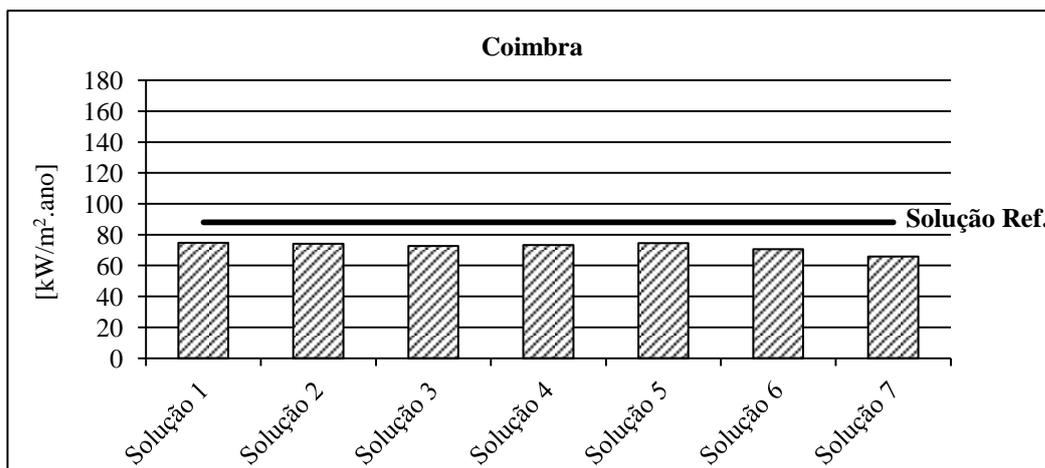
**Figura 48:** Edifício unifamiliar: necessidades de aquecimento obtidas para Bragança

Para Guimarães a Solução 7 apresenta os melhores resultados com uma redução de cerca de 23,7% relativamente aos valores encontrados para o edifício antes da reabilitação. Nas restantes soluções a redução foi de 14,2% (Solução 1) a 18,7% (Solução 6).



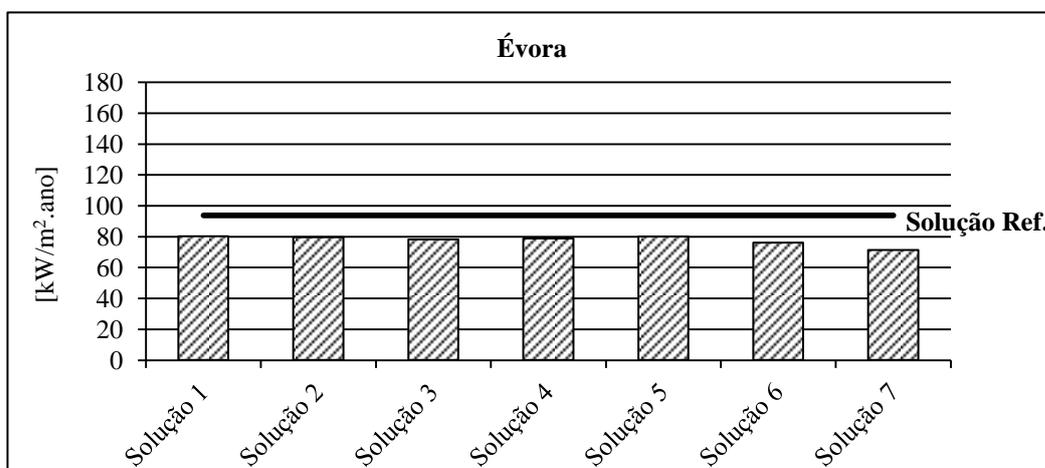
**Figura 49:** Edifício unifamiliar: necessidades de aquecimento obtidas para Guimarães

No gráfico da Figura 50 relativo a Coimbra, a Solução 7 obteve os melhores resultados permitindo uma redução de 25,1% das necessidades de aquecimento relativamente à solução existente. As restantes soluções – Solução 1 a Solução 6 – permitiram reduções de 15,2%; 15,9%; 17,4%; 16,8%; 15,4% e 19,9%, respetivamente.



**Figura 50:** Edifício unifamiliar: necessidades de aquecimento obtidas para Coimbra

Na Figura 51 relativa aos resultados obtidos para Évora verifica-se que a Solução 7 foi a mais eficiente reduzindo as necessidades de aquecimento do edifício em 24%, seguida pela Solução 6 com uma redução de 19%, a Solução 3 com 16,6%, a Solução 4 com 16%, a Solução 2 com 15,1%, a Solução 5 com 14,7% e por fim a Solução 1 com a menor percentagem de redução das necessidades, 14,5%.



**Figura 51:** Edifício unifamiliar: necessidades de aquecimento obtidas para Évora

A melhor solução para Lisboa (Figura 52) foi mais uma vez a Solução 7 que conseguiu reduzir as necessidades de aquecimento do edifício em 23,8%, seguida da Solução 6 com uma redução de 18,8%. A solução menos eficiente foi a Solução 1 com uma redução de apenas 14,3% relativamente ao edifício original; a Solução 2 reduziu as necessidades de aquecimento em 14,9%; a Solução 3 reduziu em 16,4%; a Solução 4 reduziu em 15,9% e a Solução 5 em 14,6%.

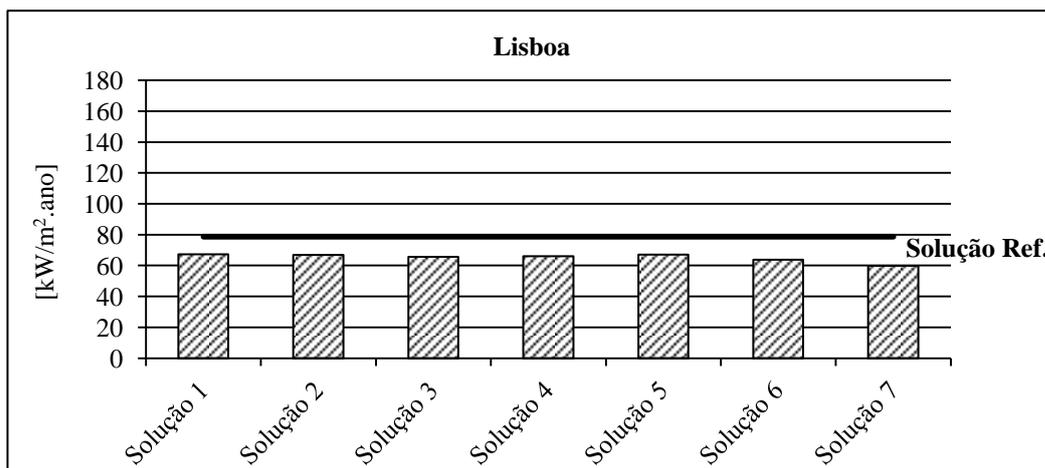


Figura 52: Edifício unifamiliar: necessidades de aquecimento obtidas para Lisboa

#### 4.1.2. Necessidades de arrefecimento

Nas Figuras 53 a 57 os gráficos mostram os resultados obtidos para cada uma das localizações relativamente às necessidades de arrefecimento do edifício. As necessidades de arrefecimento antes da reabilitação do edifício são representadas pela linha com indicação de Solução de Referência.

O gráfico da Figura 53 mostra que para Bragança durante a estação de arrefecimento a melhor solução de reabilitação foi a Solução 3 que comparativamente à solução existente reduz em 5,7% as necessidades de arrefecimento do edifício. Para as restantes soluções os valores situam-se entre os 4,3% (Solução 4) e os 5,6% (Solução 2 e Solução 6).

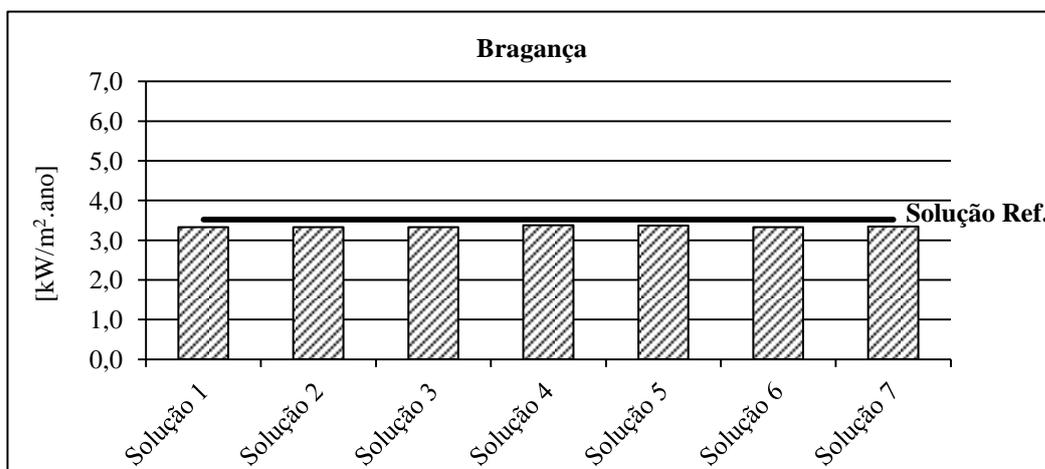
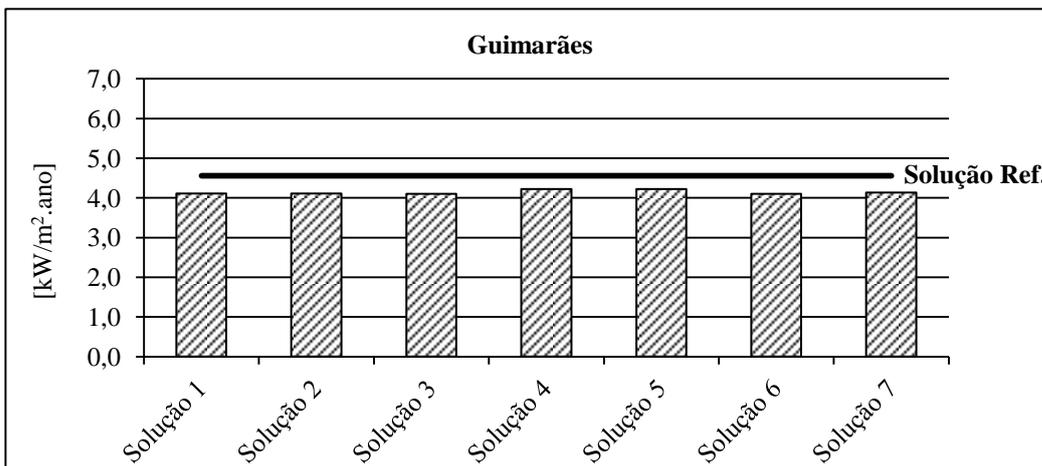


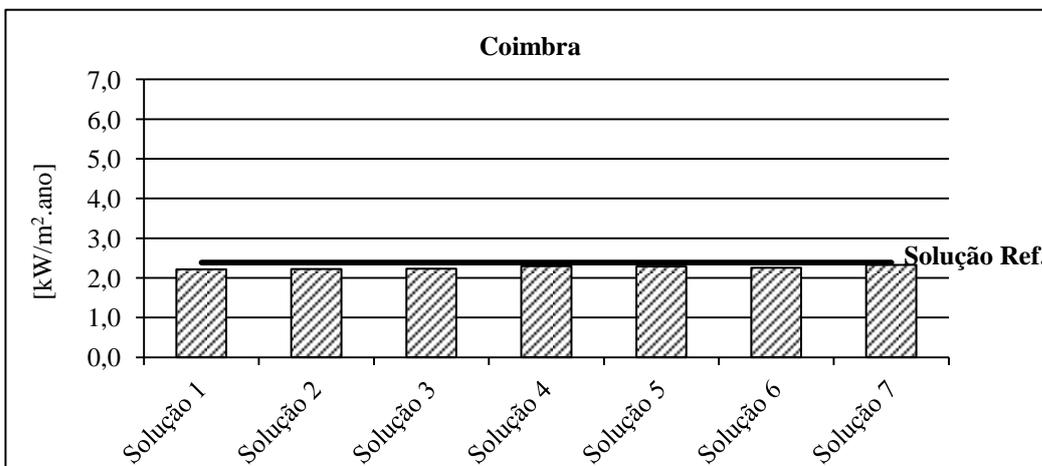
Figura 53: Edifício unifamiliar: necessidades de arrefecimento obtidas para Bragança

Em Guimarães a Solução 6 apresenta os melhores resultados com uma redução de cerca de 10% relativamente ao edifício antes da reabilitação. As soluções 2 e 3 apresentaram melhorias na ordem dos 9,9%, seguidas da Solução 1 com 9,8% e da Solução 7 com 9,2%. As soluções menos eficientes foram a Solução 4 e a Solução 5 apresentando melhorias de apenas 7,3% (Figura 54).



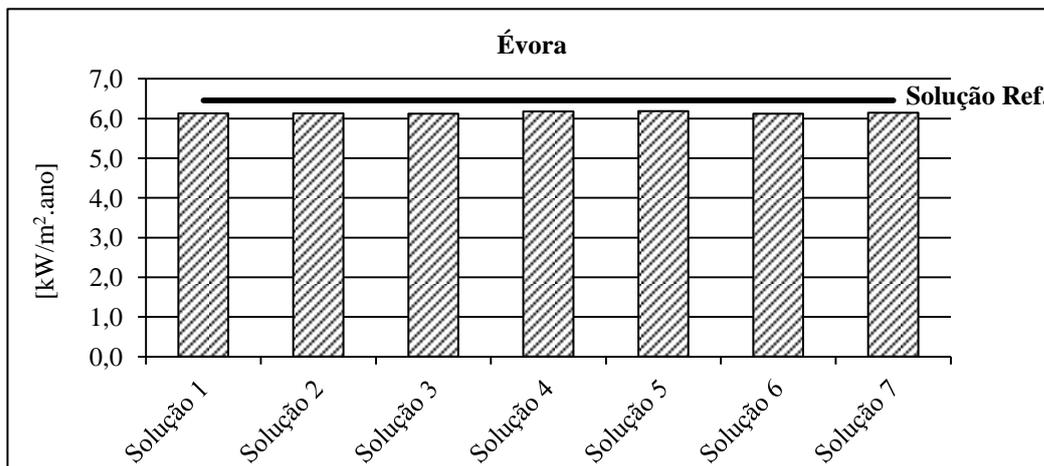
**Figura 54:** Edifício unifamiliar: necessidades de arrefecimento obtidas para Guimarães

No gráfico da Figura 55 relativamente a Coimbra, a Solução 1 obteve os melhores resultados permitindo uma redução de 6,9% das necessidades de arrefecimento relativamente à solução existente. A solução que menos melhorias introduziu ao sistema durante a estação de arrefecimento em Coimbra foi a Solução 7 com uma redução de apenas 2,3% relativamente à Solução de Referência. As restantes soluções – Solução 2 a Solução 6 – permitiram reduções de 6,7%; 6,3%; 3,5%; 3,9%; e 5,3%, respetivamente.



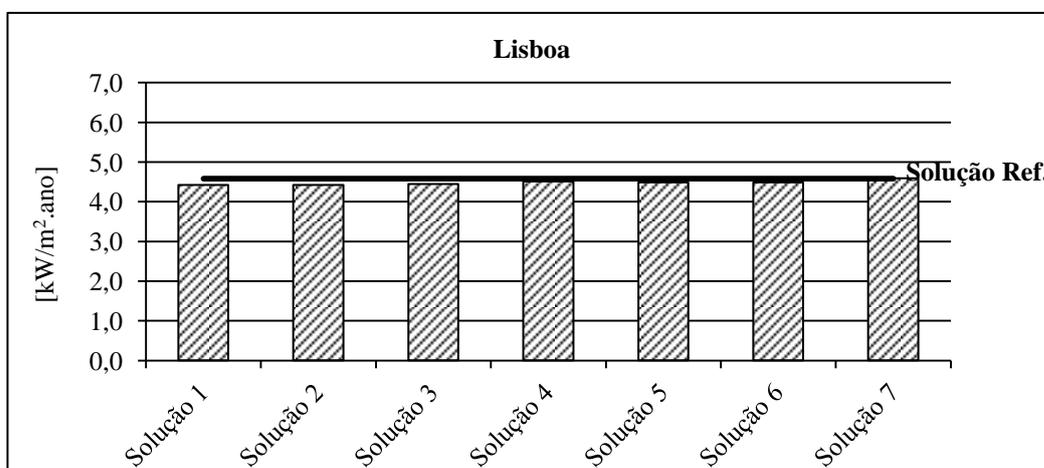
**Figura 55:** Edifício unifamiliar: necessidades de arrefecimento obtidas para Coimbra

Na Figura 56 relativa aos resultados obtidos para Évora verifica-se que a Solução 3 foi a mais eficiente a par da Solução 6 reduzindo as necessidades de arrefecimento do edifício em 5,2%, seguida pela Solução 2 com uma redução de 5,1%, pela Solução 1 com 5,0%, pela Solução 7 com 4,9%, pela Solução 4 com 4,3%, e por fim pela Solução 5 com a menor percentagem de redução das necessidades de 4,2%.



**Figura 56:** Edifício unifamiliar: necessidades de arrefecimento obtidas para Évora

Em Lisboa a melhor solução de reabilitação foi a Solução 1 que conseguiu reduzir as necessidades de arrefecimento do edifício em 3,5%, seguida da Solução 2 com uma redução de 3,4%. A Solução 7 não reduziu em nada as necessidades de arrefecimento do edifício. A solução menos eficiente foi a Solução 4 com uma redução de apenas 1,6% relativamente ao edifício original; a Solução 3 reduziu as necessidades de arrefecimento em 2,9%; as soluções 5 e 6 reduziram em 2,0% as necessidades de arrefecimento do edifício unifamiliar (Figura 57).



**Figura 57:** Edifício unifamiliar: necessidades de arrefecimento obtidas para Lisboa

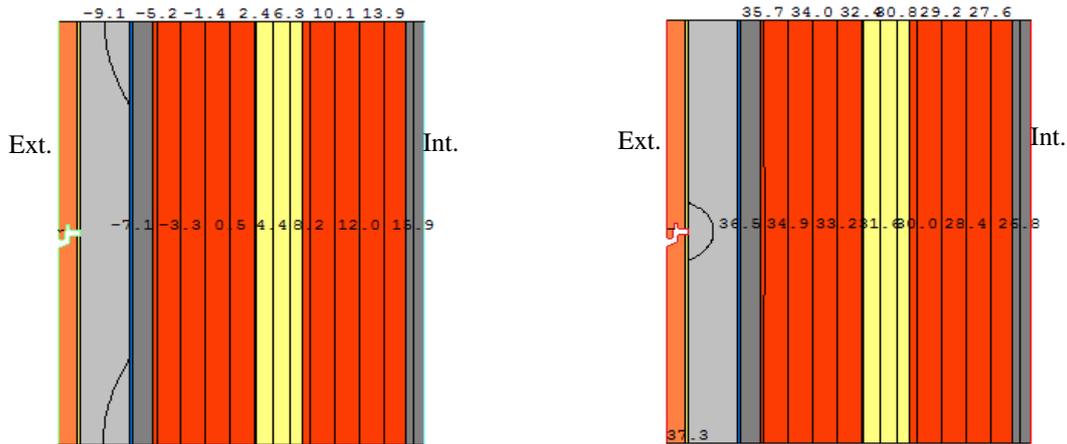
Nos resultados obtidos é possível observar que a Solução 7 apresentou melhorias em todas as localidades a nível de necessidades de aquecimento, o que se deve à grande espessura de material isolante que compõe a solução. Por outro lado, a existência de uma espessura elevada de material isolante mostrou ser penalizadora no que respeita às necessidades de arrefecimento do edifício. E a Solução 1 foi a menos eficiente em todas as localidades no que toca à redução das necessidades de aquecimento do edifício unifamiliar.

No entanto, relativamente às necessidades de arrefecimento do edifício unifamiliar os resultados obtidos não apresentam grandes diferenças. As soluções mais eficientes foram a Solução 1, a Solução 3 e a Solução 6. As soluções que mostraram piores resultados relativamente à redução das necessidades de arrefecimento foram a Solução 4, a Solução 5 e a Solução 7 já referida. As soluções de reabilitação com isolamento pelo interior – Solução 4 e Solução 5 – mostraram que relativamente à generalidade das soluções de reabilitação pelo exterior são menos eficientes, principalmente durante a estação de arrefecimento.

#### **4.1.3. Pontes Térmicas**

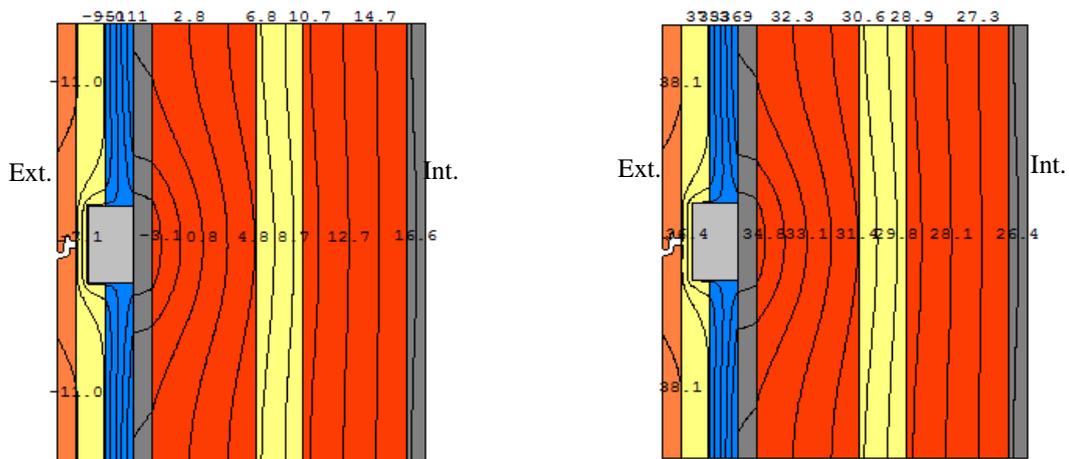
Na metodologia foram identificadas as secções que foram estudadas para cada solução de reabilitação. A parede existente neste caso de estudo corresponde à solução de fachada do edifício unifamiliar, sendo que o programa identifica com diferentes cores os diversos materiais que compõem a solução. Nas Figuras 58 a 67 mostra-se para cada solução de reabilitação as linhas isotérmicas para Bragança e Évora. Para Bragança a temperatura exterior foi de  $-11,7^{\circ}\text{C}$  e interior de  $20^{\circ}\text{C}$ . Para Évora a temperatura exterior foi de  $38,4^{\circ}\text{C}$  e interior de  $25^{\circ}\text{C}$ . Essas figuras permitem localizar a zona por onde ocorrem as perdas mais significativas de calor e observar uma maior variação da temperatura pontualmente, nas zonas correspondentes às ligações mecânicas.

A Figura 58 apresenta do lado esquerdo a representação das temperaturas ao longo da secção de ligação dos painéis do revestimento da Solução 1 (S1) através de isotérmicas para Bragança e do lado direito a representação das temperaturas ao longo da secção através de isotérmicas para Évora.

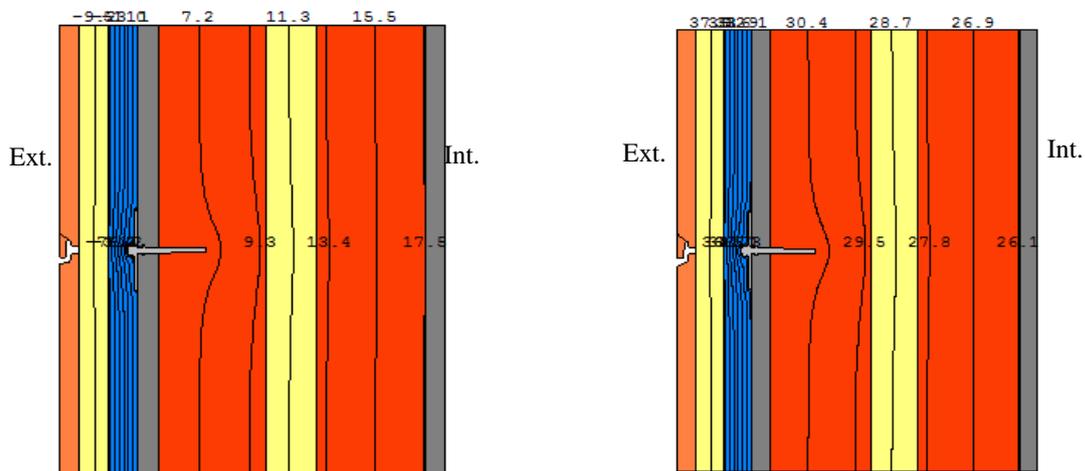


**Figura 58:** Solução 1, secção 1: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

As Figura 59 e 60 apresentam do lado esquerdo, para Bragança, as temperaturas ao longo da secção da ligação da Solução 1 à fachada do edifício unifamiliar (S2 e S3) através de isotérmicas e do lado direito as mesmas para Évora.

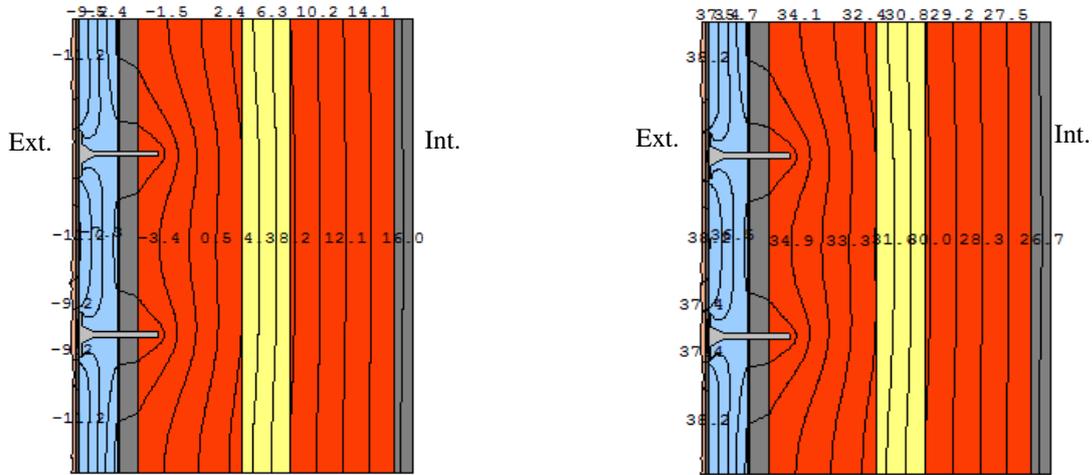


**Figura 59:** Solução 1, secção 2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)



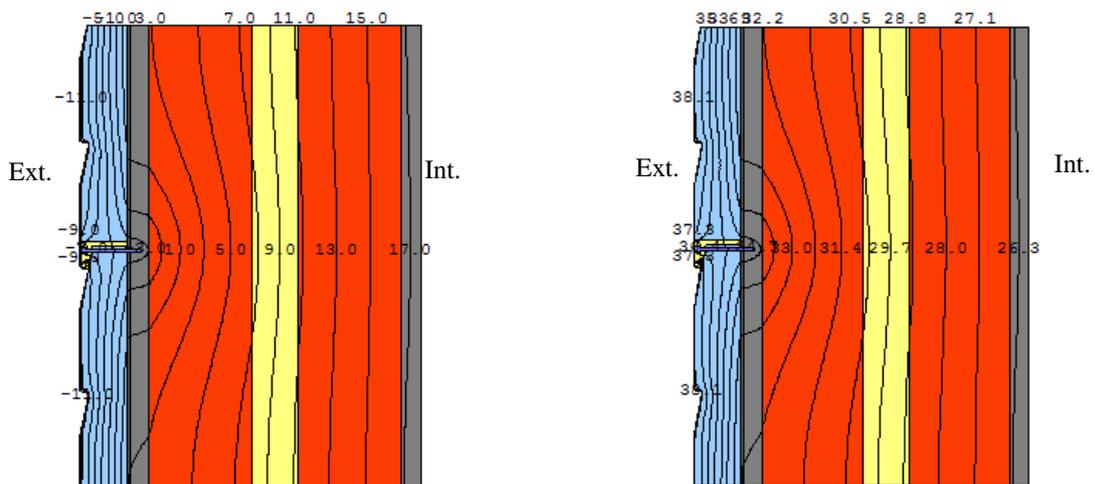
**Figura 60:** Solução 1, secção 3: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

No sistema de isolamento térmico compósito exterior com revestimento delgado, apresentado na Figura 61, ilustram-se as temperaturas ao longo da secção da zona de fixação mecânica do isolamento térmico à parede.



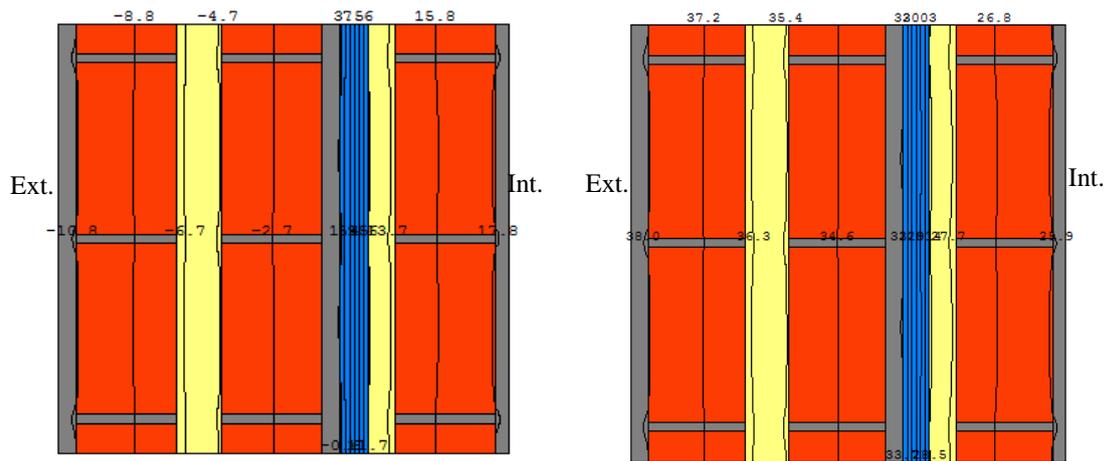
**Figura 61:** Solução 2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

O sistema de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados recorre a ligações mecânicas para fazer a ligação do paramento exterior ao sistema. A Figura 62 apresenta as linhas de temperaturas nessa secção.



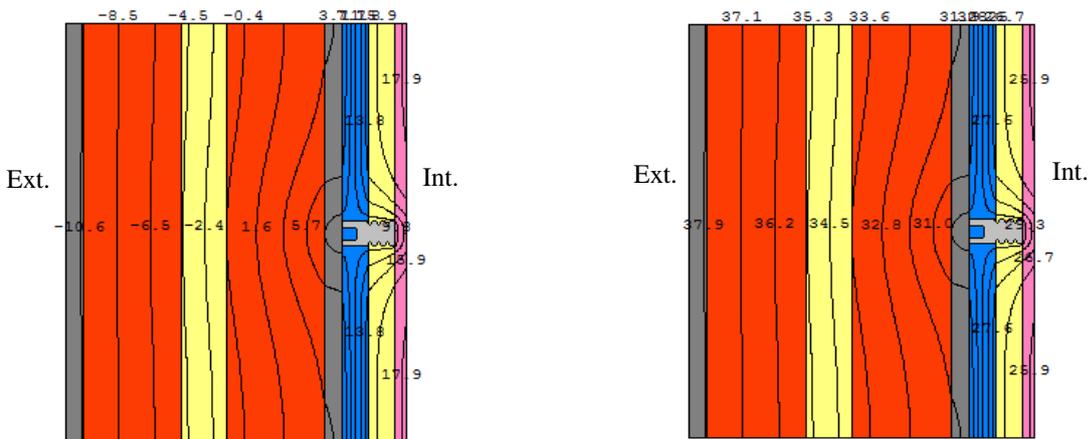
**Figura 62:** Solução 3: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

Na Solução 4 de contra-fachada de alvenaria foram analisadas as juntas. As temperaturas ao longo da secção são ilustradas pela Figura 63.

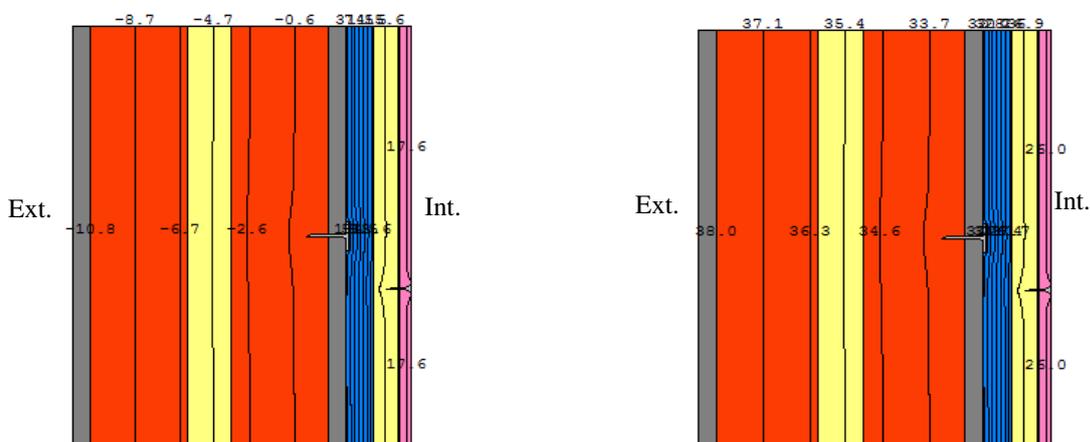


**Figura 63:** Solução 4: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

A solução de contra-fachada de gesso cartonado utiliza algumas ligações mecânicas para fixação do sistema à fachada (S1) e fixação do painel de gesso cartonado e do isolamento (S2). Estas secções são apresentadas nas Figuras 64 e 65 com as respetivas temperaturas na secção da ligação mecânica.

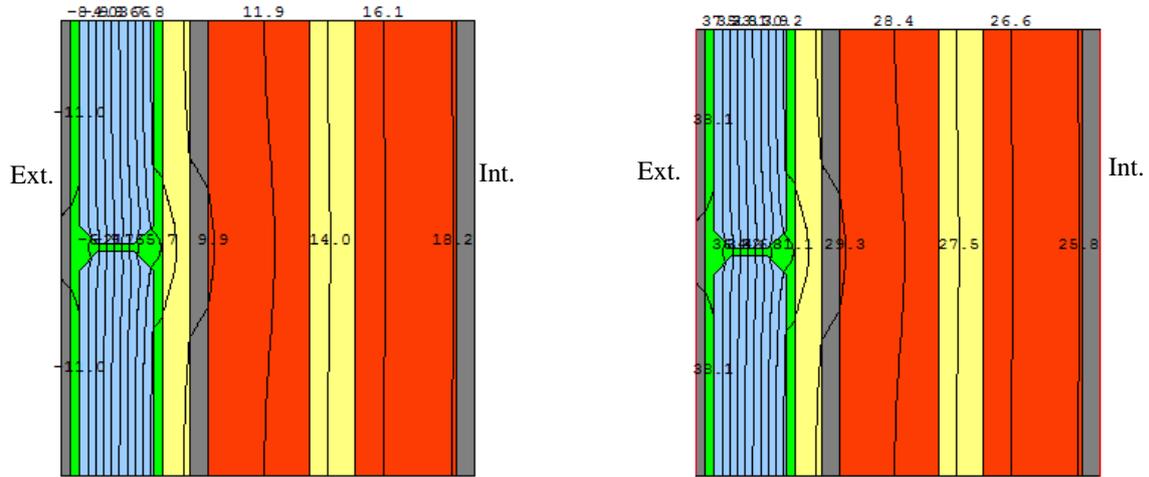


**Figura 64:** Solução 5, S1: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)



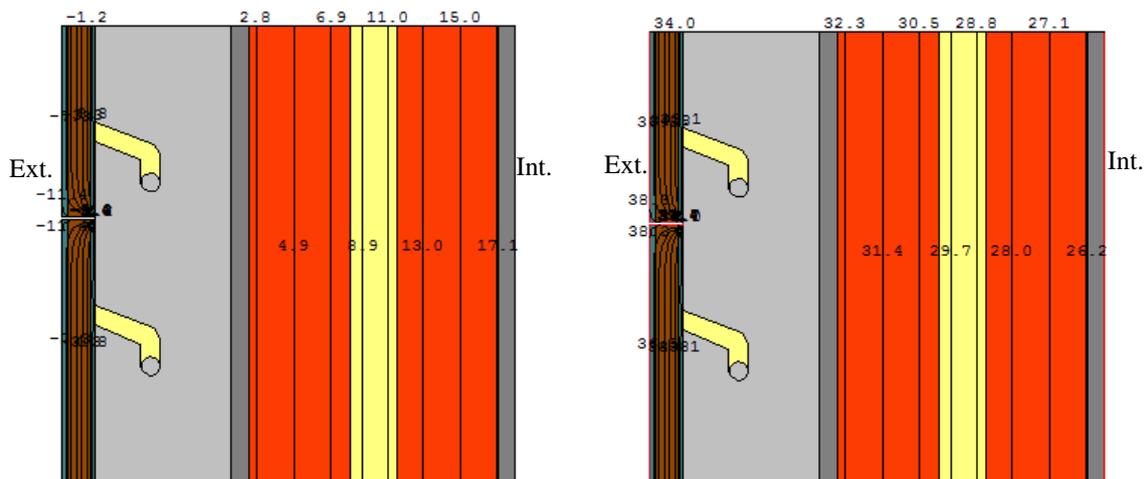
**Figura 65:** Solução 5, S2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

O painel prefabricado de betão reforçado com fibras de vidro (Solução 6) cujas nervuras de GRC intercalam o isolamento interior do painel foram simuladas pelo programa e as respetivas temperaturas da secção na nervura encontram-se na Figura 66.



**Figura 66:** Solução 6: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

O módulo de reabilitação prefabricado necessita de uma estrutura de suporte que é colocada sobre a fachada para posterior colocação dos painéis. A secção onde os painéis encaixam na estrutura de suporte foi simulada e as temperaturas da zona de ligação estão expostas na Figura 67.



**Figura 67:** Solução 7: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

No Quadro 23 encontra-se um resumo dos valores dos coeficientes de transmissão térmica (U) calculados pelo programa para cada uma das zonas analisadas, o valor de U para a zona corrente da solução de reabilitação e o acréscimo das perdas de calor

pontual da secção em relação à zona corrente que resulta da existência das pontes térmicas.

**Quadro 23:** Valor de U da secção, U da zona corrente e perdas associadas à secção do edifício unifamiliar.

Soluções/Secções		U <sub>secção</sub> [w/m <sup>2</sup> k]	U <sub>zona corrente</sub> [w/m <sup>2</sup> k]	Acréscimo de perdas [%]
Solução 1	S1	0,94	0,52	81
	S2	0,76	0,52	46
	S3	0,54	0,52	3
Solução 2		0,92	0,50	83
Solução 3		0,68	0,44	55
Solução 4		0,47	0,46	3
Solução 5	S1	0,67	0,51	32
	S2	0,52	0,51	1
Solução 6		0,36	0,35	3
Solução 7		0,64	0,17	276

Analisando os valores do Quadro 23 verifica-se que a Solução 7 oferece melhores resultados de desempenho térmico pois tem o menor valor de coeficiente de transmissão térmica (U), comparativamente com as outras soluções de reabilitação. No entanto, pontualmente, na zona de ligação entre o módulo e a estrutura de suporte que o fixa à parede existente registam-se perdas de calor acentuadas e esse valor de U aumenta para 0,64 W/m<sup>2</sup>.°C, o que significa que relativamente à zona corrente da solução há um acréscimo de perdas de calor de 276%.

Os materiais utilizados nas ligações mecânicas bem como a posição do isolamento em relação e estes elementos também influenciam os valores de transmissão térmica. As zonas onde, pontualmente, o acréscimo de perdas foi menor, por exemplo, na secção 3 da Solução 1 (3%), na Solução 4 (3%), na secção 2 da Solução 5 (1%) e na Solução 6 (3%), são zonas onde o isolamento térmico não foi perfurado por nenhum elemento de ligação mecânica, ou seja, a continuidade do isolamento térmico previne o aparecimento de pontes térmicas.

De salientar que algumas das soluções têm previsto a utilização de materiais/sistemas vedantes para este tipo de singularidades, mas não foram considerados por falta de dados precisos.

#### 4.2. DESEMPENHO ACÚSTICO

O edifício situa-se numa zona habitacional e como tal considerou-se que pertence a uma zona sensível, sendo requisito do RRAE que o índice de isolamento sonoro seja igual ou superior a 28dB. Nas fachadas dos compartimentos estudados a área translúcida não é superior a 60% da área da fachada e por isso, segundo o RRAE, não é necessário calcular o termo de adaptação C ou Ctr. No entanto, o programa Acoubat também determina o valor dos índices associados a esses termos de adaptação –  $D_{nT,W+C}$  e  $D_{nT,W+Ctr}$ .

Os resultados obtidos para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea provenientes do exterior ( $D_{2m,nT,W}$ ) das paredes de fachada do Quarto 3 e da Sala apresentam-se nos Quadros 24 e 25.

**Quadro 24:** Resultados obtidos nas simulações acústicas do Quarto 3 do edifício unifamiliar [dB]

Índice	Sol. Ref.	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
$D_{nT, rosa}$	38	36	38	37	32	37	36	38
$D_{nT, traf}$	34	31	34	34	27	33	32	34
$D_{nT, W}$	<b>39</b>	<b>37</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>33</b>	<b>38</b>	<b>37</b>	<b>39</b>
$D_{nT, W + C}$	37	35	37	37	32	36	36	37
$D_{nT, W + Ctr}$	34	32	35	34	27	33	33	35
$D_{nT, W + C100-5000}$	38	36	38	38	32	37	37	38
$D_{nT, W + Ctr100-5000}$	34	32	35	34	27	33	33	35

**Quadro 25:** Resultados obtidos nas simulações acústicas da Sala do edifício unifamiliar [dB]

Índice	Sol. Ref.	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
$D_{nT, rosa}$	37	35	37	37	33	36	36	37
$D_{nT, traf}$	33	31	33	33	28	32	32	33
$D_{nT, W}$	<b>38</b>	<b>36</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>34</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>38</b>
$D_{nT, W + C}$	36	35	36	36	32	36	35	36
$D_{nT, W + Ctr}$	34	32	34	34	28	33	32	34
$D_{nT, W + C100-5000}$	37	36	37	37	33	36	36	37
$D_{nT, W + Ctr100-5000}$	34	32	34	34	28	33	32	34

Os resultados traduzem o desempenho acústico de cada uma das soluções incluindo o envidraçado existente na parede de fachada do compartimento. Salienta-se que aquando da reabilitação não foi efetuada qualquer alteração quer no tipo de vidro quer na caixilharia existente.

Analisando o conjunto de resultados obtidos verifica-se que a solução de referência por si só verifica o disposto no RRAE. A aplicação das soluções de reabilitação estudadas, na sua generalidade, não influencia o desempenho acústico da fachada. Algumas soluções pioraram o comportamento acústico da fachada do edifício unifamiliar devido à leveza dos painéis, ou seja, não possuem materiais com massa significativa para dissipar a energia sonora. Outras soluções mais pesadas, como é o caso da Solução 4 pioraram o comportamento acústico do edifício unifamiliar devido às espessuras dos materiais, por exemplo o tijolo, serem iguais em todos os panos provocando quebras acentuadas no isolamento sonoro da fachada. Para evitar estes valores poder-se-ia usar um pano de tijolo de espessura diferente, evitando a incidência das frequências críticas do material, ou substituir o isolamento por lã de rocha, pois este material apresenta melhores características acústicas. Assim sendo, esta solução é a que apresenta o pior desempenho acústico, contudo, verifica os valores do regulamento.

As soluções de parede tripla: solução 1, solução 4, solução 5 e solução 6 que implicam quebras no isolamento sonoro devido à frequência de ressonância da caixa-de-ar, são as que apresentam um comportamento acústico pior, relativamente à solução de referência.

Os resultados obtidos para a Solução 3 vão de encontro com um outro estudo realizado pelo CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) onde foi medido e simulado o desempenho acústico da aplicação de uma solução de reabilitação semelhante à solução 3 e se demonstrou que a sua implementação teve pouco ou nenhum efeito no índice de isolamento sonoro da fachada [Guigou-Carter, 2010].

### 4.3. ANÁLISE ECONÓMICA

A análise económica das soluções de reabilitação em estudo permite avaliar a sua viabilidade de implementação face às melhorias que as mesmas promovem no edifício. Esta análise foi feita recorrendo ao cálculo do Período de Retorno Simples descrito no subcapítulo 3.5. Para isso foi necessário determinar os parâmetros  $\Delta$ Custo de Investimento e  $\Delta$ Custo de Exploração.

O parâmetro  $\Delta$ Custo de investimento corresponde ao custo que advém da colocação das soluções de reabilitação na fachada existente. Tal como referido, os custos de cada uma das soluções foram calculados com base nos preços apresentados pelo Gerador de Preços do CYPE e encontram-se no Quadro 26. As soluções 4 e 5 são colocadas pelo interior tendo uma menor área a reabilitar e um custo inferior, relativamente às restantes soluções.

**Quadro 26:** Custo de implementação das soluções de reabilitação no edifício unifamiliar

	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
Área a Reabilitar [m <sup>2</sup> ]	102,51	102,51	102,51	86,57	86,57	102,51	102,51
Custo de implementação [€]	12552,35	6987,08	6524,76	2902,69	2591,04	13649,21	6862,26
Custo [€/m <sup>2</sup> ]	122,45	68,16	63,65	33,53	29,93	133,15	66,94

O parâmetro  $\Delta$ Custo de Exploração traduz-se na redução da fatura energética e é dado pela diferença entre o custo de exploração antes e após a reabilitação da fachada do edifício. É essencial saber quais as necessidades energéticas do edifício sem qualquer tipo de reabilitação e com cada uma das soluções aplicadas. No Quadro 27 apresentam-se as necessidades de aquecimento ( $N_{aq}$ ) e de arrefecimento ( $N_{ar}$ ) do edifício unifamiliar em cada uma das localidades.

**Quadro 27:** Necessidades energéticas do edifício unifamiliar [kWh/m<sup>2</sup>.ano]

Local		Sol. Ref.	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
Bragança	Naq	172,12	149,34	148,40	146,00	146,86	148,99	142,24	134,24
	Nar	3,52	3,33	3,32	3,32	3,37	3,37	3,32	3,34
Guimarães	Naq	91,54	78,56	78,01	76,65	77,11	78,33	74,47	69,82
	Nar	4,55	4,11	4,10	4,10	4,22	4,22	4,10	4,13
Coimbra	Naq	88,12	74,69	74,14	72,76	73,33	74,56	70,58	65,97
	Nar	2,38	2,22	2,22	2,23	2,30	2,29	2,25	2,33
Évora	Naq	93,71	80,14	79,58	78,16	78,71	79,96	75,94	71,26
	Nar	6,45	6,13	6,12	6,12	6,17	6,18	6,12	6,14
Lisboa	Naq	78,69	67,42	66,96	65,77	66,14	67,19	63,90	59,97
	Nar	4,58	4,42	4,42	4,44	4,51	4,49	4,49	4,59

Para o cálculo do Custo de Exploração foi utilizada a Equação 13 do subcapítulo 3.5, já sem a componente relativa às águas quentes sanitárias, e os resultados são apresentados no Quadro 28.

**Quadro 28:** Custo de Exploração [€/ano]

Local	Sol. Ref.	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
Bragança	3211,67	2788,05	2770,49	2725,97	2742,13	2781,72	2656,17	2507,89
Guimarães	1721,38	1478,21	1468,10	1442,82	1451,99	1474,61	1402,24	1316,15
Coimbra	1647,08	1397,05	1386,95	1361,32	1372,20	1395,05	1320,92	1235,75
Évora	1771,12	1517,68	1507,25	1480,87	1491,26	1514,57	1439,65	1352,80
Lisboa	1483,00	1273,16	1264,49	1242,55	1249,84	1269,18	1208,08	1135,62

A reabilitação da fachada com cada uma das soluções em estudo permite a redução na fatura energética anual que se encontra no Quadro 29. A Solução 7 é a que permite obter maiores poupanças com reduções anuais entre os 347,38€ e os 703,78€.

**Quadro 29:**  $\Delta$ Custo de Exploração [€/ano]

Local	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
<b>Bragança</b>	423,62	441,18	485,70	469,54	429,95	555,50	703,78
<b>Guimarães</b>	243,17	253,29	278,56	269,40	246,78	319,14	405,23
<b>Coimbra</b>	250,03	260,13	285,76	274,88	252,03	326,16	411,33
<b>Évora</b>	253,44	263,87	290,26	279,86	256,55	331,48	418,33
<b>Lisboa</b>	209,84	218,52	240,45	233,16	213,82	274,93	347,38

Ao optar pela implementação de cada uma das soluções na fachada do edifício, o período de retorno do investimento feito é dado pelos valores indicados no Quadro 30.

**Quadro 30:** Período de Retorno Simples [anos]

Local	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5	Solução 6	Solução 7
<b>Bragança</b>	42	23	19	<b>9</b>	<b>9</b>	35	14
<b>Guimarães</b>	73	39	33	15	15	61	24
<b>Coimbra</b>	71	38	32	15	15	60	24
<b>Évora</b>	70	38	32	15	14	59	23
<b>Lisboa</b>	85	45	39	18	17	71	28

Analisando os resultados obtidos para o período de retorno simples verifica-se que, uma vez que se trata da reabilitação do edifício os valores obtidos são na sua maioria elevados, tendo em linha de conta o período de vida útil que resta ao edifício. No entanto, as soluções que apresentam o melhor resultado em termos económicos são as soluções de reabilitação pelo interior do edifício – Solução 4 e Solução 5 – com um período de retorno de 9 anos para Bragança, uma vez que, como já foi referido, têm menores áreas a reabilitar diminuindo os custos de implementação da solução. Dentro das soluções de reabilitação pelo exterior, a Solução 7 foi a que apresentou o menor período de retorno (14 anos) para Bragança pois apesar de ter um maior custo de implementação consegue as maiores reduções no consumo energético do edifício. Tendo Bragança um clima de Inverno mais severo, também é nesse local onde se denota uma melhor relação custo/benefício das soluções apresentadas.



## **CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DO EDIFÍCIO MULTIFAMILIAR**

A avaliação do desempenho térmico do edifício multifamiliar engloba a análise do seu comportamento térmico e acústico e a análise económica, resultantes da aplicação de cada uma das soluções em estudo. A metodologia é semelhante à utilizada no capítulo anterior e os resultados obtidos para cada um dos aspetos em análise são apresentados de seguida.

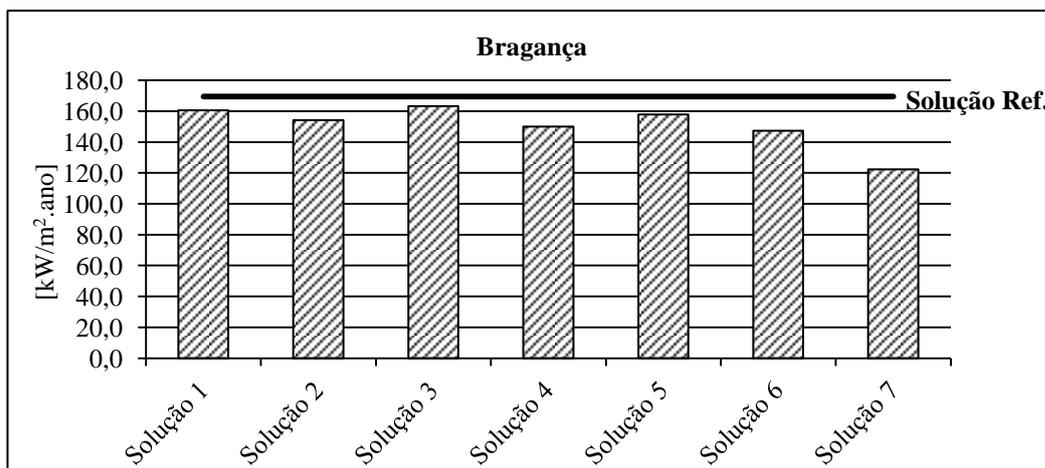
### **5.1. DESEMPENHO ENERGÉTICO**

A modelação do edifício multifamiliar foi feita recorrendo ao programa de interface gráfico DesignBuilder e o seu desempenho energético foi simulado através do programa EnergyPlus. Neste caso de estudo, contrariamente ao edifício unifamiliar foi necessário recorrer ao EnergyPlus para colocação das massas internas correspondentes às paredes divisórias dos apartamentos suprimidas e respetivo ajuste do modelo.

#### **5.1.1. Necessidades de aquecimento**

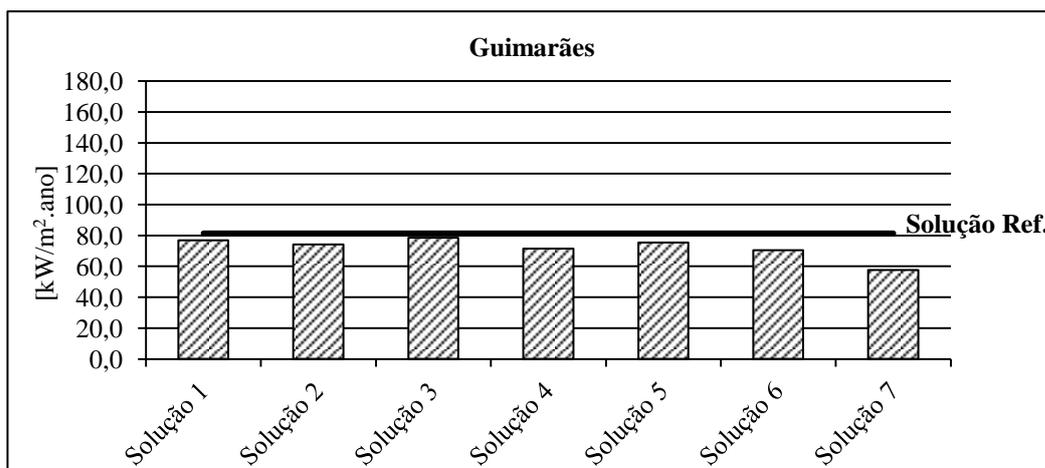
Os gráficos apresentados nas Figuras 68 a 72 mostram os resultados obtidos nas simulações relativamente às necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar para cada uma das localizações. A linha com a indicação de Solução de Referência traduz as necessidades de aquecimento antes da reabilitação do edifício.

O gráfico da Figura 68 mostra que para Bragança durante a estação de aquecimento a melhor solução de reabilitação foi a Solução 7 do Módulo de Reabilitação Prefabricado. Esta solução comparativamente à solução existente reduz em 27,8% as necessidades de aquecimento do edifício. As restantes soluções reduzem estas necessidades entre os 3,7% (Solução 3) e os 13,1% (Solução 6).



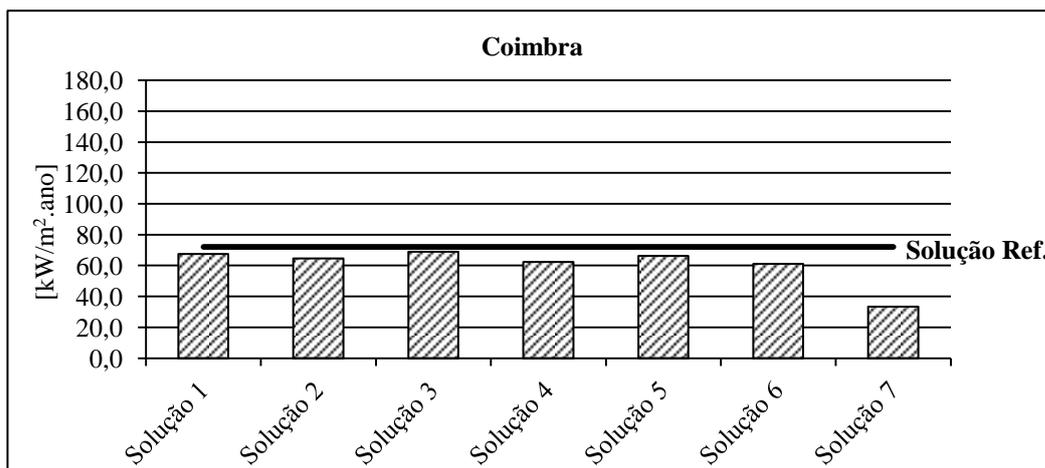
**Figura 68:** Necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar localizado em Bragança

Na Figura 69 observa-se que para Guimarães a Solução 7 apresenta os melhores resultados com uma redução de cerca de 29,2% relativamente aos valores encontrados para o edifício antes da reabilitação. Nas restantes soluções a redução foi de 3,5% (Solução 3) a 13,3% (Solução 6).



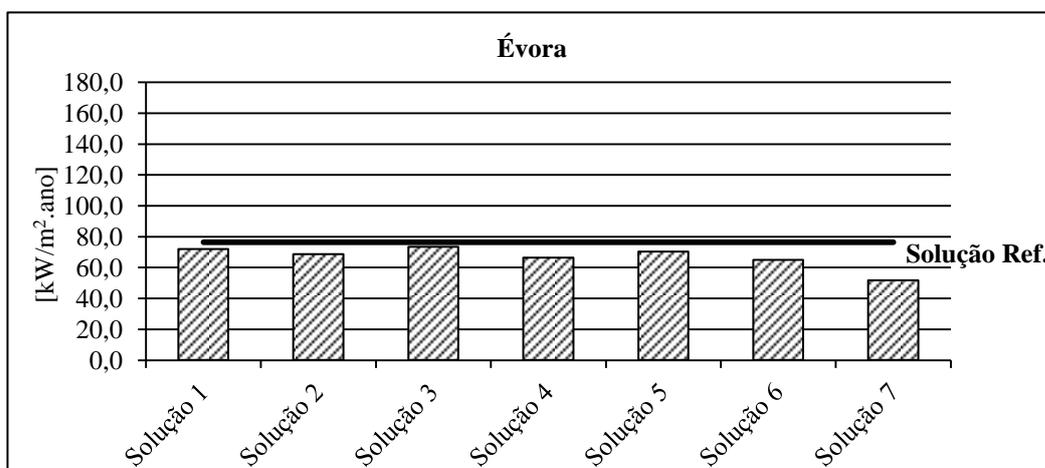
**Figura 69:** Necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar localizado em Guimarães

No gráfico da Figura 70 a Solução 7 obteve os melhores resultados para Coimbra permitindo uma redução de 32,7% das necessidades de aquecimento relativamente à solução existente. As restantes soluções – Solução 1 a Solução 6 – permitiram reduções de 6,3%; 10,5%; 4,4%; 13,5%; 8,1% e 15,4%, respetivamente.



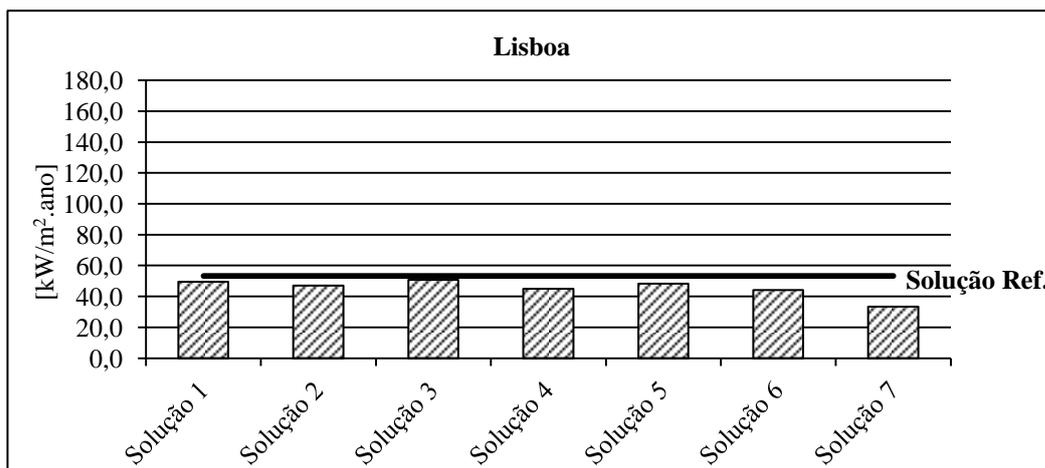
**Figura 70:** Necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar localizado em Coimbra

Relativamente às soluções de reabilitação para o edifício localizado em Évora, a Solução 7 foi a mais eficiente reduzindo as necessidades de aquecimento do edifício em 32,4%, seguida pela Solução 6 com uma redução de 15,2%, a Solução 4 com 13,4%, a Solução 2 com 10,4%, a Solução 5 com 8,1%, a Solução 1 com 6,1% e por fim a Solução 3 com a menor percentagem de redução das necessidades 4,2% (Figura 71).



**Figura 71:** Necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar localizado em Évora

A melhor solução para Lisboa (Figura 72) foi mais uma vez a Solução 7 que conseguiu reduzir as necessidades de aquecimento do edifício em 37,1%, seguida da Solução 6 com uma redução de 17,0%. A solução menos eficiente foi a Solução 3 com uma redução de apenas 4,5% relativamente ao edifício original; a Solução 1 reduziu as necessidades de aquecimento em 6,9%; a Solução 2 reduziu em 11,4%; a Solução 4 reduziu 15,3% e a Solução 5 reduziu 9,2%.

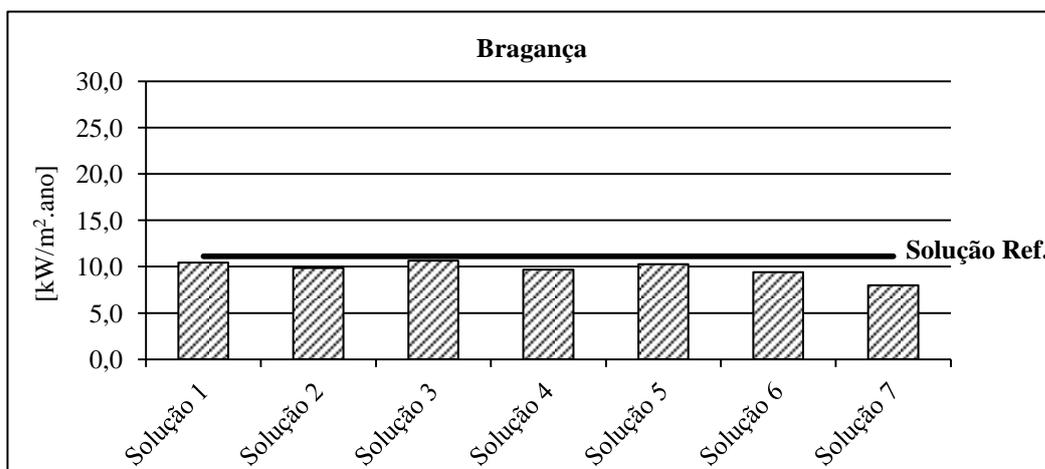


**Figura 72:** Necessidades de aquecimento do edifício multifamiliar localizado em Lisboa

### 5.1.2. Necessidades de arrefecimento

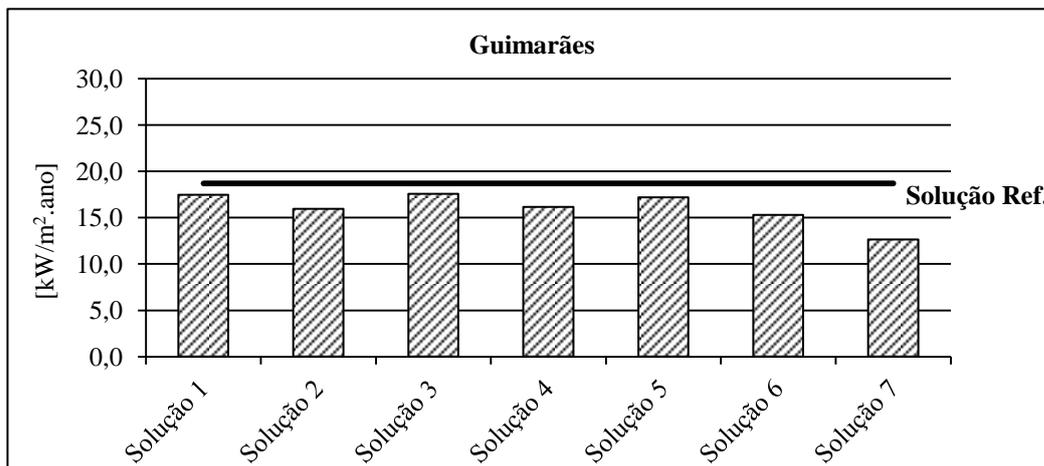
Nas Figuras 73 a 77 os gráficos mostram os resultados obtidos para cada uma das localizações relativamente às necessidades de arrefecimento do edifício. A linha com a indicação de Solução de Referência representa as necessidades de arrefecimento antes da reabilitação do edifício.

O gráfico da Figura 73 mostra que para Bragança durante a estação de arrefecimento a melhor solução de reabilitação foi a Solução 7, que comparativamente à solução existente reduz em 28,3% as necessidades de arrefecimento do edifício. Para as restantes soluções os valores situam-se entre os 4,4% (Solução 3) e os 15,6% (Solução 6).



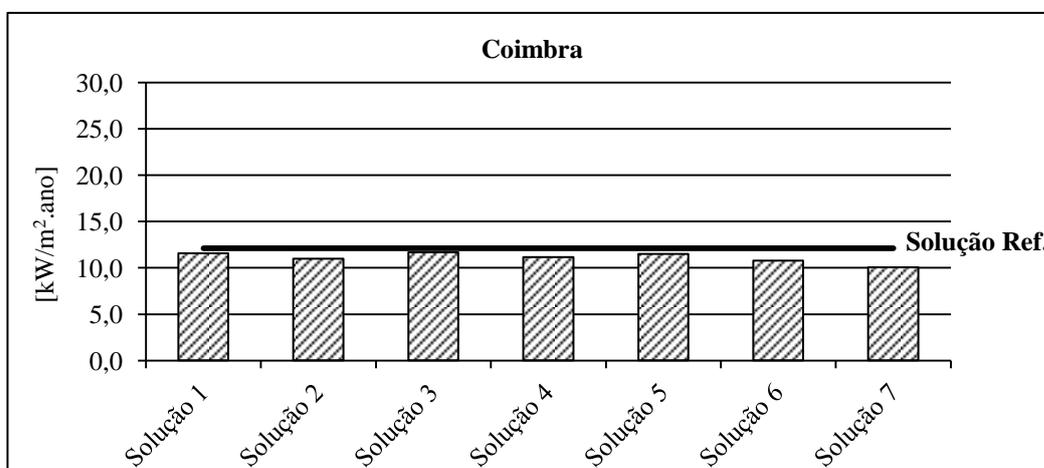
**Figura 73:** Necessidades de arrefecimento do edifício multifamiliar localizado em Bragança

No gráfico da Figura 74 de Guimarães a Solução 7 foi a que mais uma vez apresentou os melhores resultados com uma redução de cerca de 32,4% relativamente ao edifício antes da reabilitação. A solução 6 implementou no edifício melhorias de 18,1%, seguida da Solução 2 com 14,7%, da Solução 4 com 13,5%, a Solução 5 com 8,0% e a Solução 1 com 6,6%. A solução menos eficiente foi a Solução 3 com melhorias de apenas 6,1%.



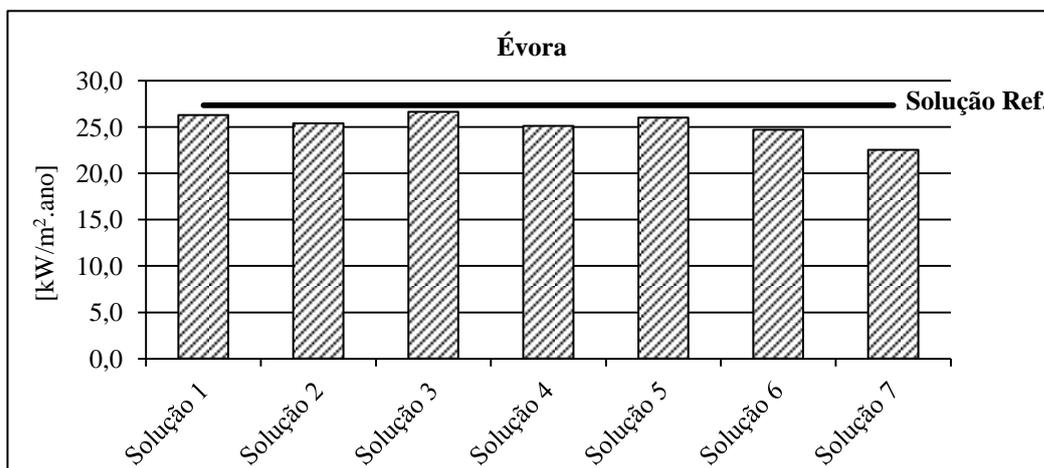
**Figura 74:** Necessidades de arrefecimento do edifício multifamiliar localizado em Guimarães

Na Figura 75 a Solução 7 obteve novamente os melhores resultados permitindo uma redução de 17,2% das necessidades de arrefecimento relativamente à solução existente. A solução que menos melhorias introduziu ao sistema durante a estação de arrefecimento em Coimbra foi a Solução 3 com uma redução de apenas 4,4% relativamente à Solução de Referência. Relativamente às restantes soluções estas permitiram reduções de 4,5% com a Solução 1, 9,5% com a Solução 2, 8,1% com a Solução 4, 5,1% com a Solução 5 e 11,2% com a Solução 6.



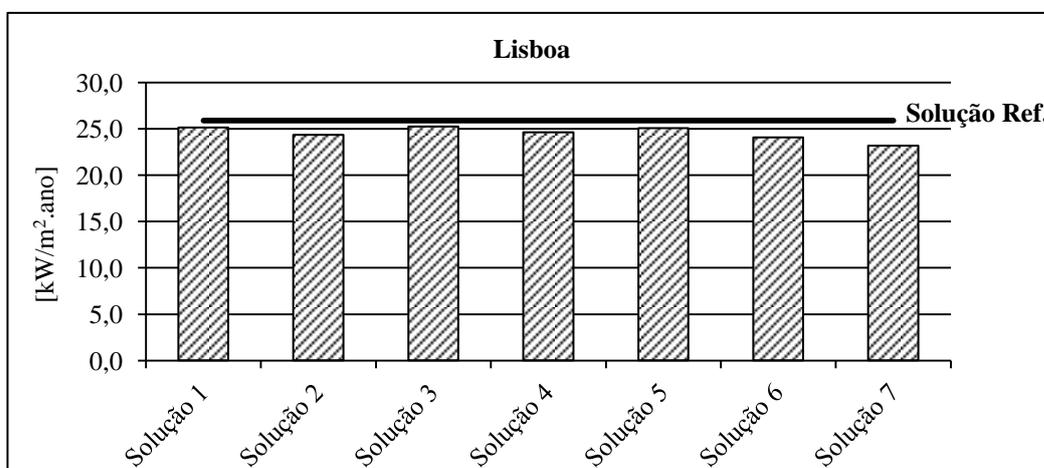
**Figura 75:** Necessidades de arrefecimento do edifício multifamiliar localizado em Coimbra

Na Figura 76 verifica-se que a Solução 7 foi a mais eficiente com uma percentagem de 17,7% de redução das necessidades de arrefecimento, de seguida a Solução 6 reduziu as necessidades de arrefecimento do edifício em 9,7%, a Solução 4 com uma redução de 8,2%, a Solução 2 com 7,2%, a Solução 5 com 4,9%, a Solução 1 com 4,0%, e por fim a Solução 3 com a menor percentagem de redução das necessidades de 2,8%.



**Figura 76:** Necessidades de arrefecimento do edifício multifamiliar localizado em Évora

A melhor solução de reabilitação para Lisboa foi a Solução 7 que conseguiu reduzir as necessidades de arrefecimento do edifício em 10,6%, seguida da Solução 6 com uma redução de 7,0%. A solução menos eficiente foi a Solução 3 com uma redução de apenas 2,6% relativamente ao edifício original; a Solução 1 reduziu as necessidades de arrefecimento em 2,9%; as soluções 2 teve uma percentagem de redução de 6,1%, a Solução 4 reduziu em 5,0% as necessidades de arrefecimento do edifício unifamiliar e a Solução 5 reduziu em 3,2% (Figura 77).



**Figura 77:** Necessidades de arrefecimento do edifício multifamiliar localizado em Lisboa

Tal como foi observado nos resultados das simulações efetuadas ao edifício unifamiliar também para este caso de estudo foi possível observar a influência do clima de cada local relativamente às necessidades energéticas do edifício. Bragança apresentou valores de necessidades de aquecimento mais elevados correspondentes a uma localidade com um clima de Inverno mais rigoroso do que as restantes zonas. Évora apresentou as maiores necessidades para arrefecimento do edifício multifamiliar associadas ao clima de Verão mais severo do que os restantes locais.

Ao contrário do que aconteceu com o edifício unifamiliar, para este caso a Solução 7 mostrou ser a mais eficiente em todas as localidades a nível de necessidades de aquecimento e também de arrefecimento. De forma inversa a Solução 3 foi a menos eficiente para as necessidades de aquecimento e de arrefecimento do edifício multifamiliar em todas as localidades estudadas.

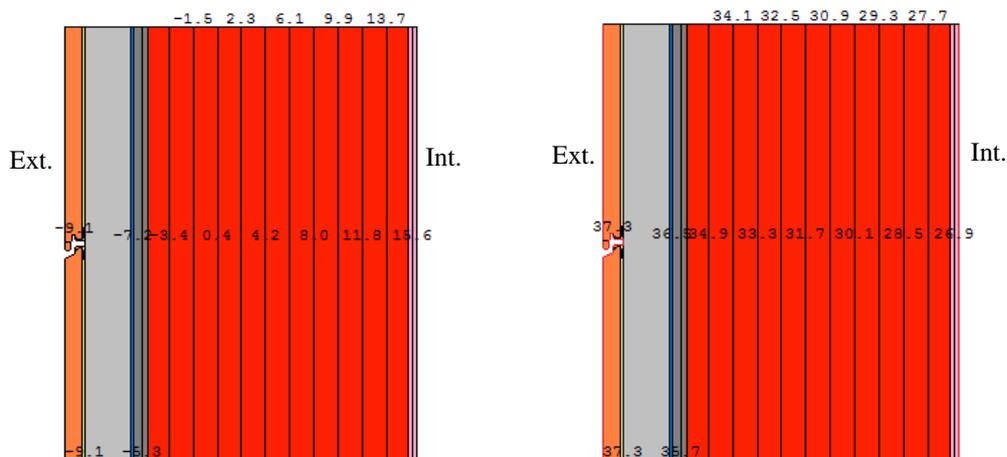
Neste caso de estudo a classificação de solução mais eficiente à menos eficiente é facilmente atribuída uma vez que o desempenho energético do edifício reabilitado foi semelhante independentemente da localidade, ou seja, a Solução 7 obteve melhores resultados de desempenho energético qualquer que fosse a localização do edifício, seguida pela Solução 6, Solução 4, Solução 2, Solução 5, Solução 1 e por fim a solução menos eficiente, a Solução 3 que apresentou os piores resultados quer a nível de necessidades de aquecimento quer de arrefecimento para todas as localidades estudadas.

Com base apenas nos resultados das simulações dinâmicas efetuadas ao edifício multifamiliar antes e após a reabilitação, não é possível fazer uma comparação entre o desempenho energético das soluções com isolamento exterior e interior, pois existem soluções com isolamento exterior com desempenhos muito bons (Solução 7) e péssimos (Solução 3).

### **5.1.3. Pontes Térmicas**

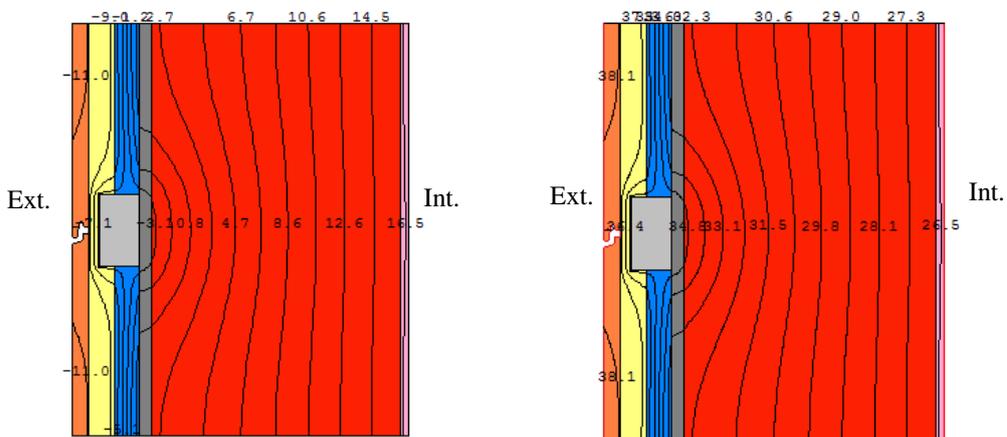
As secções escolhidas para o estudo da ocorrência de pontes térmicas nas soluções de fachada do edifício multifamiliar foram idênticas às que foram escolhidas no caso do edifício unifamiliar. A diferença é que neste caso de estudo a parede existente corresponde à solução de fachada do edifício multifamiliar. As Figuras 78 a 87 mostram

para cada solução de reabilitação as linhas isotérmicas para Bragança e Évora, considerando para Bragança uma temperatura exterior de  $-11,7^{\circ}\text{C}$  e interior de  $20^{\circ}\text{C}$  e para Évora uma temperatura exterior de  $38,4^{\circ}\text{C}$  e interior de  $25^{\circ}\text{C}$ . É mostrada a secção onde se podem distinguir através das diferentes cores os materiais que compõem a solução. Sobreposta à secção encontram-se as linhas isotérmicas onde se pode verificar a evolução da temperatura ao longo da secção. No lado esquerdo encontram-se os resultados para Bragança e no lado direito para Évora. A Figura 78 apresenta as temperaturas na zona de ligação dos painéis do revestimento da Solução 1 (S1) ao longo da secção através de isotérmicas.

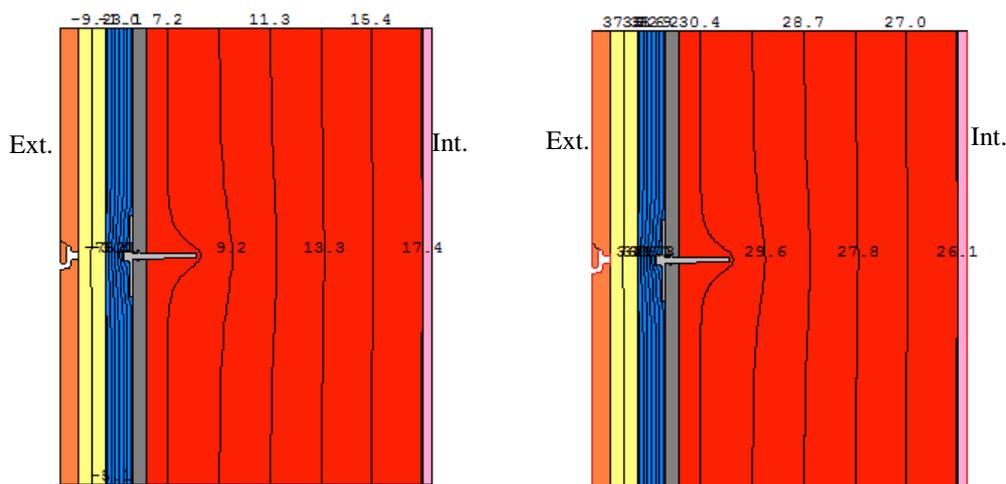


**Figura 78:** Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 1: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

As Figuras 79 e 80 apresentam a zona de ligação mecânica da Solução 1 à fachada do edifício unifamiliar (S2 e S3) com a representação das temperaturas ao longo da secção através de isotérmicas.

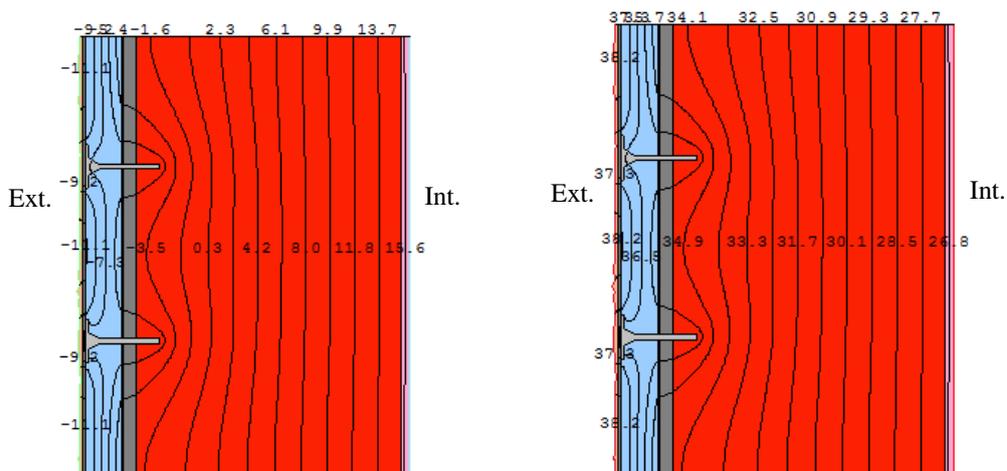


**Figura 79:** Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)



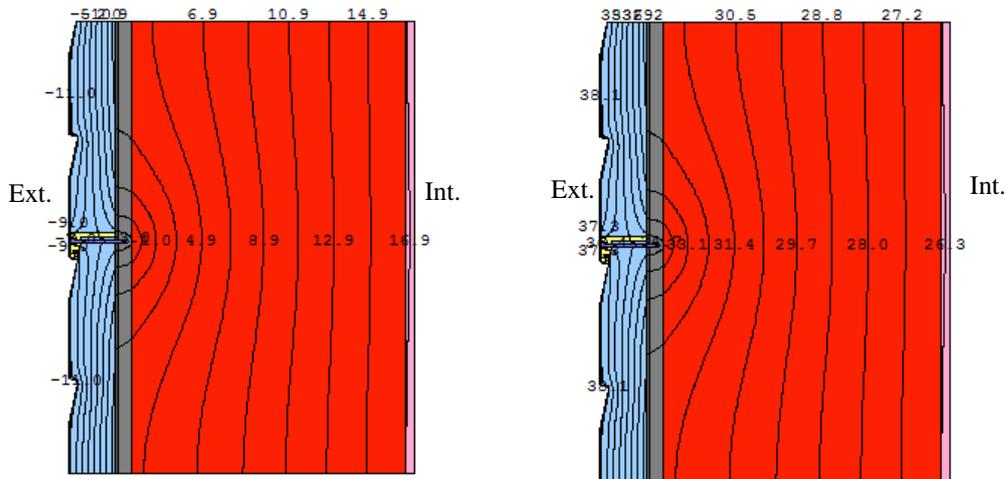
**Figura 80:** Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 3: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

No sistema de isolamento térmico composto exterior com revestimento delgado sistema – Solução 2 – da Figura 81 ilustram-se as temperaturas ao longo da secção na zona de fixação mecânica do isolamento térmico à parede.



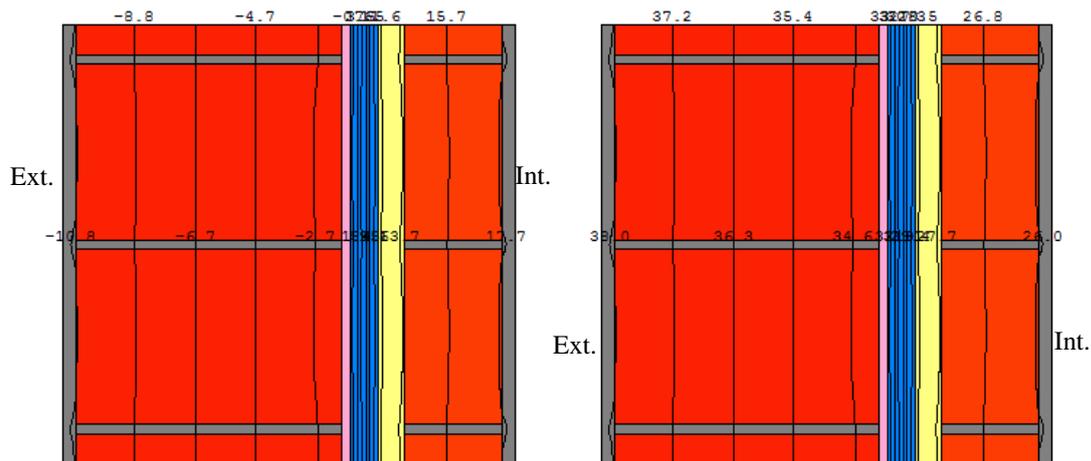
**Figura 81:** Edifício multifamiliar – Solução 2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

O sistema de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados recorre a ligações mecânicas para fazer a ligação do paramento exterior ao sistema. A Figura 82 apresenta as linhas isotérmicas dessa secção.



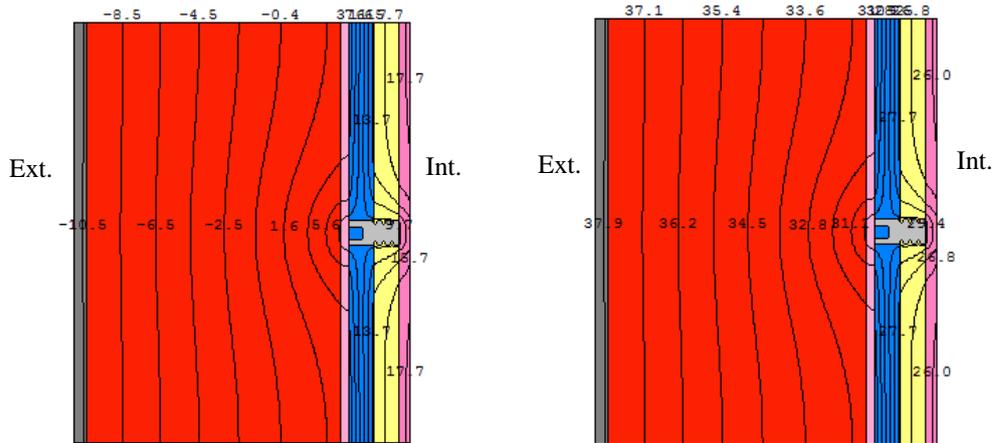
**Figura 82:** Edifício multifamiliar – Solução 3: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

Na solução de isolamento pelo interior de contra-fachada de alvenaria foram analisadas as juntas. As temperaturas ao longo da secção são ilustradas pela Figura 83.

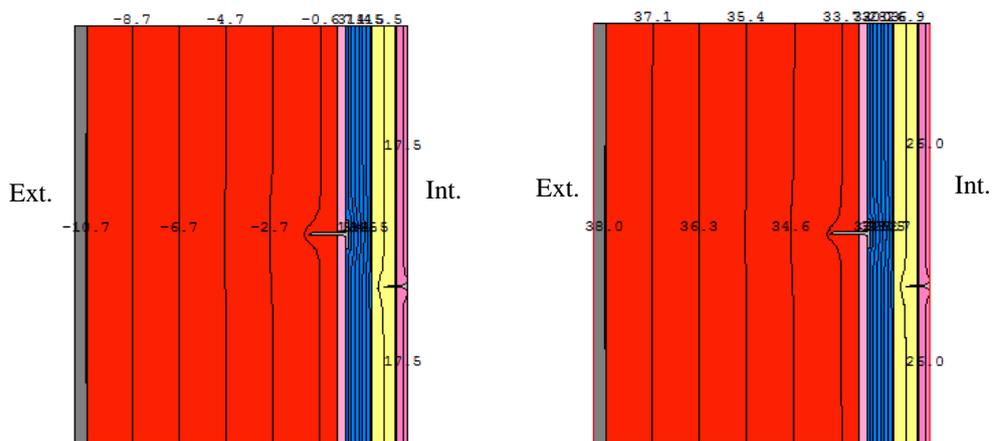


**Figura 83:** Edifício multifamiliar – Solução 4: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

A solução de contra-fachada de gesso cartonado utiliza algumas ligações mecânicas para fixação do sistema à fachada (S1) e fixação do painel de gesso cartonado e do isolamento (S2). Estas secções são apresentadas nas Figuras 84 e 85 com as respetivas linhas de temperaturas ao longo da secção.

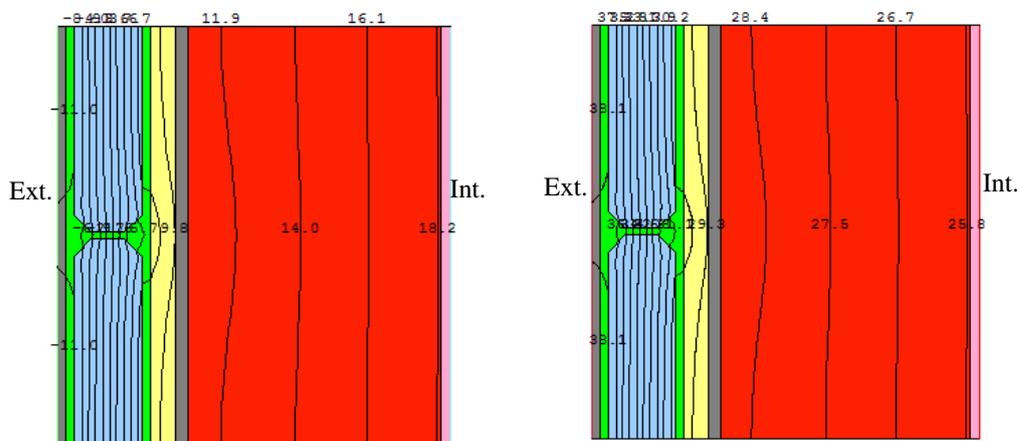


**Figura 84:** Edifício multifamiliar – Solução 5, S1: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)



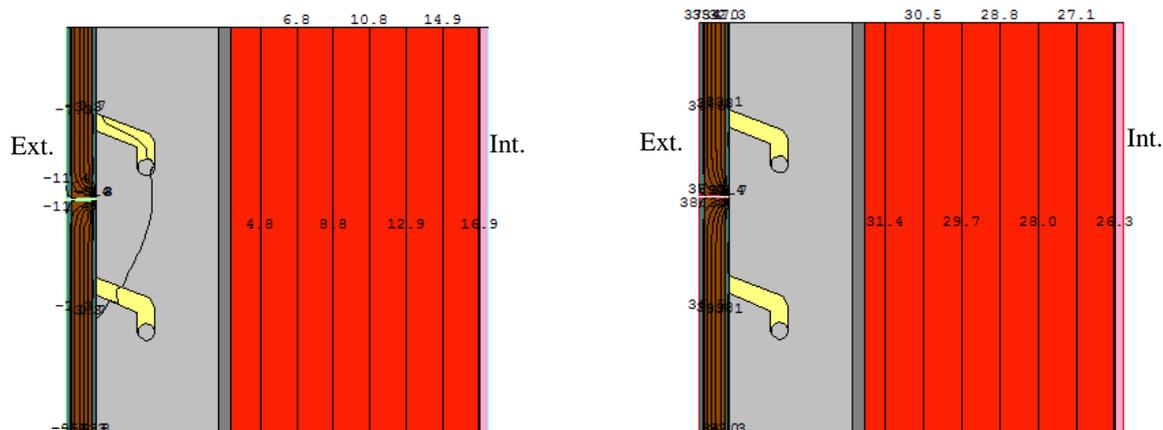
**Figura 85:** Edifício multifamiliar – Solução 5, S2: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

Na Figura 86 é apresentada a zona de nervuras que intercalam o isolamento interior do painel GRC (Solução 6) simulada pelo programa, com as respetivas temperaturas ao longo da secção.



**Figura 86:** Edifício multifamiliar – Solução 6: temperaturas ao longo da secção (Bragança e Évora)

O módulo de reabilitação prefabricado utiliza uma estrutura de suporte metálica que é fixada sobre a fachada para posterior colocação dos painéis. A secção onde os painéis encaixam na estrutura de suporte foi simulada e as linhas isotérmicas ao longo da secção encontram-se na Figura 87.



**Figura 87:** Edifício multifamiliar – Solução 7: temperaturas ao longo da (Bragança e Évora)

O Quadro 31 contém os valores dos coeficientes de transmissão térmica calculados pelo programa para cada uma das zonas analisadas ( $U_{\text{secção}}$ ) e para a zona corrente da solução de reabilitação ( $U_{\text{zona corrente}}$ ) e o acréscimo das perdas de calor da secção em relação à zona corrente devido à existência das pontes térmicas.

**Quadro 31:** Valor de  $U$  da secção,  $U$  da zona corrente e perdas associadas à secção do edifício multifamiliar.

Soluções/Secções		$U_{\text{secção}} [\text{w/m}^2\text{k}]$	$U_{\text{zona corrente}} [\text{w/m}^2\text{k}]$	Acréscimo de perdas [%]
Solução 1	S1	1,01	0,54	87
	S2	0,80	0,54	48
	S3	0,56	0,54	4
Solução 2		1,00	0,52	93
Solução 3		0,71	0,46	54
Solução 4		0,49	0,47	5
Solução 5	S1	0,69	0,53	31
	S2	0,54	0,53	2
Solução 6		0,37	0,36	3
Solução 7		0,65	0,18	264

Observando os valores do Quadro 33 para o coeficiente de transmissão térmica de cada uma das zonas correntes das soluções de reabilitação verifica-se que para o edifício multifamiliar a Solução 7 tem o melhor desempenho térmico pois tem o menor valor U. Contudo, na zona de ligação entre o módulo e a estrutura de suporte que o fixa à parede existente verifica-se um acréscimo das perdas de calor pontual de 264%, justificado pela quebra do isolamento térmico e pelo material metálico da ligação do painel à estrutura metálica de suporte que acompanha toda a zona estudada. As áreas onde o isolamento térmico não é atravessado pelas fixações mecânicas apresentaram menores perdas de calor, e por isso os valores do acréscimo de perdas na secção 3 da Solução 1, na Solução 4, na secção 2 da Solução 5 e na Solução 6 são de apenas 4%, 5%, 2% e 3%, respetivamente.

Conclui-se que as pontes térmicas são influenciadas essencialmente por fatores relacionados com dois elementos das soluções: as fixações mecânicas e o isolamento. A sua posição na secção bem como o material e a área de superfície que a fixação ocupa na secção e a descontinuidade do isolamento térmico contribuem para o agravamento do comportamento térmico da solução.

Algumas soluções estudadas preveem a aplicação de medidas pontuais para minimizar as pontes térmicas mas não foram consideradas por falta de informação mais específica.

## **5.2. DESEMPENHO ACÚSTICO**

O desempenho acústico das soluções de fachada em estudo foi avaliado através do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior do edifício e quartos ou salas ( $D_{2m, nT,W}$ ). O regulamento em vigor – RRAE – indica que para zonas sensíveis este índice deve ter um valor igual ou superior a 28dB [RRAE, 2008].

A justificação da escolha dos compartimentos analisados, bem como de todos os cálculos necessários para posterior simulação encontram-se descritos no subcapítulo 3.4. De seguida nos Quadros 32 e 33, mostram-se os resultados alcançados para o Quarto 4 e a Sala 2 do edifício multifamiliar, respetivamente.

**Quadro 32:** Resultados obtidos nas simulações acústicas do Quarto 4 do edifício multifamiliar [dB]

Índice	Sol. Ref.	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
$D_{nT, rosa}$	39	37	39	39	33	38	37	39
$D_{nT, traf}$	34	31	34	34	27	33	32	34
$D_{nT, W}$	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>34</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>40</b>
$D_{nT, W + C}$	38	36	38	38	32	37	37	38
$D_{nT, W + Ctr}$	34	32	35	34	27	33	33	35
$D_{nT, W + C100-5000}$	39	37	39	39	33	38	37	39
$D_{nT, W + Ctr100-5000}$	34	32	35	34	27	33	33	35

**Quadro 33 –** Resultados obtidos nas simulações acústicas da Sala 2 do edifício multifamiliar [dB]

Índice	Sol. Ref.	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
$D_{nT, rosa}$	37	36	37	37	33	37	37	37
$D_{nT, traf}$	33	31	33	33	28	32	32	33
$D_{nT, W}$	<b>39</b>	<b>37</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>35</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>39</b>
$D_{nT, W + C}$	37	35	37	37	32	36	36	37
$D_{nT, W + Ctr}$	33	32	33	33	28	33	32	33
$D_{nT, W + C100-5000}$	37	36	38	37	33	37	37	38
$D_{nT, W + Ctr100-5000}$	33	32	33	33	28	33	32	33

Os resultados acima apresentados representam o desempenho acústico de toda a fachada, isto é, a parte opaca e o envidraçado existente, mas na reabilitação não foi alterado nem o envidraçado nem a caixilharia existente. Assim sendo, verifica-se que todas as soluções cumprem o disposto no regulamento incluindo a solução já existente (solução de referência). A reabilitação da fachada existente com as soluções estudadas não melhora o seu desempenho acústico e algumas dessas soluções diminuem substancialmente o índice de isolamento sonoro da fachada. É o caso da Solução 4 – a contra-fachada de alvenaria – cuja quebra de isolamento sonoro devido à espessura do tijolo ser igual à do tijolo aplicado na solução existente, influencia negativamente o desempenho acústico da fachada. Apesar de ser a solução que apresenta piores resultados, os valores obtidos verificam o valor estipulado no RRAE.

As soluções de parede dupla: Solução 1, Solução 4, Solução 5 e Solução 6 reduzem o desempenho acústico da fachada devido à existência da caixa-de-ar que implicam quebras no isolamento sonoro devido à sua frequência de ressonância. As restantes soluções não alteram o desempenho acústico da fachada e isto pode dever-se à leveza das soluções em si. Ensaios realizados pelo CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) com soluções semelhantes à Solução 3 mostraram que as soluções leves têm pouco ou nenhum efeito no desempenho acústico da fachada [Guigou-Carter, 2010].

### 5.3. ANÁLISE ECONÓMICA

Na avaliação da viabilidade da colocação das soluções de reabilitação estudadas relativamente à solução de base existente nas fachadas foi utilizado o cálculo do Período de Retorno Simples, cujo valor é dado pelo quociente entre a variação do custo de investimento e a variação do custo de exploração.

Uma vez que na reabilitação da fachada a parede existente mantém-se, ou seja, apenas são colocadas pelo exterior ou interior da mesma as soluções de reabilitação, o parâmetro  $\Delta$ Custo de Investimento corresponde ao custo de implementação de cada uma das soluções de reabilitação (Quadro 34).

**Quadro 34:** Custo de implementação das soluções de reabilitação no edifício multifamiliar

	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
Área a Reabilitar [m <sup>2</sup> ]	667,21	667,21	667,21	502,91	502,91	667,21	667,21
Custo [€]	81699,41	45476,78	42467,68	16862,68	15052,20	88838,52	44664,36
Custo [€/m <sup>2</sup> ]	122,45	68,16	63,65	33,53	29,93	133,15	66,94

De salientar que as áreas de fachada a reabilitar variam de acordo com a posição onde serão colocadas as diversas soluções construtivas: pelo exterior ou pelo interior da parede exterior existente. Os preços utilizados baseiam-se nos valores que constam no Gerador de Preços *on-line* do CYPE que incluem materiais e seu transporte, montagem da solução, maquinaria, mão-de-obra, meios auxiliares e outros custos indiretos associados à implementação de cada uma das soluções construtivas.

Para determinar o Custo de Exploração, conforme o que já foi especificado na

metodologia (Capítulo 3), são necessários os resultados obtidos nas simulações energéticas realizadas anteriormente com o DesignBuilder e EnergyPlus. No Quadro 35 apresentam-se os resultados obtidos nas simulações.

**Quadro 35:** Resumo dos resultados obtidos nas simulações energéticas [kWh/m<sup>2</sup>.ano]

Local		Sol. Ref.	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
Bragança	Naq	169,59	160,66	154,29	163,25	150,15	157,94	147,39	122,41
	Nar	11,12	10,44	9,83	10,63	9,68	10,27	9,39	7,97
Guimarães	Naq	81,31	76,88	74,07	78,47	71,57	75,45	70,46	57,56
	Nar	18,69	17,46	15,95	17,56	16,16	17,19	15,30	12,63
Coimbra	Naq	72,18	67,61	64,60	68,97	62,42	66,32	61,09	48,60
	Nar	12,12	11,58	10,97	11,66	11,14	11,50	10,76	10,04
Évora	Naq	76,51	71,83	68,54	73,29	66,28	70,33	64,90	51,72
	Nar	27,37	26,27	25,41	26,62	25,13	26,02	24,71	22,53
Lisboa	Naq	53,20	49,52	47,13	50,79	45,08	48,29	44,14	33,48
	Nar	25,92	25,16	24,34	25,25	24,64	25,09	24,10	23,19

O Quadro 36 apresenta os custos de exploração associados a cada solução de reabilitação para cada um dos locais de implantação do edifício multifamiliar.

**Quadro 36:** Custo de Exploração [€/ano]

Local	Sol. Ref.	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
Bragança	24348,05	23061,90	22140,81	23435,61	21550,95	22672,27	21150,01	17571,91
Guimarães	12176,63	11505,26	11051,53	11732,75	10706,86	11293,48	10517,67	8597,83
Coimbra	10640,22	9975,60	9527,56	10170,28	9226,96	9791,02	9025,61	7235,47
Évora	11826,49	11124,75	10627,97	11342,81	10297,69	10902,98	10087,69	8145,24
Lisboa	8482,01	7933,89	7565,51	8117,15	7288,14	7757,54	7135,03	5596,39

A poupança anual alcançada devido à implementação de cada uma das soluções de reabilitação de fachada encontra-se no Quadro 37.

**Quadro 37:**  $\Delta$ Custo de Exploração [€/ano]

Local	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5	Solução 6	Solução 7
<b>Bragança</b>	1286,15	2207,24	912,44	2797,10	1675,78	3198,04	6776,14
<b>Guimarães</b>	671,37	1125,10	443,88	1469,77	883,15	1658,96	3578,80
<b>Coimbra</b>	664,62	1112,66	469,93	1413,26	849,20	1614,61	3404,75
<b>Évora</b>	701,74	1198,52	483,68	1528,80	923,51	1738,80	3681,25
<b>Lisboa</b>	548,12	916,49	364,86	1193,86	724,47	1346,98	2885,62

Assim sendo, o período de retorno simples esperado para cada uma das soluções tem um valor correspondente ao indicado no Quadro 38.

**Quadro 38:** Período de Retorno Simples [anos]

Local	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5	Solução 6	Solução 7
<b>Bragança</b>	64	21	47	<b>6</b>	<b>9</b>	28	<b>7</b>
<b>Guimarães</b>	122	40	96	11	17	54	12
<b>Coimbra</b>	123	41	90	12	18	55	13
<b>Évora</b>	116	38	88	11	16	51	12
<b>Lisboa</b>	149	50	116	14	21	66	15

Tratando-se de reabilitação de edifícios, o seu período de vida útil é mais reduzido pelo que o tempo obtido para o período de retorno do investimento é elevado e nesta perspetiva grande parte das soluções de reabilitação são economicamente inviáveis. As Soluções 4 e 5 de reabilitação pelo interior do edifício apresentam menores custos de implementação devido à área de reabilitação pelo interior do edifício ser inferior à área de reabilitação das restantes soluções. A Solução 7 também apresenta um menor período de retorno simples devido aos baixos consumos energéticos associados à sua aplicação, o que significa que tem um custo de exploração mais baixo relativamente às restantes soluções. A solução que registou os piores resultados foi a Solução 1. Tal como para o edifício unifamiliar, as localidades onde se verifica uma melhor relação custo/benefício são Bragança e Évora, pois a redução dos consumos implementada pelas soluções de reabilitação é mais significativa.



## **CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

### **6.1. CONCLUSÕES**

Este trabalho consistiu na avaliação do comportamento térmico, acústico e económico de diversas soluções de reabilitação para fachadas: revestimento independente descontínuo com isolante térmico na caixa-de-ar (Solução 1); sistema de isolamento térmico compósito exterior com revestimento delgado (Solução 2); sistema de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados (Solução 3); contra-fachada de alvenaria (Solução 4); contra-fachada de gesso cartonado (Solução 5); painel prefabricado de betão reforçado com fibras de vidro (Solução 6); módulo de reabilitação prefabricado (Solução 7).

Estas soluções foram aplicadas a duas tipologias de edifícios residenciais: edifício unifamiliar e multifamiliar. Foram consideradas várias localizações para a implantação dos edifícios tendo em conta a severidade dos climas, no caso de Bragança e Évora, e a sua disposição geográfica (Guimarães, Coimbra e Lisboa) pretendendo-se analisar locais das três regiões do país, o que permitiu o estudo de diferentes zonas climáticas e a análise da sua influência na escolha das soluções a implementar.

O desempenho energético das soluções colocadas no edifício unifamiliar foi avaliado com recurso à ferramenta de simulação DesignBuilder para a modelação e a simulação dinâmica do seu comportamento anual. No caso do edifício multifamiliar, para se proceder ao ajustamento do modelo foi utilizado também o programa EnergyPlus para complementar a modelação e proceder à simulação dinâmica do edifício.

A influência do clima de cada local nas necessidades energéticas dos edifícios estudados fizeram-se notar nos resultados das simulações energéticas pois Bragança com um clima de Inverno mais rigoroso foi a localidade onde as necessidades de aquecimento do edifício foram maiores e Évora com uma estação de Verão mais severa relativamente aos restantes locais obteve os valores mais elevados no que respeita às necessidades de arrefecimento. A Solução 7 é a solução mais eficiente em termos energéticos pois obteve os melhores resultados relativamente à redução das necessidades de aquecimento dos dois edifícios estudados e no caso do edifício multifamiliar isso também se

verificou para as necessidades de arrefecimento. No entanto, em algumas situações nomeadamente na localidade de Évora, a Solução 7 não mostrou ser tão eficiente de Verão, o que poderá dever-se à elevada espessura de isolamento. As soluções com menor desempenho energético foram a Solução 1 e a Solução 3. Para o edifício unifamiliar as soluções de reabilitação pelo interior dos edifícios (Solução 4 e Solução 5) mostraram ser menos eficientes relativamente às restantes, principalmente durante a estação de arrefecimento.

As pontes térmicas, em ambos os casos de estudo, são normalmente causadas pela aplicação de materiais condutores (metal) para fixação do isolamento ou de outro componente à fachada. O THERM através da análise 2D das transferências de calor nas secções, avalia as perdas que ocorrem traduzindo-as no aumento do coeficiente de transmissão térmica (U) relativamente ao U da zona corrente da solução.

De entre todas as secções estudadas para ambos os edifícios, a que apresentou resultados mais gravosos foi a secção S1 (zona de sobreposição dos painéis) da Solução 1 com  $U_{\text{secção}}$  de  $0,94 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  para o edifício unifamiliar e de  $1,01 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  para o edifício multifamiliar. Contrariamente, a secção da Solução 6 foi a melhor solução apresentando um baixo valor de  $U_{\text{secção}}$  de  $0,36 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  para o edifício unifamiliar e de  $0,37 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  para o edifício multifamiliar. Tendo em conta a diferença entre os coeficientes de transmissão térmica das soluções e das respetivas secções, a Solução 7 foi a que registou maiores perdas pontuais (276% no edifício unifamiliar e 264% no edifício multifamiliar), uma vez que a secção diz respeito à ligação dos painéis à fachada através de uma estrutura metálica de suporte. Na secção S2 da Solução 5, regista-se a menor diferença entre os valores de U da secção e da solução (1% no edifício unifamiliar e 2% no edifício multifamiliar). A Solução 6 foi a melhor solução em termos térmicos pois apresentou baixos valores de coeficiente de transmissão térmica e uma baixa percentagem de perdas na secção estudada, quer no caso do edifício unifamiliar quer no multifamiliar.

As pontes térmicas para além de acarretarem maiores consumos energéticos nos edifícios podem também conduzir ao aparecimento de condensações causando desconforto para os ocupantes do edifício. As medidas utilizadas para mitigar as perdas que ocorrem nestas zonas devem ser cuidadosamente estudadas pois podem conduzir ao aparecimento de condensações nas soluções afetando a eficiência do seu desempenho.

A avaliação do desempenho acústico das soluções foi realizada através do programa de simulação acústica Acoubat Sound. Este programa utiliza as curvas de redução sonora das soluções aplicadas e a geometria dos vários elementos constituintes dos compartimentos em estudo para determinar qual o seu comportamento acústico. Uma vez que não se encontram disponíveis as curvas de redução sonora relativas às soluções estudadas e dada a impossibilidade da sua implementação nos edifícios e respetiva medição *in situ*, estas curvas foram determinadas recorrendo à Lei da Massa.

Após a simulação e a análise dos resultados obtidos verificou-se que em ambos os edifícios, todas as soluções estudadas – solução existente e soluções de reabilitação – verificam o valor indicado pelo regulamento RRAE ( $\geq 28$  dB). No entanto, as soluções de reabilitação por si só não melhoram o desempenho acústico da fachada.

No edifício unifamiliar em ambos os compartimentos as soluções que não alteram o desempenho acústico da fachada sendo as melhores soluções encontradas são a Solução 2, Solução 3 e Solução 7. A Solução 5, Solução 6 e Solução 1 reduzem o isolamento sonoro a sons de condução aérea em 1 e 2 dB. A Solução 4 verificou o pior desempenho a nível de comportamento acústico.

De forma semelhante no edifício multifamiliar as melhores soluções, ou seja, aquelas que não agravaram o desempenho acústico da fachada são a Solução 2, Solução 3 e Solução 7. As Soluções 5 e 6 agravaram em 1 dB o desempenho acústico; a Solução 1 agravou em 2 dB e por fim a Solução 4 foi a que apresentou o pior desempenho acústico. No entanto, mesmo com a aplicação da Solução 4 na fachada dos edifícios o valor obtido excede o mínimo exigido pelo regulamento RRAE em ambos os edifícios.

Conclui-se que as soluções mais eficientes em termos acústicos para ambos os casos de estudo foram as que não alteraram o desempenho acústico dos edifícios – Solução 2, Solução 3 e Solução 7.

Os resultados demonstram que as quebras de isolamento sonoro devido às frequências críticas dos materiais e devido às frequências de ressonância da caixa-de-ar e do conjunto massa/caixa-de-ar têm uma grande influência no desempenho acústico das soluções. Por isso, deve ser dada especial atenção às espessuras e aos materiais utilizados nas soluções de reabilitação, a fim de evitar a ocorrência de quebras no isolamento sonoro e a sobreposição de quebras na mesma frequência.

Tratando-se de soluções leves, a inclusão de membranas acústicas ou a colocação de outros materiais de isolamento acústico deve ser previamente estudada para confirmar se poderá potenciar o desempenho acústico da fachada do edifício e se estas alterações são realmente uma mais-valia para a solução de reabilitação.

Para além da avaliação do desempenho energético e acústico das soluções foi também analisada a relação custo/benefício, correspondendo este “benefício” à redução dos consumos energéticos que resultam da implementação de cada uma das soluções na fachada dos edifícios estudados. Esta análise seguiu o indicado pelo RSECE, representando o parâmetro – Período de Retorno Simples – a relação custo/benefício das soluções.

No caso do edifício unifamiliar as Soluções 5, 4 e 7 foram as que apresentaram os melhores resultados com períodos de retorno mais curtos para a zona de Bragança, de 9 anos para as duas primeiras soluções e de 14 anos para a Solução 7. Para o edifício multifamiliar também estas foram as soluções com maior viabilidade económica com períodos de retorno de 6 anos (Solução 4), 7 anos (Solução 7) e 9 anos (Solução 5) para a zona de Bragança.

Em termos gerais, se se tiver em conta o período de retorno e a vida útil do edifício relativamente às melhorias introduzidas pelos sistemas de reabilitação, as restantes soluções de reabilitação estudadas são inviáveis. A pior solução em termos económicos foi a Solução 1 pois no caso do edifício multifamiliar apresentou períodos de retorno muito elevados (superiores a 100 anos) o que a torna inexequível nos edifícios avaliados.

Analisando todos os aspetos abordados no trabalho (energético, acústico e económico) a Solução 7 foi a que apresentou o melhor desempenho energético, foi uma das soluções que não prejudicou o desempenho acústico do edifício e foi uma das soluções com a melhor relação custo/benefício, encontrando-se entre as soluções mais viáveis. No entanto, o seu comportamento térmico na zona de ligação à estrutura de suporte deve ser melhorado para minimizar as perdas que ocorrem nesse local.

Uma vez que o país e os seus habitantes atravessam uma fase económica difícil, os custos imediatos inerentes à implementação das soluções podem ser relevantes para a escolha do sistema de reabilitação. Em termos de custos de implementação, as Soluções

4 e 5 abarcam menores custos pois sendo aplicadas pelo interior do edifício a sua área de aplicação é menor e os materiais e mão-de-obra utilizados também têm custos inferiores comparativamente às restantes soluções e o seu PRS é inferior a 10 anos. No entanto, este tipo de soluções reduz o espaço no interior do edifício e traz menores desempenhos a nível energético e acústico o que pode condicionar a escolha da sua implementação.

A localização do edifício tem uma grande influência no comportamento energético das soluções construtivas e conseqüentemente no custo/benefício de cada uma. Por um lado a severidade dos climas de Bragança e Évora impõem a existência de maiores necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, relativamente a outras localidades. Por outro lado é em Bragança e em Évora que se verificam os menores períodos de retorno, ou seja, apresentam a melhor relação custo/benefício, relativamente às restantes localidades analisadas.

## **6.2. PERSPETIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE TRABALHOS FUTUROS**

O estudo realizado permitiu verificar o comportamento energético das diversas soluções de reabilitação de fachadas quando aplicadas a dois tipos de edifícios e em diferentes zonas climáticas, e a sua viabilidade económica de implementação. A partir dele podem ser aprofundados alguns aspetos relevantes que não foram desenvolvidos neste trabalho mas complementam-no.

Um desses aspetos é a otimização das soluções, nomeadamente no que respeita à espessura do isolamento, adaptando-as às características de cada localidade, de acordo com os valores exigidos pela regulamentação existente.

Também será interessante estudar o comportamento de cada uma das soluções nas singularidades das fachadas: janelas (utilizando diferentes tipos de envidraçados e caixilharia), portas, grelhas de ventilação, ligação à cobertura, etc..

As singularidades acima referidas são pontos suscetíveis à ocorrência de pontes térmicas e como tal será importante estudar os pormenores das soluções e materiais utilizados para minimizar as pontes térmicas, verificando a sua funcionalidade, identificando fragilidades e indicando possíveis melhorias a introduzir nos sistemas de reabilitação.

A nível acústico, tal como já foi referido anteriormente, seria conveniente um estudo para verificar se a inclusão de membranas acústicas ou a colocação de outros materiais de isolamento acústico nas soluções de reabilitação poderiam influenciar positivamente o desempenho acústico da fachada do edifício.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[Acoubat, 2010] CSTB – Centre Scientifique et Technique du Batiment, Technical Manual Acoubat V6.0.9, 2010.

[Almeida, 2006] Almeida, M.; Silva, S. Climatização e instalações das construções II – térmica de edifícios. Universidade do Minho. Guimarães, 2006.

[Almeida, 2007] Almeida, M.; Silva, S.; Ferreira T. Climatização e instalações das construções I – Acústica Ambiental e de Edifícios. Universidade do Minho. Guimarães, 2007.

[Annex50, 2008] Zweifel, G. Case study building “Elfenau”, Lucerne – Specification. IEA ECBCS Annex 50. Maio, 2008.

[APICER, 1998] Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica. Manual de Alvenaria de tijolo. Coimbra, 1998.

[ASHRAE55, 2010] American Society for Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2010.

[CEC, 2008] 20 20 by 2020: Europe's climate change opportunity. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (COM(2008) 30 final). Commission of the European Communities. Brussels, January 2008

[Cunha, 2006] Cunha M. Desenvolvimento de um Sistema Construtivo para Fachadas Ventiladas. Dissertação de Mestrado em Construção de Edifícios, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, Dezembro de 2006.

[CYPE, 2012] Gerador de preços, CYPE Ingenieros, S. A. Acedido em: Janeiro, 2013. Disponível em: <http://geradordeprecos.cype.pt/>

[de Dear, 2001] Brager, G. S. e De Dear, R. Climate, Comfort & Natural Ventilation: A new adaptive comfort standard for ASHRAE Standard 55. Proceedings: Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century, Oxford Brookes University, Windsor, UK, April 2001.

[DL146, 2006] Decreto-Lei n.º 146/2006. Diário da República, I Série. 31 de Julho de 2006.

[DRACE, 2001] Sistema Drace para cerramiento de fachadas con paneles prefabricados de G.R.C.. Instituto Eduardo Torroja. Madrid, Agosto 2001.

[EPBD, 2010] Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). Jornal Oficial da União Europeia. 18 de Junho de 2010.

[EU, 2011] Europa – Sínteses da legislação da EU. Acedido em: Fevereiro, 2012. Disponível em: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/tackling\\_climate\\_change/128060\\_pt.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/128060_pt.htm)

[Euroconstruct, 2010] 69th EUROCONSTRUCT Conference – Summary Report, Dublin. Junho 2010. Acedido em: Fevereiro, 2012. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/64681046/Euro-Construct-June-2010>

[Euroconstruct, 2011] Euroconstruct. Press Info, Euroconstruct, 2011. Acedido em: Fevereiro, 2012. Disponível em: <http://www.euroconstruct.org>

[Euroconstruct, 2012] Euroconstruct. Press Info, Euroconstruct, Junho 2012. Acedido em: Novembro, 2012. Disponível em: <http://www.euroconstruct.org>

[Fanger, 1970] Fanger, P. O. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. Mc Graw-Hill, 1970.

[Ferreira, 2006] Ferreira, T. Sobre a utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior em edifícios residenciais em Portugal: análise do desempenho higrotérmico. Dissertação de Mestrado em Construção de Edifícios, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Abril de 2006.

[Freitas, 2002] Freitas V. P. Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior: Reboco Delgado Armado Sobre Poliestireno Expandido – ETICS. Porto, Dezembro 2002.

[Guigou-Carter, 2010] C. Guigou-Carter, R. Foret, R. Wetta, P. Ducruet, M. Villot. Comparison of measured and predicted sound insulation for a thermal retrofitted building. Internoise 2010. Lisboa, Junho de 2010.

[InCI, 2012] Instituto da Construção e do Imobiliário, I.P.; Direção de Análise de Mercados; Ministério da economia e do Emprego. Perspetivas para a construção até 2014. Junho 2012.

[INE, 2001] Instituto Nacional de Estatística (INE). Censos 2001. Acedido em: Fevereiro, 2012. Disponível em: <http://www.ine.pt>

[INE, 2009] Instituto Nacional de Estatística (INE). Estatísticas da Construção e Habitação 2008, Julho 2009. Acedido em: Fevereiro, 2012. Disponível em: <http://www.ine.pt>

[INE, 2011] Instituto Nacional de Estatística (INE). Estatísticas da Construção e Habitação 2010, 2011. Acedido em: Fevereiro, 2012. Disponível em: <http://www.ine.pt>

[ISO, 2005] ISO 7730. Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.

[ITeC, 2012] Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (ITeC). Sumario del informe EUROCONSTRUCT. Novembro de 2011. Acedido em: Novembro, 2012. Disponível em: <http://www.itec.es/noupsc.e/sumari.aspx>

[LBA, 1987] Lei de Bases do Ambiente, Lei n.º 11/87. Diário da República, I Série. 7 de Abril de 1987.

[Manual DB, 2008] DesignBuilder 1.5 User Manual, DesignBuilder Software, Ltd., 2008.

[Manual EP, 2008] EnergyPlus Manual Version 2.2, United States Department of Energy, 2008.

[Mateus, 2008] Mateus, D. Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído. Coimbra, Dezembro 2008.

[MRA, 2012] Software de simulação acústica. MRA Instrumentação. Acedido em: Outubro, 2012. Disponível em: <http://www.mra.pt>

[MRP, 2012] Almeida, M., Silva, P., Martins, E.. Módulo de Reabilitação Prefabricado. Universidade do Minho, Guimarães, 2012.

[NP2073, 1983] NP-2073. Acústica: Critério de quantificação do isolamento sonoro em edifícios. 1983

[Paiva, 2006] Paiva, J. V.; Aguiar, J.; Pinho A. Guia Técnico de Reabilitação Habitacional – Volume II. Instituto Nacional de Habitação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Agosto de 2006.

[Patrício, 2010] Patrício, J. V. Acústica nos edifícios. Lisboa, Janeiro de 2010.

[Pereira, 2006] Pereira, V. Tendências na reabilitação de fachadas - a contribuição da indústria de materiais de construção. Workshop: "O Habitat do Futuro inserido no património construído - desafios e oportunidades para o Sector da Reabilitação" promovido pela AveiroDomus. Aveiro, Janeiro de 2006.

[RCCTE, 2006] Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 80/2006. Diário da República, I Série A. 4 de Abril de 2006.

[Cardoso, 2010] Cardoso, F; Silva, P.. Revista Climatização – Edifícios e Energia. 5 Julho de 2010. Acedido em: Dezembro, 2012. Disponível em: <http://www.climatizacao.pt/noticias/5-julho-a-%281%29.aspx>

[RGR, 1987] Regulamento Geral do Ruído, Decreto-Lei n.º 251/87. Diário da República, I Série. 24 de Junho de 1987.

[RGR, 2000] Regulamento Geral do Ruído, Decreto-Lei n.º 292/2000. Diário da República, I Série-A. 14 de Novembro de 2000.

[RGR, 2007] Regulamento Geral do Ruído, Decreto-Lei n.º 09/2007. Diário da República, I Série. 17 de Janeiro de 2007.

[RRAE, 2008] Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 96/2008. Diário da República, I Série. 9 de Junho de 2008.

[RSECE, 2006] Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, Decreto-Lei n.º 79/2006. Diário da República, I Série A. 4 de Abril de 2006.

[Santos, 2003] Santos, A. A Iluminação Natural na Perspectiva da Reabilitação das Construções. LNEC. Abril 2003.

[SCE, 2006] Sistema de Certificação Energética, Decreto-Lei n.º 78/2006. Diário da República, I Série A. 4 de Abril de 2006.

[Silva, 1998] Silva, V., JOHN, V. Painéis em Cimento Reforçado com Fibras de Vidro (GRC). EPUSP. São Paulo, 1998.

[Sousa, 2009] Sousa, O.; Almeida, M.; Silva, P. Obtenção dos perfis de utilização, iluminação e de equipamentos das habitações residenciais. Universidade do Minho. Guimarães, 2009.

[THERM, 1998] Finlayson, E.U.; Mitchell, R.; Arasteh, D.; Huizenga, C.; Curcija, D. THERM 2.0 Program Description: A PC program for analysing the two-dimensional heat transfer through building products. California, Junho de 1998.



## **ANEXOS**

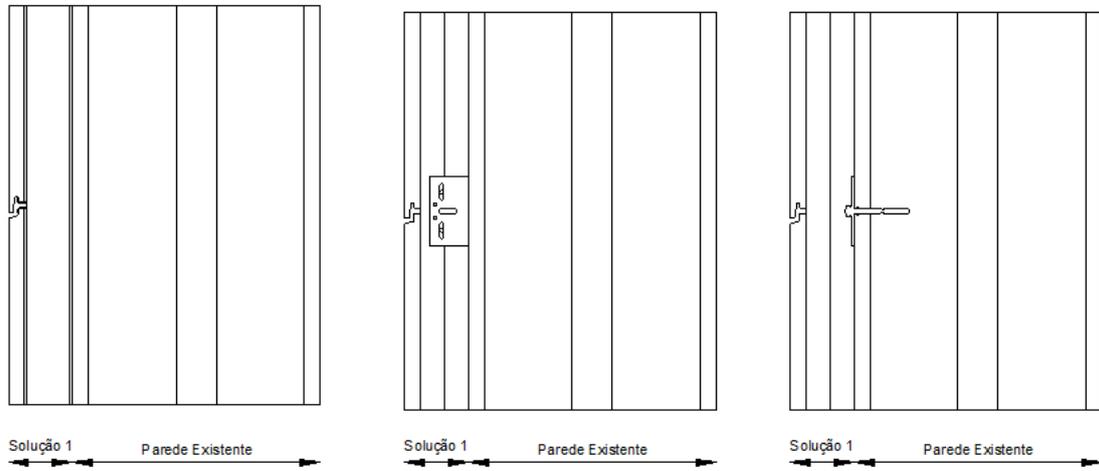
**EDIFÍCIO UNIFAMILIAR – SECÇÕES SIMULADAS NO THERM**

**EDIFÍCIO UNIFAMILIAR – SIMULAÇÕES ACÚSTICAS ACOUBAT SOUND**

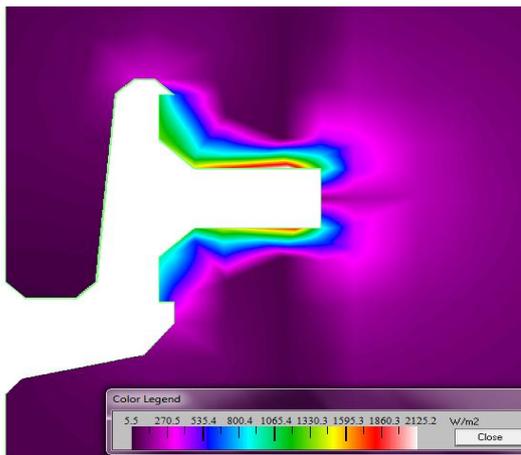
**EDIFÍCIO MULTIFAMILIAR – SECÇÕES SIMULADAS NO THERM**

**EDIFÍCIO MULTIFAMILIAR – SIMULAÇÕES ACÚSTICAS ACOUBAT SOUND**

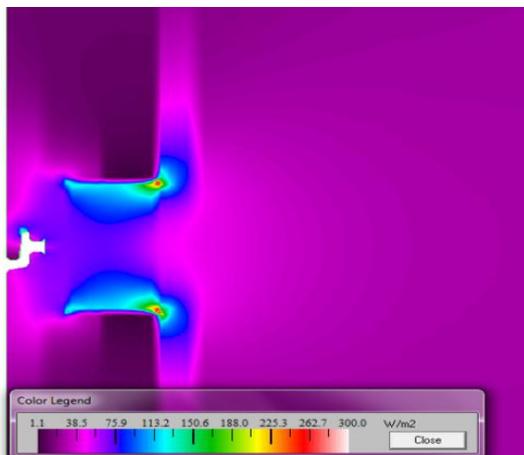
### EDIFÍCIO UNIFAMILIAR – SECÇÕES SIMULADAS NO THERM



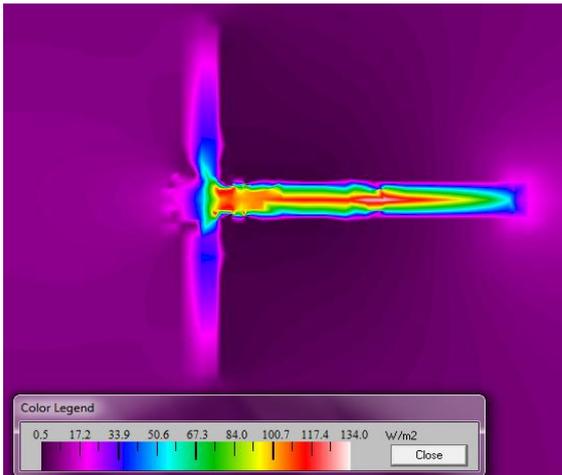
**Figura 88:** Edifício unifamiliar – Solução 1 – Secções 1, 2 e 3 simuladas no THERM



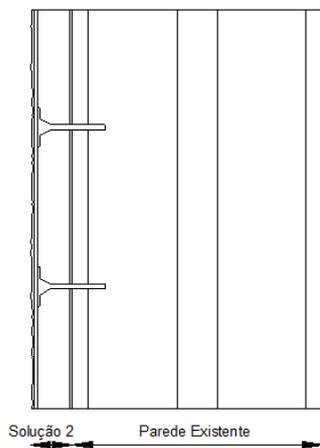
**Figura 89:** Edifício unifamiliar – Solução 1, secção 1: pormenor dos fluxos de calor



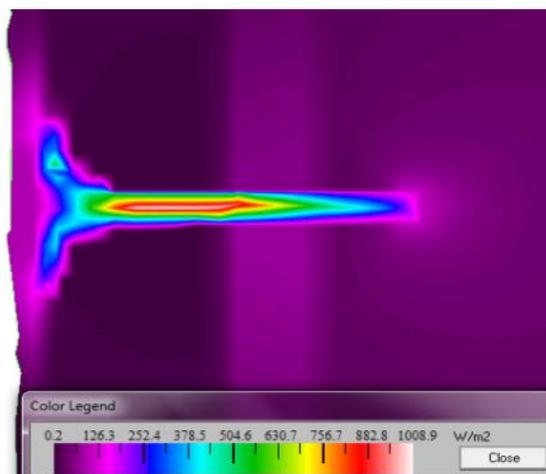
**Figura 90:** Edifício unifamiliar – Solução 1, secção 2: pormenor dos fluxos de calor



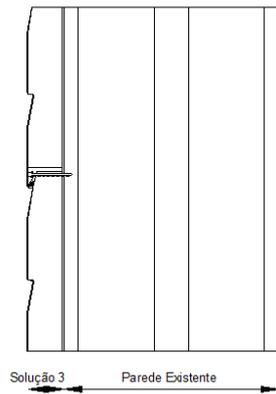
**Figura 91:** Edifício unifamiliar – Solução 1, secção 3: pormenor dos fluxos de calor



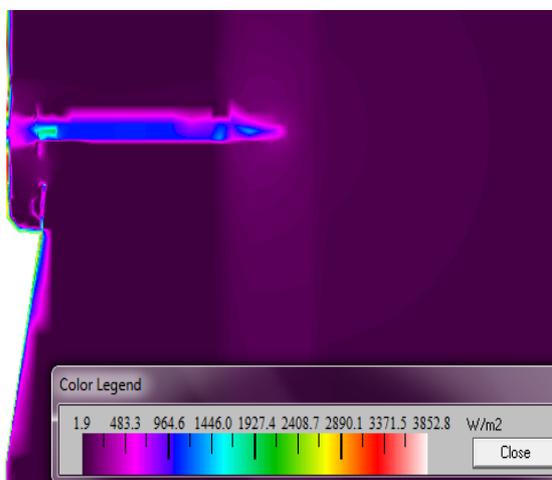
**Figura 92:** Edifício unifamiliar – Solução 2 – Secção simulada no THERM



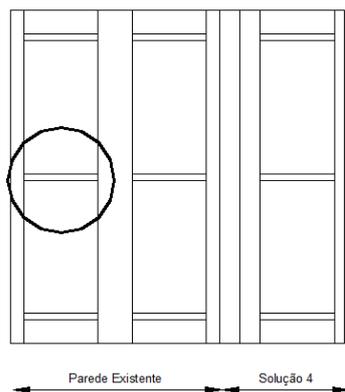
**Figura 93:** Edifício unifamiliar – Solução 2: pormenor dos fluxos de calor



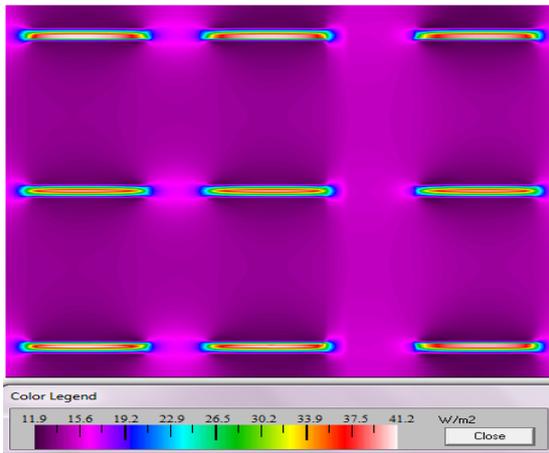
**Figura 94:** Edifício unifamiliar – Solução 3 – Secção simulada no THERM



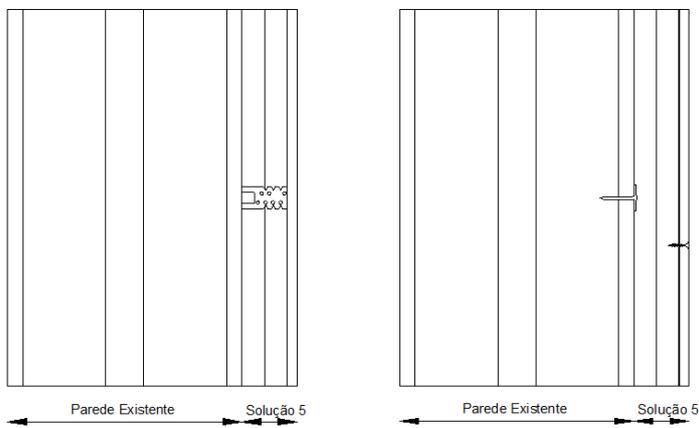
**Figura 95:** Edifício unifamiliar – Solução 3: pormenor dos fluxos de calor



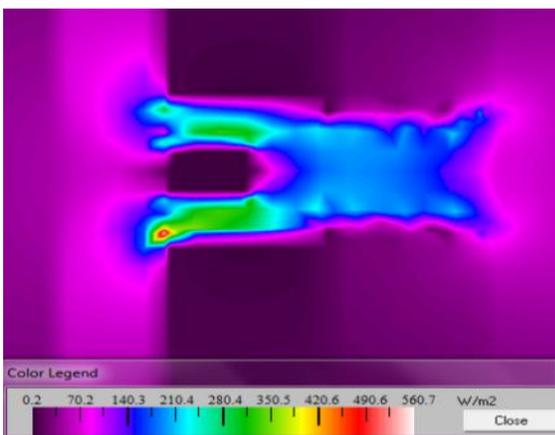
**Figura 96:** Edifício unifamiliar – Solução 4 – Secção simulada no THERM



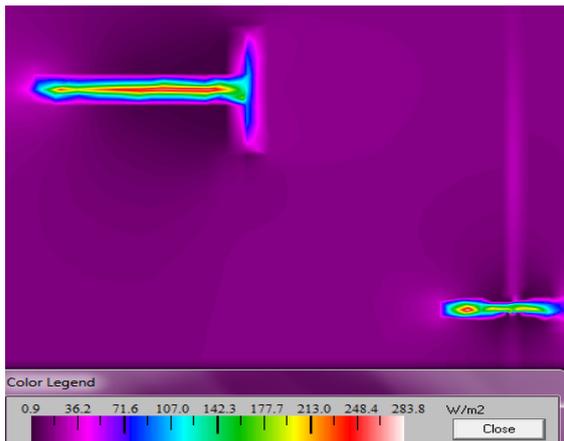
**Figura 97:** Edifício unifamiliar – Solução 4: pormenor dos fluxos de calor



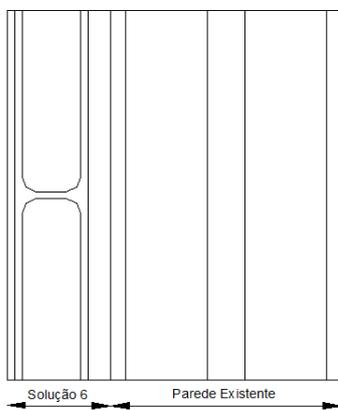
**Figura 98:** Edifício unifamiliar – Solução 5 – Secções 1 e 2 simuladas no THERM



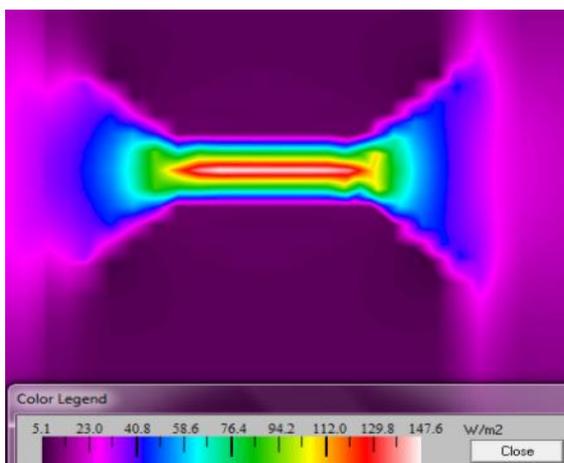
**Figura 99:** Edifício unifamiliar – Solução 5, S1: pormenor dos fluxos de calor



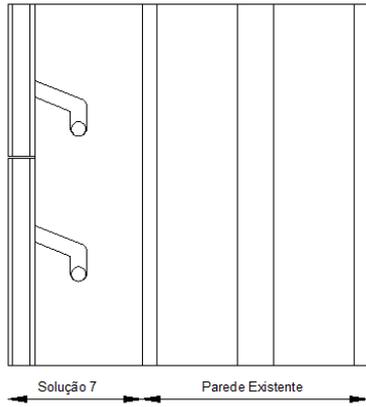
**Figura 100:** Edifício unifamiliar – Solução 5, S2: pormenor dos fluxos de calor



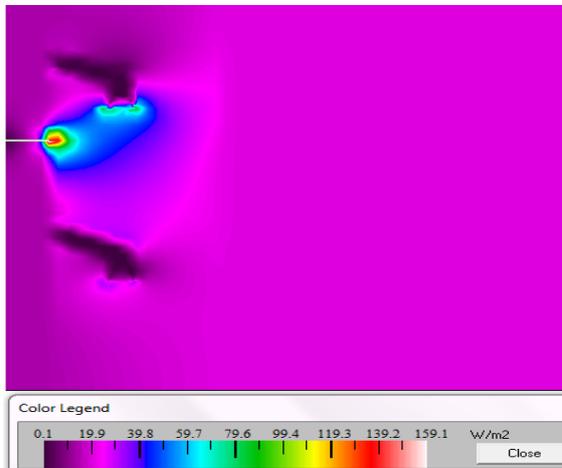
**Figura 101:** Edifício unifamiliar – Solução 6 – Secção simulada no THERM



**Figura 102:** Edifício unifamiliar – Solução 6: pormenor dos fluxos de calor



**Figura 103:** Edifício unifamiliar – Solução 7 – Secção simulada no THERM



**Figura 104:** Edifício unifamiliar – Solução 7: pormenor dos fluxos de calor

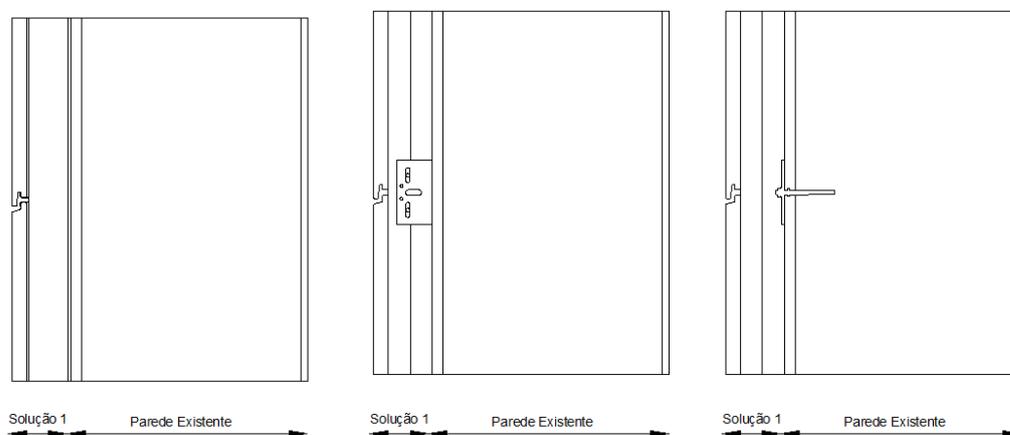
**EDIFÍCIO UNIFAMILIAR – SIMULAÇÕES ACÚSTICAS ACOUBAT SOUND****Quadro 39:** Valores de  $D_{nT,W}$  para as diversas frequências – Quarto 3 do edifício unifamiliar [dB].

<b>Frequência [Hz]</b>	<b>Sol. Ref.</b>	<b>Sol. 1</b>	<b>Sol. 2</b>	<b>Sol. 3</b>	<b>Sol. 4</b>	<b>Sol. 5</b>	<b>Sol. 6</b>	<b>Sol. 7</b>
<b>100</b>	28,2	23,8	28,6	28,2	18,9	25,7	24,9	28,5
<b>125</b>	26,8	22,4	27,2	26,8	17,4	24,4	23,5	27,1
<b>160</b>	26,7	21,4	27,3	26,6	16,1	23,7	22,7	27,1
<b>200</b>	23,4	20,8	23,7	23,4	16,6	22,2	21,6	23,6
<b>250</b>	28,9	25,7	29,4	28,9	21,1	27,6	26,8	29,2
<b>315</b>	29,7	28,0	29,9	29,7	24,5	29,2	28,7	29,8
<b>400</b>	32,0	31,0	32,2	32,0	28,0	31,8	31,5	32,2
<b>500</b>	36,6	35,6	36,9	36,6	32,4	36,5	36,2	36,8
<b>630</b>	38,2	37,7	38,4	38,2	35,4	38,3	38,0	38,3
<b>800</b>	41,3	41,0	41,4	41,3	39,0	41,4	41,3	41,4
<b>1000</b>	44,3	44,2	44,5	44,3	42,5	44,6	44,4	44,4
<b>1250</b>	45,6	45,6	45,7	45,6	44,6	45,8	45,8	45,7
<b>1600</b>	44,9	45,0	45,0	44,9	44,6	45,0	45,0	45,0
<b>2000</b>	46,0	46,0	46,0	46,0	45,9	46,1	46,1	46,0
<b>2500</b>	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1
<b>3150</b>	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1
<b>4000</b>	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1
<b>5000</b>	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1
<b><math>D_{2m, nT,W}</math></b>	<b>39</b>	<b>37</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>33</b>	<b>38</b>	<b>37</b>	<b>39</b>

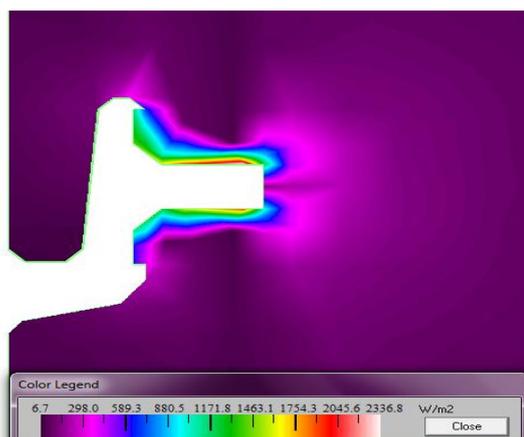
**Quadro 40:** Valores de  $D_{nT,W}$  para as diversas frequências – Sala do edifício unifamiliar [dB].

<b>Frequência [Hz]</b>	<b>Sol. Ref.</b>	<b>Sol. 1</b>	<b>Sol. 2</b>	<b>Sol. 3</b>	<b>Sol. 4</b>	<b>Sol. 5</b>	<b>Sol. 6</b>	<b>Sol. 7</b>
<b>100</b>	27,8	24,3	28,1	27,8	19,8	26,0	25,2	28,0
<b>125</b>	26,6	23,0	26,9	26,5	18,4	24,7	23,9	26,7
<b>160</b>	27,1	22,3	27,6	27,0	17,2	24,5	23,5	27,4
<b>200</b>	22,7	20,8	22,8	22,6	17,3	21,8	21,4	22,8
<b>250</b>	28,6	26,1	28,9	28,6	22,0	27,6	27,0	28,8
<b>315</b>	28,8	27,7	29,0	28,8	24,9	28,5	28,2	28,9
<b>400</b>	31,0	30,4	31,1	31,0	28,2	30,9	30,7	31,1
<b>500</b>	35,8	35,1	35,9	35,8	32,7	35,7	35,5	35,9
<b>630</b>	37,1	36,8	37,2	37,1	35,3	37,2	37,0	37,2
<b>800</b>	40,2	40,0	40,3	40,2	38,7	40,3	40,2	40,2
<b>1000</b>	43,2	43,1	43,3	43,2	42,0	43,3	43,3	43,3
<b>1250</b>	44,4	44,4	44,4	44,4	43,8	44,5	44,5	44,4
<b>1600</b>	43,6	43,6	43,6	43,5	43,4	43,6	43,6	43,6
<b>2000</b>	44,6	44,6	44,6	44,6	44,5	44,6	44,6	44,6
<b>2500</b>	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6
<b>3150</b>	34,7	34,7	34,6	34,6	34,6	34,6	34,7	34,6
<b>4000</b>	36,7	36,7	36,6	36,6	36,6	36,6	36,7	36,6
<b>5000</b>	40,7	40,7	40,6	40,6	40,6	40,6	40,7	40,6
<b><math>D_{2m, nT,W}</math></b>	<b>38</b>	<b>36</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>34</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>38</b>

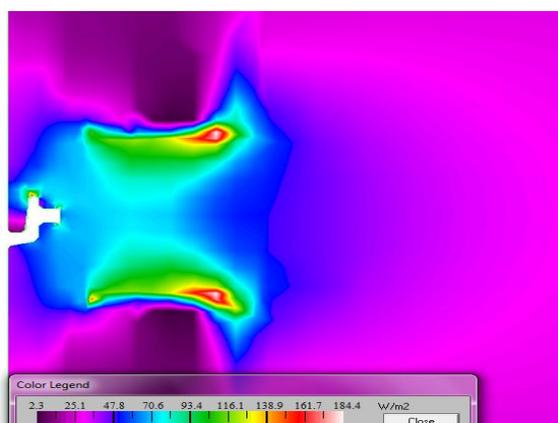
### EDIFÍCIO MULTIFAMILIAR – SECÇÕES SIMULADAS NO THERM



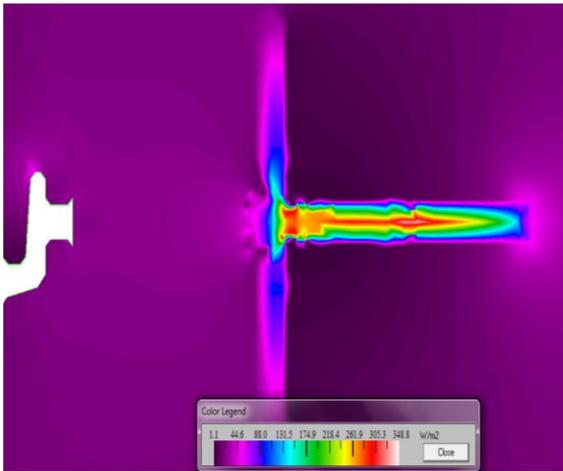
**Figura 105:** Edifício multifamiliar - Solução 1 – identificação das secções 1, 2 e 3 analisadas no THERM



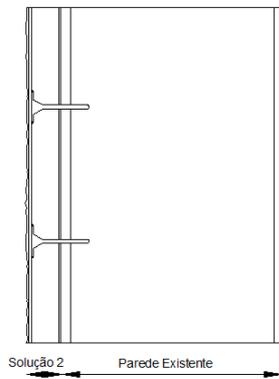
**Figura 106:** Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 1: pormenor dos fluxos de calor



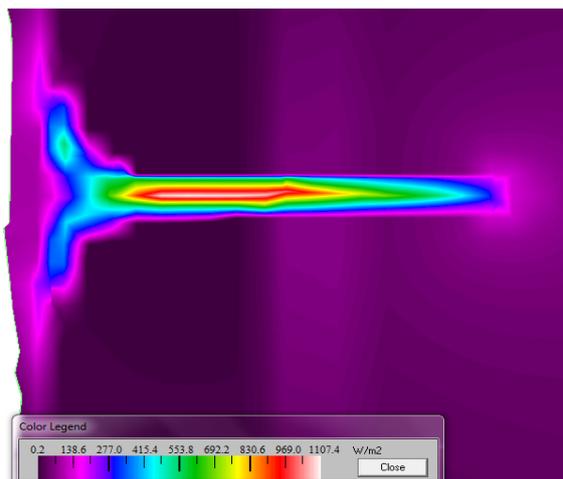
**Figura 107:** Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 2: pormenor dos fluxos de calor



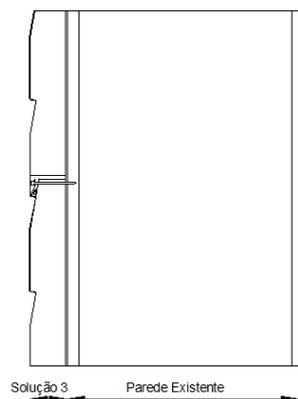
**Figura 108:** Edifício multifamiliar – Solução 1, secção 3: pormenor dos fluxos de calor



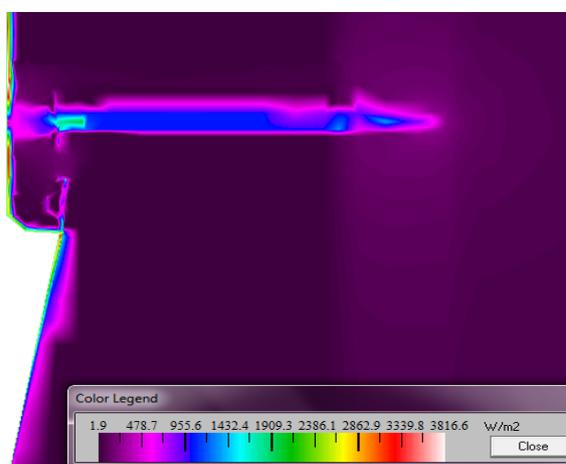
**Figura 109:** Edifício multifamiliar – Solução 2 – identificação da secção analisada no THERM



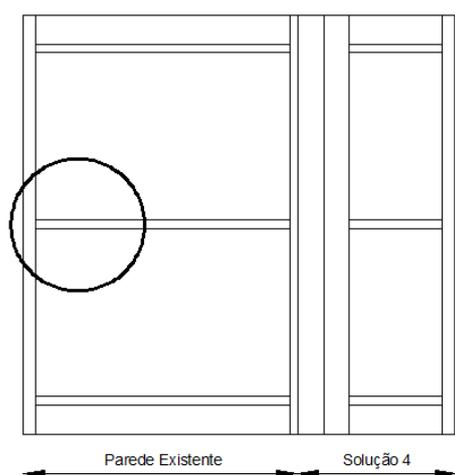
**Figura 110:** Edifício multifamiliar – Solução 2 pormenor dos fluxos de calor



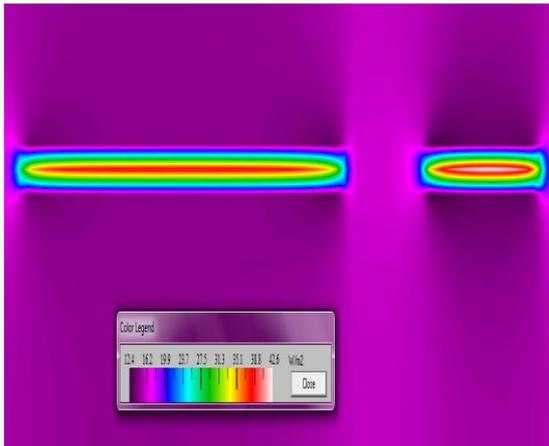
**Figura 111:** Edifício multifamiliar – Solução 3 – identificação da secção analisada no THERM



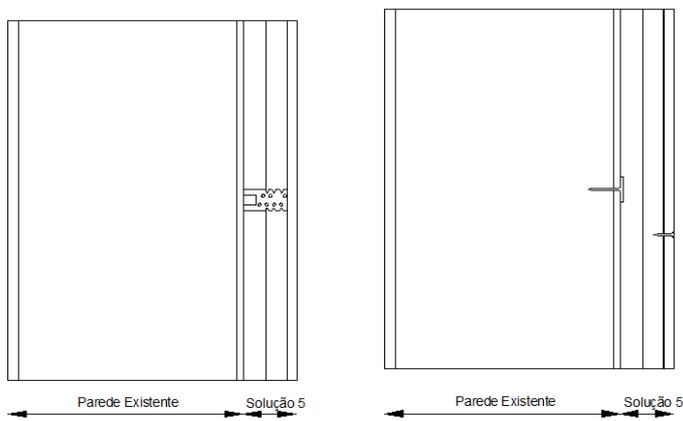
**Figura 112:** Edifício multifamiliar – Solução 3: pormenor dos fluxos de calor



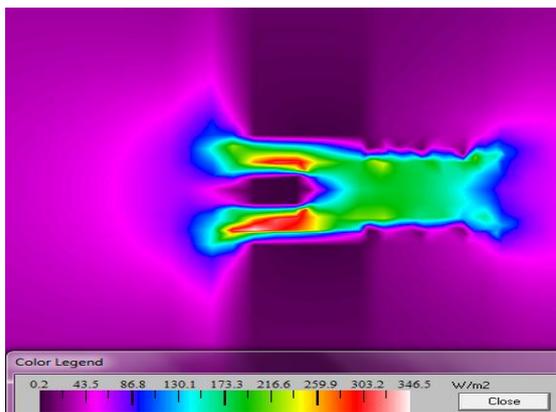
**Figura 113:** Edifício multifamiliar – Solução 4 – identificação da secção analisada no THERM



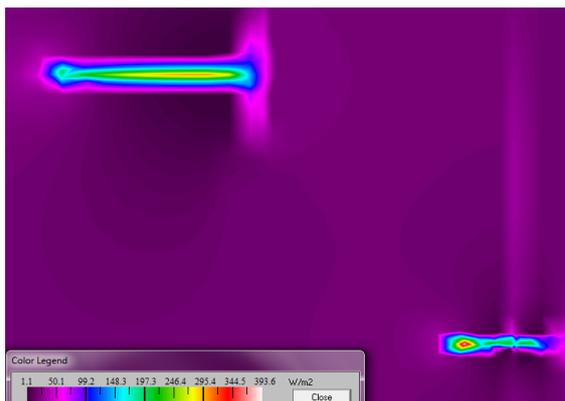
**Figura 114:** Edifício multifamiliar – Solução 4: pormenor dos fluxos de calor



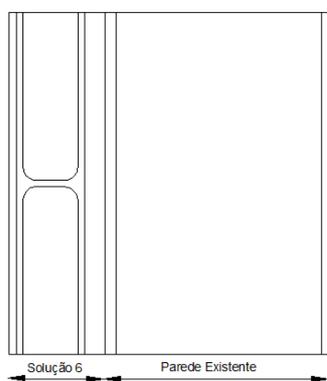
**Figura 115:** Edifício multifamiliar – Solução 5 – identificação das secções analisadas no THERM



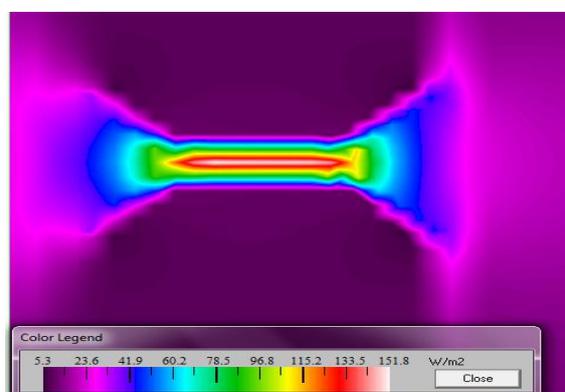
**Figura 116:** Edifício multifamiliar – Solução 5, S1: pormenor dos fluxos de calor



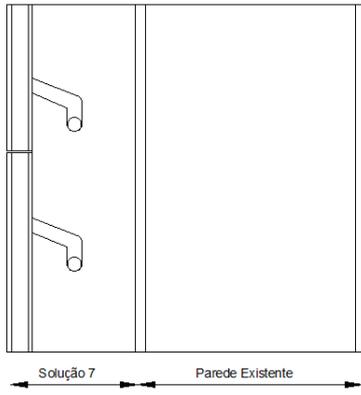
**Figura 117:** Edifício multifamiliar – Solução 5, S2: pormenor dos fluxos de calor



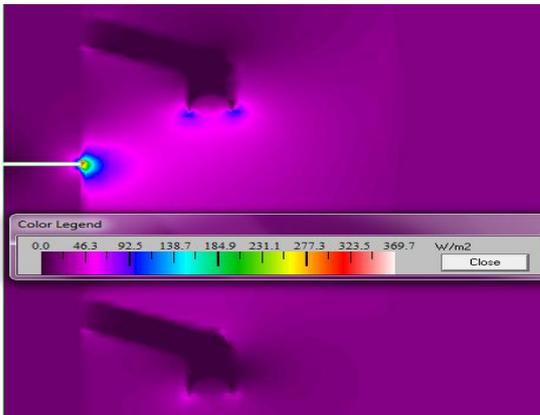
**Figura 118:** Edifício multifamiliar – Solução 6 – identificação da secção analisada no THERM



**Figura 119:** Edifício multifamiliar – Solução 6: pormenor dos fluxos de calor



**Figura 120:** Edifício multifamiliar – Solução 7 – identificação da secção analisada no THERM



**Figura 121:** Edifício multifamiliar – Solução 7: pormenor dos fluxos de calor

**EDIFÍCIO MULTIFAMILIAR – SIMULAÇÕES ACÚSTICAS ACOUBAT SOUND****Quadro 41:** Valores de  $D_{nT,W}$  para as diversas frequências – Quarto 4 do edifício multifamiliar [dB].

Frequência [Hz]	Sol. Ref.	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
<b>100</b>	29,4	24,2	29,9	29,3	19,0	26,3	25,4	29,7
<b>125</b>	28,2	22,8	28,7	28,1	17,6	25,1	24,1	28,5
<b>160</b>	26,6	21,4	27,2	26,5	16,1	23,7	22,6	27,0
<b>200</b>	21,6	19,7	21,8	21,6	16,2	20,8	20,3	21,7
<b>250</b>	29,3	25,9	29,8	29,3	21,1	27,9	27,0	29,6
<b>315</b>	32,5	29,7	32,9	32,4	25,1	31,5	30,7	32,7
<b>400</b>	35,4	33,3	35,8	35,3	29,1	34,9	34,2	35,6
<b>500</b>	37,0	35,9	37,3	37,0	32,5	36,9	36,5	37,2
<b>630</b>	39,4	38,7	39,6	39,4	36,0	39,5	39,2	39,5
<b>800</b>	42,5	42,1	42,7	42,5	39,7	42,7	42,5	42,6
<b>1000</b>	43,9	43,8	44,1	43,9	42,3	44,2	44,0	44,0
<b>1250</b>	45,7	45,6	45,8	45,7	44,7	45,9	45,8	45,7
<b>1600</b>	47,3	47,4	47,4	47,3	46,8	47,5	47,4	47,4
<b>2000</b>	46,5	46,5	46,5	46,5	46,3	46,6	46,6	46,5
<b>2500</b>	44,6	44,6	44,6	44,6	44,6	44,6	44,6	44,6
<b>3150</b>	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6
<b>4000</b>	42,6	42,6	42,6	42,6	42,6	42,6	42,6	42,6
<b>5000</b>	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6
<b><math>D_{nT,W}</math></b>	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>34</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>40</b>

**Quadro 42:** Valores de  $D_{nT,W}$  para as diversas frequências – Sala 2 do edifício multifamiliar [dB].

Frequência [Hz]	Sol. Ref.	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7
<b>100</b>	29,0	24,9	29,4	29,0	20,1	26,7	25,9	29,3
<b>125</b>	28,2	23,7	28,6	28,1	18,7	25,7	24,8	28,4
<b>160</b>	26,7	22,3	27,2	26,7	17,3	24,4	23,4	27,0
<b>200</b>	20,0	18,9	20,1	20,0	16,4	19,6	19,3	20,1
<b>250</b>	28,8	26,3	29,1	28,7	22,1	27,8	27,1	29,0
<b>315</b>	31,8	29,8	32,0	31,7	26,0	31,1	30,6	31,9
<b>400</b>	34,5	33,2	34,8	34,5	29,8	34,2	33,8	34,7
<b>500</b>	35,7	35,0	35,8	35,7	32,7	35,6	35,4	35,8
<b>630</b>	37,9	37,5	38,0	37,9	35,8	37,9	37,8	38,0
<b>800</b>	40,9	40,7	41,0	40,9	39,3	41,1	40,9	41,0
<b>1000</b>	42,2	42,1	42,2	42,2	41,3	42,3	42,2	42,2
<b>1250</b>	43,8	43,8	43,8	43,8	43,3	43,9	43,8	43,8
<b>1600</b>	45,4	45,4	45,4	45,4	45,1	45,4	45,4	45,4
<b>2000</b>	44,4	44,5	44,5	44,4	44,4	44,5	44,5	44,5
<b>2500</b>	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5
<b>3150</b>	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5
<b>4000</b>	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5
<b>5000</b>	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5
<b><math>D_{nT,W}</math></b>	<b>39</b>	<b>37</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>35</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>39</b>