



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Caracterização térmica de soluções de fachadas leves

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

Ana Cristina Roque de Abreu

Orientador

Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2015

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero demonstrar o meu sincero e forte agradecimento aos meus pais e ao meu irmão pelo apoio incondicional que me deram durante esta longa caminhada e por acreditarem sempre em mim e nas minhas capacidades. Uma palavra especial ao meu namorado João Duarte e um forte abraço à minha amiga Ana e ao meu primo Miguel por todo o apoio, paciência e disponibilidade.

Quero agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Diogo Mateus, pela sua disponibilidade, colaboração e excelente orientação.

Quero também agradecer à Engenheira Marina Dias pelo apoio demonstrado ao longo de todo o percurso laboratorial.

E por último, quero agradecer ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra por me ter fornecido todas as ferramentas e materiais para a realização desta dissertação, bem como a oportunidade concedida e as condições fornecidas.

RESUMO

As necessidades de eficiência energética e de sustentabilidade dos edifícios, ao nível energético, com enfoque na redução dos consumos, condicionam cada vez mais a conceção da envolvente dos edifícios, em particular das paredes e dos vãos.

Neste contexto, é objetivo deste trabalho estudar novas soluções construtivas, com base em elementos leves, e avaliar o seu previsível desempenho térmico. Estas soluções apresentam diversas vantagens, designadamente a rapidez de execução e o peso reduzido relativamente às soluções tradicionais em alvenaria ou betão, o que permite uma economia no custo da estrutura. Possibilitam também uma redução nos resíduos de construção associados ao processo construtivo, já que se faz recurso à pré-fabricação.

Estes sistemas podem ser desvantajosos pois existe uma maior dificuldade na correção de “pontes térmicas” e apresentam uma baixa massa térmica, o que é particularmente importante para climas com grandes amplitudes térmicas, como é o caso de Portugal. É de notar, ainda, que as soluções leves são não tradicionais pelo que apresentam técnicas de execução menos testadas e, portanto, são mais suscetíveis de erro.

Numa primeira fase da presente dissertação será realizada uma pesquisa bibliográfica no domínio da aplicação destes sistemas em fachadas que conduzirá à definição de soluções construtivas que se enquadrem no âmbito dos recentes requisitos térmicos definidos no Decreto-Lei nº 118/2013. Será depois efetuada uma campanha de medições que possibilitará a avaliação do desempenho destas soluções.

ABSTRACT

The energy efficiency and sustainability of buildings, from an energy point of view, focusing on the reduction of consumption, define the design of the building envelope, especially walls and openings.

In this context, the aim of this work is to study new constructive solutions, based on light elements, and evaluate their foreseeable thermal performance. These solutions have many advantages including the increased speed of execution and reduced weight compared with traditional solutions like masonry or concrete, which allows a saving in structural costs. This also enables a reduction in construction waste associated with the construction process, as it makes use of prefabrication.

These systems may be disadvantageous due to the difficulty in correcting the “thermal bridges” and to their low thermal mass, which is extremely relevant in climates possessing large temperature variations such as Portugal. It is also important to point out that light materials are not traditionally used, present less tested execution techniques and, because of that, are more susceptible to errors.

In the first phase of this thesis it will be performed a literature search concerning the implementation of these systems in facades, which will lead to the definition of constructive solutions that fit within the recent thermal requirements set out in Decree-Law No. 118/2013. It will be performed a campaign of measurements that enable the evaluation of the performance of these solutions.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivos da dissertação	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Enquadramento Energético	4
2.2 Breves Noções Sobre Transmissão de Calor	6
2.2.1 Condução	7
2.2.2 Radiação	7
2.2.3 Convecção	8
2.2.4 Evaporação	8
2.3 Caracterização Térmica de Materiais e Soluções Construtivas	8
2.3.1 Condutibilidade térmica	9
2.3.2 Resistência térmica e coeficiente de transmissão térmica	9
2.4 Construção Leve versus Construção Pesada.....	11
2.4.1 Construção leve	13
2.4.2 Construção pesada	14
2.5 Exigências Funcionais de Soluções de Fachadas Leves	15
2.5.1 Exigências de segurança	15

2.5.2	Exigências de habitabilidade	16
2.5.3	Exigências de economia	17
3	SOLUÇÕES LEVES (NÃO ESTRUTURAIS)	19
3.1	Soluções para Isolamento Térmico	19
3.1.1	XPS	19
3.1.2	EPS	20
3.1.3	Lãs minerais	21
3.1.4	Poliuretano projetado	22
3.1.5	Poliuretano flexível	22
3.2	Soluções para Revestimento	23
3.2.1	Painéis de gesso laminado	23
3.2.2	Painéis de aglomerado de madeira com cimento (tipo “Viroc”)	24
3.2.3	Soluções tipo “Aquapanel”	24
3.2.4	OSB	25
3.3	Soluções Correntes de Divisórias Leves	27
3.3.1	Divisórias interiores	27
3.3.2	Revestimento interior de fachada	28
3.3.3	Revestimento exterior de fachada	28
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL E MODELO DE PREVISÃO	30
4.1	Equipamentos	31
4.1.1	Protótipo de uma <i>hot-box</i>	31
4.1.2	Termofluxímetro	32
4.1.3	Termopares	33
4.1.4	<i>Datalogger</i>	33
4.1.5	Medidor de energia	34
4.2	Metodologia Experimental	35
4.2.1	Soluções construtivas	35
4.2.2	Localização e instalação dos equipamentos	36
4.2.3	Recolha de dados	37
4.2.4	Análise dos resultados experimentais	37
4.2.5	Precisão dos resultados experimentais	40

4.2.6	Comparação entre os diversos resultados	40
4.3	Modelo de Previsão	41
5	CASOS DE ESTUDO	43
5.1	Caso de Estudo 1 - OSB	43
5.2	Caso de Estudo 2 - Aglomerado de Poliuretano Flexível	44
5.3	Caso de Estudo 3 - Painel <i>Sandwich</i> de OSB e Poliuretano Flexível	45
5.4	Caso de Estudo 4 - Painel <i>Sandwich</i> de OSB e Poliuretano Flexível com Chapa Lateral	47
5.5	Caso de Estudo 5 - Painel <i>Sandwich</i> de OSB e Poliuretano Flexível com Chapa em toda a sua envolvente	52
5.6	Caso de Estudo 6 - Painel <i>Sandwich</i> de Pedra e Poliuretano Flexível	54
5.7	Caso de Estudo 7 - Painel <i>Sandwich</i> de Pedra e Poliuretano Flexível com Pedra Lateral	55
5.8	Caso de Estudo 8 - Painel <i>Sandwich</i> de Pedra e Poliuretano Flexível com Pedra em toda a sua envolvente	57
5.9	Caso de Estudo 9 - Painel de OSB com Chapa Lateral e Caixa-de-ar vazia	59
5.10	Caso de Estudo 10 - Painel de OSB com Chapa em toda a sua envolvente e Caixa-de-ar vazia	60
5.11	Caso de Estudo 11 - Painel de Pedra com Pedra Lateral e Caixa-de-ar vazia	61
5.12	Caso de Estudo 12 - Painel de Pedra com Pedra em toda a sua envolvente e Caixa-de-ar vazia	63
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	65
6.1	Conclusões	65
6.2	Trabalhos Futuros	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática da fisiologia humana e trocas térmicas (Lamberts, 2013)	6
Figura 2.2 – Diversos tipos de parede de fachada (Pereira, 2005)	12
Figura 2.3 – Exemplo de construção leve em <i>Light Steel Framing</i> e em estruturas de madeira (Futureng, 2015 e Carmo, 2015)	13
Figura 2.4 – Exemplo de construção em betão armado e com estruturas mistas (Engibarra, 2015 e Guimarães, 2009)	14
Figura 2.5 – Exemplo de parede em alvenaria de tijolo (Futureng, 2015)	14
Figura 3.1 – Placa de XPS (Eurofoam, 2015)	19
Figura 3.2 – Placas de EPS (EPS-Lda., 2015)	20
Figura 3.3 – Manta de lã de rocha (Fibrosom, 2015)	21
Figura 3.4 – Manta de lã de vidro (Isover, 2015)	21
Figura 3.5 – Espuma de poliuretano projetado (Polirígido, 2015)	22
Figura 3.6 – Espuma de poliuretano flexível (Aglomex, 2012)	22
Figura 3.7 – Diferentes tipos de placa de gesso laminado (Lopes, 2012)	23
Figura 3.8 – Painéis <i>Viroc</i> (Somapil, 2015)	24
Figura 3.9 – Placa de <i>Aquapanel</i> (Knauf Aquapanel, 2015)	25
Figura 3.10 – Esquema de uma placa de OSB (Pfeil & Pfeil, 2003)	25
Figura 3.11 - Representação do processo de produção do OSB (adaptado de OSBGuide, 2015)	26
Figura 3.12 – Placa de OSB (Jular, 2002)	27
Figura 3.13 – Exemplo de divisória interior com gesso laminado (Placo Saint-Gobain, 2015)	27
Figura 3.14 - Exemplo de fachada revestida pelo exterior com <i>Viroc</i> (Banema, 2013)	28
Figura 3.15 - Exemplo de fachada revestida pelo exterior com OSB (Futureng, 2015)	29
Figura 3.16 – Exemplo de fachada revestida pelo exterior com o sistema <i>Aquapanel</i> (Knauf, 2015)	29
Figura 4.1 – Interior da câmara fria e da câmara quente	32
Figura 4.2 – Termofluxímetro (Hukseflux, 2000)	32
Figura 4.3 – Termopar tipo K (Pico Technology, 2015)	33
Figura 4.4 – <i>Datalogger</i> (Pico Technology, 2015)	34
Figura 4.5 – Medidor de energia (Bachmann, 2015)	34

Figura 4.6 – Pontos para colocação dos termofluxímetros e sensores de temperatura	36
Figura 4.7 – Representação da largura de influência, w (adaptado ASHRAE, 1993)	40
Figura 4.8 – Exemplo de uma amostra e resultados no <i>Therm</i> (Therm-Windows, 2014)	42
Figura 5.1 – Painel de OSB	43
Figura 5.2 – Aglomerado de poliuretano flexível	44
Figura 5.3 – Painel sandwich de OSB e poliuretano flexível	45
Figura 5.4 – Painel sandwich de OSB e poliuretano flexível com chapa lateral	47
Figura 5.5 – Temperaturas na câmara quente e fria do ensaio 4.1	48
Figura 5.6 – Temperaturas superficiais da amostra do ensaio 4.1	48
Figura 5.7 – Fluxos de calor no ponto 5 e 6 do ensaio 4.1	49
Figura 5.8 - Temperaturas na câmara quente e fria do ensaio 4.2	50
Figura 5.9 - Temperaturas superficiais da amostra do ensaio 4.2	50
Figura 5.10 - Fluxos de calor no ponto 5 e 7 do ensaio 4.2	51
Figura 5.11 – Painel sandwich de OSB e poliuretano flexível com chapa na sua envolvente..	52
Figura 5.12 – Painel sandwich de pedra e poliuretano flexível.....	54
Figura 5.13 - Painel sandwich de pedra e poliuretano flexível com pedra lateral	56
Figura 5.14 - Painel sandwich de pedra e poliuretano flexível com pedra na sua envolvente..	57
Figura 5.15 - Painel de OSB com chapa lateral e caixa-de-ar vazia	59
Figura 5.16 – Painel de OSB e com chapa na sua envolvente e caixa-de-ar vazia.....	60
Figura 5.17 - Painel de pedra com pedra lateral e caixa-de-ar vazia	62
Figura 5.18 – Painel de pedra com pedra na sua envolvente e caixa-de-ar vazia	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência (adaptado do REH).....	5
Quadro 4.1 – Valores medidos previamente em laboratório	39
Quadro 4.2 – Valores das resistências térmicas superficiais	41
Quadro 4.3 – Valores das resistências térmicas dos espaços de ar não ventilados	41
Quadro 5.1 – Variação entre os vários valores de λ obtidos no caso de estudo 1	44
Quadro 5.2 – Variação entre os vários valores de λ obtidos no caso de estudo 2	45
Quadro 5.3 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 3	46
Quadro 5.4 – U teórico de soluções práticas para o caso de estudo 3	47
Quadro 5.5 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 4	51
Quadro 5.6 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 5	53
Quadro 5.7 – U teórico de solução prática para o caso de estudo 5	53
Quadro 5.8 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 6	55
Quadro 5.9 – U teórico de soluções práticas para o caso de estudo 6	55
Quadro 5.10 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 7	56
Quadro 5.11 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 8	58
Quadro 5.12 – U teórico de soluções práticas para o caso de estudo 8	58
Quadro 5.13 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 9	60
Quadro 5.14 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 10	61
Quadro 5.15 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 11	62
Quadro 5.16 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 12	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

A construção surgiu na pré-história, altura em que o homem começou a descobrir que vivendo em zonas mais protegidas, como cavernas e grutas, evitaria a adversidade das condições climáticas bem como a agressividade dos animais. No entanto, com o passar do tempo, o homem sentiu necessidade de adquirir conhecimentos a fim de melhorar a sua qualidade de vida, recorrendo a tudo o que a natureza tivesse para lhe oferecer, nomeadamente a pedra e a madeira. No que respeita à construção propriamente dita, foram realizados abrigos com paredes em pedra, cobertas com madeira e folhas.

Na idade média, e posteriormente na idade moderna, a arte de trabalhar a madeira evoluiu bastante. Muitos edifícios foram construídos com madeiras sobre estacas enterradas no solo, que serviam para proteção de ataques dos animais e para evitar as cheias provocadas pelos rios. As paredes construídas em madeira eram complementadas com areia e argila e suportadas por um entrelaçado de ripas e tecido. Contudo, este método era pouco eficaz pois estalava facilmente, tendo sido então necessário substituí-lo por alvenaria, tijolo e blocos de betão. No entanto, a madeira sempre foi, e continua a ser, o material mais usado na construção, fazendo parte da construção tradicional de Portugal (Lourenço e Branco, 2012).

Com o desenvolvimento tecnológico da indústria da madeira e o aperfeiçoamento de sistemas construtivos, surgiram novos materiais derivados da mesma, o que despertou um enorme interesse na área da construção. Um bom exemplo deste tipo de materiais, e de extrema relevância para a componente laboratorial desta dissertação, é o geralmente denominado por OSB (*Oriented Strand Board*), que consiste num aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas.

Nos dias de hoje, é fundamental reduzir o custo de obra devido às adversidades sociais, procurando recorrer a painéis pré-fabricados, pois estes representam métodos mais fáceis e com tempos de espera mais curtos.

Na construção de um edifício, um dos elementos mais importantes é a sua fachada, visto ser dos elementos mais expostos aos diversos efeitos naturais e, portanto, bastante suscetível de

desenvolver patologias. Caso estas não sejam evitadas, tanto o custo da própria edificação como os respetivos custos de manutenção podem tornar-se bastante elevados. Desta forma, é necessário encontrar soluções construtivas capazes de evitar patologias nas fachadas.

Para além disso, as fachadas desempenham ainda um papel crucial quanto ao desempenho térmico e energético do edifício, mostrando mais uma vez a importância do estudo de diversas soluções construtivas na sua constituição, de forma a identificar qual a solução mais eficiente. Esse estudo permite, não só responder à necessidade do conforto térmico, mas também contribuir para o cumprimento dos regulamentos impostos, através da redução do consumo de energia e das emissões de dióxido de carbono, CO₂.

1.2 Objetivos da dissertação

O objetivo fundamental desta dissertação consiste na avaliação, e posterior compreensão, do comportamento térmico de soluções leves, quando aplicadas em paredes de fachadas de edifícios.

Para tal, é necessário efetuar o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, U, nas diversas soluções construtivas estudadas em laboratório, de forma a tornar possível a comparação desse valor de U com o valor teórico esperado.

Feita a comparação entre os diversos valores de U (obtidos através do método experimental e os respetivos valores teóricos), torna-se fundamental analisar e explicar o motivo para as diferenças encontradas entre os referidos valores, caso estas existam e sejam significativas. Esta análise permite averiguar se as metodologias teóricas estudadas nesta dissertação são fiáveis e, no limite, compreender com maior clareza se a solução em estudo é ou não adequada para aplicação na fachada de um edifício.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em 6 capítulos que precedem as Referências Bibliográficas.

O primeiro capítulo é introdutório, fazendo uma breve referência ao enquadramento histórico da arte de construir e indicando, também, os principais objetivos do presente trabalho e sua estruturação.

No segundo capítulo procura-se fazer uma descrição das referências bibliográficas efetuadas, dando a conhecer os principais conceitos necessários ao estudo do comportamento térmico de soluções construtivas. De seguida, descreve-se e compara-se o conceito de construção leve e de construção pesada, referindo as vantagens e desvantagens de cada um deles. Posteriormente, mencionam-se alguns exemplos deste tipo de construção, tais como betão armado e estruturas mistas (aço e betão) para a construção pesada e estruturas de madeira e aço leve (LSF – *Light Steel Framing*) para construção leve. Neste capítulo, são ainda identificadas e descritas as exigências funcionais a que deve obedecer uma parede de fachada leve.

O terceiro capítulo é constituído por três subcapítulos. O primeiro refere e detalha vários materiais de isolamento térmico usados em soluções leves não estruturais, como o caso de paredes divisórias e paredes de fachada. Os subcapítulos seguintes mencionam, individualmente, exemplos de materiais de revestimento em soluções leves aplicáveis em fachadas, como por exemplo, soluções tipo “*Viroc*”, “*Aquapanel*”, o material OSB, e por fim, soluções correntes utilizando combinações dos referidos materiais. Visto o OSB ser o foco de estudo laboratorial do presente trabalho, a sua descrição é mais completa relativamente às duas soluções mencionadas anteriormente.

No quarto capítulo é, pormenorizadamente, descrita a metodologia experimental, mencionando os equipamentos utilizados e descrevendo o procedimento efetuado em laboratório.

No capítulo 5 procede-se à apresentação e análise dos resultados obtidos, tanto a nível teórico como prático.

Por fim, o capítulo 6 é destinado às conclusões do presente trabalho e a sugestões de trabalhos futuros neste contexto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Enquadramento Energético

A energia é essencial para o nosso dia-a-dia, pois necessitamos dela para as mais diversas tarefas. Esta apresenta-se sob a forma de luz, calor, frio, etc. Assim, torna-se essencial encontrar uma definição para a eficiência energética. De uma forma simplificada, entende-se por eficiência energética a atividade de otimizar a utilização da energia, isto é, usá-la de forma responsável e contida, mantendo o nível de conforto pretendido.

Para que a energia chegue ao consumidor, ou seja, à fase de utilização, tem de passar por um processo de transformação à qual estão associados grandes desperdícios. É importante notar que estes desperdícios não existem apenas nesta fase, sendo prolongados até à fase de utilização. Aqui, a eficiência energética é associada ao termo "Utilização Racional da Energia" (URE), que visa um melhor aproveitamento da energia nos diversos sectores (doméstico, serviços e indústria) (ADENE, 2015).

Cada vez mais se torna indispensável impor e implementar medidas que conduzam à adoção de melhores soluções a nível energético, nas mais variadas fases de um processo construtivo. Para isso, é necessário um estudo da eficiência energética, que obriga a uma consulta da legislação europeia. O instrumento que impulsionou a luta contra as alterações climáticas é o tão conhecido Protocolo de Quioto, tendo sido assinado em 1997. Este documento impõe, para os países industrializados, uma redução no valor das emissões de gases que provocam o efeito de estufa. Em 2002, e inspirada no Protocolo de Quioto, surge a Diretiva Europeia relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) que estabelece requisitos mínimos de desempenho energético de edifícios, atendendo às condições climáticas externas e às condições locais. Esta diretiva promove a exigência de implementação de um Sistema de Certificação Energética (SCE) por parte dos diversos estados membros, permitindo assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios através da sua caracterização mediante uma classe energética (EPBD, 2002).

A transposição desta diretiva para a regulamentação nacional conduziu a uma revisão regulamentar que resultou na publicação de diversos Decretos-Lei, de entre os quais se destaca

o Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006).

Já em 2010, a Diretiva Europeia relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios anteriormente mencionada é reformulada, criando novas metas para a necessidade de redução das emissões de gases. Esta impõe que, até 2020, é necessária uma redução de 20% nas emissões de CO₂, uma utilização de 20% de energia proveniente de fontes renováveis e um aumento de 20% na eficiência energética. Por conseguinte, os estados membros foram obrigados a alterar os regulamentos anteriores, o que a nível nacional implicou a revisão do Decreto-Lei n.º 80/2006. Esta revisão resultou na publicação do Decreto-Lei n.º 118/2013 que engloba, num único documento, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

O Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto veio definir um mapa evolutivo dos requisitos regulamentares necessários para a obtenção de um nível ótimo de rentabilidade e criar requisitos de eficiência energética para os sistemas técnicos mais importantes dos edifícios. O mapa evolutivo permite a previsão e consequente atualização dos requisitos regulamentares, tendo um limite temporal até 2020. Este Decreto-Lei incentiva ainda a utilização de fontes de energias renováveis e de soluções passivas nos edifícios, recorrendo o menos possível a sistemas de climatização (IteCons, 2013).

Na Portaria n.º 349-B/2013 do referido Decreto-Lei é fornecida uma tabela com os valores de referência dos coeficientes de transmissão térmica superficiais e uma outra com os valores limite do mesmo, sendo estes últimos bastante superiores aos valores de referência. O quadro seguinte mostra esses valores de referência, para uma parede de fachada.

Quadro 1.1 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência (adaptado do REH)

U ref (W/m ² C)	Zona climática					
	Portugal Continental					
Zona corrente da envolvente	Com entrada em vigor do presente regulamento			31 de dezembro de 2015		
Fachada	I1	I2	I3	I1	I2	I3
		0,50	0,40	0,35	0,40	0,35

2.2 Breves Noções Sobre Transmissão de Calor

A transmissão de calor é um fenómeno complexo, podendo ocorrer entre o homem e o meio ambiente ou entre duas faces opostas de um corpo. Dito por outras palavras, a transmissão de calor ocorre sempre que existe um diferencial de temperaturas entre duas faces opostas de um corpo ou entre dois corpos distintos. A transferência de energia é feita no sentido do corpo com a temperatura mais elevada para o corpo com a temperatura mais reduzida, até que se estabeleça o equilíbrio entre as temperaturas, ou seja, conservação de energia.

Existem quatro formas distintas para a transferência de energia na forma de calor entre dois corpos, indicados na Figura 2.1 e detalhados de seguida, mas apenas os primeiros três têm interesse para esta dissertação: condução, radiação, convecção e evaporação. Tendo em conta a variação das condições de fronteira e a inércia do sistema, estes são fenómenos de regime dinâmico ou variável, ou seja, com a temperatura e o fluxo de calor a variar com o decorrer do tempo. O regime permanente, ou seja, o regime com temperatura e fluxo constantes ao longo do tempo, dificilmente é atingido numa situação real de cálculo térmico de edifícios, uma vez que existe uma grande variação das temperaturas (mais acentuada nas temperaturas exteriores).

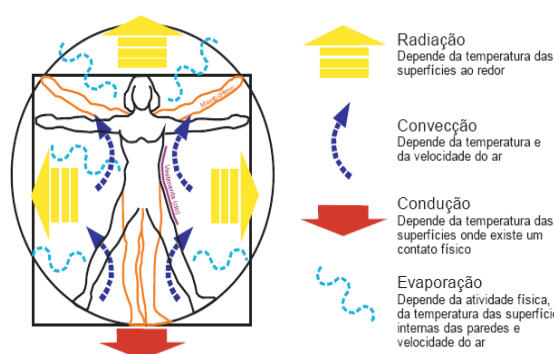


Figura 2.1 – Representação esquemática da fisiologia humana e trocas térmicas (Lamberts, 2013)

O fluxo de calor pode ainda ser considerado unidirecional, bidimensional ou tridimensional. Embora na maioria das vezes o fluxo seja tridimensional, as condições de fronteira são muito próximas das representadas num elemento em estudo e a espessura do mesmo é significativamente menor do que as dimensões das suas faces, pelo que de forma a simplificar a análise, esse fluxo é muitas vezes considerado como unidirecional. Já o fluxo bidimensional é observado em zonas de ponte térmica, ou seja, em envolventes com elementos de resistências térmicas diferentes inseridos na zona corrente, ou ainda em elementos da fachada com camadas paralelas ao sentido do fluxo.

2.2.1 Condução

O fluxo de calor que se propaga por condução ocorre devido à colisão entre átomos e moléculas, como consequência da transformação da energia cinética em calor. Devido ao contacto entre dois corpos ou substâncias distintas, a condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas “mais quentes” para as partículas “mais frias”, ocorrendo principalmente em corpos sólidos ou líquidos que não se encontrem em movimento.

A Lei de Fourier controla a transferência de calor por condução, através de uma equação matemática que indica que o fluxo de calor que atravessa uma superfície é proporcional ao produto da área da superfície pelo gradiente de temperatura (Gonçalves, 2015). O fluxo de calor que atravessa um elemento por condução é dado pela equação:

$$Q = -\lambda A \frac{d\theta}{dx} \quad (1)$$

Onde Q representa o calor que atravessa a superfície (W), λ representa a condutibilidade térmica (W/m°C), A a área da superfície (m²) e $\frac{d\theta}{dx}$ o gradiente de temperatura existente (°C/m).

2.2.2 Radiação

Todas as superfícies emitem energia térmica sob a forma de ondas eletromagnéticas. Desta forma, quando esta radiação incide sobre outro corpo pode ser parcialmente refletida, transmitida ou absorvida. No entanto, apenas a fração que é absorvida surge como calor no corpo. Este fenómeno de transmissão é o único que não necessita de um suporte material para que possa ocorrer. A Lei de Stefan-Boltzman permite calcular o poder emissor de um corpo, usando a equação matemática abaixo indicada, e mostra que a energia radiante emitida por um corpo negro (corpo que absorve toda a radiação que nele incide) é proporcional à área do corpo e à quarta potência da sua temperatura absoluta (Incropera et al., 2007a).

$$Q = \varepsilon \sigma AT^4 \quad (2)$$

Onde Q é o fluxo de calor (W), ε a emissividade da superfície emissora, σ a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), A a área de transmissão (m²) e T a temperatura do corpo (K).

2.2.3 Convecção

A convecção representa um fluxo de calor devido a um movimento macroscópico, com transporte de partes da substância de uma “zona quente” para uma “zona fria”, ou seja, consiste no movimento de um fluido, no qual grande número das moléculas se movem coletivamente. Por essa razão, este fenômeno ocorre apenas em fluidos ou entre estes e uma superfície sólida. A Lei de Newton rege a transferência de calor por convecção, usando a equação matemática indicada de seguida, e demonstra que o fluxo de calor transmitido entre uma superfície e um fluido é proporcional à sua área e à diferença de temperatura verificada (Incropera et al., 2007b).

$$Q = h_c A (\theta_s - \theta_f) \quad (3)$$

Onde Q é o fluxo de calor transferido (W), h_c o coeficiente de transmissão de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$), A a área de transmissão (m^2), θ_s a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$) e θ_f a temperatura do fluido ($^{\circ}\text{C}$).

2.2.4 Evaporação

A evaporação, embora não seja de grande importância para a compreensão deste trabalho, é de grande importância na fisiologia humana. Esta consiste numa perda de calor ao nível da pele, arrefecendo a sua superfície.

O mecanismo termorregulador do organismo tem como objetivo manter constante a temperatura corporal, contribuindo assim para a sensação de conforto térmico. Deste modo, um organismo exposto durante um longo período de tempo a um ambiente térmico constante, tenderá a um equilíbrio térmico de acordo com esse ambiente, isto é, a produção de calor pelo organismo através do seu metabolismo, será igual à perda de calor do mesmo para o ambiente, através das diversas formas de transferência de calor (Lamberts, 2014).

2.3 Caracterização Térmica de Materiais e Soluções Construtivas

Devido à grande variedade de materiais de construção disponíveis no mercado, torna-se difícil proceder à sua seleção, sendo fundamental que exista um conhecimento preciso das características térmicas dos mesmos. Sabe-se assim que, sempre que a transmissão de calor se dá em regime permanente, são três os parâmetros térmicos capazes de caracterizar termicamente um material, todos eles relacionados entre si: a sua condutibilidade térmica, a sua

resistência térmica e o seu coeficiente de transmissão térmica. Todos estes parâmetros vêm detalhados na norma ISO 6946:2007, sendo também explicado todo o seu processo de cálculo.

2.3.1 Condutibilidade térmica

Tal como o nome indica, a condutibilidade térmica descreve o transporte de energia, sob a forma de calor, através do material, quando este está sujeito a um diferencial de temperaturas. Este coeficiente está presente sempre que a transmissão de calor se dá por condução e representa a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente uma espessura unitária do material, quando existe um gradiente de temperatura unitário.

É de notar que a condutibilidade térmica varia segundo o tipo de material, a fase em que se encontra, o peso específico, a porosidade, a humidade, entre outros.

2.3.2 Resistência térmica e coeficiente de transmissão térmica

A resistência térmica de um material está relacionada com a sua condutibilidade térmica, mas, enquanto a condutibilidade térmica representa a facilidade com que esse material transmite o calor através dele, a resistência térmica indica a dificuldade dessa transmissão. A equação matemática que permite o seu cálculo é obtida através da seguinte equação.

$$R_t = \frac{e}{\lambda} \quad (4)$$

Para uma solução construtiva constituída por vários materiais, com camadas termicamente homogéneas perpendiculares ao fluxo de calor, é necessário somar as diferentes resistências térmicas de cada material e as duas resistências térmicas superficiais: uma interior e outra exterior. Estas traduzem o efeito da radiação e da convecção. Com isto, a resistência térmica da solução é então calculada de acordo com a equação de seguida apresentada.

$$R_t = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_n + R_{se} \quad (5)$$

Onde R_{si} diz respeito à resistência térmica superficial interior (m^2C/W), R_n é a resistência do material n da solução construtiva (m^2C/W) e R_{se} é a resistência térmica superficial exterior (m^2C/W).

Para uma solução construtiva constituída por camadas termicamente homogéneas e não homogéneas, paralelas à superfície, o cálculo da sua resistência térmica total torna-se mais complexo. De acordo com a norma ISO 6946, começa-se pelo cálculo do limite superior da resistência, assumindo um fluxo unidimensional e perpendicular às superfícies da componente.

$$\frac{1}{R_T'} = \frac{fa}{R_{Ta}} + \frac{fb}{R_{Tb}} + \dots + \frac{fq}{R_{Tq}} \quad (6)$$

Onde fa, fb, \dots, fq são as áreas fracionárias de cada secção e $R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tq}$ são as resistências térmicas de cada secção, calculadas usando a Equação (5).

Posto isto, calcula-se o seu limite inferior, R_T'' , através da equação (8), assumindo que todos os planos paralelos às superfícies da componente são superfícies isotérmicas. Calcula-se, então, a resistência térmica equivalente, R_j , recorrendo à equação (7), para cada camada termicamente não homogénea.

$$\frac{1}{R_j} = \frac{fa}{R_{aj}} + \frac{fb}{R_{bj}} + \dots + \frac{fq}{R_{qj}} \quad (7)$$

$$R_T'' = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (8)$$

Tendo já o valor do limite superior e inferior, a resistência térmica total da componente é calculada como uma média aritmética destes dois valores, $R_T = \frac{R_T' + R_T''}{2}$.

Para terminar, é necessário estimar o erro de cálculo.

$$e = \frac{R_T' - R_T''}{2 * R_T} * 100 \quad (9)$$

Caso o rácio entre o valor do limite superior e o valor do limite inferior dê superior a 1,5 e o erro dê superior a 20%, então a norma ISO 6946 não é aplicável para o cálculo do valor de U (o que ocorre com muita frequência).

Através do valor calculado da resistência térmica total de uma solução construtiva, calcula-se o seu coeficiente de transmissão térmica, U. Num elemento de faces planas e paralelas, o seu valor de U representa a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente um metro quadrado de material, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário.

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (10)$$

Sendo o coeficiente de transmissão térmica o inverso da resistência térmica de uma solução, quanto menor for o seu valor, menores serão as trocas de calor entre o interior e o exterior e, consequentemente, melhor será o comportamento térmico do elemento.

O valor de U pode também ser determinado *in situ*, de forma a verificar se o seu valor está em conformidade com o valor teórico esperado, calculado segundo a norma ISO 6946. É importante referir que existem muitos aspetos que não são considerados nesta norma, tais como questões relacionadas com o envelhecimento dos materiais, fenómenos de humidade, movimentos de ar ocasionais, fatores influenciados pela mão-de-obra, espessura das caixas-de-ar, entre outros. Todos estes aspetos podem afetar o valor de U de uma solução construtiva ao longo do tempo, levando assim a diferenças significativas entre o valor de U calculado e o valor de U teórico. De acordo com (Albatici e Tonelli, 2010), estas diferenças podem resultar numa sobrestimação da performance energética dos edifícios.

2.4 Construção Leve versus Construção Pesada

Num edifício, dependendo da sua localização e da sua finalidade, as paredes podem ter diversas designações. No que diz respeito à localização, estas podem ser interiores ou exteriores. As paredes interiores são, geralmente, paredes divisórias, isto é, tal com o nome indica têm a função de dividir o interior dos edifícios, sendo que dentro deste conceito existem, ainda, as chamadas paredes de empena que são aquelas que separam diferentes propriedades.

Já as paredes exteriores são normalmente denominadas de paredes de fachada e têm o objetivo de separar o espaço interior do espaço exterior de um edifício. Estas são de extrema importância pois, para além de serem visíveis a todos, o que implica um maior cuidado em termos estéticos, são as que estão mais expostas às diferenças climáticas e aos demais elementos naturais. Por este facto, o seu estudo é bastante relevante e, por isso, é sobre as mesmas que este trabalho irá incidir. É possível, ainda, dividir as paredes de fachada em duas categorias distintas: paredes simples ou múltiplas (geralmente duplas), dependendo se têm um ou vários panos de parede, respetivamente. A Figura 2.2 indica algumas das denominações possíveis para uma fachada.

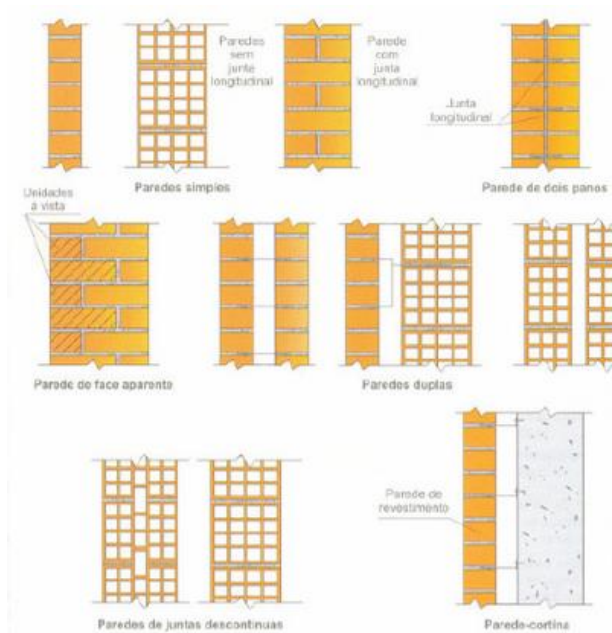


Figura 2.2 – Diversos tipos de parede de fachada (Pereira, 2005)

Relativamente à finalidade das paredes, ou seja, à sua função, estas podem ter uma função estrutural, isto é, ter a função de suportar cargas (função resistente) ou função não estrutural (função não resistente). É importante reter que cada parede é desenhada e projetada para uma determinada função e, portanto, tem de preencher todos os requisitos para garantir a total satisfação no que respeita às exigências funcionais para as quais foi concebida, como por exemplo, estabilidade, durabilidade, conforto térmico, entre outras que serão indicadas e, pormenorizadamente, explicadas mais adiante neste capítulo.

O homem tem a tendência de procurar sempre a melhor relação qualidade/preço e na construção não é exceção, daí ser necessária uma constante evolução e criatividade nesta área, explorando novos materiais, novas combinações e novas soluções. O objetivo será conseguir conjugar o mais barato (como por exemplo, menor custo dos materiais e maior produtividade na mão de obra) com o aligeiramento das estruturas resistentes (menor peso dos elementos sobre as estruturas). Em Portugal, as opções construtivas de paredes são muito variadas, desde o betão à alvenaria, dependendo se a construção pretendida for leve ou pesada e se a sua função será estrutural ou não estrutural. Mesmo havendo um leque de escolhas bastante alargado, pode verificar-se que grande parte dos edifícios construídos no nosso país é em betão armado (construção com materiais pesados), o que pode não ser necessariamente a melhor opção pois tanto a chamada construção leve como a pesada têm as suas vantagens e desvantagens (Mendonça, 2005a).

2.4.1 Construção leve

A construção leve, isto é, construção com materiais leves, quando combinados com os isolamentos e revestimentos adequados, apresenta muitas vantagens, tanto a nível construtivo como económico, pois grande parte do trabalho é realizado em fábrica. Por este motivo, é possível afirmar que este tipo de construção tem um reduzido impacto ambiental visto não produzir tantos entulhos e resíduos em obra. Trata-se portanto, de uma construção mais simples, mais económica e mais rápida. O controlo dos materiais é feito em fábrica, pelo que os estes apresentam melhor desempenho e, portanto, um menor risco de desenvolver patologias. Apesar de todas estas vantagens, este tipo de construção exige mão-de-obra especializada e um maior cuidado a nível da manutenção da construção, durante a sua vida útil.

É ainda possível distinguir elementos estruturais de elementos não estruturais, tanto na construção leve como na construção pesada. Neste tipo de construção, os elementos estruturais são normalmente executados com o sistema *Light Steel Framing* (estruturas de aço leve) ou com estruturas de madeira, como exemplifica a Figura 2.3.



Figura 2.3 – Exemplo de construção leve em *Light Steel Framing* e em estruturas de madeira (Futureng, 2015 e Carmo, 2015)

Já para os elementos não estruturais, o projeto de execução é habitualmente realizado recorrendo, por exemplo, a elementos de madeira, como o OSB e outros que irão ser referidos no capítulo seguinte, substituindo assim as tradicionais fachadas em betão e alvenaria (Mendonça, 2005b).

2.4.2 Construção pesada

Relativamente à construção pesada, esta apresenta um maior conhecimento das diversas soluções, uma vez que existe um maior controlo normativo das mesmas. Apresenta, geralmente, um melhor isolamento acústico e uma maior economia sob o ponto de vista de custos de utilização por ser menor a necessidade de aquecimento e arrefecimento de um determinado espaço. Todavia, este tipo de construção constitui um processo mais moroso, mais complexo, mais caro e com um elevado impacte ambiental. Em construções pesadas, é mais provável o aparecimento e desenvolvimento de diversas patologias, pois o controlo de qualidade dos materiais é bastante mais reduzido.

Neste tipo de construção, os elementos estruturais são normalmente executados em betão armado ou segundo estruturas mistas (constituídas por aço e betão), como exemplifica a Figura 2.4 (Mendonça, 2005c).

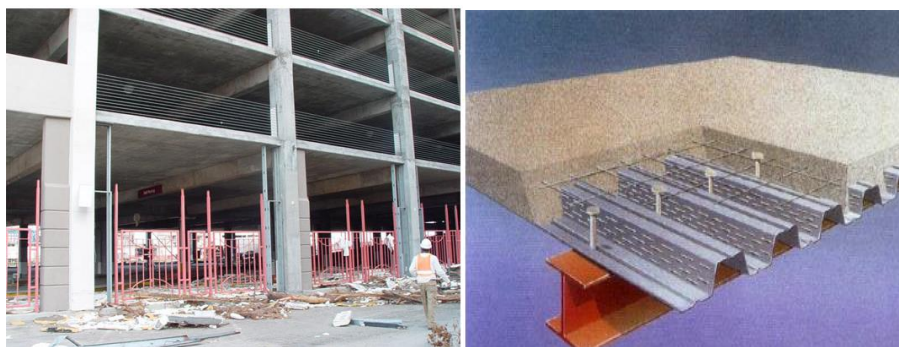


Figura 2.4 – Exemplo de construção em betão armado e com estruturas mistas (Engibarra, 2015 e Guimarães, 2009)

Já os elementos não estruturais são habitualmente executados em alvenaria, como mostra a Figura 2.5.



Figura 2.5 – Exemplo de parede em alvenaria de tijolo (Futureng, 2015)

2.5 Exigências Funcionais de Soluções de Fachadas Leves

Para que uma parede de fachada, desde que bem concebida, possa desempenhar corretamente as suas funções, existem algumas exigências de desempenho às quais estas devem obedecer: exigências de segurança, de habitabilidade e de economia.

2.5.1 Exigências de segurança

No domínio das exigências de segurança, normalmente interessa estudar a segurança estrutural, a segurança contra o risco de incêndios e a segurança de ocupação e uso.

A segurança estrutural de uma fachada está dependente da força que esta apresenta para suportar o seu próprio peso entre os pontos de apoio ou fixação à estrutura, devendo ter estabilidade suficiente para responder com eficácia a solicitações como ventos, sismos, cargas pontuais, variações térmicas, entre outros. Para permitir os movimentos diferenciais, tem que haver um suporte apropriado para suportar o peso da estrutura da parede, bem como meios de fixação adequados que irão manter a parede em posição e ao mesmo tempo permitir movimentos diferenciais sem danos para a fachada e, conseqüentemente, para os utilizadores do edifício. Relativamente aos revestimentos, como são estes que se encontram em contacto com o ambiente exterior, deverão ser capazes de resistir a ações normais como os fatores climatéricos (vento, chuva e variações térmicas), o peso próprio e choques decorrentes do seu normal funcionamento. Existem ensaios que se podem realizar numa parede ou revestimento, a fim de verificar se esta se encontra em segurança ou não, como o caso do teste de corpo duro e de corpo mole.

Relativamente à segurança contra o risco de incêndios, as principais preocupações são a propagação interna do fogo, entre os materiais das superfícies das paredes e tetos, e a propagação externa do fogo, sobre a sua estrutura. O fogo pode-se espalhar dentro de um edifício a partir da superfície dos materiais que cobrem as paredes e tetos, motivo pelo qual é sempre necessário analisar o comportamento face ao fogo de um edifício, através do comportamento dos seus elementos construtivos, como fachadas, pavimentos, escadas, entre outros. Para o desenvolvimento e avaliação de fachadas, recorre-se ao Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios (SCIE). Este documento define o comportamento ao fogo dos elementos e materiais da construção, de acordo com dois parâmetros fundamentais que se determinam através de ensaios: a reação ao fogo e a resistência ao fogo. A reação ao fogo caracteriza a forma de como o material contribui para o início e desenvolvimento de um

incêndio. Já a resistência ao fogo avalia o comportamento na presença do fogo, determinando o tempo decorrido entre o momento em que um dado elemento construtivo é colocado em contacto com uma chama normalizada e o momento em que este deixa de corresponder de forma satisfatória às suas funções.

Para que uma parede se possa considerar segura na ocupação e no uso, quando sujeita a ações normais como o choque, atrito, contacto com a água e enodoamento, esta não deve apresentar alterações significativas ou danos visíveis. Tal como seria expectável, os revestimentos de uma parede serão, à partida, aqueles que estarão mais sujeitos às ações decorrentes do uso do edifício, pelo que será nestes onde serão mais visíveis os problemas. Para determinar a adaptabilidade de um revestimento existem ensaios próprios, como o ensaio das energias mínimas de choque de corpos duros e moles, ou o ensaio de resistência à riscagem por ação de uma série de minas com durezas crescentes. Devem ainda ser realizados ensaios para a avaliação do comportamento de um revestimento em relação à sua resistência à água (Emmitt e Gorse, 2014).

2.5.2 Exigências de habitabilidade

No domínio das exigências de habitabilidade, interessa estudar condições de conforto térmico, acústico, visual e condições de higiene e limpeza.

Tal como foi referido anteriormente, desde cedo que se tem verificado um aumento das preocupações relativamente ao desempenho térmico dos edifícios. Relativamente ao conforto térmico de um edifício, toda a atenção está voltada para as fachadas, uma vez que estas são a envolvente do edifício, logo são as responsáveis pelas trocas de calor efetuadas entre o meio interior e o exterior.

Define-se conforto térmico como a “sensação de bem-estar relativamente à temperatura ambiente. Depende de um equilíbrio a atingir entre o calor produzido pelo corpo e as perdas de calor do corpo para o ambiente. Não existe nenhuma regra rígida que nos indique quais as melhores condições para o conforto de todas as pessoas. O conforto de um individuo é afetado mediante vários fatores: saúde, idade, atividade, roupas, sexo, etc.” (Portal da Construção Sustentável, 2015). Das duas características, a mais fácil de controlar é a humidade de uma habitação, uma vez que basta ventilar corretamente o espaço (através da abertura de janelas) ou, em casos mais extremos, através de um desumidificador. Quanto ao controlo da temperatura ambiente, e sem que para isso se tenha que recorrer a sistemas de aquecimento/arrefecimento, este é feito com a escolha criteriosa e colocação de um isolamento térmico. Para isso, devem ser satisfeitos os requisitos presentes no Decreto-Lei n.º 118/2013 para o grau de isolamento

térmico nos edifícios, através do cálculo do coeficiente de transmissão térmica superficial das fachadas, U , indicado na Equação (10). Este Decreto-Lei divide o país em três zonas climáticas de Inverno (I1, I2 e I3) e em três zonas climáticas de Verão (V1, V2, e V3), indicando um valor de U máximo ($U_{máx}$) e um Valor de U de referência (U_{ref}) de acordo com o elemento em análise, possibilitando assim a verificação do regulamento.

Uma vez que o ruído causa um grande incómodo nos utilizadores provocando, entre outras situações graves, a diminuição do rendimento do trabalho e *stress*, o conforto acústico é outra das exigências fundamentais num edifício. Desta forma, é essencial procurar soluções que reduzam o nível excessivo de pressão sonora de um ruído, para valores não incomodativos, através do reforço de isolamento acústico na conceção de elementos construtivos em edifício, desde paredes, pavimentos, janelas, entre outros.

O conforto visual de uma parede está dependente tanto dos revestimentos utilizados, como da estrutura do edifício, uma vez que caso existam problemas estruturais visíveis, estes influenciam os revestimentos da parede, tornando-a desagradável em termos estéticos. Assim, para que uma parede satisfaça os requisitos mínimos de conforto visual, deve ter condições mínimas de planeza, verticalidade, retidão das arestas, regularidade e perfeição da superfície, e homogeneidade de cor e de brilho (Pinto, 2010).

Para que as condições de higiene e limpeza de uma parede estejam satisfeitas, esta deve ser executada corretamente de forma a minimizar o risco de eventuais patologias, como humidades, fungos, acumulação de poeiras, entre outros. Essas patologias podem, não só pôr em risco a saúde dos utilizadores, como também a segurança do próprio edifício. Para além disso, as fachadas devem ter revestimentos onde a limpeza seja de fácil execução e que não comprometa os seus materiais constituintes. Numa fachada, a limpeza dos revestimentos é fundamental, estando interligada com as condições de higiene e também com o conforto visual do edifício.

2.5.3 Exigências de economia

No domínio das exigências de economia, interessa estudar a durabilidade e o custo global da obra.

A durabilidade de uma parede de fachada tem de ser vista como uma prioridade, pois a parede deve manter o seu desempenho, sem alterações significativas, ao longo do seu período de vida útil, em condições normais de uso e manutenção. Esta depende de vários fatores, como o ambiente a que está exposta e os efeitos degradantes às quais ficará sujeita mediante a sua função. Assim, poderá ser controlada através de uma escolha criteriosa dos materiais utilizados

na sua constituição. A importância da durabilidade está refletida no custo de manutenção e reparação de todas as funções necessárias para manter a fachada funcional durante a sua vida útil.

A tentativa de limitar o custo global de uma obra está sempre presente. Na avaliação dos custos de qualquer sistema construtivo devem ser tidos em conta principalmente dois custos: o de investimento inicial e o de manutenção e reparação. Normalmente as soluções leves de fachadas, como por exemplo a solução tipo *Viroc*, não apresentam um custo de investimento muito atrativo, quando comparados com outras soluções de revestimento exterior de fachadas. No entanto, tendo em conta os custos de instalação relativamente baixos, devido à facilidade de montagem, e os custos de manutenção muito baixos quando comparados com outras soluções de revestimento exterior de fachadas verifica-se que, no final de contas, estas soluções compensam relativamente às tradicionais (Hutcheon, 1963).

3 SOLUÇÕES LEVES (NÃO ESTRUTURAIS)

Tal como foi referido no primeiro capítulo da presente dissertação, este capítulo visa mencionar alguns exemplos de soluções leves utilizadas em paredes não estruturais, mais propriamente em paredes de fachada. Inicia-se com a indicação e breve descrição de vários materiais de isolamento térmico utilizados nestas condições, passando posteriormente para a análise de diversos exemplos de revestimentos presentes em soluções leves, dando uma maior importância a uma solução derivada da madeira, OSB, pois é sobre o estudo do comportamento da mesma que esta dissertação se debruça, em particular, na parte experimental da mesma.

3.1 Soluções para Isolamento Térmico

3.1.1 XPS

Existem várias soluções a ter em conta no que toca à escolha do isolamento térmico de um edifício. Uma das opções é a placa de isolante térmico em espuma rígida de poliestireno extrudido, mais conhecido como XPS, ilustrada na Figura 3.1. Tem uma estrutura de células fechadas e é fabricada de acordo com um processo certificado segundo a Norma Europeia EN 13164. Estas placas de isolamento são normalmente colocadas na caixa-de-ar de uma parede e em coberturas.

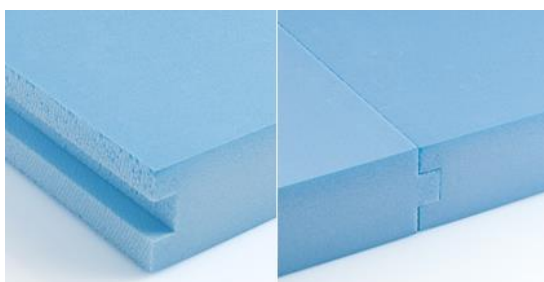


Figura 3.1 – Placa de XPS (Eurofoam, 2015)

Esta solução apresenta características de isolamento interessantes (coeficiente de condutibilidade térmica baixo – na ordem dos 0,034-0,038 W/m°C) e uma absorção de água muito reduzida, tal como uma elevada resistência mecânica, nomeadamente à compressão. O

seu corte, transporte e aplicação é bastante simples, sendo 100% reciclável e compatível com a maioria dos materiais utilizados na construção. Não contém na sua constituição clorofluorcarbonetos nem hidroclorofluorcarbonetos, apresentando também insensibilidade ao ataque de ácidos e bases.

3.1.2 EPS

Outra das opções a ter em conta é a placa de isolante térmico de poliestireno expandido, EPS, vulgarmente denominado de “esferovite” (marca comercial), ilustrada na Figura 3.2, que se encontra de acordo com a norma NP EN 13163.



Figura 3.2 – Placas de EPS (EPS-Lda., 2015)

Estas placas de isolamento são normalmente colocadas pelo exterior segundo o sistema ETICS. O ETICS, *External Thermal Insulation Composite System*, consiste num sistema de isolamento térmico baseado na aplicação de placas de EPS sobre as fachadas com posterior revestimento delgado armado, em fibra de vidro, com resinas sintéticas. Tem como grandes vantagens a diminuição do valor de U de uma fachada, a correção das pontes térmicas e contribui de forma positiva para a inércia térmica do edifício (Silva et al., 2009). Apesar disso, pode também ser colocado na caixa-de-ar de uma fachada.

Este material é extremamente leve, permitindo uma redução do peso da construção e apresenta uma baixa condutibilidade térmica (na ordem dos 0,038-0,040 W/m°C) e uma absorção de água muito reduzida, tal como uma elevada resistência mecânica. É fácil de manusear e aplicar, podendo apresentar-se numa multitude de tamanhos e formas, que se ajustam sempre às necessidades específicas da construção.

3.1.3 Lãs minerais

As lãs minerais mais comuns usadas como isolamentos são a lã de rocha e a lã de vidro. Começando por falar na lã de rocha, como mostra a Figura 3.3, a sua capa exterior, de alta densidade, assegura a aderência ao reboco e uma ancoragem mais simples, assim como um bom comportamento mecânico. A capa interior, de densidade inferior, otimiza as prestações térmicas do painel e permite a máxima adaptabilidade ao suporte.



Figura 3.3 – Manta de lã de rocha (Fibrosom, 2015)

A lã de vidro, ilustrada em manta na Figura 3.4, devido às suas características tanto térmicas como acústicas, atende os mercados da construção civil, industrial, automóvel, entre outros. É leve, de fácil aplicação e durável, mantendo as suas capacidades ao longo do tempo. No entanto, a sua produção está associada à geração de partículas para a atmosfera e à emissão de gases tipo NO_x , SO_2 e CO_2 , implicando gastos significativos de água e energia.

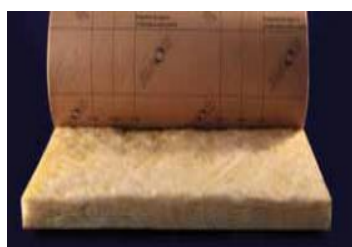


Figura 3.4 – Manta de lã de vidro (Isover, 2015)

Estas soluções apresentam um coeficiente de condutibilidade térmica na ordem dos 0,040-0,045 $\text{W/m}^\circ\text{C}$.

3.1.4 Poliuretano projetado

A espuma de poliuretano projetado, ilustrada na Figura 3.5, é um produto de grande eficácia a nível de isolamentos. A sua aplicação é contínua, sem juntas nem fissuras, vindo assim substituir o isolamento em placas. Trata-se de um material plástico, aplicado *in situ*, através de um equipamento que o projeta contra as superfícies a isolar. Após um breve período de expansão, solidifica constituindo-se pequenas células fechadas que contêm no seu interior um gás que tem um poder isolante superior ao do ar.



Figura 3.5 – Espuma de poliuretano projetado (Polirígido, 2015)

Estas espumas são ideais no isolamento de superfícies irregulares e com reentrâncias, devido à sua grande capacidade isolante e o facto de ser altamente moldável e expansiva. Funciona como barreira ao ar, mas não ao vapor e deve ser protegida de exposições prolongadas à luz solar. Adere a qualquer material utilizado na construção e é resistente mecânica e quimicamente. Esta solução apresenta um coeficiente de condutibilidade térmica na ordem dos $0,042 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$.

3.1.5 Poliuretano flexível

O aglomerado de espuma de poliuretano flexível, ilustrada na Figura 3.6, é um produto resultante da aglomeração de espuma flexível de poliuretano de diferentes densidades, que evidencia uma composição homogénea e estável.



Figura 3.6 – Espuma de poliuretano flexível (Aglomex, 2012)

Trata-se de um material com razoável comportamento face ao fogo e excelente estabilidade dimensional. Tem também uma boa resistência mecânica e é de fácil manuseio e aplicação. Esta solução apresenta um coeficiente de condutibilidade térmica na ordem dos 0,036 W/m°C.

3.2 Soluções para Revestimento

3.2.1 Painéis de gesso laminado

As placas de gesso laminado, ou também conhecidas como placas de gesso cartonado, têm-se destacado na indústria da construção civil por serem um produto leve e de rápida instalação em divisórias interiores e no revestimento e isolamento de paredes e tetos. Estas são placas de uso comum, sendo formadas por duas lâminas de papel multicamada e uma massa interna de gesso natural de elevada pureza, reforçada com filamentos de fibra de vidro. “O seu sistema construtivo consiste num método de produção e montagem, com materiais industrializados e pré-fabricados. Surgiu basicamente para substituir as paredes internas de tijolos ou blocos, bem como para esconder os mais diversos tipos de tubagens hidráulicas e elétricas das mais variadas obras de construção civil. O sistema é composto basicamente por três elementos: as placas de gesso, os elementos estruturais e os acessórios para acabamentos” (Lopes, 2012).

As principais características e vantagens deste produto passam pela produção racionalizada, com rapidez e qualidade, a diminuição do peso da construção, uma maior flexibilização na modulação interior dos edifícios, a durabilidade, um maior conforto térmico e acústico, a facilidade de aplicação e de utilização e, por último, uma boa resistência ao fogo.

Tal como é mostrado na Figura 3.7, existem três tipos de placas que se destacam: placa a) resistente ao fogo, placa b) gesso padrão e placa c) resistente à humidade.

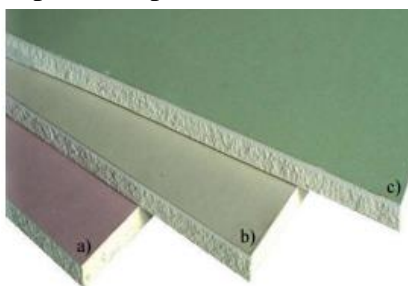


Figura 3.7 – Diferentes tipos de placa de gesso laminado (Lopes, 2012)

3.2.2 Painéis de aglomerado de madeira com cimento (tipo “Viroc”)

O *Viroc*, que corresponde a uma marca comercial, é um produto composto pela mistura de dois materiais bastante conhecidos e fundamentais para a construção civil. Segundo a empresa nacional Viroc by Investwood, este produto é constituído por aparas de madeira resinosa com cimento Portland contendo, ainda, na sua constituição com compostos químicos e água. Este é entregue sob a forma de painéis retangulares com variadíssimas dimensões e espessuras, apresentando uma superfície pouco homogénea, dependendo se o produto é ou não calibrado/lixado. Oferece diversas vantagens visto combinar as propriedades da madeira, tais como a resistência e a flexibilidade que a caracterizam, com a durabilidade e dureza do cimento. Por este motivo, o *Viroc* tem uma vasta aplicabilidade, podendo integrar pavimentos, paredes ou tetos, tanto no interior como o exterior de um edifício.

As várias características e vantagens do produto *Viroc* são a resistência ao fogo, à humidade, ao impacto, ao ruído e a variações térmicas, a resistência a fungos, insetos e micro-organismos, estabilidade dimensional, durabilidade, custos competitivos, facilidade de aplicação e de utilização e o facto de ser um produto ecológico (não tóxico).

A figura que se segue (Figura 3.8) representa, de forma mais real, possíveis painéis *Viroc*.



Figura 3.8 – Painéis *Viroc* (Somapil, 2015)

3.2.3 Soluções tipo “Aquapanel”

A solução tipo *Aquapanel* é formada por uma placa à base de cimento usada no desenvolvimento de soluções de fachadas de edifícios. Esta, citando a empresa Knauf Aquapanel, é composta por “cimento Portland e agregados leves e possui uma tela de reforço embutida que lhe confere maior resistência”. Este sistema foi criado e desenvolvido para a construção e recuperação de paredes de fachada, e por isso, apresenta diversas vantagens nomeadamente no âmbito da economia, da sustentabilidade e do seu desempenho construtivo. A figura que se segue (Figura 3.9) representa uma placa *Aquapanel*.



Figura 3.9 – Placa de *Aquapanel* (Knauf Aquapanel, 2015)

De acordo com a empresa atrás referida, as várias características e vantagens desta solução são a leveza, rapidez de execução, versatilidade e flexibilidade, resistência ao fogo, ao impacto, ao ruído e a variações térmicas e estabilidade dimensional. Este sistema não apresenta grandes necessidades de aplicação de isolamento térmico e acústico e oferece máxima tecnologia em sistemas de placa de cimento.

3.2.4 OSB

Tal como já foi referido, o OSB (*Oriented Strand Board*) é um produto derivado da madeira constituído por partículas finas, longas e orientadas segundo uma determinada direção. Este é composto por várias camadas e as suas partículas são orientadas aproximadamente de forma perpendicular de camada para camada, como é possível observar na Figura 3.10. É também visível que os painéis são, geralmente, retangulares e, é de ter em atenção, que as partículas das camadas exteriores encontram-se, normalmente, alinhadas paralelamente ao comprimento da placa. Esta orientação confere ao painel uma melhor distribuição da sua resistência nos sentidos longitudinal e transversal, além de melhorar a sua estabilidade dimensional.

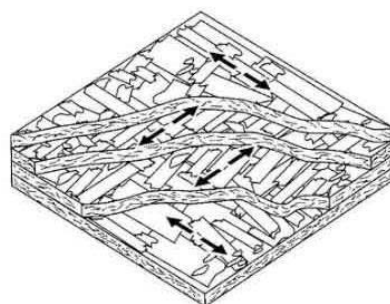


Figura 3.10 – Esquema de uma placa de OSB (Pfeil & Pfeil, 2003)

As partículas podem ser obtidas através do corte de troncos finos e sinuosos, sendo estas lascas fortalecidas e compactadas recorrendo ao uso de resinas, calor e pressão. Devido às suas características físicas e mecânicas, este produto tem diversas aplicações, nomeadamente na área da construção (como por exemplo, construção de paredes, pisos, telhados, alpendres, entre outras), na área da decoração e na área da carpintaria.

Relativamente ao processo de fabrico do OSB, este recorre a pequenas árvores e apresenta um alto aproveitamento da matéria-prima. Segundo Gorski (Gorski et al., 2015), as tiras de madeira são descascadas e cortadas ao longo da sua fibra. Posteriormente estas passam por um processo de secagem, são peneiradas e misturadas com a composição de resinas de colagem à prova de água, emulsão parafínica e inseticida. De seguida, esta mistura segue para o processo de modelagem, onde serão produzidas as camadas orientadas que formam o denominado “colchão” de camadas orientadas. Este entra na prensa contínua de alta temperatura e pressão, onde será formado o desejado painel de OSB. Por fim, os painéis são cortados em tamanhos comercializados, classificados, embalados e armazenados. Todo este processo é totalmente automatizado, com a monitoração de câmaras e computadores. O processo de produção do OSB é ilustrado na figura seguinte (Figura 3.11).

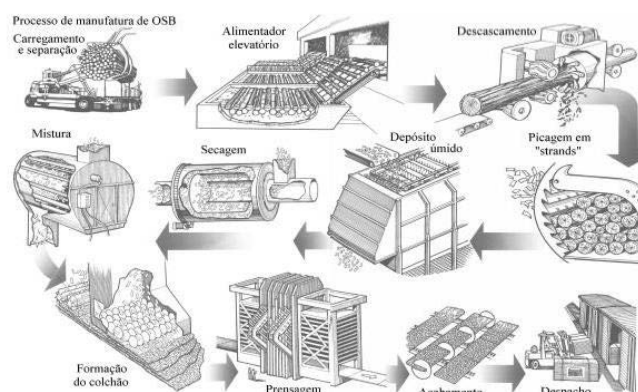


Figura 3.11 - Representação do processo de produção do OSB (adaptado de OSBGuide, 2015)

Os parâmetros fundamentais no controle de qualidade do processo de produção de painéis OSB são, de acordo com (Cloutier, 1998), a densidade da madeira e do painel, a geometria das partículas e sua orientação, a quantidade de humidade do colchão, a quantidade de resina e de parafina e o tempo e temperatura de prensagem.

Este material é bastante competitivo e muito usado na construção de edifícios de madeira pois oferece variadíssimas vantagens, tais como a resistência ao fogo, à corrosão (produtos

químicos), aos fungos e a insetos, estabilidade dimensional, durabilidade, rigidez, isolamento térmico e acústico e facilidade de utilização e manuseamento.

Em termos estéticos é apazível, como podemos observar na Figura 3.12.



Figura 3.12 – Placa de OSB (Jular, 2002)

3.3 Soluções Correntes de Divisórias Leves

3.3.1 Divisórias interiores

Em paredes divisórias interiores, a solução corrente são os painéis de gesso laminado de ambos os lados, como exemplifica a Figura 3.13.

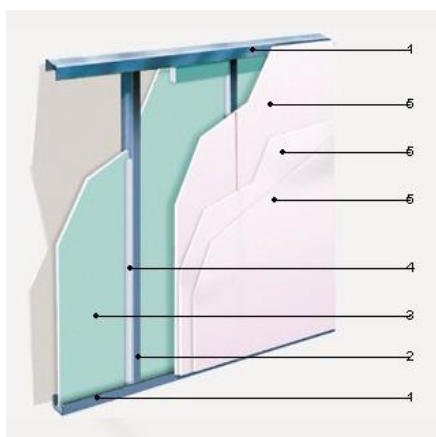


Figura 3.13 – Exemplo de divisória interior com gesso laminado (*Placo Saint-Gobain*, 2015)

O número 1 representa o canal, o número 2 o montante, o número 3 a placa interior, o número 4 o perfil de fixação e o número 5 a placa exterior. Como, na maioria das vezes, não existem

requisitos térmicos nestas paredes divisórias interiores, não se justifica a utilização de um isolamento térmico no interior da parede.

3.3.2 Revestimento interior de fachada

Nas paredes leves de fachada, o revestimento interior normalmente utilizado é em placas de gesso laminado e pontualmente OSB.

3.3.3 Revestimento exterior de fachada

Nas paredes de fachada, o revestimento exterior utilizado apresenta uma grande variação. De entre os materiais apresentados, tanto pode ser utilizado o *Viroc*, o OSB como o sistema *Aquapanel*, pelo que irá ser apresentado um exemplo para cada material.

Como exemplo da aplicação do *Viroc* temos a Figura 3.14, que representa uma fachada ventilada, sendo a solução ideal para revestimentos exteriores, pelas suas indiscutíveis vantagens de isolamento térmico.

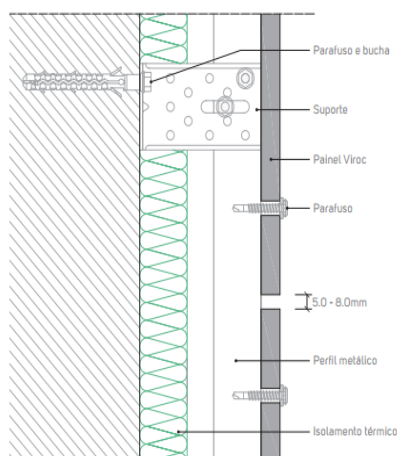


Figura 3.14 - Exemplo de fachada revestida pelo exterior com *Viroc* (Banema, 2013)

Relativamente à aplicação do OSB, é frequente conjugar este material com o sistema ETICS pelo exterior, como ilustrado na Figura 3.15.

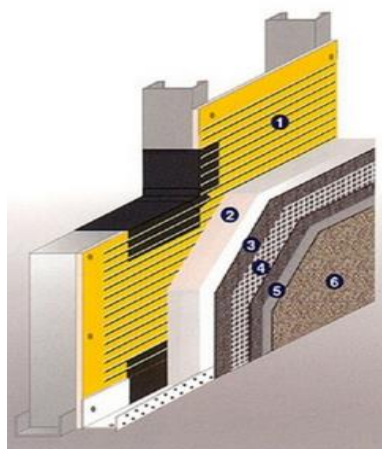


Figura 3.15 - Exemplo de fachada revestida pelo exterior com OSB (Futureng, 2015)

Onde 1 representa o sistema de fixação, 2 a placa de isolamento térmico, 3 a rede de fibra, 4 o revestimento base, 5 o primário e regulador de fundo e 6 o revestimento final.

Um exemplo da aplicação do sistema *Aquapanel* é ilustrada na Figura 3.16, sendo constituído por diferentes materiais e componentes, como é possível observar.

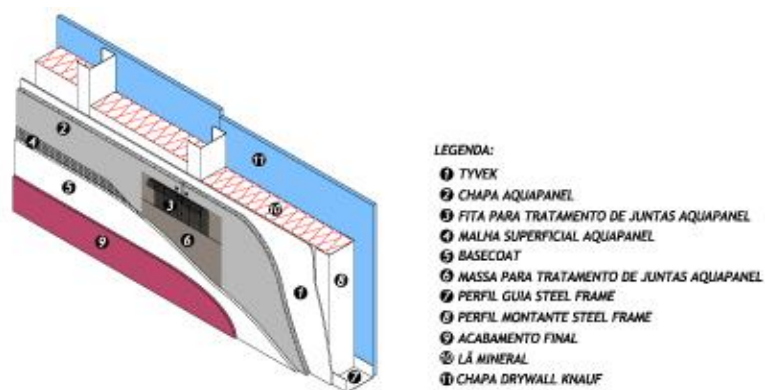


Figura 3.16 – Exemplo de fachada revestida pelo exterior com o sistema *Aquapanel* (Knauf, 2015)

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL E MODELO DE PREVISÃO

O principal objetivo desta dissertação consiste na avaliação, e posterior compreensão, do comportamento térmico de soluções leves, quando aplicadas em paredes de fachadas de edifícios, através do cálculo do coeficiente de transmissão térmica. Desta forma, e na parte experimental do presente trabalho, foi utilizada uma *hot-box*, sendo este método definido na norma ASTM C 1363-11- “*Standard test method for thermal performance of building materials and envelope assemblies by means of a hot box apparatus*”. A *hot-box* utilizada foi construída no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (não correspondendo a um modelo de mercado) e pretende responder às exigências indicadas na referida norma. Este método é usado para grandes amostras homogéneas ou não homogéneas e aplica-se a estruturas de edifícios ou, no caso do presente trabalho, a elementos de construção para os quais é possível construir um exemplar representativo que encaixe no aparelho de teste. Este ensaio é concebido para condições típicas de construção corrente. É, também, importante referir que este método aplica-se a testes em regime permanente e não estabelece os procedimentos ou critérios para a realização de ensaios em regime dinâmico.

Um ensaio realizado com uma *hot-box* é totalmente feito em laboratório. Os equipamentos utilizados são indicados e descritos de seguida. Os parâmetros medidos são a temperatura ambiente, as temperaturas superficiais (em diferentes pontos dos materiais e soluções a ensaiar), os fluxos de calor que atravessam o elemento (da câmara quente para a câmara fria), a energia consumida na câmara quente e diversas áreas. Com estes dados, obtêm-se características do elemento como a sua resistência térmica, a condutibilidade térmica e o coeficiente de transmissão térmica. Este coeficiente é obtido por dois processos de cálculo distintos, também detalhados de seguida: pela equação indicada na norma (usando os dados do fluxímetro, mais para soluções homogéneas) e pela equação do método baseado no consumo de energia (para soluções heterogéneas). Posto isto, torna-se interessante comparar os diversos valores de U obtidos para cada elemento com os seus valores teóricos, calculados utilizando a norma ISO 6946 (caso esta norma seja aplicável) ou segundo o modelo de previsão, o programa *Therm*.

4.1 Equipamentos

Os equipamentos usados em laboratório foram um protótipo de uma *hot-box*, os termofluxímetros, os sensores de temperatura ou termopares, o *datalogger*, o medidor de energia e um computador para o registo dos dados.

4.1.1 Protótipo de uma *hot-box*

Numa *hot-box*, a amostra é colocada entre duas câmaras termicamente isoladas (câmara fria e câmara quente) que são mantidas a temperaturas diferentes em regime permanente. A união entre as duas câmaras é realizada por perfis de borracha que conferem um adequado isolamento térmico e estanquidade ao ar. O coeficiente de transmissão térmica da amostra é obtido pela medição da energia que o aparelho requer para manter a câmara quente a uma temperatura constante. As propriedades isolantes da amostra devem ser avaliadas através da medição de fluxos de calor e de diferenças de temperatura entre os lados quente e frio, sendo também necessária uma análise em diferentes pontos da superfície da amostra, que são representativos de uma área com propriedades homogêneas.

Existem dois tipos de *hot-box*: a *guarded hot-box* é construída com uma câmara de guarda que contém a caixa de medição. Uma vez que os dois volumes são mantidos à mesma temperatura, não é necessária uma correção para a perda de calor através de paredes. A *calibrated hot-box* não tem uma câmara de guarda (uma qualidade que permite a análise de amostras maiores), mas todo o aparelho está localizado num ambiente circundante cuja temperatura é conhecida, geralmente diferente da verificada na câmara de medição (Asdrubali e Baldinelli, 2011). Para a realização dos ensaios laboratoriais do presente trabalho, foi utilizado um protótipo deste segundo tipo de *hot-box*. Desta forma, foram projetadas duas câmaras cúbicas com 1 m de lado, pelo exterior, como mostra a Figura 4.1.

A câmara fria tem por base a adaptação de uma unidade de refrigeração contínua, que pode atingir temperaturas próximas de 0°C. A sua envolvente é constituída por uma camada de 100 mm de espessura de espuma rígida de poliuretano expandido. Esta câmara é incorporada com um sistema de arrefecimento assegurado por uma máquina frigorífica. A câmara quente está equipada com uma resistência que permite obter valores até cerca de 60°C. A envolvente é constituída por uma camada de 100 mm de espessura de espuma rígida de poliuretano expandido, revestidas com 40 mm de espessura de poliestireno extrudido. A câmara é incorporada com uma resistência elétrica alimentada por uma corrente contínua regulável, de forma a aquecer o ambiente dentro da câmara quente.

Entre as duas câmara é colocada uma amostra de área também unitária. De foma a manter a temperatura uniforme, e tendo em conta que a densidade do ar varia consoante a temperatura no interior do compartimento, foram colocadas ventoinhas, tanto na câmara fria como na câmara quente. Uma vez ligada a câmara são iniciadas as trocas de energia entre ambas as faces da amostra.

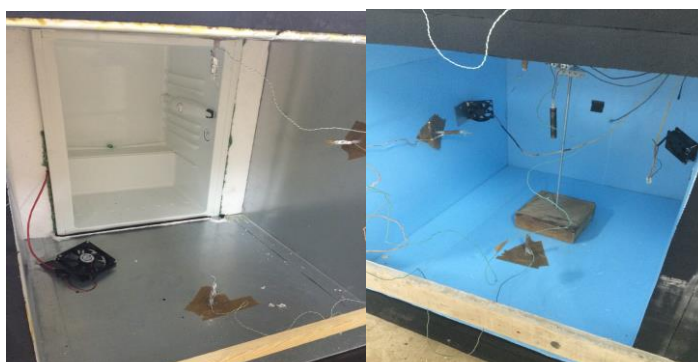


Figura 4.1 – Interior da câmara fria e da câmara quente

4.1.2 Termofluxímetro

Um termofluxímetro é constituído por placas finas, termicamente resistentes, com vários sensores de temperatura distribuídos na sua superfície, para que o sinal elétrico transmitido pelo sensor esteja diretamente relacionado com o fluxo de calor que ocorre através da placa. Dito por outras palavras, o termofluxímetro serve para medir a energia térmica que flui através do objeto sobre o qual está montado. Os termofluxímetros utilizados no trabalho experimental estão ilustrados na Figura 4.2 e são o modelo HFP01 da marca *Hukseflux*.



Figura 4.2 – Termofluxímetro (*Hukseflux*, 2000)

Este equipamento cobre temperaturas entre os -30°C e os 70°C , tendo uma sensibilidade de aproximadamente $50 \mu\text{V}/\text{Wm}^2$. É importante destacar o facto de ter sido necessário efetuar uma conversão dos valores obtidos, pois o equipamento registava os valores do fluxo em mV e as unidades pretendidas são em W/m^2 .

4.1.3 Termopares

Os termopares são dispositivos que possibilitam a medição de temperaturas, tanto superficiais como ambientes. Esta medição parte do princípio que dois condutores metálicos diferentes, unidos numa das suas extremidades e expostos a uma variação de temperatura, geram uma força eletromotriz que é uma função uniforme das temperaturas verificadas em ambas as extremidades. Os termopares disponíveis no mercado têm os mais diversos formatos, sendo também feita a sua distinção pelo tipo de metal que o constitui e o calibre dos seus fios. Posto isto, os termopares disponíveis para este trabalho eram do tipo K (Figura 4.3).



Figura 4.3 – Termopar tipo K (*Pico Technology*, 2015)

Estes termopares são constituídos por cromel e alumel e cobrem temperaturas entre os -200°C e os 1260°C , tendo uma sensibilidade de aproximadamente $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ (Grupo ECIL, 2015).

4.1.4 Datalogger

Para tornar possível a observação e registo dos dados medidos com o termofluxímetro (fluxos de calor) e com os termopares (temperaturas superficiais e ambientes), é necessário um equipamento de aquisição contínuo com capacidade de transmitir os sinais enviados pelos equipamentos referidos: o *datalogger*. O *datalogger* disponível era o modelo TC-08, da marca *Pico Technology* (Figura 4.4), concebido para registar uma vasta gama de temperaturas utilizando qualquer termopar.



Figura 4.4 – Datalogger (*Pico Technology*, 2015)

Este modelo possui 8 canais, e a aquisição de dados é feita de forma muito simples. Uma vez que o equipamento não possui memória interna, basta ligar o TC-08 a uma porta USB de um computador para iniciar o registo de dados. O *software* de aquisição de dados *PicoLog* é fornecido com o TC-08, tornando mais fácil definir a frequência com que deve ser feito o registo.

4.1.5 Medidor de energia

De forma a observar e registar os valores do consumo de energia na câmara quente, para efetuar posteriormente os cálculos de acordo com o “método baseado no consumo de energia”, foi utilizado um medidor de energia. O medidor disponível era digital, modelo EM6000 da marca *Bachmann* (Figura 4.5), e permite a medição fácil dos níveis energéticos de consumo dos dispositivos elétricos. O display mostra os valores de consumo, previsões de custo, valores das emissões de CO₂, período da medição, voltagem, tensão e a energia efetiva.



Figura 4.5 – Medidor de energia (*Bachmann*, 2015)

Tudo o que é necessário definir é a taxa de tarifa específica para um kWh e um valor equivalente de emissões de CO₂ por kWh. Todos os cálculos são baseados nos valores determinados pelas medições.

4.2 Metodologia Experimental

A metodologia do trabalho experimental envolve várias fases, apresentadas da seguinte forma e detalhadas posteriormente:

- Montagem dos provetes na abertura da câmara de ensaios;
- Colocação dos equipamentos de medição (termofluxímetros e termopares) na superfície do provete conforme as singularidades que o caracterizam, bem como os termopares no interior da câmara quente e da câmara fria, o medidor de energia, o *datalogger* e o computador;
- Início do ensaio;
- Recolha de dados relativos ao fluxo de calor e temperaturas superficiais;
- Análise dos resultados experimentais;
- Cálculo e análise dos resultados teóricos;
- Comparação entre os diversos resultados.

4.2.1 Soluções construtivas

Os elementos estudados dizem respeito a soluções de fachadas leves e os ensaios foram realizados em laboratório, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, entre fevereiro e maio de 2015. Deste modo, no próximo capítulo, serão apresentados os casos de estudo. Começou-se pelo estudo de um painel simples de OSB e de um painel de aglomerado de poliuretano flexível, de forma a eliminar possíveis dúvidas quanto ao λ destes materiais e permitir uma comparação mais rigorosa entre os vários modelos utilizados. Posto isto, foram estudados painéis *sandwich* de OSB e poliuretano flexível, painéis de OSB com caixa-de-ar vazia, painéis *sandwich* de pedra e poliuretano flexível e painéis de pedra com caixa-de-ar vazia. O estudo de todos estes painéis justifica-se devido à incorporação de isolamento térmico ou de caixa-de-ar vazia, embora estes provetes não contenham qualquer ponte térmica, o que na realidade é difícil de concretizar. Por fim, foram analisados os referidos painéis, mas alguns com chapa de aço lateral e chapa em toda a sua envolvente, e outros com pedra lateral e pedra em toda a sua envolvente. Estes últimos provetes pretendem simular situações bem mais realistas, com pontes térmicas (numa e em duas direções) e permitem avaliar sobretudo a contribuição dessas pontes térmicas para o desempenho térmico do provete em estudo. Todas

as soluções foram preparadas de forma a ser possível o seu encaixe no provete de ensaios, com dimensões de 0,60x0,60 m e espessura variável.

É de salientar o facto de ter sido testada uma solução que não é propriamente uma solução leve, a pedra calcária. Esta solução está normalmente associada a elementos de revestimento exterior, sobre elementos de compartimentação pesados, mas no caso deste trabalho, foi testado o seu comportamento de forma isolada (sem considerar o elemento de base, que normalmente é uma parede de alvenaria de tijolo ou de blocos de betão).

4.2.2 Localização e instalação dos equipamentos

A localização dos termofluxímetros e dos sensores de temperatura deve ser pensada, para que os resultados sejam representativos de todo o elemento. Assim, não é recomendável colocar o termofluxímetro próximo de pontes térmicas de pequena dimensão, e os sensores de temperatura não devem estar demasiado próximos de fontes de calor ou de frio.

Em cada um dos ensaios, foram utilizados 3 sensores de temperatura no interior da câmara quente e outros 3 sensores na câmara fria (na superfície inferior, na superior e na lateral esquerda). Relativamente ao provete, foram definidos previamente um conjunto de 10 pontos, como mostra a Figura 4.6, para colocação dos equipamentos. Em todos os elementos estudados, existiam 5 sensores de temperatura na superfície “quente” e outros 5 sensores na superfície “fria”, sendo que a sua localização dependeu dos materiais que constituíam o elemento e a sua posição. Nos elementos em que não existia a chapa ou a pedra lateral ou no contorno, foi usado apenas um termofluxímetro (normalmente localizado no ponto 5) e nos elementos em que existia essa chapa ou pedra, foram utilizados dois termofluxímetros (mais uma vez a localização dependia da posição desses materiais).

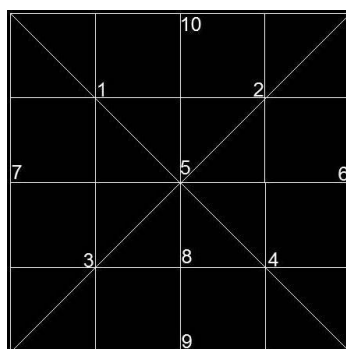


Figura 4.6 – Pontos para colocação dos termofluxímetros e sensores de temperatura

Quanto à fixação dos sensores, é fundamental optar por um material termicamente neutro, para que os resultados não sejam influenciados. Assim, para fixar os sensores de temperatura foi utilizada uma massa adesiva na extremidade e também fita adesiva nos cabos. Nos termofluxímetros, foi usada uma camada fina de pasta dentífrica na sua superfície e novamente a fita adesiva nos cabos. O elemento de construção deve ainda ser estanque, selado ou colado no local para impedir a circulação do ar em torno de seu perímetro. Podem ser coladas folhas finas impermeáveis de papel ou plástico às superfícies de vedação, sem afetar significativamente a condução térmica, e pode também ser colocada uma camada fina de silicone. O isolamento no perímetro do elemento está normalmente incorporado na moldura de ensaio do provete, sendo que esta é reutilizável.

4.2.3 Recolha de dados

Depois de instalados todos os equipamentos, procedeu-se à sua ligação e o *datalogger* foi conectado a um computador de modo a dar início ao registo de dados. Recomenda-se que os dados recolhidos pelos termofluxímetros e pelos sensores de temperatura sejam gravados de forma contínua.

Alguns elementos de teste exigem um tempo suficiente de medições para entrar em equilíbrio térmico após a montagem do ensaio, condicionados em laboratório. O tempo necessário para atingir a estabilidade num ensaio em regime permanente depende das propriedades do elemento a ser estudado, das propriedades das câmaras quente e fria e das condições iniciais do teste. Uma vez que estes fatores podem variar ao longo de intervalos variados, não faria sentido indicar o tempo necessário para a estabilização de temperaturas bem como o período para aquisição de dados. Apesar disso, na realização deste trabalho, constatou-se que o período para a estabilização das temperaturas variou entre 6 a 12 horas. As gravações devem ser realizadas em intervalos de tempo fixos, de forma a obter os valores médios das medições em intervalos de tempo mais curtos. Deste modo, programou-se o equipamento para gravar as leituras de 1 em 1 minuto.

4.2.4 Análise dos resultados experimentais

Foram utilizados dois métodos distintos que podem ser usados para a análise dos dados. O primeiro método de cálculo utiliza equações diretas que apenas têm em conta a média do fluxo de calor que atravessa a amostra, a média das temperaturas superficiais da amostra, em cada um dos lados e, para o cálculo posterior, tem em conta as resistências superficiais (interior e exterior). No entanto, estas equações não têm em conta as perdas por dissipação nem os ganhos

de calor associados ao motor da ventoinha, ou seja, não tem em conta os consumos de energia. Para ter em conta todas essas perdas e ganhos no sistema, surge o segundo método de cálculo, um método baseado no consumo de energia.

Começando então pelo primeiro método, este indica uma forma simples da estimativa do coeficiente de transmissão térmica, U (cálculo realizado em soluções com vários materiais) e da condutibilidade térmica, λ (quando o elemento é constituído por apenas um material), através da aplicação das Equações (11) e (12).

$$\frac{1}{R_t} = \frac{Q}{A(T_1 - T_2)} \quad (11)$$

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum R_t + R_{se}} \quad (12)$$

Onde Q representa a taxa do fluxo de calor através da abertura da câmara (W/m^2), A é a área da superfície da amostra (m^2), tendo sido sempre considerada uma área de superfície unitária, T_1 é temperatura média na superfície quente ($^{\circ}C$), T_2 é a temperatura média na superfície fria ($^{\circ}C$), R_t é a resistência térmica da solução ($m^2^{\circ}C/W$). É de salientar que, quando a solução em estudo incluía zonas de ponte térmica (como o caso das soluções com chapas laterais/toda a volta ou pedras laterais/toda a volta), o valor de U final tem que ser ponderado com as áreas dos respetivos materiais (ou seja, ponderado com a área da amostra sem contar com as chapas/pedras e com a área apenas das chapas/pedras, usando o conceito de largura de influência sobre a zona das pontes térmicas representado na figura 4.7.).

No caso de elementos com apenas uma camada homogénea:

$$\lambda = \frac{Q * L}{A(t_1 - t_2)} \quad (13)$$

Onde Q representa a taxa do fluxo de calor através da abertura da câmara (W/m^2), L é a espessura da amostra (m), A é a área da superfície da amostra (m^2), que neste caso corresponde a uma área de superfície unitária, t_1 é a temperatura média da área ponderada da amostra na superfície quente ($^{\circ}C$) e t_2 é a temperatura média da área ponderada da amostra na superfície fria ($^{\circ}C$).

Relativamente ao método baseado no consumo de energia, este já tem em conta os ganhos e perdas pelo sistema. Desta forma, o valor de Q é alterado, como mostra a Equação (14).

$$Q = Q_r + Q_f \quad (14)$$

Onde Q_r representa o calor produzido pela resistência (W) e Q_f o calor produzido pela ventoinha (W). Uma vez que se procedeu a uma alteração no valor de Q , a Equação (11) também tem que sofrer uma alteração.

$$\frac{1}{R_t} = \frac{Q_r + Q_f}{A(T_1 - T_2)} \quad (15)$$

No entanto, e tal como já foi referido no início deste capítulo, foi necessário dimensionar um protótipo de uma *hot-box* de dimensões reduzidas, e como tal, também estes valores de perdas e ganhos pela ventoinha e pela resistência tiveram que ser adaptados ao novo modelo. Assim, considerando que a eficiência da resistência elétrica é igual a 1 (o que corresponde aproximadamente à realidade), o consumo de energia do sistema será igual ao fluxo de energia que sai por toda a envolvente da câmara quente. Como antes deste trabalho experimental foram realizados ensaios, no mesmo laboratório, a diferentes variações de temperatura entre a câmara quente e a envolvente (exceto pela zona de abertura para o provete), foi possível obter uma tabela de fluxos pelo contorno (que não o provete). Descontando este valor tabelado à energia gasta em cada ensaio, fica-se a saber a quantidade de energia que atravessa a câmara pela zona do provete.

O valor da energia do sistema medido previamente em laboratório foi de 6,215 W/h e obteve-se, como mostra o Quadro 4.1, para diversas diferenças de temperatura entre a câmara quente e a temperatura média ambiente, os valores da energia da ventoinha e da resistência (W/h). Estes resultados foram obtidos com um painel de XPS (moldura do provete) com 0,16 m² de área, 0,1 m de espessura e uma condutibilidade térmica de 0,035 W/m°C. Tendo este resumo de resultados, é possível realizar uma interpolação de acordo com as diferenças de temperatura verificadas em cada ensaio.

Quadro 4.1 – Valores medidos previamente em laboratório

$\Delta T = T$ (câmara quente) – T (média ambiente) (°C)	11	13	14	20
Energia (ventoinha + resistência) (W)	12,50	14,97	17,21	24,74

Tendo já determinada a quantidade de energia que atravessa a câmara pela superfície do provete, o valor do fluxo calcula-se de acordo com a Equação (16).

$$Q = \frac{E}{A} \quad (16)$$

Onde E representa a energia que passa através da superfície da amostra (W) e A é a área da amostra (m^2). Com o valor do fluxo de calor já calculado, prossegue-se para a determinação do valor de U ou de λ , usando novamente as Equações (11) e (12).

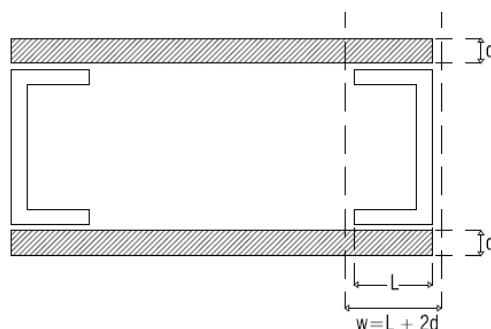


Figura 4.7 – Representação da largura de influência, w (adaptado ASHRAE, 1993)

4.2.5 Precisão dos resultados experimentais

A precisão dos resultados experimentais dependem dos equipamentos de teste, do funcionamento dos mesmos, das condições do ensaio e das propriedades da amostra. Deste modo, é necessário ter especial cuidado com a calibração dos equipamentos (tanto da *hot-box*, como do termofluxímetro e dos sensores de temperatura). Por outro lado, as variações térmicas causadas pelo deficiente contacto entre os sensores e a superfície, também podem estar na origem de erros. Por este motivo, não existe uma declaração quantitativa simples para a incerteza de resultados que possa ser aplicada a todos os casos de estudo. No entanto, a fim de se cumprir com os requisitos, é necessário fazer uma estimativa da incerteza para cada caso.

Em geral, é obtida uma maior precisão para um aparelho de medição com baixa perda térmica pela parede da câmara, através da utilização de paredes altamente isoladas sujeitas a baixas diferenças de temperatura. Também de uma forma geral, para cada aparelho, a incerteza irá diminuir à medida que a transferência de calor através da amostra aumenta. Dito por outras palavras, quanto maior for a diferença de temperatura entre as duas câmaras, menor será a incerteza nos resultados.

4.2.6 Comparação entre os diversos resultados

Feito o cálculo dos valores de R_t experimentais, e posterior calculo dos valores de U , (para elementos compostos por vários materiais) e dos valores de λ também experimentais (para um

único material), resta proceder à determinação dos valores teóricos para posterior comparação. Para a previsão desses valores teóricos, foram utilizados dois métodos distintos: o programa *Therm* (introduzido e explicado no subcapítulo seguinte) e o cálculo segundo a norma ISO 6946 (quando aplicável), cujo procedimento foi apresentado no Capítulo 2.

Alguns valores das condutibilidades térmicas dos materiais foram retirados do ITE 50 do LNEC, e os restantes valores de λ adotados foram retirados dos catálogos do fabricante. Quanto às resistências térmicas superficiais e às resistências térmicas dos espaços de ar não ventilados (apresentados nos Quadros 4.2 e 4.3), foram retiradas do Despacho n.º 15793-K/2013 do REH.

Quadro 4.2 – Valores das resistências térmicas superficiais

Sentido do fluxo de calor	Rse (m ² °C/W)	Rsi (m ² °C/W)
Horizontal	0,04	0,13

Quadro 4.3 – Valores das resistências térmicas dos espaços de ar não ventilados

Sentido do fluxo de calor	Espessura (mm)	Rar (m ² °C/W)
Horizontal	< 5	0,00
	5	0,11
	10	0,15
	15	0,17
	25 a 300	0,18

4.3 Modelo de Previsão

Terminado o cálculo dos diversos valores de U obtidos em laboratório para cada elemento, é essencial realizar uma comparação com os valores teóricos esperados. Deste modo, foi utilizado como modelo de previsão, o programa *Therm*. Este é um programa de computador do *Microsoft Windows*, baseado no método dos elementos finitos e desenvolvido no Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (LBNL). Através deste programa é possível modelar os efeitos bidimensionais da transferência de calor em elementos construtivos como janelas, paredes, coberturas, e outras soluções onde as pontes térmicas são alvo de preocupação. A análise do processo de transferência de calor no *Therm* permite avaliar a eficiência energética de um produto e padrões de temperatura locais, que estão diretamente relacionados a problemas de condensação, humidade, e integridade estrutural. Uma vez que a análise é feita admitindo um

fluxo de calor bidimensional, a transmissão de calor por condução baseia-se no método dos elementos finitos, que permite modelar as geometrias mais complexas dos elementos de construção. O funcionamento do *Therm* divide-se em três componentes: a componente gráfica, a análise da transmissão de calor e os resultados. A componente gráfica permite que se desenhe uma secção transversal do elemento ou solução para o qual se estão a realizar os cálculos térmicos. Para que o modelo do provete seja corretamente representado, devem ser definidas as propriedades dos materiais constituintes da secção transversal, as respetivas dimensões (tendo em conta o conceito de largura de influência representado na Figura 4.7) e as condições de fronteira da secção transversal.

O método dos elementos finitos requer que a secção transversal seja dividida numa malha composta por elementos que não se sobrepõem. Este processo é realizado automaticamente pelo programa. Depois de definidas a geometria da secção transversal, as propriedades do material e as condições de fronteira, basta introduzir as temperaturas verificadas no interior de cada câmara (câmara quente e câmara fria) e os valores do inverso das resistências térmicas superficiais (interior e exterior), para que o *Therm* realize a análise térmica do elemento ou solução. Posto isto, os resultados da análise térmica podem ser visualizados através dos respetivos coeficientes de transmissão térmica, U (que é o desejado neste trabalho), de isotérmicas, de vetores de fluxo de calor, de linhas coloridas de fluxo constante e ainda através das temperaturas locais, médias, máximas e mínimas (Therm-Windows, 2014). Alguns resultados vêm exemplificados na Figura 4.8, onde a primeira imagem é um corte transversal da amostra, a segunda apresenta os resultados como isotérmicas e a terceira mostra os resultados das temperaturas através das cores dos infravermelhos.

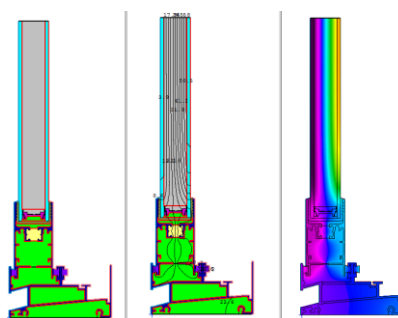


Figura 4.8 – Exemplo de uma amostra e resultados no *Therm* (Therm-Windows, 2014)

Na presente dissertação foram simuladas situações com pontes térmicas nas duas direções perpendiculares que implicariam um cálculo a 3D, mas que foi simplificado utilizando o *Therm* com a duplicação das pontes térmicas (em vez de duas faixas de pontes térmicas em cada direção, foram assumidas quatro faixas na mesma direção).

5 CASOS DE ESTUDO

5.1 Caso de Estudo 1 - OSB

O primeiro caso de estudo diz respeito a um painel de OSB. Uma vez que se trata de um material homogéneo (com apenas uma camada) e como nunca tinha sido testado em laboratório, o parâmetro estudado para este material foi o valor da sua condutibilidade térmica, λ . O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície e uma espessura de 0,018 m, como mostra a Figura 5.1.



Figura 5.1 – Painel de OSB

O ensaio teve uma duração de cerca de 42 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (do ponto 1 ao 5) e o termofluxímetro ficou posicionado no centro do painel (no ponto 5). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 31,2°C e a superfície fria uma temperatura média de 20,2°C. O fluxo medido (Q) foi de 76,21 W/m². Segue-se para o cálculo do valor de λ , através da Equação (13).

Já no método baseado no consumo de energia, após a estabilização, procedeu-se à reiniciação da contagem e a energia medida foi de 1,587 kWh durante 24h e 34 m, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de 19,2°C, e o valor de U calculado recorrendo à Equação (16).

O valor teórico da condutibilidade térmica do painel de OSB foi retirado das tabelas do ITE 50. No Quadro 5.1 apresentam-se os valores de λ obtido experimentalmente, de λ segundo o método baseado no consumo de energia e de λ teórico, tal como a variação obtida entre esses valores.

Quadro 5.1 – Variação entre os vários valores de λ obtidos no caso de estudo 1

λ (fluxo) (W/m°C) 1	λ (energia) (W/m°C) 2	λ (teórico) (W/m°C) 3	Desvio (%) $\lambda(1)/\lambda(2)$	Desvio (%) $\lambda(1)/\lambda(3)$	Desvio (%) $\lambda(3)/\lambda(2)$
0,13	0,15	0,13	-13	0	-13

É possível observar que o valor da condutibilidade térmica calculada de acordo com os valores do fluxo de calor deu exatamente o valor indicado no ITE 50. Já o valor de λ calculado segundo o método baseado no consumo de energia apresenta uma ligeira variação, cerca de 15%. Uma possível explicação para esse desvio é o facto de, eventualmente, haver pequenas frestas na envolvente do painel OSB.

5.2 Caso de Estudo 2 - Aglomerado de Poliuretano Flexível

No segundo caso de estudo foi ensaiado num aglomerado de poliuretano flexível. O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície e uma espessura de 0,05 m, como mostra a Figura 5.2.



Figura 5.2 – Aglomerado de poliuretano flexível

O ensaio teve uma duração de aproximadamente 122 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (do ponto 1 ao 5) e o termofluxímetro ficou posicionado no centro do aglomerado (no ponto 5). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 36,9°C e a superfície fria uma temperatura média de 6,69°C. O fluxo medido (Q) foi de 19,88 W/m².

Já no método baseado no consumo de energia, a energia medida foi de 3,936kWh durante 3 dias, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de 18,9°C.

No Quadro 5.2 apresentam-se os diferentes valores de λ , tal como a variação obtida entre esses valores. O valor teórico da condutibilidade térmica do aglomerado de poliuretano foi retirado das tabelas técnicas do fabricante, que neste caso é a Aglomex.

Quadro 5.2 – Variação entre os vários valores de λ obtidos no caso de estudo 2

λ (fluxo) (W/m°C)	λ (energia) (W/m°C)	λ (teórico) (W/m°C)	Desvio (%)	Desvio (%)	Desvio (%)
1	2	3	$\lambda(1)/\lambda(2)$	$\lambda(1)/\lambda(3)$	$\lambda(3)/\lambda(2)$
0,033	0,046	0,036	-28	-8	-22

Mais uma vez observa-se que o valor de λ calculado segundo o método baseado no consumo de energia é o que apresenta uma maior variação relativamente ao valor teórico, cerca de 30%. Isto pode dever-se a eventuais perdas localizadas no contorno, neste caso agravado pelo facto do provete ser flexível.

5.3 Caso de Estudo 3 - Painel *Sandwich* de OSB e Poliuretano Flexível

O terceiro caso de estudo corresponde a um painel *sandwich* de OSB e poliuretano flexível. O parâmetro térmico estudado para este elemento foi o valor do seu coeficiente de transmissão térmica, U. O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície, uma espessura de 0,018 m de painel de OSB de ambos os lados e ainda uma espessura de 0,05 m de poliuretano flexível entre cada um dos painéis, como mostra a Figura 5.3.



Figura 5.3 – Painel *sandwich* de OSB e poliuretano flexível

O ensaio durou cerca de 41 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (do ponto 1 ao 5) e o termofluxímetro ficou posicionado no centro do painel (no ponto 5). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 37,3°C e a superfície fria uma temperatura média de 6,17°C. O fluxo medido (Q) foi de 16,66 W/m². Segue-se para o cálculo de R_t , através da Equação (11) e, posteriormente, para o cálculo de U usando a equação (12).

Já no método baseado no consumo de energia, e sabendo que a energia medida foi de 1,014 kWh durante 26h e 5m, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de 18,3°C, recorrendo à Equação (16), obteve-se o valor de U. Para o cálculo do valor teórico de U segundo a norma ISO 6946, os valores da condutibilidade térmica do OSB e do aglomerado de poliuretano foram retirados do ITE 50 e das tabelas técnicas do fabricante, respetivamente, obtendo-se um valor de erro superior a 20% pelo que a norma não é aplicável.

No Quadro 5.3 apresentam-se os valores de U obtido experimentalmente, de U segundo o método baseado no consumo de energia e de U teórico segundo o *Therm*, tal como a variação obtida entre esses valores.

Quadro 5.3 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 3

U (fluxo) (W/m ² °C)	U (energia) (W/m ² °C)	U (teórico-therm) (W/m ² °C)	Desvio (%) U(1)/U(2)	Desvio (%) U(1)/U(3)	Desvio (%) U(2)/U(3)
1	2	3			
0,49	0,66	0,51	-25	-3	-23

Verifica-se que o valor de U calculado segundo o método baseado no consumo de energia é aquele que apresenta maiores desvios relativamente aos valores teóricos. Essas diferenças podem dever-se ao facto de o painel não ter sido corretamente selado, alterando os valores das energias medidas.

Para além disso, e de forma a compreender melhor o efeito provocado nas soluções pela presença de pontes térmicas, foram estudados, de uma forma teórica, duas soluções distintas, que representam situações mais próximas do que realmente pode ocorrer na prática. O valor teórico dessas soluções foi determinado segundo o *Therm*, e as condutibilidades térmicas retiradas do ITE 50 ou do fabricante. A primeira solução é semelhante à apresentada, apenas difere na espessura do isolamento (0,10 m). A segunda solução é com ETICs, contém 0,004 m

de argamassa, 0,05 m de EPS, 0,018 m de painel de OSB, 0,05 m de espuma de poliuretano e novamente um painel OSB. Os resultados obtidos estão representados no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – U teórico de soluções práticas para o caso de estudo 3

Soluções	U (teórico-therm) (W/m ² °C)
Painel <i>sandwich</i> com 0,10 m de isolamento	0,29
ETICS	0,31

É de notar que, para qualquer uma destas soluções, o desempenho térmico do painel melhora consideravelmente. Os dois resultados são idênticos, sendo o ETICS ligeiramente pior apenas devido ao seu valor de condutibilidade térmica ser pior.

5.4 Caso de Estudo 4 - Painel *Sandwich* de OSB e Poliuretano Flexível com Chapa Lateral

O quarto caso de estudo corresponde a um painel *sandwich* de OSB e poliuretano flexível com chapas de aço nas laterais do elemento. O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície, uma espessura de 0,018 m de painel de OSB de ambos os lados, uma espessura de chapa de 0,66 mm entre cada placa de OSB e o poliuretano, e ainda uma espessura de 0,05 m de poliuretano flexível entre cada um dos painéis, como mostra a Figura 5.4.



Figura 5.4 – Painel *sandwich* de OSB e poliuretano flexível com chapa lateral (imagem obtida antes da aplicação da placa de OSB)

Uma vez que este caso de estudo é mais complexo que os anteriores (devido à existência das chapas e, conseqüentemente, existência de pontes térmicas), será apresentado de forma mais detalhada. Para além disso, o ensaio foi dividido em duas medições distintas, devido à necessidade de mudança da posição dos equipamentos, tal como é descrito de seguida.

A primeira parte do ensaio teve uma duração de cerca de 42 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 3, 4, 5 e 6) e usados dois termofluxímetros posicionados no centro e no lado direito do painel (nos pontos 5 e 6). As Figuras 5.5 e 5.6 mostram a evolução das temperaturas nas câmaras e as temperaturas superficiais da amostra ao longo do ensaio.

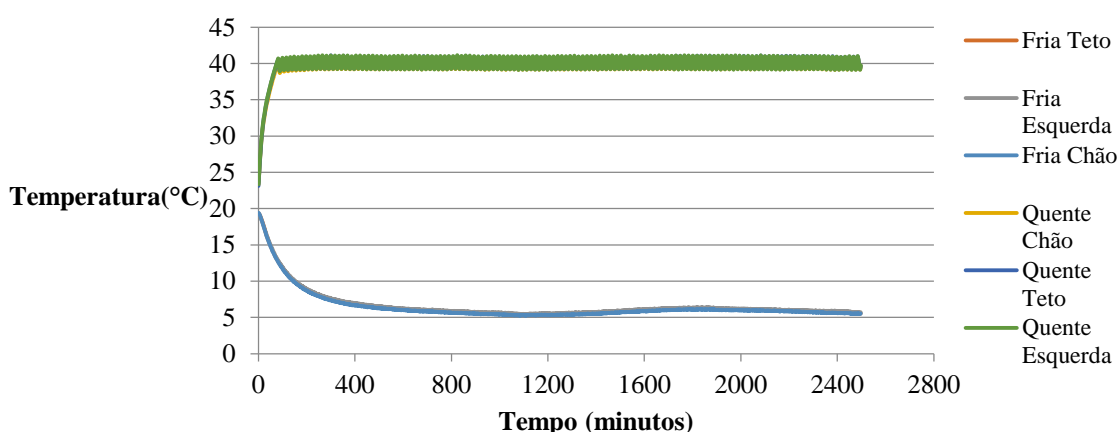


Figura 5.5 – Temperaturas na câmara quente e fria do ensaio 4.1

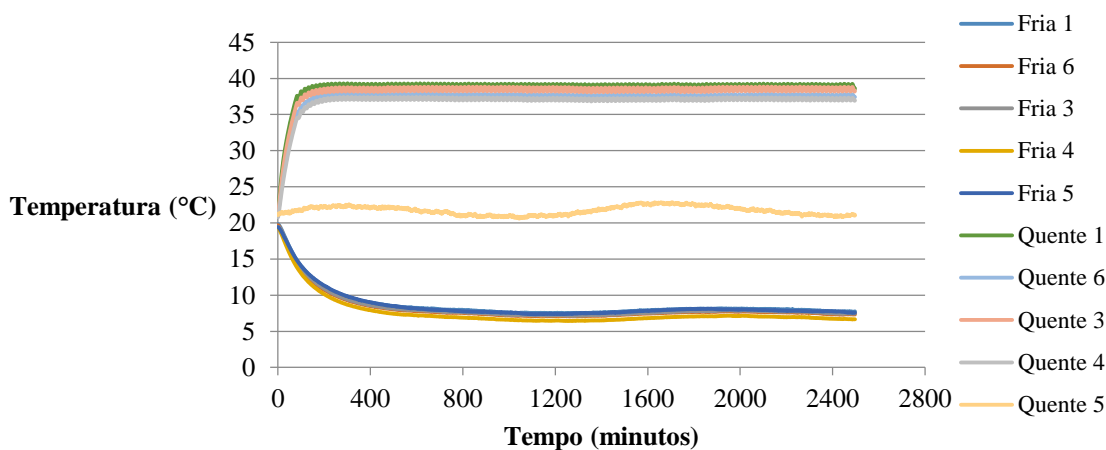


Figura 5.6 – Temperaturas superficiais da amostra do ensaio 4.1

Observando os gráficos, é possível afirmar que a temperatura na câmara quente estabilizou por volta dos 200 minutos de ensaio, já a temperatura da câmara fria levou mais tempo para estabilizar, cerca de 800 minutos. O mesmo aconteceu nas temperaturas superficiais de cada lado da amostra. Verifica-se também que o ponto 5 da superfície quente é aquele que apresenta

temperaturas mais baixas, uma vez que se localiza no centro da amostra. Na Figura 5.7 observamos a variação dos fluxos de calor.

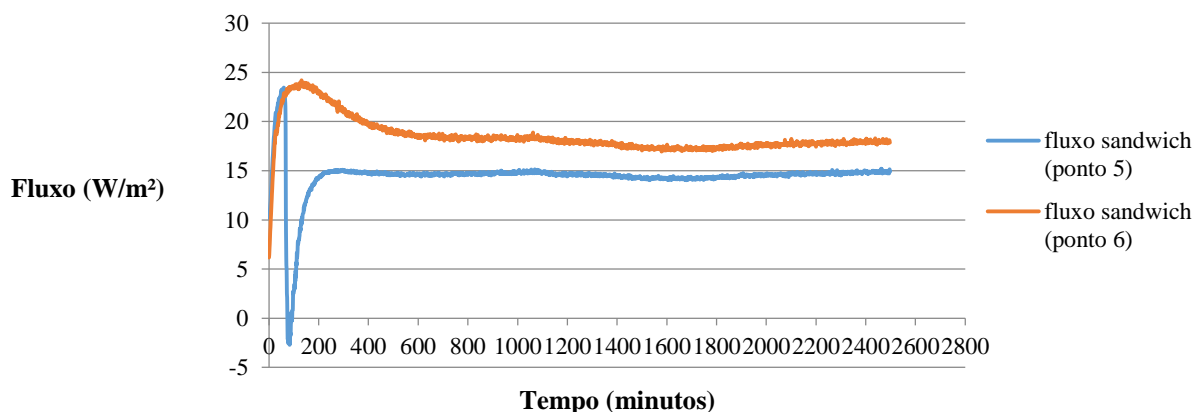


Figura 5.7 – Fluxos de calor no ponto 5 e 6 do ensaio 4.1

Verifica-se que o fluxo que passa pelo centro do painel (ponto 5) é aquele que estabiliza de forma mais rápida, sendo que o fluxo no ponto 6 apresenta valores mais elevados, devido à presença da chapa nesta zona (ponte térmica). Segue-se para o cálculo do valor de U através de cada um dos termofluxímetros, de acordo com a Equação (12). Posto isto, o valor de U a ter em conta para esta primeira parte do ensaio é obtido através da ponderação das respetivas áreas, como mostra a equação, tendo-se obtido um valor de $0,52 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

$$U_{ponderado} = \frac{U_{ponto\ 5} \cdot A_{amostra\ sem\ chapa} + U_{ponto\ 6} \cdot A_{chapa}}{A_{amostra\ sem\ chapa} + A_{chapa}} \quad (16)$$

A segunda parte do ensaio teve uma duração de 69 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 5, 7 e 8) e usados dois termofluxímetros posicionados no centro e no lado esquerdo do painel (nos pontos 5 e 7). As Figuras 5.8 e 5.9 mostram a evolução das temperaturas nas câmaras e as temperaturas superficiais da amostra ao longo do ensaio.

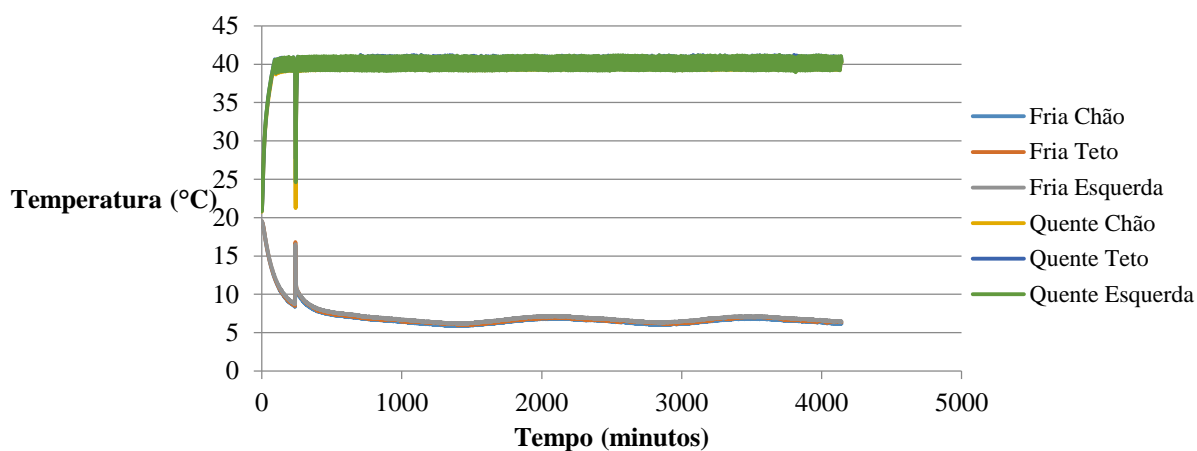


Figura 5.8 - Temperaturas na câmara quente e fria do ensaio 4.2

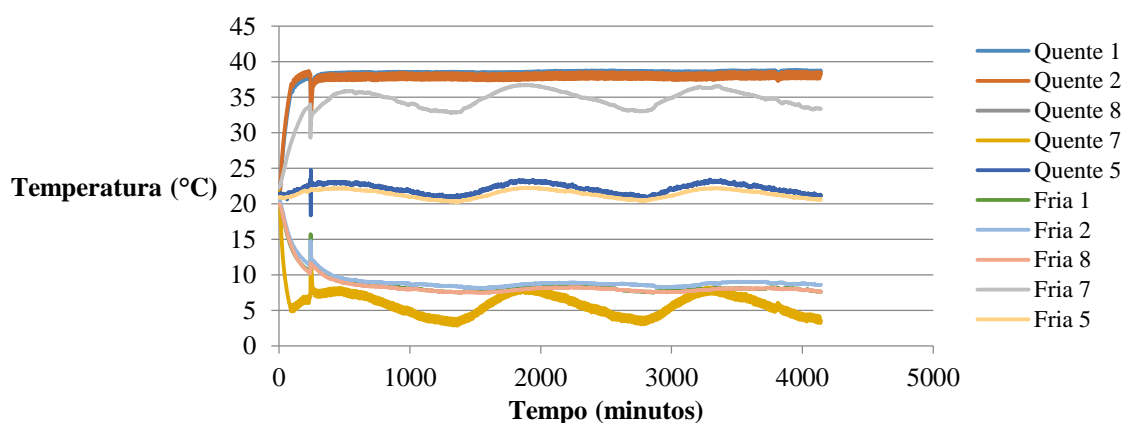


Figura 5.9 - Temperaturas superficiais da amostra do ensaio 4.2

Observando os gráficos, é possível afirmar que as temperaturas nas câmaras estabilizaram por volta dos 500 minutos de ensaio. O mesmo aconteceu nas temperaturas superficiais de cada lado da amostra. Verifica-se também que o ponto 5 da superfície quente e da superfície fria é aquele mais difere dos restantes, uma vez que se localiza no centro da amostra. Na Figura 5.10 observamos a variação dos fluxos de calor.

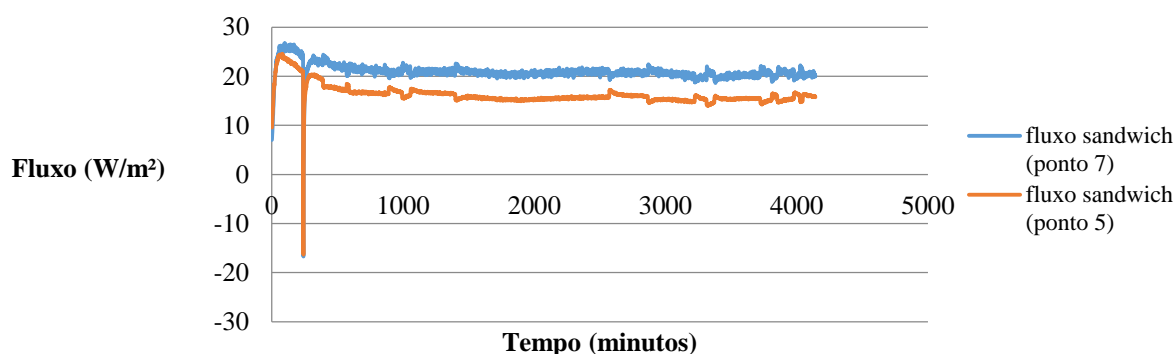


Figura 5.10 - Fluxos de calor no ponto 5 e 7 do ensaio 4.2

Verifica-se que o fluxo que passa pela esquerda do painel (ponto 7) é aquele apresenta valores mais elevados, devido à presença da chapa nesta zona (ponte térmica). Segue-se para o cálculo do valor de U, utilizando o mesmo procedimento indicado no ensaio 4.1. Assim, obteve-se o valor de $0,50 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Para o cálculo do valor de U final, tendo em conta os diferentes resultados dos dois ensaios, é necessário voltar a proceder-se a uma ponderação, de acordo com a equação seguinte.

$$U = \frac{U_{\text{ponto 5(ensaio 4.2)}} \cdot A_{\text{amostra sem chapa}} + U_{\text{ponto 7}} \cdot A_{\text{chapa}} + U_{\text{ponto 6}} \cdot A_{\text{chapa}}}{A_{\text{amostra sem chapa}} + A_{\text{chapa}} + A_{\text{chapa}}} \quad (17)$$

O cálculo do valor teórico de U segundo a norma ISO 6946 não foi efetuado, uma vez que a norma só é aplicável se $R't/R''t < 1,5$, com um erro inferior a 20%, o que não se verificou (erro de 60%). No método baseado no consumo de energia, e sabendo que a energia medida foi de 2,664 kWh durante 64h e 44m, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de $18,2^\circ\text{C}$, calcula-se o valor de U. No Quadro 5.5 apresentam-se os diferentes valores de U, tal como a variação obtida entre esses valores.

Quadro 5.5 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 4

U (fluxo) ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	U (energia) ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	U (teórico-therm) ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	Desvio (%) U(1)/U(2)	Desvio (%) U(1)/U(3)	Desvio (%) U(2)/U(3)
1	2	3			
0,51	0,89	0,72	-42	-29	-19

Verifica-se que o valor de U obtido experimentalmente é aquele que apresenta maiores desvios relativamente ao valor teórico. Portanto, o método baseado no consumo de energia é o que deve ser tido em conta, o que é desejável atendendo que o fluxo não é unidirecional.

Por outro lado, dado o pequeno agravamento do valor de U obtido através do fluxo, em relação à situação sem ponte térmica, provavelmente as placas de OSB não estariam adequadamente comprimidas ao perfil.

5.5 Caso de Estudo 5 - Pannel *Sandwich* de OSB e Poliuretano Flexível com Chapa em toda a sua envolvente

O quinto caso de estudo corresponde a um pannel *sandwich* de OSB e poliuretano flexível com chapas de aço em toda a sua envolvente. O pannel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície, uma espessura de 0,018 m de pannel de OSB de ambos os lados, uma espessura de chapa de 0,66 mm entre cada placa de OSB e o poliuretano, e ainda uma espessura de 0,05 m de poliuretano flexível entre cada um dos painéis, como mostra a Figura 5.11.



Figura 5.11 – Pannel *sandwich* de OSB e poliuretano flexível com chapa na sua envolvente (imagem obtida antes da aplicação da placa de OSB)

Analogamente ao caso de estudo 4, este ensaio também foi dividido em duas medições distintas. A primeira parte do ensaio teve uma duração de cerca de 40 horas, tendo-se verificado no momento em que estabilizou uma temperatura média na superfície quente de 40,7°C e uma temperatura média na superfície fria de 9,4°C. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 5, 7 e 8) e usados dois termofluxímetros posicionados no centro e no lado esquerdo do pannel (nos pontos 5 e 7). Em termos de fluxo, obtiveram-se os valores médios de 17,70 e 24,99 W/m² para os pontos 5 e 7, respetivamente. Feitos os cálculos, obtém-se um valor de 0,67 W/m²°C para U .

A segunda parte do ensaio teve uma duração de aproximadamente 23 horas, tendo-se verificado uma temperatura média na superfície quente de $40,6^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura média na superfície fria de $9,7^{\circ}\text{C}$. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 5, 9 e 10) e usados dois termofluxímetros posicionados na parte de baixo e de cima do painel (nos pontos 9 e 10). Verificaram-se valores médios de fluxo de $21,50$ e $29,26 \text{ W/m}^2$ para os pontos 9 e 10, respetivamente e obteve-se um valor de $0,65 \text{ W/m}^2\text{C}$ para U.

No Quadro 5.6 apresentam-se os diferentes valores de U, tal como a variação obtida entre esses valores. O cálculo do valor teórico de U segundo a norma ISO 6946 não foi efetuada, uma vez que a norma não era aplicável (erro de 28%). Para o método baseado no consumo de energia, a energia medida foi de $0,798 \text{ kWh}$ durante 17h e 35m , com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de $20,6^{\circ}\text{C}$.

Quadro 5.6 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 5

U (fluxo) ($\text{W/m}^2\text{C}$)	U (energia) ($\text{W/m}^2\text{C}$)	U (teórico-therm) ($\text{W/m}^2\text{C}$)	Desvio (%) U(1)/U(2)	Desvio (%) U(1)/U(3)	Desvio (%) U(2)/U(3)
1	2	3			
0,82	0,93	0,87	-11	-6	-6

Verifica-se que os desvios entre os valores obtidos na prática relativamente ao valor teórico são semelhantes, portanto, como o fluxo não é unidirecional, o método baseado no consumo de energia é o que deve ser tido em conta.

Foram, mais uma vez, estudadas duas soluções que representam situações mais reais. A primeira solução é semelhante à apresentada, apenas difere na espessura do isolamento ($0,10 \text{ m}$). A segunda solução é com ETICs, contém $0,004 \text{ m}$ de argamassa, $0,05 \text{ m}$ de EPS, $0,018 \text{ m}$ de OSB, $0,05 \text{ m}$ de espuma de poliuretano e novamente um painel de OSB. Os resultados obtidos estão representados no Quadro 5.7.

Quadro 5.7 – U teórico de solução prática para o caso de estudo 5

Soluções	U (teórico-therm) ($\text{W/m}^2\text{C}$)
Painel <i>sandwich</i> com $0,10 \text{ m}$ de isolamento	0,68
ETICS	0,43

Através da comparação destas novas soluções com as soluções análogas já apresentadas no caso de estudo 3, é possível verificar o agravamento originado pela presença das pontes térmicas, em particular na situação sem ETICS, onde a ponte térmica influencia fortemente o resultado final. Ao contrário do que acontecia no ponto 5.3, a solução com ETICS é significativamente mais favorável, uma vez que consegue anular fortemente o efeito desfavorável da ponte térmica.

5.6 Caso de Estudo 6 - Painel *Sandwich* de Pedra e Poliuretano Flexível

O sexto caso de estudo corresponde a um painel *sandwich* de pedra calcária e poliuretano flexível. O parâmetro térmico estudado para este elemento foi o valor do seu coeficiente de transmissão térmica, U . O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície, uma espessura de 0,02 m de pedra de ambos os lados e ainda uma espessura de 0,03 m de poliuretano flexível entre cada uma das pedras, como mostra a Figura 5.12.



Figura 5.12 – Painel *sandwich* de pedra e poliuretano flexível

O ensaio teve uma duração de cerca de 70 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (do ponto 1 ao 5) e o termofluxímetro ficou posicionado no centro do painel (no ponto 5). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 39,3°C e a superfície fria uma temperatura média de 10,1°C. O fluxo medido (Q) foi de 32,18 W/m².

No Quadro 5.8 apresentam-se os valores de U para os diferentes métodos, tal como a variação obtida entre esses valores. A energia medida foi de 3,138 kWh durante 65h e 45m, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de 20,4°C. O cálculo do valor teórico de U segundo a norma ISO 6946 não foi efetuado, uma vez que a norma não era aplicável (erro superior a 20%).

Quadro 5.8 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 6

U (fluxo) (W/m ² °C)	U (energia) (W/m ² °C)	U (teórico-therm) (W/m ² °C)	Desvio (%) U(1)/U(2)	Desvio (%) U(1)/U(3)	Desvio (%) U(2)/U(3)
1	2	3			
0,93	1,16	0,91	-20	2	-21

Verifica-se que o valor de U calculado segundo o método baseado no consumo de energia é aquele que apresenta maiores desvios relativamente ao valor teórico. Essas diferenças podem dever-se ao facto de o painel não ter sido corretamente selado, alterando os valores das energias medidas.

Foi estudada uma solução que representa uma situação mais real. Esta apenas difere na solução apresentada na espessura do isolamento (0,10 m). Os resultados obtidos estão representados no Quadro 5.9.

Quadro 5.9 – U teórico de soluções práticas para o caso de estudo 6

Solução	U (teórico-therm) (W/m ² °C)
Painel <i>sandwich</i> com 0,10 m de isolamento	0,30

É de notar, tal como esperado, que o desempenho térmico do painel melhora bastante com o aumento da espessura do isolamento, sendo cerca de três vezes mais favorável.

5.7 Caso de Estudo 7 - Painel *Sandwich* de Pedra e Poliuretano Flexível com Pedra Lateral

Com vista a averiguar, novamente, a influência das pontes térmicas, foram também ensaiadas soluções à base de pedra em que o contorno era em pedra. Este caso de estudo corresponde a um painel *sandwich* de pedra calcária e poliuretano flexível com pedras laterais, também calcárias. O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície, uma espessura de 0,02 m de pedra de ambos os lados, uma espessura de pedra de 0,03 m entre cada placa de pedra e o poliuretano, e ainda uma espessura de também 0,03 m de poliuretano flexível entre cada um dos painéis, como mostra a Figura 5.13.



Figura 5.13 - Painel *sandwich* de pedra e poliuretano flexível com pedra lateral (imagem obtida antes da aplicação da placa de pedra)

O ensaio foi dividido em duas medições distintas. A primeira parte do ensaio teve uma duração de 19 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 3, 6 e 7) e usados dois termofluxímetros posicionados no lado direito e esquerdo do painel (nos pontos 6 e 7). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de $37,9^{\circ}\text{C}$ e a superfície fria uma temperatura média de $12,9^{\circ}\text{C}$. Verificaram-se valores médios de fluxo de $62,50$ e $66,48 \text{ W/m}^2$ para os pontos 6 e 7, respetivamente e obteve-se um valor de $1,80 \text{ W/m}^2\text{C}$ para U.

A segunda parte do ensaio teve uma duração de aproximadamente 22 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 3, 5 e 7) e usados dois termofluxímetros posicionados no centro e no lado esquerdo do painel (nos pontos 5 e 7). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de $39,5^{\circ}\text{C}$ e a superfície fria uma temperatura média de 11°C . Verificaram-se valores médios de fluxo de $33,55$ e $66,98 \text{ W/m}^2$ para os pontos 5 e 7, respetivamente e obteve-se um valor de $1,12 \text{ W/m}^2\text{C}$ para U.

No Quadro 5.10 apresentam-se os diferentes valores de U, tal como a variação obtida entre esses valores. O cálculo do valor teórico de U segundo a norma ISO 6946 não foi efetuada devido ao erro de 42%. Para o método baseado no consumo de energia, a energia medida foi de $0,900 \text{ kWh}$ durante 17h e 16m, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de $21,2^{\circ}\text{C}$.

Quadro 5.10 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 7

U (fluxo) ($\text{W/m}^2\text{C}$)	U (energia) ($\text{W/m}^2\text{C}$)	U (teórico-therm) ($\text{W/m}^2\text{C}$)	Desvio (%) U(1)/U(2)	Desvio (%) U(1)/U(3)	Desvio (%) U(2)/U(3)
1	2	3			
1,23	1,44	2,04	-15	-40	-29

Verifica-se que o valor de U obtido experimentalmente é aquele que apresenta maiores desvios relativamente ao valor teórico. Portanto o método baseado no consumo de energia é o que deve ser tido em conta, uma vez que o fluxo não é unidirecional.

5.8 Caso de Estudo 8 - Painel *Sandwich* de Pedra e Poliuretano Flexível com Pedra em toda a sua envolvente

O oitavo caso de estudo corresponde a um painel *sandwich* de pedra calcária e poliuretano flexível com pedra a toda a volta, também calcária. O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície, uma espessura de 0,02 m de pedra de ambos os lados, uma espessura de pedra de 0,03 m entre cada placa de pedra e o poliuretano, e ainda uma espessura de também 0,03 m de poliuretano flexível entre cada um dos painéis, como mostra a Figura 5.14.



Figura 5.14 - Painel *sandwich* de pedra e poliuretano flexível com pedra na sua envolvente (imagem obtida antes da aplicação da placa de pedra)

O ensaio foi dividido em três medições distintas, devido à necessidade de mudança da posição dos equipamentos. A primeira parte do ensaio teve uma duração de 22 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 3, 6 e 7) e usados dois termofluxímetros posicionados no lado direito e esquerdo do painel (nos pontos 6 e 7). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 35,2°C e a superfície fria uma temperatura média de 14,6°C. Verificaram-se valores médios de fluxo de 64,43 e 76,38 W/m² para os pontos 6 e 7, respetivamente e obteve-se um valor de 2,16 W/m²°C para U.

A segunda parte do ensaio teve uma duração de cerca de 7 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 3, 9 e 10) e usados dois termofluxímetros posicionados na parte de cima e de baixo do painel (nos pontos 9 e 10). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 36°C

e a superfície fria uma temperatura média de 15,1°C. Verificaram-se valores médios de fluxo de 82,90 e 62,52 W/m² para os pontos 9 e 10, respetivamente e obteve-se um valor de 2,18 W/m²°C para U.

A terceira parte do ensaio teve uma duração de aproximadamente 18 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 3, 5 e 7) e usados dois termofluxímetros posicionados no centro e no lado esquerdo do painel (nos pontos 5 e 7). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 38,2°C e a superfície fria uma temperatura média de 14,6°C. Verificaram-se valores médios de fluxo de 36,12 e 66,41 W/m² para os pontos 5 e 7, respetivamente e obteve-se um valor de 1,41 W/m²°C para U.

No Quadro 5.11 apresentam-se os valores de U calculados para os diferentes métodos, tal como a variação obtida entre esses valores. O cálculo do valor teórico de U segundo a norma ISO 6946 não foi efetuada devido ao erro de 40%. Para o método baseado no consumo de energia, a energia medida foi de 0,931 kWh durante 16h e 49m, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de 20,1°C.

Quadro 5.11 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 8

U (fluxo) (W/m ² °C)	U (energia) (W/m ² °C)	U (teórico-therm) (W/m ² °C)	Desvio (%) U(1)/U(2)	Desvio (%) U(1)/U(3)	Desvio (%) U(2)/U(3)
1	2	3			
1,75	1,91	2,59	-8	-32	-26

Comparando os diferentes valores de U, verifica-se que o valor de U obtido pelo método baseado no consumo de energia é o que apresenta um valor mais próximo do teórico e, atendendo que o fluxo não é unidirecional, é este o valor que deve ser tido em conta.

Foi, mais uma vez, estudada uma solução que representa uma situação mais real. Esta apenas difere na solução apresentada na espessura do isolamento (0,10 m). Os resultados obtidos estão representados no Quadro 5.12.

Quadro 5.12 – U teórico de soluções práticas para o caso de estudo 8

Solução	U (teórico-therm) (W/m ² °C)
Painel <i>sandwich</i> com 0,10 m de isolamento	1,88

Através da comparação desta nova solução com a solução apresentada no caso de estudo 6, é possível verificar o agravamento originado pela presença das pontes térmicas. O valor de $U = 1,88 \text{ W/m}^2\text{°C}$ é exagerado, visto ser superior à solução com 0,05 m de espessura de isolamento ($U = 1,75 \text{ W/m}^2\text{°C}$). Este facto justifica-se uma vez que o Therm penaliza fortemente as situações com pontes térmicas de grandes dimensões.

5.9 Caso de Estudo 9 - Painel de OSB com Chapa Lateral e Caixa-de-ar vazia

O nono caso de estudo corresponde a um painel de OSB com chapas de aço laterais e caixa-de-ar vazia. O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície, uma espessura de 0,018 m de OSB de ambos os lados, uma espessura de chapa de 0,66 mm entre cada placa de OSB e a caixa-de-ar, e ainda uma espessura de 0,05 m de caixa-de-ar vazia entre cada um dos painéis, como mostra a Figura 5.15.



Figura 5.15 - Painel de OSB com chapa lateral e caixa-de-ar vazia
(imagem obtida antes da aplicação da placa de OSB)

O ensaio teve uma duração de aproximadamente 67 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 3, 5 e 7) e usados dois termofluxímetros posicionados no centro e no lado esquerdo do painel (nos pontos 5 e 7). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de $38,3^{\circ}\text{C}$ e a superfície fria uma temperatura média de $16,3^{\circ}\text{C}$. Verificaram-se valores médios de fluxo de 49,35 e 43,62 W/m^2 para os pontos 5 e 7, respetivamente.

No Quadro 5.13 apresentam-se os diferentes valores de U , tal como a variação obtida entre esses valores. O cálculo do valor teórico de U segundo a norma ISO 6946 não foi efetuada devido ao erro de 66%. A energia medida foi de 3,741 kWh durante 64h e 30m, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de $20,4^{\circ}\text{C}$.

Quadro 5.13 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 9

U (fluxo) (W/m ² °C)	U (energia) (W/m ² °C)	U (teórico-therm) (W/m ² °C)	Desvio (%) U(1)/U(2)	Desvio (%) U(1)/U(3)	Desvio (%) U(2)/U(3)
1	2	3			
1,60	2,19	1,66	-27	-4	-24

Verifica-se que o valor de U calculado segundo o método baseado no consumo de energia é aquele que apresenta maiores desvios relativamente ao valor teórico. No entanto, este resultado é o que deve ter sido em conta, uma vez que o fluxo não é unidirecional.

5.10 Caso de Estudo 10 - Pannel de OSB com Chapa em toda a sua envolvente e Caixa-de-ar vazia

O décimo caso de estudo corresponde a um painel de OSB com chapas de aço a toda a volta e caixa-de-ar vazia. O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície, uma espessura de 0,018 m de painel de OSB de ambos os lados, uma espessura de chapa de 0,66 mm entre cada placa de OSB e caixa-de-ar, e ainda uma espessura de 0,05 m de caixa-de-ar vazia entre cada um dos painéis, como mostra a Figura 5.16.



Figura 5.16 – Pannel de OSB e com chapa na sua envolvente e caixa-de-ar vazia (imagem obtida antes da aplicação da placa de OSB)

O ensaio foi dividido em duas medições distintas. A primeira parte do ensaio teve uma duração de aproximadamente 6 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 3, 5 e 7) e usados dois termofluxímetros posicionados no centro e no lado esquerdo do painel (nos pontos 5 e 7). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 37,8°C e a superfície fria uma

temperatura média de 14,4°C. Verificaram-se valores médios de fluxo de 42,15 e 48,82 W/m² para os pontos 5 e 7, respetivamente e obteve-se um valor de 1,52 W/m²°C para U.

A segunda parte do ensaio teve uma duração de cerca de 23 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 3, 9 e 10) e usados dois termofluxímetros posicionados na parte de baixo e de cima do painel (nos pontos 9 e 10). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 35,8°C e a superfície fria uma temperatura média de 14°C. Verificaram-se valores médios de fluxo de 34,38 e 57,28 W/m² para os pontos 9 e 10, respetivamente e obteve-se um valor de 1,53 W/m²°C para U.

No Quadro 5.14 apresentam-se os diferentes valores de U, tal como a variação obtida entre esses valores. O cálculo do valor teórico de U segundo a norma ISO 6946 não foi efetuada devido ao erro de 69%. Para o método baseado no consumo de energia, a energia medida foi de 0,994 kWh durante 18h e 4m, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de 20,9 °C.

Quadro 5.14 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 10

U (fluxo) (W/m ² °C)	U (energia) (W/m ² °C)	U (teórico-therm) (W/m ² °C)	Desvio (%) U(1)/U(2)	Desvio (%) U(1)/U(3)	Desvio (%) U(2)/U(3)
1	2	3			
1,68	1,79	1,72	-6	-2	-4

Verifica-se que o valor de U calculado segundo o método baseado no consumo de energia é o que apresenta desvios maiores quando comparado com o valor teórico. Contudo, deve ser este o valor a ter em conta visto o fluxo não ser unidirecional.

5.11 Caso de Estudo 11 - Painel de Pedra com Pedra Lateral e Caixa-de-ar vazia

O décimo segundo caso de estudo corresponde a um painel de pedra calcária com pedras laterais, também calcárias e caixa-de-ar vazia. O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície, uma espessura de 0,02 m de pedra de ambos os lados, uma espessura de pedra de 0,03 m entre cada placa de pedra e o poliuretano, e ainda uma espessura de também 0,03 m de caixa-de-ar vazia, como mostra a Figura 5.18.



Figura 5.17 - Painel de pedra com pedra lateral e caixa-de-ar vazia
(imagem obtida antes da aplicação da placa de pedra)

O ensaio foi dividido em duas medições distintas, devido à necessidade de mudança da posição dos equipamentos, tal como é descrito de seguida. A primeira parte do ensaio teve uma duração de 7 horas, Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 4, 5, 6 e 7) e usados dois termofluxímetros posicionados no lado direito e esquerdo do painel (nos pontos 6 e 7). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 33,2 °C e a superfície fria uma temperatura média de 21°C. Verificaram-se valores médios de fluxo de 119,41 e 94,28 W/m² para os pontos 6 e 7, respetivamente e obteve-se um valor de 3,50 W/m²°C para U.

A segunda parte do ensaio teve uma duração de 16 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 2, 4, 5 e 7) e usados dois termofluxímetros posicionados no centro e no lado esquerdo do painel (nos pontos 5 e 7). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 34,7°C e a superfície fria uma temperatura média de 22°C. Verificaram-se valores médios de fluxo de 80,04 e 97,60 W/m² para os pontos 5 e 7, respetivamente e obteve-se um valor de 3,09 W/m²°C para U.

No Quadro 5.16 apresentam-se os diferentes valores de U, bem como a variação obtida entre esses valores. O cálculo do valor teórico de U segundo a norma ISO 6946 não foi efetuada devido ao erro de 49%. Para o método baseado no consumo de energia, a energia medida foi de 1,021 kWh durante 16h e 12m, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de 20,3°C.

Quadro 5.15 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 11

U (fluxo) (W/m ² °C)	U (energia) (W/m ² °C)	U (teórico-therm) (W/m ² °C)	Desvio (%) U(1)/U(2)	Desvio (%) U(1)/U(3)	Desvio (%) U(2)/U(3)
1	2	3			
3,18	3,11	3,73	-2	-15	-17

Verifica-se que o valor de U calculado segundo o método baseado no consumo de energia é aquele que apresenta maiores desvios relativamente ao valor teórico, embora estes sejam pouco significativos. No entanto, este resultado é o que deve ter sido em conta, uma vez que o fluxo não é unidirecional.

5.12 Caso de Estudo 12 - Painel de Pedra com Pedra em toda a sua envolvente e Caixa-de-ar vazia

O décimo terceiro caso de estudo, e último, corresponde a um painel de pedra calcária com pedra a toda a volta, também calcárias, e caixa-de-ar vazia. O painel apresentava uma área de 0,6x0,6 m de superfície, uma espessura de 0,02 m de pedra de ambos os lados, uma espessura de pedra de 0,03 m entre cada placa de pedra e a caixa-de-ar, e ainda uma espessura de também 0,03 m de caixa-de-ar vazia, como mostra a Figura 5.19.



Figura 5.18 - Painel de pedra com pedra na sua envolvente e caixa-de-ar vazia (imagem obtida antes da aplicação da placa de pedra)

O ensaio foi dividido em duas medições distintas. A primeira parte do ensaio teve uma duração de aproximadamente 17 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 4, 5, 6 e 7) e usados dois termofluxímetros posicionados no centro e no lado direito e esquerdo do painel (nos pontos 6 e 7). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 33,6°C e a superfície fria uma temperatura média de 21,9°C. Verificaram-se valores médios de fluxo de 108,47 e 106,21 W/m² para os pontos 6 e 7, respetivamente e obteve-se um valor de 3,58 W/m²°C para U.

A segunda parte do ensaio teve uma duração de cerca de 52 horas. Foram colocados 5 sensores de temperatura em cada uma das superfícies da amostra (nos pontos 1, 4, 5, 6 e 10) e usados dois termofluxímetros posicionados no centro e na parte de cima do painel (nos pontos 5 e 10). Quando o ensaio estabilizou, a superfície quente apresentava uma temperatura média de 34,4°C

e a superfície fria uma temperatura média de 24,6°C. Verificaram-se valores médios de fluxo de 70,41 e 88,84 W/m² para os pontos 5 e 10, respetivamente e obteve-se um valor de 3,33 W/m²°C para U.

No Quadro 5.17 apresentam-se os diferentes valores de U, tal como a variação obtida entre esses valores. O cálculo do valor teórico de U segundo a norma ISO 6946 não foi efetuada devido ao erro de 49%. Já no método baseado no consumo de energia, e sabendo que a energia medida foi de 2,771 kWh durante 47h e 26m, com uma diferença média de temperatura verificada entre a câmara quente e o ambiente de 17,9°C.

Quadro 5.16 – Variação entre os vários valores de U obtidos no caso de estudo 12

U (fluxo) (W/m ² °C)	U (energia) (W/m ² °C)	U (teórico-therm) (W/m ² °C)	Desvio (%) U(1)/U(2)	Desvio (%) U(1)/U(3)	Desvio (%) U(2)/U(3)
1	2	3			
3,43	3,56	3,95	-4	-13	-10

Verifica-se que o valor de U obtido pelo método baseado no consumo de energia é o que apresenta um valor mais próximo do teórico e, atendendo que o fluxo não é unidirecional, é este o valor que deve ser tido em conta.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Neste trabalho, pretendeu-se avaliar e compreender o comportamento térmico de várias soluções de fachadas leves e comparar os resultados obtidos experimentalmente com os valores teóricos previstos para cada caso, através da norma ISO 6946 e através de um programa *de elementos finitos a 2D*. Assim, foram determinados experimentalmente os valores da condutibilidade térmica, λ , para os principais materiais incorporados nas soluções de fachada testadas, bem como os valores das resistências térmicas, R_t , para essas soluções, utilizando o método da *Hot-Box* previsto na norma ASTM C 1363-11. Estes resultados foram, ainda, comparados com os obtidos através de uma metodologia baseada no consumo de energia na câmara quente (descontando o fluxo através da envolvente da câmara quente, previamente avaliado para diferentes gradientes de temperatura em relação ao ambiente exterior da *Hot-Box*).

Relativamente ao cálculo de λ no painel de OSB e no aglomerado de poliuretano flexível, os desvios foram pouco significativos. Estes podem ser explicados por eventuais perdas “parasitas” no contorno do provete de ensaio. Nos ensaios às soluções de fachada com painéis de OSB ou pedra, o parâmetro térmico que serviu de comparação entre as diferentes soluções foi o coeficiente de transmissão térmica (U), obtido a partir da resistência térmica resultante dos mesmos, adicionada das resistências térmicas superficiais exterior e interior. As divergências encontradas podem ser igualmente explicadas por eventuais perdas “parasitas” no contorno do provete, devido essencialmente a frestas entre a moldura e a amostra.

Verificou-se que, nalguns casos, o método baseado no consumo de energia é o mais desfavorável, conduzindo tendencialmente a maiores desvios relativamente aos resultados teóricos. No entanto, e sobretudo para as soluções com pontes térmicas ao nível do contorno, este método não deve ser desvalorizado, uma vez que o fluxo de calor nos elementos não é unidirecional, e esta metodologia é a que melhor permite avaliar, em termos globais, o comportamento térmico destas soluções.

Da comparação dos resultados obtidos a partir do Therm com os resultados experimentais, e para o caso das soluções com OSB e chapas na sua envolvente, verifica-se que estes são próximos do valor médio entre os resultados obtidos pela avaliação do fluxo de calor e pela

avaliação do consumo de energia, sendo os resultados da avaliação do fluxo sempre inferiores. Provavelmente a justificação está na reduzida secção dos perfis no contorno face à dimensão do fluxímetro e à não unidirecionalidade do fluxo. Nos provetes em pedra, com pedra no contorno, pela elevada largura das pedras de contorno, os resultados obtidos no Therm são fortemente penalizados, sendo sempre superiores aos resultados obtidos pelos dois tipos de avaliações experimentais.

Em relação às soluções que incorporavam pontes térmicas, verificou-se ainda que o agravamento na transmissão térmica foi bastante significativo, em particular nas soluções em pedra, devido sobretudo às elevadas áreas de ponte térmica plana presentes nas soluções testadas. Na prática, a existência destas pontes térmicas é geralmente inevitável, mas os seus efeitos podem ser fortemente atenuados com a utilização do sistema ETICS.

Comparando os valores de U obtidos para as soluções estudadas com os valores de referência (U_{ref}), indicados no REH, concluiu-se que, sem correção das pontes térmicas específicas dos painéis estudados, dificilmente se conseguirá obter um valor de U inferior a U_{ref} , pelo que dificilmente se poderão considerar estas soluções como viáveis na prática. De uma forma geral, justifica-se uma alteração significativa das estruturas internas destes painéis ou uma correção suplementar, por exemplo através de isolamento pelo exterior (nomeadamente ETICS ou eventualmente uma fachada ventilada). Esta correção poderá também ser concretizada pelo interior do edifício (com isolamento térmico pelo interior), mas neste caso geralmente menos eficaz, pela insuficiente correção térmica ao nível dos pisos do edifício (nomeadamente a ligação fachada pavimento).

6.2 Trabalhos Futuros

Serão agora sugeridos possíveis trabalhos de desenvolvimento futuro em torno do tema abordado nesta dissertação. Em primeiro lugar, seria útil o estudo do comportamento térmico em soluções de fachadas leves diferentes das estudadas, utilizando também diferentes tipos de isolamentos térmicos.

Uma vez que os provetes que continham pontes térmicas representaram situações mais reais, revela-se importante aprofundar o estudo da influência destas pontes térmicas em elementos de fachadas leves. Seria também interessante explorar a possibilidade de utilização de métodos numéricos em 2D e 3D, para a análise do comportamento de soluções heterogéneas, como o caso destas soluções que incluem as pontes térmicas (planas ou lineares). Por outro lado e tal como seria de esperar, os resultados mostraram que as soluções que incluem pontes térmicas apresentam um pior comportamento térmico. Deste modo, deveriam ser previstas formas de minimização das pontes térmicas em elementos de fachadas leves.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENE. (2015). ADENE - Eficiência Energética. Retrieved from <http://www.adene.pt/eficiencia-energetica>
- Aglomex. (2012). *Ficha técnica - Aglomex Acoustic 60 FR*.
- Albatici, R., & Tonelli, A. M. (2010). Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, 42(11), 2177–2183.
- ASHRAE. (1993). *ASHRAE Handbook of Fundamentals Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*. Atlanta, EUA: American Society of Heating
- ASTM. (2011). *ASTM C 1363-11 - Standard test method for thermal performance of building materials and envelope assemblies by means of a hot box apparatus*.
- Bachmann. (2015). *EM 6000 Operating Manual*.
- Banema. (2013). *Soluções Recomendadas - Viroc*.
- Carlos A. Pina dos Santos, L. M. (2006). *ITE 50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios - LNEC*. Lisboa.
- Carmo. (2015). Estruturas de Madeira. Retrieved from <http://www.carmo.com/pt/estruturas>
- Cloutier, A. (2008). Oriented strandboard (OSB): raw material, manufacturing process, properties of wood-base fiber and particle materials.
- ECIL, G. (2015). Termopar Tipo K. Retrieved from <http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/pirometria/termopares/termopar-tipo-k>
- EcoCasa. (2015). Lã de vidro. Retrieved from http://www.ecocasa.org/userfiles/file/La_de_Vidro.pdf
-

Emmitt, Stephen and Christopher A., G. (2014). *Barry's Advanced Construction of Buildings*.

Engibarra. (2015). Projetos/Estudos. Retrieved from <http://www.engibarra.pt/engibarra/projectos.html>

EPBD. (2002). *Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios*.

EPS-Lda. (2015). EPS. Retrieved from <http://www.eps-lda.com/index.html>

Eurofoam. (2015). Eurisol XPS. Retrieved from <http://www.eurofoam.pt/pt/eurisol-xps-pr.php>

F. Asdrubali, G. B. (2011). Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. *Energy and Buildings*.

Fibrosom. (2015). Lã de Rocha. Retrieved from <http://www.fibrosom.com/>

Futureng. (2015a). Baixo Peso. Retrieved from <http://www.futureng.pt/baixo-peso>

Futureng. (2015b). ETICS. Retrieved from <http://www.futureng.pt/etics>

Futureng. (2015c). Light Steel Framing - LSF. Retrieved from <http://www.futureng.pt/lsf>

Gonçalves, A. M. G. (2015). *Avaliação in situ do desempenho térmico de soluções construtivas*.

Guimarães, J. A. T. (2009). *Análise e Dimensionamento de Pórticos Mistos Aço-Betão*. Universidade do Porto.

Hukseflux. (2000). *HFP01 Product brochure* (Vol. 1003).

Hutcheon, N. B. (1963). *CBD-48. Requirements for Exterior Walls*.

Incropera, DeWitt, Bergman, L. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.

Investwood, V. by. (2015). *Dossier Técnico - Viroc*.

ISO. (2007). *EN ISO 6946 - Building Components and Building Elements - Thermal Resistance and Thermal Transmittance - Calculation Method*.

Isover. (2015). Lã de Vidro. Retrieved from <http://www.isover.pt/>

IteCons. (2013). *Regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação (REH), Síntese da regulamentação aplicável.*

J. A. R. Mendes da Silva, Jorge Falorca, Isabel Torres, Mário J. T. Carvalhal, V. H. A. (2009). *Isolamento Térmico Exterior De Fachadas (sistema ETICS).*

Jular. (2002). *Placas OSB.*

Júnior, B. e Nivaldo, J. (2004). “Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis OSB e compensados”. *Revista Árvore*, Vol.28, Issue 4/nº4, pp. 563-570.

Knauf. (2015). Knauf Aquapanel. Retrieved from <http://knauf.com.br/?id=724>

Lamberts, R., Prof, A., Augusto, A., & Vecchi, R. De. (2013). *Centro Tecnológico - Departamento De Engenharia Civil Conforto E Stress Térmico.*

LBNL Windows & Daylighting Software. (2014). Therm. Retrieved from <http://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html>

Lopes, S. M. de O. (2012). *Conceção e produção de placas de gesso laminado.*

Lourenço, P. B., & Branco, J. (2012). Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI. *História Da Construção: Arquiteturas E Técnicas Construtiva*, 199–211.

Luciane Gorski, Aleksandro Bayestorff da Cunha, Polliana D’Angelo Rios, Rosilani Trianoski, L. P. M. (2015). Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) de *Eucalyptus benthamii* e *Pinus spp.* em diferentes combinações de camadas.

Martins, T. F. R. M. (2010). “Dimensionamento de Estruturas em Madeira - Coberturas e Pavimentos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

Mendonça, P. J. F. de A. U. de. (2005). *Habitar sob uma segunda pele - Estratégias para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperados.* Universidade do Minho - Guimarães.

OSBGuide. (2015). OSB Manufacturing Process.

- Pereira, M. F. P. (2005). *Anomalias em Paredes de Alvenaria sem função Estrutural*. Universidade do Minho - Guimarães.
- Pfeil, W. & Pfeil, M. (2003). *Estruturas de Madeira*.
- Pinto, V. H. D. S. D. J. (2010). *Soluções De Paredes Leves Incorporando Placas De Aglomerado Madeira/Cimento Para Edifícios De Pequeno Porte*.
- Placo. (2015). Sistemas Construtivos - Divisórias. Retrieved from <http://www.placo.es/pt-pt/Sistemas-Construtivos/Solu%C3%A7%C3%B5es-em-Divis%C3%B3rias>
- Polirigido. (2015a). *Catálogo Poliuretano - Sistema Spraypur*.
- Polirigido. (2015b). *Portfolio Poliuretano*. Retrieved from <http://www.polirigido.com/pt/portfolio/isolamentos-termicos/poliuretano/vivaci-guarda>
- República, D. da. (2006). *RCCTE - Decreto-Lei 80/2006 - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*.
- República, D. da. (2013). *REH - Despacho nº 15793-K/2013*.
- Ribeiro, P. (2009). “Avaliação do Comportamento Térmico de Edifícios de Habitação com Recurso a um Termofluxímetro”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Somapil. (2015). Placas Viroc. Retrieved from <http://www.somapil.com/pt/placas/viroc-20141002-091848>
- Sustentável, P. da C. (2015). Conforto Higratérmico. Retrieved from <http://www.csustentavel.com/PT/glossario/conforto-higrotermico>
- Tech, P. (2015a). Sensors. Retrieved from <https://www.picotech.com/accessories/sensors>
- Tech, P. (2015b). TC-08 Thermocouple Data Logger. Retrieved from <https://www.picotech.com/data-logger/tc-08/thermocouple-data-logger>
- Viero. (2011). *Poliestireno Extrudido - XPS*
- Viero. (2012a). Lã de rocha
- Viero. (2012b). *Poliestireno Expandido - EPS*
-