



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Paulo Alexandre Figueiredo Lopes

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE ESTRATÉGIAS  
DE MINIMIZAÇÃO DE PONTES TÉRMICAS EM  
PAREDES LSF

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções, orientada pelo Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Departamento de Engenharia Civil

Paulo Alexandre Figueiredo Lopes

# AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE ESTRATÉGIAS DE MINIMIZAÇÃO DE PONTES TÉRMICAS EM PAREDES LSF

## NUMERICAL EVALUATION OF STRATEGIES TO MINIMIZE THERMAL BRIDGES IN LSF WALLS

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,  
orientada pelo Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC  
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Julho de 2022

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA



Este trabalho foi realizado com o apoio do Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE) e teve o financiamento enquadrado no projeto PTDC/ECI-EGC/32061/2017 – Tyre4BuildIns – *Recycled Tyre Rubber Resin-Bonded for Building Insulation Systems Towards Energy Efficiency*, financiado por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do COMPETE.

## **AGRADECIMENTOS**

Não teria sido possível desenvolver esta dissertação sem a ajuda de todos os que me acompanharam, motivaram e incentivaram durante todo este percurso.

Aos meus pais, José e Paula, pelos valores e educação que me transmitiram, por permitirem que tudo isto fosse possível, e por proporcionarem as melhores condições ao longo da minha vida.

À minha irmã Carina por toda a amizade e por ter estado sempre presente.

À minha namorada Rosangela pelo amor, amizade, e por todo o apoio.

Ao meu orientador Professor Doutor Paulo Santos, pela disponibilidade demonstrada, pelas valiosas orientações que permitiram tomar as decisões mais acertadas, e por todos os conhecimentos transmitidos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra que participaram do meu percurso académico, por me terem proporcionado um ensino de excelência na área da Engenharia Civil.

## RESUMO

As alterações climáticas, assim como a escassez e os elevados preços dos combustíveis fósseis, conduziram a uma crescente preocupação e exigência relativamente à eficiência energética nos edifícios. As perdas de calor originadas pelas pontes térmicas podem representar uma importante parcela da energia consumida para aquecimento (cerca de 30% em edifícios tradicionais), podendo estas ser superiores aos benefícios extraídos da utilização de coletores solares térmicos para produção de água quente sanitária. Nos edifícios com estrutura metálica leve as pontes térmicas originadas pela elevada condutibilidade térmica do aço, são ainda mais penalizadoras, o que leva a uma preocupação no sentido de mitigar o seu efeito. Nesta dissertação pretende-se estudar diversas formas de minimização de pontes térmicas em edifícios em LSF. Para além da revisão do estado da arte sobre esta temática, nesta dissertação compara-se a eficácia de estratégias de mitigação de pontes térmicas existentes e verifica-se qual a melhoria consequente no comportamento térmico e na eficiência energética. É realizado um estudo paramétrico, com recurso a simulações numéricas, onde se avalia a influência de tiras de corte térmico e do isolamento contínuo pelo exterior, em função das suas dimensões e propriedades térmicas. Por último, avalia-se o desempenho de tiras de corte térmico do material compósito de borracha reciclada de pneu (em fim de vida) e aerogel criado no âmbito do projeto de investigação *Tyre4BuildIns* – “Borracha reciclada de pneus colada com resinas para sistemas de isolamento de edifícios eficientes energeticamente”. Nesta dissertação concluiu-se que as tiras de corte térmico e o isolamento contínuo pelo exterior são duas estratégias eficientes para minimizar as pontes térmicas em paredes LSF, quando constituídos por materiais de baixa condutibilidade térmica. A utilização de duas tiras de corte térmico do material compósito de borracha reciclada e aerogel, com o preenchimento total da caixa de ar (com lã mineral), conduz a uma melhoria do coeficiente de transmissão térmica superficial de 41 % em paredes LSF sem ETICS e 23 % em paredes LSF com ETICS.

**Palavras-chave:** LSF; Estruturas leves em aço; Pontes térmicas; Tiras de corte térmico; Desempenho térmico; Simulações numéricas.

## ABSTRACT

Climate change, as well as the scarcity and soaring prices of fossil fuels, have led to a growing concern and demand regarding energy efficiency in buildings. Heat losses caused by thermal bridges can represent an important part of the energy consumed for heating (around 30% in traditional buildings), which can be greater than the benefits obtained from the use of thermal solar collectors to produce domestic hot water. In lightweight steel framed buildings, thermal bridges caused by the high thermal conductivity of steel are even more penalizing, which leads to a concern to mitigate their effect. The main objective of this dissertation is to study strategies to minimize thermal bridges in LSF buildings. In addition to revision the state of the art on this topic, this dissertation compares the effectiveness of existing thermal bridge mitigation strategies and checks the consequent improvement in thermal behaviour and energy efficiency. A parametric study is conducted, using numerical simulations, where the influence of thermal break strips and external continuous insulation is evaluated, depending on their dimensions and thermal properties. Finally, the performance of thermal break strips of recycled tire rubber (end of life) and aerogel composite material created within the scope of the research project Tyre4BuildIns – “Recycled tire rubber resin-bonded for building insulation systems towards energy efficiency”. The main conclusions of this dissertation are that thermal break strips and external continuous insulation are two efficient strategies to minimize thermal bridges in LSF walls, buildings when made of materials with low thermal conductivity. The use of two thermal break strips of recycled rubber and aerogel composite material, with the total filling of the air cavity (with mineral wool), leads to an improvement in thermal transmittance of 41 % on LSF walls without ETICS and 23% on LSF walls with ETICS.

**Keywords:** Lightweight Steel Framed (LSF); Thermal bridges; Thermal break strips; Thermal performance; Numerical Simulations.

---

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura da dissertação .....	2
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>4</b>
2.1	Crise Energética e Ambiental.....	4
2.1.1	Impacto dos edifícios.....	5
2.2	Enquadramento Legislativo .....	6
2.2.1	União Europeia .....	7
2.2.2	Portugal.....	8
2.3	Comportamento Térmico dos Edifícios.....	10
2.3.1	Fundamentos de transmissão de calor .....	10
2.3.2	Transmissão de calor em edifícios .....	13
2.3.3	Pontes térmicas .....	16
2.4	Métodos de Simulação/Avaliação Numérica .....	18
2.4.1	Método dos elementos finitos.....	19
2.4.2	Abordagem ao problema numérico computacional de transferência de calor.....	21
2.4.3	<i>Software</i> disponível para simulação numérica do comportamento térmico.....	22
2.5	O sistema construtivo em <i>Lightweight Steel Framed (LSF)</i> .....	23
2.5.1	Materiais de construção .....	23
2.5.2	Vantagens e desvantagens.....	27
2.5.3	Comportamento térmico de estruturas em LSF .....	28
2.5.4	Estratégias de mitigação de pontes térmicas .....	31
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1	Descrição das Paredes e Materiais em Estudo .....	35
3.2	Modelos Numéricos .....	37
3.2.1	Discretização do domínio .....	37

---

3.2.2	Condições de fronteira.....	37
3.2.3	Validação dos modelos numéricos com os Casos de teste da ISO 10211 .....	38
3.2.4	Comparação da precisão entre os <i>softwares</i> Therm e Ansys .....	39
3.2.5	Validação dos modelos numéricos com resultados experimentais .....	41
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
4.1	Paredes de Referência .....	43
4.2	Influência das Dimensões e Condutibilidade das Tiras de Corte Térmico .....	44
4.2.1	Parede LSF sem ETICS com uma tira de corte térmico .....	45
4.2.2	Parede LSF sem ETICS com duas tiras de corte térmico .....	47
4.2.3	Parede LSF com ETICS e uma tira de corte térmico .....	48
4.2.4	Parede LSF com ETICS e duas tiras de corte térmico .....	49
4.3	Influência da Espessura e Condutibilidade do Isolamento Térmico Contínuo pelo Exterior .....	50
4.4	Comparação Entre o Uso de Tiras de Corte Térmico e o ETICS .....	52
4.5	Desempenho das Novas Tiras de Corte Térmico.....	53
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>57</b>
5.1	Trabalhos Futuros .....	59
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>60</b>
	ANEXO A - Resultados: Parede sem ETICS (1 tira de CT).....	A-1
	ANEXO B - Resultados: Parede sem ETICS (2 tiras de CT) .....	B-1
	ANEXO C - Resultados: Parede com ETICS (1 tira de CT) .....	C-1
	ANEXO D - Resultados: Parede com ETICS (2 tiras de CT).....	D-1
	ANEXO E - Resultados: ETICS (espessura e condutibilidade).....	E-1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Influência das decisões de projeto nos impactes ambientais e custos de um edifício (Koher e Moffatt, 2003). .....	6
Figura 2.2 - Fenómenos de transferência de calor que ocorrem num edifício (Simões, 2015). .....	12
Figura 2.3 - Fluxo de calor unidimensional (Simões, 2015). .....	14
Figura 2.4 - Distribuição de temperatura numa zona de ponte térmica (ITeCons, 2011). .....	16
Figura 2.5 - Tipos de Pontes Térmicas (ITeCons, 2011). .....	17
Figura 2.6 - Método dos elementos finitos (Gomes, 2019). .....	20
Figura 2.7 - Metodologia para a simulação numérica com diferentes geometrias e <i>softwares</i> (Nagy, 2014). .....	21
Figura 2.8 - Estrutura de uma moradia construída em LSF (ROCKS 3D, 2022). .....	23
Figura 2.9 - Secções transversais de perfis estruturais de aço enformados a frio (LSK, 2005). .....	24
Figura 2.10 - Revestimento estrutural na construção em LSF. ....	25
Figura 2.11 - Exemplos de elementos constituintes de paredes em LSF. ....	26
Figura 2.12 - Sistema de união e aperto com parafusos auto-perfurantes (LSK, 2005). .....	26
Figura 2.13 - Estratégias para aumentar a inercia térmica dos edifícios em LSF. ....	30
Figura 2.14 - Distribuição de temperaturas nas mesmas condições de fronteira ( $\theta_i=20\text{ }^\circ\text{C}$ , $\theta_e=5\text{ }^\circ\text{C}$ ) (Atsonios et al., 2018). .....	31
Figura 2.15 - Estratégias de mitigação de pontes térmicas em estruturas em LSF. ....	32
Figura 2.16 - Redução da área de contacto perfil-parede (ThermaChannel, 2018). .....	33
Figura 2.17 - Exemplo da aplicação de tiras de corte térmico (Tyre4BuildIns, 2022). .....	34
Figura 3.1 - Paredes em LSF de referência. ....	36
Figura 3.2 - Teste 2 da ISO 10211: Distribuição de temperatura e fluxo de calor, no Therm. ....	38
Figura 3.3 - Teste 4 da ISO 10211: Distribuição de temperatura e fluxo de calor, no Ansys. ....	39
Figura 3.4 - Comparação da precisão dos modelos numéricos, na parede em LSF sem ETICS: Distribuição de temperaturas e resistência térmica. ....	40
Figura 3.5 - Comparação da precisão dos modelos numéricos, na parede em LSF com ETICS: Distribuição de temperaturas e resistências térmica. ....	40
Figura 3.6 - Equipamento experimental (P. Santos e Mateus, 2020) . ....	41
Figura 4.1 - Valores de resistência térmica das paredes, em LSF, de referência. ....	44
Figura 4.2 - Ilustração esquemática dos parâmetros estudados nas paredes LSF. ....	45
Figura 4.3 - Influência de uma tira de CT na resistência térmica de uma parede resistente sem ETICS. .....	46
Figura 4.4 - Influência de duas tiras de CT na resistência térmica de uma parede resistente sem ETICS. .....	48
Figura 4.5 - Influência de uma tira de CT na resistência térmica de uma parede resistente com ETICS. .....	49
Figura 4.6 - Influência de duas tiras de CT na resistência térmica de uma parede resistente com ETICS. ....	50

Figura 4.7 - Influência da espessura e da condutibilidade do isolamento contínuo pelo exterior na resistência térmica de uma parede em LSF.....	51
Figura 4.8 - Comparação entre duas tiras de CT (15 mm de espessura cada) e isolamento contínuo pelo exterior com (30 mm de espessura) numa parede exterior, em LSF (espessura total de 156.5 mm)....	52
Figura 4.9 - Comparação dos coeficientes de transmissão térmica superficial ( $U$ ) das paredes em estudo com os máximos impostos na Portaria n.º 138-I/2021.....	55
Figura 4.10 - Distribuição de temperaturas e coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) das paredes de referência, com e sem tiras de corte termico do compósito de borracha reciclada e aerogel.....	56

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Resumo dos <i>softwares</i> disponíveis para simulação numérica.....	22
Quadro 3.1 - Propriedades dos materiais constituintes das paredes LSF de referência.....	36
Quadro 3.2 - Condições de fronteira para o estudo paramétrico. ....	37
Quadro 3.3 - Resultados para o caso de teste 2 da ISO 10211. ....	38
Quadro 3.4 - Resultados para o caso de teste 4 da ISO 10211. ....	39
Quadro 3.5 - Comparação de resultados experimentais e numéricos.....	42
Quadro 4.1 - Materiais das tiras de corte térmico em estudo. ....	53
Quadro 4.2 - Resumo dos casos estudados: Materiais, espessura da parede e coeficiente de transmissão térmica superficial ( $U$ ). ....	54

---

## SIMBOLOGIA

$A$  - Área [ $m^2$ ];

$c$  - Calor específico [ $J/(kg \cdot K)$ ];

$e$  - Espessura [ $m$ ];

$hc$  - Coeficiente de condutância térmica superficial por convecção [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];

$h'$  - Coeficiente de filme [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];

$Kp$  - Condutância térmica [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];

$l$  - Comprimento de desenvolvimento linear da PTL [ $m$ ];

$Q$  - Fluxo de calor [ $W$ ];

$R$  - Resistência térmica [ $(m^2 \cdot K)/W$ ];

$R_{se}$  - Resistência térmica superficial exterior [ $(m^2 \cdot K)/W$ ];

$R_{si}$  - Resistência térmica superficial interior [ $(m^2 \cdot K)/W$ ];

$t$  - Tempo [ $s$ ];

$U$  - Coeficiente de transmissão térmica superficial [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];

$\varepsilon$  - Emissividade [--];

$\theta_e$  - Temperatura exterior [ $^{\circ}C$ ];

$\theta_f$  - Temperatura de fluido [ $^{\circ}C$ ];

$\theta_i$  - Temperatura interior [ $^{\circ}C$ ];

$\theta_s$  - Temperatura da superfície [ $^{\circ}C$ ];

$\theta_{se}$  - Temperatura da superfície exterior [ $^{\circ}C$ ];

$\theta_{si}$  - Temperatura da superfície interior [ $^{\circ}C$ ];

$\lambda$  - Condutibilidade térmica [ $W/(m \cdot K)$ ];

$\sigma$  - Constante de Stefan-Boltzmann [ $W/(m^2 \cdot K^4)$ ];

$\rho$  - Massa volúmica [ $kg/m^3$ ];

$\chi$  - Coeficiente de transmissão térmica pontual [ $W/K$ ];

$\psi$  - Coeficiente de transmissão térmica linear [ $W/(m \cdot K)$ ].

## ABREVIATURAS

1D - Unidirecional;  
2D - Bidimensional;  
3D - Tridimensional;  
CE - Comissão Europeia;  
CQNUAC - Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas;  
CT - Corte Térmico;  
DL - Decreto-Lei;  
EAHE - “*Earth-Air Heat Exchanger*”;  
EPBD - “*Energy Performance in Buildings Directive*”;  
EPC - Energy Performance Certificate;  
EPS - Poliestireno Expandido;  
ETICS - “*External Thermal Insulation Composit System*”;  
GEE - Gases do Efeito Estufa;  
HFM - “*Heat Flux Meter*”;  
ISO - “*International Organization for Standardization*”;  
LSF - “*Lightweight Steel Framed*”;  
MEF - Método dos Elementos Finitos;  
NZEB - “*Near Zero Energy Buildings*”;  
ONU - Organização das Nações Unidas;  
OSB - “*Oriented Strand Board*”;  
PCM - “*Phase Change Materials*”;  
PEES - Programa de Estabilização Económica e Social;  
PNUA - Programa das Nações Unidas para o Ambiente;  
PTL - Pontes Térmicas Lineares;  
PTP - Pontes Térmicas Planas;  
RECS - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços;  
REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação;  
SCE - Sistema de Certificação Energética dos Edifícios;  
TC - “*ThermoCouple*”;  
UE - União Europeia;  
XPS - Poliestireno Extrudido;  
ZEB - “*Zero-Emission Buildings*”.

---

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

As alterações climáticas, assim como a escassez e os elevados preços dos combustíveis fósseis, conduziram a uma crescente preocupação e exigência relativamente à eficiência energética nos edifícios. Ao longo dos últimos anos a engenharia civil tem vindo adaptar-se e a ter em conta diversos pontos cada vez mais importantes não só económicos, mas também sociais, como o conforto e bem-estar pessoal, assim como para a preservação do meio ambiente. Indo um pouco mais além do que a preocupação estrutural dos edifícios, o comportamento térmico é um dos fatores que tem vindo a ganhar relevância, a par com a eficiência energética.

A construção com estrutura leve em aço, ou “*Lightweight Steel Framed*” (LSF), objeto de estudo ao longo desta dissertação, é um tipo de construção que tem vindo a crescer nos últimos anos, não só em Portugal, mas também um pouco por toda a Europa. Este tipo de construção tem algumas vantagens, que explicam o seu rápido crescimento, tais como a maior rapidez de construção, o maior conforto térmico/acústico e a sua maior sustentabilidade, quando comparada com a construção mais tradicional, mas também apresenta algumas desvantagens associadas ao seu comportamento térmico, como detalhado mais a frente nesta dissertação (P. Santos, 2017).

Esta dissertação trata de pontes térmicas em paredes com estrutura leve em aço, sabendo de antemão que, se não forem corretamente avaliadas e corrigidas, na fase de projeto e construção, serão uma das principais zonas de perda de calor na zona opaca destes edifícios, originando problemas de condensação superficial, aumentando os consumos energéticos, e por sua vez os seus custos. O impacto total das pontes térmicas no aumento das necessidades de aquecimento é significativo, podendo chegar a 30% (Martins et al., 2016). Tendo em consideração a elevada influência da condutibilidade do aço no desempenho térmico e energético das construções em LSF, é importante estudar soluções que mitiguem esta influência e permitam otimizar a eficiência energética deste tipo de construção. A aplicação de isolamento com um elevado desempenho térmico/acústico e com bom comportamento ao fogo, considerando sempre os aspetos ambientais durante o seu ciclo de vida, pode tornar a construção em estrutura leve em aço ainda mais competitiva e sustentável.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação consiste em definir e avaliar numericamente estratégias de mitigação/minimização de pontes térmicas em paredes LSF de modo a potenciar este sistema construtivo em termos de eficiência térmica e energética.

Para tal, pretende-se fazer uma avaliação e comparação de valores de resistência térmica ( $R$ ) e de coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) de paredes com estrutura leve em aço utilizando diferentes estratégias de mitigação de pontes térmicas. Dentro destas estratégias foram estudadas as tiras de corte térmico e o isolamento contínuo pelo exterior. Foi avaliada a influência das suas dimensões e condutibilidade térmica, no desempenho térmico das paredes em LSF.

Neste trabalho são analisadas e comparadas estratégias de mitigação de pontes térmicas com recurso a resultados de simulações numéricas de transferência de calor, realizadas em *softwares* que têm por base o método dos elementos finitos. Utilizaram-se dois *softwares* de elevada precisão, um bidimensional, o Therm (2017), com o qual se realizaram 454 modelos 2D, e um tridimensional, o Ansys (2019), com o qual se realizaram 8 modelos 3D. Para além de realizadas análises com os dois *softwares*, fez-se uma comparação de precisão entre ambos e compararam-se os resultados obtidos com um método experimental, o método dos termofluxímetros (“*Heat Flow Meter Method*”).

Pretende-se também avaliar o desempenho de tiras de corte térmico de materiais feitos à base de borracha reciclada de pneus, um dos objetivos principais do projeto de investigação *Tyre4BuildIns* onde esta dissertação está inserida (Tyre4BuildIns, 2022).

## 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco Capítulos.

Neste capítulo inicial, Capítulo 1 – Introdução, é realizado um enquadramento geral sobre o tema em estudo, identificam-se os objetivos principais deste trabalho e descreve-se a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 – Estado da Arte, é abordado o tema da crise energética e ambiental e é definido o impacto dos edifícios nesta crise. Também são referenciadas as políticas europeias e nacionais adotadas com o intuito de reduzir o impacto dos edifícios nesta crise. De seguida, o

---

comportamento térmico dos edifícios é objeto de estudo, realiza-se uma apresentação dos processos de troca de calor e explica-se a forma como se aplicam a edifícios. Realiza-se uma introdução aos métodos de avaliação numérica existentes e explica-se mais detalhadamente o método dos elementos finitos. Por último, é apresentado o sistema construtivo LSF, são avaliadas as suas vantagens e desvantagens, é feito o enquadramento do comportamento térmico destes edifícios e estratégias para o potenciar, nomeadamente, através do aumento da inércia térmica e da mitigação das pontes térmicas.

O Capítulo 3 – Materiais e Métodos, onde todos os materiais, procedimentos e ferramentas utilizadas são apresentadas. Neste capítulo também se validam os modelos numéricos, assim como se demonstra a sua precisão e fiabilidade.

O Capítulo 4 – Análise e Discussão de resultados, onde é avaliada a influência das dimensões e condutibilidade das tiras de corte térmico no desempenho térmico de paredes em LSF, depois avalia-se também a influência do isolamento contínuo pelo exterior, e é feita uma comparação entre as duas estratégias. Por último, avalia-se a melhoria no desempenho térmico que a aplicação de tiras de corte térmico (nos banzos dos perfis metálicos), do novo compósito de borracha reciclada de pneus e aerogel reforçado com fibras (Durães et al., 2022), introduz em paredes de estrutura leve em aço.

Por fim, no Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros, apresentam-se as principais conclusões desta dissertação e possíveis trabalhos futuros dentro do tema.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Crise Energética e Ambiental

Atualmente, a União Europeia (UE) enfrenta dificuldades e perturbação no mercado global de energia causadas pela invasão da Ucrânia pela Rússia. Há uma dupla urgência da UE para transformar o seu sistema energético: (1) acabar com a dependência da UE dos combustíveis fósseis russos, que são usados como arma económica e política e custam aos contribuintes europeus cerca de 100 bilhões de euros por ano; (2) enfrentar a crise ambiental. Ao agir como uma União, a Europa pode acelerar a eliminação gradual da dependência dos combustíveis fósseis provenientes da Rússia. Para isso é necessária uma economia de energia, diversificação do fornecimento de energia e uma rápida implantação de energia renovável para substituir os combustíveis fósseis nos edifícios residenciais, nas indústrias e na geração de energia (CE, 2022).

A crise ambiental, mais concretamente, as alterações climáticas/aquecimento global, são um dos maiores problemas a nível mundial, o seu estudo teve início nos anos 70, após grandes catástrofes naturais, percebeu-se que a poluição e os seus efeitos não eram apenas fenómenos localizados. Ficou claro, desde então, que as alterações climáticas devem ser tratadas como um problema internacional e têm surgido várias iniciativas, a nível mundial, para aprofundar conhecimentos e combater os seus efeitos. Esta crise que se caracteriza pelo estado degradado do meio ambiente e põem em causa a sua capacidade de autossustentação, tem como principais causas: (1) o crescimento desmedido da população mundial; (2) o grande desenvolvimento das atividades humanas após a revolução industrial; e (3) a constante procura pelo aumento do conforto e qualidade de vida (B. Santos, 2018).

Em 1972, a Organização das Nações Unidas (ONU), criou o Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA), este serve como autoridade reguladora e defensora do meio ambiente no mundo, tem como objetivo principal coordenar todas as atividades a nível ambiental e facilitar a comunicação e acordos entre os países, assim como ajudar na implementação de medidas ambientais nos países em desenvolvimento (B. Santos, 2018).

Em 1987 foi introduzida a definição de desenvolvimento sustentável, que se define como: “procura por satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das

gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades”. Este conceito é mundialmente reconhecido como uma das prioridades na proteção do meio ambiente (Commission on Environment, 1987).

Em 1992 foi assinada a Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (CQNUAC), um tratado que tem o objetivo de controlar a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE), um dos maiores catalisadores das alterações climáticas (World Meteorological Organization, 2019). O Protocolo de Quioto (1997) e o Acordo de Paris (2015) são as atualizações mais conhecidas deste tratado. O Protocolo de Quioto foi assinado entre 37 países e a União Europeia (UE) com o objetivo de impor, a estes países, uma redução de 5.2% nas emissões de GEE, até o final do ano de 2012. Este Protocolo expirou em 2015 com assinatura do Acordo de Paris que foi aprovado por 195 países em 2015, mas só entrou em vigor no ano de 2020, tem como principal objetivo controlar a temperatura terrestre, sendo imposta a meta de 2 °C para a subida máxima acima dos níveis do período pré-industrial. Estas iniciativas internacionais conduziram a uma mudança de atitude perante a conservação do meio ambiente por parte das entidades governativas (B. Santos, 2018).

### **2.1.1 Impacto dos edifícios**

Os edifícios são um dos setores com maior consumo de energia, sendo responsável por 40% do consumo de energia e pela emissão de 36% dos GEE na UE (CE, 2020) enquanto a nível mundial estes valores são de 36% e 37% (Global CCS, 2021), respetivamente. Nos últimos 2 anos houve um declínio em ambos os valores devido à pandemia de COVID-19 (CE, 2020). A energia consumida na UE para aquecimento e arrefecimento corresponde a 50% do seu total, em que 80% é utilizada em edifícios (EU, 2018a). Por isso, a UE promove a utilização de energias renováveis para aquecimento e arrefecimento (EU, 2018b) bem como a renovação do seu parque imobiliário, dando prioridade à eficiência energética para atingir os objetivos energéticos e climáticos/ambientais (EU, 2018a). Na UE 75% do parque imobiliário não é energeticamente eficiente, pelo que a renovação dos edifícios existentes poderá reduzir o consumo total de energia em 5-6% (CE,2020), correspondendo a uma redução nas importações de gás de 13-15.6% (EU, 2018a).

As decisões tomadas nas fases de conceção, projeto e construção têm grande influência sobre os impactes ambientais e os custos do edifício durante a sua utilização. Como é possível observar na Figura 2.1, é a fase de projeto que mais influencia o desempenho do edifício ao longo do seu tempo útil de vida, é por isso fundamental considerar preocupações com a sustentabilidade desde as primeiras etapas do projeto (Bragança et al., 2014). A energia

operacional é a fração com maior influência nos os impactes ambientais e custos de um edifício, uma vez que é responsável pelo consumo de 80 a 85% da energia total consumida ao longo da sua vida útil (Sharma et al., 2011), estes valores são explicados pelas necessidades de aquecimento e arrefecimento dos edifícios, que contribuem com 55 a 74% desse consumo, dependendo da localização geográfica e da eficiência dos sistemas de aquecimento de água dos edifícios (B. Santos, 2018; P. Santos et al., 2011).

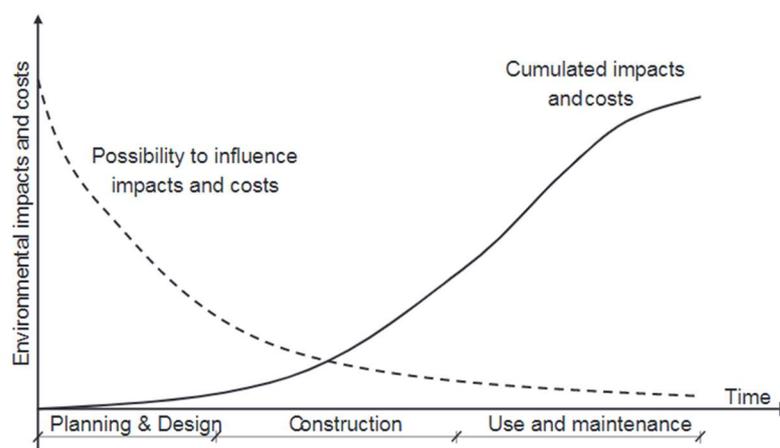


Figura 2.1 - Influência das decisões de projeto nos impactes ambientais e custos de um edifício (Koher e Moffatt, 2003).

Medidas para tornar os edifícios mais sustentáveis assentam sobretudo em abordagens de ciclo de vida, abrangendo os três principais aspetos da sustentabilidade: ambiental, económico e sociocultural. A análise do ciclo de vida é uma abordagem sistemática que permite a quantificação de potenciais impactos ambientais de um edifício ao longo de seu ciclo de vida, ou seja desde a concepção da estrutura até ao fim da sua vida útil, incluindo a extração de matéria prima para a construção e a gestão dos desperdícios resultantes da demolição do edifício. A avaliação da eficiência do edifício em termos de minimização dos impactes ambientais do ciclo de vida e do consumo de energia é de extrema importância, o uso de tal abordagem no início de um projeto é muito importante em busca de uma construção sustentável (Gervásio et al., 2014).

## 2.2 Enquadramento Legislativo

A UE enfrenta um período de transição, devido à necessidade de enfrentar novos desafios impostos pela crise energética e ambiental. Como referido na Secção anterior, há um grande

potencial de poupança energética e ambiental associado à aplicação de medidas que reduzam os consumos dos edifícios e melhorem o seu desempenho ao longo de todo o seu ciclo de vida, devido a este facto, foram introduzidas um conjunto de políticas internacionais e nacionais que conduziram á introdução dos conceitos de eficiência energética e desempenho energético em edifícios.

### 2.2.1 União Europeia

O setor dos edifícios tem vindo a ser alvo de regulamentação por parte da UE, através da publicação de várias diretivas do Parlamento Europeu, com o objetivo de alcançar a eficiência energética e a sustentabilidade no seu parque edificado.

Em 2002 entrou em vigor a Diretiva (UE) 2002/91 relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD, do inglês “*Energy Performance in Buildings Directive*”). Este documento regulamenta o desempenho energético dos edifícios, através da implementação de medidas que passam por: (1) enquadramento de uma metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios; (2) imposição de requisitos mínimos de desempenho energético em edifícios novos e em edifícios sujeitos a uma grande reabilitação; (3) certificação energética de edifícios; e, (4) inspeção regular e avaliação de caldeiras e instalações de ar condicionado (EU, 2002). Para além destas medidas, os Países Membros foram encorajados a estudarem e aplicarem medidas que visem atingir estes objetivos. Para garantir uma transposição eficaz desta diretiva, pelos Estados-Membros, o Parlamento Europeu elaborou diversas normas que estabelecem os métodos e metodologias de cálculo necessários na correta avaliação do desempenho energético dos edifícios (B. Santos, 2018).

Em 2010 a Diretiva (UE) 2002/91 foi reformulada com a entrada em vigor da Diretiva (UE) 2010/31. Esta diretiva veio renovar a EPBD, de modo a dar resposta aos desafios impostos pelas alterações climáticas. Reafirmou a ambição da UE em atingir melhores resultados no desempenho energético do seu parque edificado. Também introduziu o conceito de “edifício com necessidades energéticas quase nulas” (NZEB do inglês “*Near Zero Energy Building*”), sendo que o pouco consumo destes edifícios deve ser assegurado por fontes de energia renovável (e.g. painéis solares), este conceito foi imposto em toda a construção nova. A Diretiva (EU) 2010/31 veio impor, aos Estados-Membros, maior exigência na metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios, nos requisitos de desempenho térmico/energético, na avaliação dos sistemas técnicos (e.g. caldeiras) e na utilização de energia proveniente de fontes renováveis (EU, 2010).

Em 2018 entrou em vigor a Diretiva (UE) 2018/844 que altera a Diretiva (UE) 2010/31 relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva (EU) 2012/27 sobre a eficiência energética. Nesta revisão, a UE reafirma o empenho no desenvolvimento de “um sistema energético sustentável, concorrencial e descarbonizado até 2050”, procedendo a um “conjunto de alterações com vista ao reforço das disposições da Diretiva (UE) 2010/31”. Para atingir uma elevada eficiência energética e a descarbonização do parque imobiliário, os estados-membros deverão “estabelecer orientações claras, definir ações específicas e mensuráveis e promover o acesso equitativo a financiamento, nomeadamente para os segmentos com pior desempenho do parque imobiliário Europeu, para os consumidores em situação de precariedade energética, para a habitação social e para os agregados familiares que enfrentam conflitos de interesses, tendo simultaneamente em conta a acessibilidade dos preços”(EU, 2018a).

Em 15 de dezembro de 2021, a Comissão Europeia apresentou uma proposta para a revisão (ou reformulação) da EPBD, como parte do pacote ‘*Fit for 55*’. Este último consiste em várias propostas legislativas para cumprir o novo objetivo da UE de uma redução mínima de 55 % das emissões de GEE até 2030 em comparação com 1990. É uma parte essencial do Pacto Ecológico Europeu, que visa estabelecer firmemente a UE no caminho para emissões líquidas zero de GEE, atingindo a neutralidade climática até 2050 (EU, 2022).

A EPBD reformulada (ainda em avaliação) visa, mais uma vez, acelerar as taxas de renovação de edifícios, reduzir as emissões de GEE e o consumo de energia e promover a utilização de energia renovável nos edifícios. Introduzirá uma nova definição na UE de «edifício com emissões zero» (ZEB, do inglês *Zero-Emission Buildings*), aplicável a todos os novos edifícios a partir de 2027 e a todos os edifícios renovados a partir de 2030. Os edifícios com emissões zero devem ter em conta o potencial de aquecimento global do seu ciclo de vida. Esta reformulação acelera as renovações nos 15 % dos edifícios da UE com pior desempenho energético e estabelecerá novos mínimos de desempenho energético, ainda mais rigorosos que os que estão em vigor atualmente. No devido tempo, todos os edifícios existentes precisariam alcançar pelo menos uma Classe E numa escala de A a G de certificados de desempenho energético (EPCs, do inglês *Energy Performance Certificates*). Os EPCs seriam incluídos em bancos de dados nacionais vinculados (EU, 2022).

### 2.2.2 Portugal

Portugal, como país desenvolvido e membro da União Europeia, tem a responsabilidade e o dever de implementar a sustentabilidade na construção e a eficiência energética em todo o seu parque edificado. Ser membro da UE garante um acesso privilegiado a um conjunto de

---

incentivos monetários e documentos legislativos que têm como objetivo uniformizar as medidas e métodos a implementar pelos Estados-Membros, para atingir os objetivos comuns (B. Santos, 2018).

A transposição da Diretiva (UE) 2002/91 para o ordenamento jurídico nacional só foi consumada em 2006, com a criação e aprovação de três decretos-lei (DL): (1) DL n.º 78/2006 – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE); (2) DL n.º 79/2006 – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE); e, (3) DL n.º 80/2006 – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) (B. Santos, 2018).

A transposição da Diretiva (UE) 2010/31 resultou na aprovação do DL n.º 118/2013, que aprova: (1) o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), (2) o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH); e, (3) o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

Após a experiência adquirida na transposição das diretivas europeias anteriores, e posterior aplicação, Portugal teve a oportunidade de rever e melhorar a sua regulamentação do desempenho térmico e energético dos edifícios com a criação do DL n.º 101-D/2020, que entrou em vigor a 1 de julho de 2021. Este DL estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o SCE, transpondo a Diretiva (UE) 2018/844 e parcialmente a Diretiva (UE) 2019/944. O Despacho n.º 6476-E/2021 aprova os requisitos mínimos de conforto térmico e de desempenho energético aplicáveis à conceção e renovação dos edifícios, aprova também o Manual do SCE – “Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios” (Adene, 2021). A Portaria n.º 138-I/2021 regulamenta os requisitos mínimos de desempenho energético relativos à envolvente dos edifícios e aos sistemas técnicos.

Para além de toda a regulamentação citada, foi criado o Programa de Estabilização Económica e Social (PEES), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 41/2020 que estabelece, entre outras, uma iniciativa, designada “Edifícios Mais Sustentáveis”, apoiada financeiramente pelo Fundo Europeu. Os edifícios estão no centro das preocupações subjacentes ao Pacto Ecológico Europeu, prevê-se o estabelecimento de uma iniciativa especialmente dedicada à renovação dos edifícios, denominada como “*Renovation Wave*”, que visa abordar as atuais baixas taxas de renovação em toda a UE, além de fornecer uma estrutura para que a reabilitação desempenhe um papel fundamental no apoio a uma recuperação verde e digital (Despacho n.º 8745, 2020).

---

## 2.3 Comportamento Térmico dos Edifícios

A termodinâmica é o ramo da física que estuda, detalhadamente, a forma de aplicação dos processos de troca de calor. A higrotérmica é um domínio da física das construções que estuda o comportamento dos edifícios face à humidade e à temperatura no que concerne à durabilidade dos elementos construtivos, à eficiência energética no aquecimento e arrefecimento e à qualidade do ar no interior dos edifícios.

Como já foi visto na Secção 2.1.1, a eficiência energética de um edifício é muito dependente da energia alocada para suprimir as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Também é possível observar o aumento das exigências no conforto, ao longo do tempo, pelos utilizadores dos edifícios. É, portanto, fundamental considerar o conforto e o comportamento térmico como um requisito essencial dos edifícios e proceder ao seu estudo. Para atingir o conforto térmico é essencial o correto planeamento da envolvente dos edifícios, dado o seu impacto no controlo do ambiente interior e, conseqüentemente, nas necessidades de climatização (Kheiri, 2018). A envolvente de um edifício consiste na conjugação de materiais opacos (e.g. paredes) e transparentes (e.g. envidraçados) que constituem o contorno fechado do espaço interior aquecido através das quais se verifica troca de calor com o exterior ou outros espaços adjacentes não aquecidos (B. Santos, 2018).

### 2.3.1 Fundamentos de transmissão de calor

A transmissão/transferência de energia térmica ocorre sempre que existem diferenças de temperatura entre elementos. Esta transmissão de energia, que acontece sempre do ponto mais quente para o mais frio respeitando o princípio da conservação da energia até se atingir o equilíbrio térmico, é designada por calor. Esta troca de calor ocorre sempre através do “caminho mais fácil”, ou seja, de menor resistência térmica ( $R$ ).

Existem três processos de transmissão de calor, que podem coexistir (Incropera et al., 2007):

**Condução:** A transmissão de calor por condução, forma típica de transmissão nos corpos, que ocorre em virtude da diferença de temperatura estabelecida entre dois pontos do corpo. Este fenómeno físico ocorre em todos os estados da matéria e é definida pela Lei de Fourier (1822). Esta lei dita que o fluxo de calor ( $dQ_x$ ), que atravessa uma dada superfície é proporcional ao produto da área (atravessada) pelo gradiente de temperatura  $\left(\frac{d\theta}{dx}\right)$  existente, como se observa na Equação (1):

$$dQ_x = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx} [W/m^2] \quad (1)$$

Sendo:

$dQ_x$  o fluxo de calor, por condução, na direção x;

$\lambda$  é a condutibilidade térmica do material [W/(m·K)], este coeficiente determina o calor que atravessa, perpendicularmente, um material quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário;

$d\theta$  a diferença de temperatura entre dois pontos [°C];

$dx$  a distância entre os pontos na direção x [m].

**Convecção:** A transferência de calor por convecção ocorre no interior de um fluido ou na fronteira deste com uma superfície sólida. Este processo ocorre devido à dilatação térmica e regras de fluabilidade dos fluidos, que provoca a sua movimentação natural. A convecção é o processo responsável por fenômenos como, por exemplo, a movimentação ascensional do ar quente. Também pode ser forçado, quando a movimentação do fluido é originada por forças externas. Este fenômeno é regido pela equação de Newton (1701), no caso da transferência de calor entre uma superfície e um fluido, representada na Equação (2).

$$Q = h_c \cdot A \cdot (\theta_s - \theta_f) [W] \quad (2)$$

Onde:

$Q$  o fluxo de calor, por convecção, entre uma superfície e um fluido [W];

$h_c$  o coeficiente de condutância térmica superficial por convecção [W/(m<sup>2</sup>·K)]. Esta condutância quantifica o calor que atravessa, perpendicularmente, um elemento de faces planas e paralelas, por unidade de superfície, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário;

$\theta_s$  a temperatura da superfície [°C];

$\theta_f$  a temperatura do fluido [°C].

**Radiação:** A transmissão de calor por radiação é significativamente diferente das anteriores, não necessitando como elas de qualquer suporte material e ocorrendo entre todos os materiais e em qualquer fase. Todos os corpos emitem e recebem radiação e a quantidade de energia é apenas função da sua temperatura absoluta e do estado da sua superfície. Este fenómeno físico é regido pela lei de Stefan-Boltzmann (1884), e pode ser apresentada segundo a Equação (3):

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \theta_s^4 \text{ [W]} \quad (3)$$

Sendo:

$Q$  é o fluxo de calor por radiação [W];

$\varepsilon$  é a emissividade ( $0 < \varepsilon < 1$ ), representa a capacidade de uma superfície emitir energia por radiação comparativamente a um Corpo Negro à mesma temperatura;

$\sigma$  a constante de proporcionalidade (não é uma constante fundamental) é chamada constante de Stefan-Boltzmann ou constante de Stefan  $\sigma$ . O seu valor é  $5.8 \times 10^{-8} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)]}$ ;

Na Figura 2.2 estão ilustrados os três processos de troca de calor suprarreferidos, ocorrendo numa parede exterior de um edifício. Embora na maior parte dos casos estes três processos coexistam, o estudo individualizado de cada um destes processos de transmissão permite o seu tratamento analítico e é, em geral, possível adicionar os seus efeitos quando da ocorrência conjunta dos três processos.

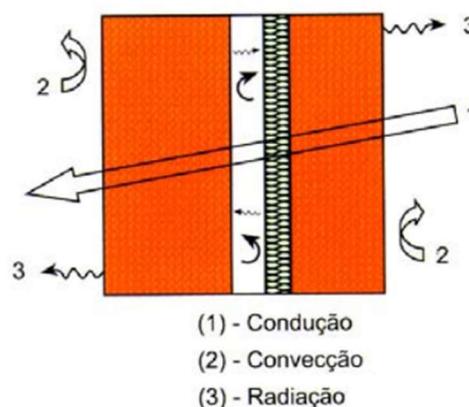


Figura 2.2 - Fenómenos de transferência de calor que ocorrem num edifício (Simões, 2015).

### 2.3.2 Transmissão de calor em edifícios

O estudo da envolvente dos edifícios, é dependente das condições de homogeneidade dos elementos construtivos, do tipo de distribuição de temperatura, do regime temporário e da existência de fenómenos de acumulação e geração de calor (B. Santos, 2018).

Quando existe a ocorrência de transmissão de calor por convecção e radiação em simultâneo, o fenómeno pode ser estudado apenas como convecção utilizando a Equação (4):

$$Q = h' \cdot A \cdot (\theta_s - \theta_f)[W] \quad (4)$$

Onde  $h'$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] representa o coeficiente de filme, que combina a transferência de calor por convecção e radiação.

Esta simplificação facilita o estudo da envolvente de um edifício, pois trata as radiações e convecções que ocorrem nas superfícies das paredes e das caixas de ar.

A equação diferencial da condução de calor é expressa segundo a Equação (5):

$$c \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q^* \quad (5)$$

Sendo:

$c$  é o calor específico [ $J/(kg \cdot K)$ ];

$\rho$  a massa volúmica [ $kg/m^3$ ];

$t$  o tempo [s];

$Q^*$  a geração interior de calor [W];

A parcela:  $\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$ , é responsável pela condução de calor;

$c \rho \frac{\partial \theta}{\partial t}$  é a parcela responsável pela acumulação de calor.

No decorrer desta dissertação é feita uma análise em regime permanente, ou seja, sem geração e acumulação de calor, e em condições de isotropia, ou seja, os materiais têm as mesmas propriedades físicas (e.g. condutibilidade térmica) em todas as direções. Neste caso, a Equação (5) toma a seguinte formulação, para a distribuição de temperaturas tridimensional (3D):

$$\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}\right) = 0 \quad (6)$$

Para a distribuição de temperaturas bidimensional (2D) fica:

$$\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}\right) = 0 \quad (7)$$

E para a distribuição de temperaturas unidirecional (1D):

$$\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}\right) = 0 \quad (8)$$

O caso 1D corresponde à transferência de calor apenas numa direção, aplica-se a partes da envolvente que apresentam um ou mais elementos homogêneos de superfícies paralelas, este processo encontra-se esquematizado na Figura 2.3.

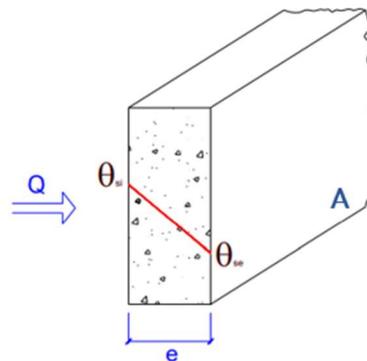


Figura 2.3 - Fluxo de calor unidimensional (Simões, 2015).

Este caso é de simples resolução, através da lei de Fourier, que toma a seguinte formulação:

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{e} \text{ [W]} \quad (9)$$

Onde:

$Q$  é o fluxo de calor;

$\lambda$  a condutibilidade térmica do material, [W/(m·K)];

$e$  é a espessura, ou distancia entre superfícies [m];

$\theta_{si}$  a temperatura superficial interior [°C];

$\theta_{se}$  a temperatura superficial exterior [°C].

Relacionando a condutância térmica ( $K_p$ ), equação (10), a resistência térmica (R), equação (11) e o coeficiente de transmissão térmica superficial ( $U$ ), equação (12), é possível obter a transferência de calor unidirecional em regime permanente em função de  $U$ , equação (13):

$$K_p = \frac{\lambda}{e} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]} \quad (10)$$

$$R = \frac{1}{K_p} = \frac{e}{\lambda} \text{ [(m}^2 \cdot \text{K)/W]} \quad (11)$$

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum R_i + R_{si}} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]} \quad (12)$$

$$Q = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_e) \text{ [W]} \quad (13)$$

Onde:

$R_{se}$  a resistência térmica da superfície exterior [(m<sup>2</sup> · K)/W];

$R_{si}$  a resistência térmica da superfície interior [(m<sup>2</sup> · K)/W];

$\sum R_i$  o somatório das resistências térmicas de todas as camadas constituintes do elemento construtivo [(m<sup>2</sup> · K)/W].

É, portanto, o coeficiente de transmissão térmica superficial ( $U$ ) um parâmetro fundamental para a caracterização da envolvente de um edifício. Este coeficiente pode ser obtido por quatro abordagens distintas: (1) Métodos numéricos, segundo a ISO 10211:2017; (2) métodos simplificados, prescritos nas normas ISO 6946:2007 e EN 1745:2012; (3) métodos experimentais, *in situ* segundo a ISO 9869:1994, e/ou laboratoriais, como a “Hot Box”, segundo a ISO 8990:1994; e, (4) valores fornecidos por fabricantes, calculados ou obtidos

laboratorialmente de acordo com as normas de ensaio relevantes, documentos de homologação, documentos de aplicação ou aprovações técnicas europeias, segundo a ISO 10456:2007.

Atualmente, a Portaria n.º 138-I/2021, especifica valores máximos de  $U$  aplicáveis a elementos opacos e envidraçados de edifícios de habitação em Portugal, consoante a Zona Climática.

### 2.3.3 Pontes térmicas

Uma ponte térmica é “uma zona da envolvente de um edifício na qual a resistência térmica é significativamente alterada devido a penetrações totais ou parciais de outros materiais com diferentes condutibilidades térmicas na sua envolvente, e/ou pela alteração da espessura da envolvente, e/ou devido à diferença entre áreas interiores e exteriores como das ligações entre paredes, pisos e tetos” (ISO 10211, 2017).

As zonas de ponte térmica representam uma área que penaliza o desempenho térmico dos edifícios, pois aumentam significativamente as perdas de calor no inverno e os ganhos de calor no verão, como já referido estas perdas podem chegar aos 30% (Martins et al., 2016). Por sua vez, como consequência dos diferentes fluxos de calor, a distribuição de temperatura superficial dos elementos construtivos vai assumir um estado heterogéneo, como se observa na Figura 2.4, potenciando o aparecimento de patologias, tais como condensações superficiais, desenvolvimento de bolores e degradação de revestimentos.

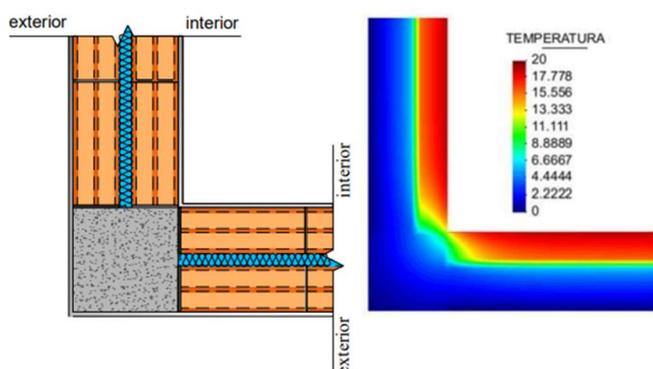


Figura 2.4 - Distribuição de temperatura numa zona de ponte térmica (ITeCons, 2011).

Podem ocorrer pontes térmicas nos edifícios devido a múltiplos fenómenos/causas, como: (1) pontes térmicas geométricas, devido à alteração da geometria (Figura 2.5(a)); (2) pontes térmicas planas ou estruturais, devido à alteração da condutibilidade térmica dos materiais

(Figura 2.5(b)); (3) pontes térmicas convectivas, devido aos movimentos de ar indesejáveis, resultantes de imperfeições da construção (Figura 2.5(c)); (4) pontes térmicas sistemáticas, devido á repetição de elementos estruturais, que é muito frequente nos sistemas construtivos leves em aço e madeira (Figura 2.5(d)); e (5) Pontes térmicas pontuais que resultam da interseção de três elementos estruturais de dimensões semelhantes, como 2 paredes e um pavimento (Figura 2.5(e)). Outros exemplos de pontes térmicas lineares são as junções de parede com outros elementos construtivos, como janelas, caixas de estore, varandas e portas.

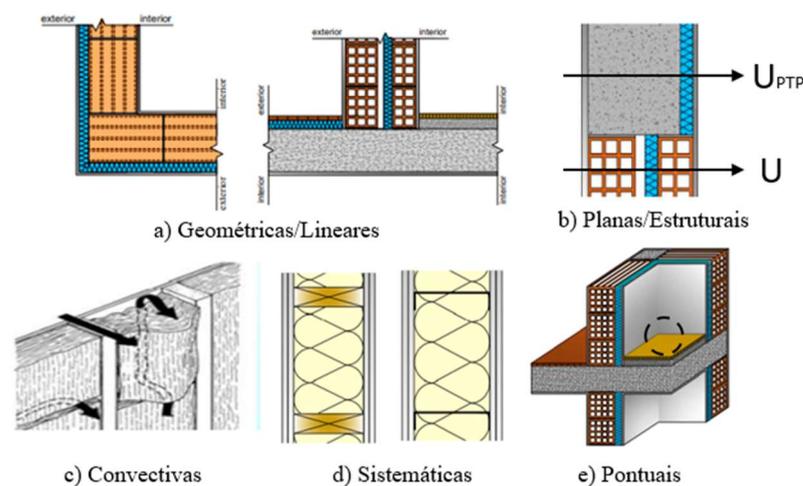


Figura 2.5 - Tipos de Pontes Térmicas (ITeCons, 2011).

As pontes térmicas 2D são as mais recorrentes, nos edifícios, e é possível classificá-las em dois grupos: as Pontes Térmicas Planas (PTP) e as Pontes Térmicas Lineares (PTL).

As PTP ocorrem em áreas de heterogeneidade da envolvente, ou seja, onde se verifica uma alteração estrutural. Um exemplo de PTP (o mais corrente em edifícios tradicionais) é a existência de um pilar de betão armado numa parede de alvenaria, como ilustrado na Figura 2.5(b). Estas pontes térmicas são caracterizadas pelo valor de  $U_{PTP}$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ], que representa o coeficiente de transmissão térmica superficial da zona da PTP.

As PTL ocorrem no desenvolvimento linear da ligação entre diferentes elementos construtivos. As pontes térmicas observadas na Figura 2.4 e Figura 2.5(a) são um bom exemplo de PTL. O seu estudo envolve o cálculo da Equação (7) e dada a sua complexidade é necessário o recurso a métodos numéricos para a resolver. Estas pontes térmicas caracterizam-se pelo coeficiente de transmissão térmica linear  $\psi$  [ $W/(m \cdot K)$ ], um parâmetro essencial na caracterização da

envolvente, a par do valor de  $U$ . O fluxo de calor em zonas de PTL é calculado com recurso à Equação (14).

$$Q = \psi \cdot l \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [W] \quad (14)$$

Onde  $l$  [m] é o comprimento de desenvolvimento linear da PTL.

Existem três possíveis abordagens para a determinação do  $\psi$ . A primeira, a mais conservativa, é o uso de valores por defeito (Adene, 2021), que apresentam um erro que pode chegar aos +50%. A segunda abordagem é o uso de catálogos de pontes térmicas (ITeCons, 2011), estes têm um erro variável ente -20% e 20 %. Por último, o cálculo numérico, que é o mais rigoroso e apresenta erros entre -5 e 5 %.

As pontes térmicas pontuais, ou 3D, ocorrem em zonas de ponte térmica bastante concentradas, como ilustrado na Figura 2.5(e). Estas pontes térmicas caracterizam-se pelo valor de  $\chi$  [W/°C], que representa o coeficiente de transmissão térmica pontual. Geralmente, devido à dificuldade do seu estudo e ao reduzido impacto que têm nos edifícios, são desprezadas pelas normas de cálculo do desempenho energético de edifícios. O fluxo de calor ocorrente devido a estas pontes térmicas é calculado através da Equação (15):

$$Q = \chi \times (\theta_i - \theta_e) \quad [W] \quad (15)$$

## 2.4 Métodos de Simulação/Avaliação Numérica

Como citado anteriormente, existem vários métodos de avaliação do desempenho térmico de elementos construtivos, como: (1) o uso de catálogos, este método é muito limitado pois tem a desvantagem de apenas ser possível avaliar elementos construtivos que estão na base de dados dos catálogos; (2) cálculos analíticos, estes são de fácil utilização por projetistas, mas apenas para configurações simples de transferência de calor unidirecional, o que não se verifica em todas as zonas de um edifício; (3) medições (*in situ* ou sob condições laboratoriais controladas). Como revisto recentemente por Soares *et al.* (2019), existem vários métodos para a caracterização térmica de elementos de construção, incluindo o método do “*Heat Flow Meter*”, o método da “*Guarded Hot Plate*”, o método da “*Hot Box*”, e, o método da termografia; e, (4) simulações numéricas.

Com o aumento da velocidade e da capacidade de cálculo dos computadores, os modelos numéricos de transferência de calor tornaram-se mais detalhados e precisos. Essas simulações

numéricas podem ser modelos bidimensionais (2D) mais simples ou modelos tridimensionais (3D) mais complexos/detalhados, permitindo uma comparação rápida entre várias configurações de elementos construtivos. No entanto, para serem totalmente confiáveis, essas simulações precisam ser validadas com dados medidos em laboratório ou pelo menos verificadas por comparação com resultados de referência (P. Santos e Mateus, 2020).

Vários métodos computacionais estão disponíveis, atualmente, como análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e dinâmica de fluidos computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*). com estes métodos numéricos avançados, é possível produzir modelos altamente detalhados de componentes de construção e fornecer valores mais precisos e confiáveis para as suas propriedades térmicas. Ao contrário da abordagem experimental, estes modelos numéricos, quando validados, têm a vantagem de serem menos dispendiosos em termos de tempo e dinheiro, permitindo o racionalismo de recursos e otimização de elementos construtivos. Como citado anteriormente, a precisão desses modelos deve ser verificada, e para o efeito, a ISO 10211 (2017) estabelece as especificações a seguir, durante a modelação de pontes térmicas em edifícios, e casos de teste, para avaliar a precisão dos algoritmos numéricos e validar o método de cálculo, verificando o cálculo dos fluxos de calor e temperaturas superficiais (Martins, 2020).

Como descrito na Seção 2.3.3, a equação do balanço energético (5) é de difícil resolução para os casos de distribuição de temperatura 2D e 3D, é, portanto, necessário recorrer a métodos numéricos, como o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos ou o método dos elementos fronteira. Uma vez que nesta dissertação são utilizadas ferramentas computacionais/*softwares* que tem por base o MEF, é pertinente uma breve introdução do método e de alguns conceitos chave para uma análise completa e confiável.

#### **2.4.1 Método dos elementos finitos**

Este método reduz os problemas definidos no espaço geométrico para encontrar uma solução num número finito de pontos subdivididos em regiões menores denominadas malhas, aplicando para isso equações conhecidas entre os pontos (Pepper e Heinrich, 2017). O MEF é aplicado a elementos construtivos, isto é, sólidos, 2D ou 3D, que são modelados através da subdivisão num conjunto de pequenos subdomínios, chamados “elementos finitos”. A palavra “finito” esta relacionada com o número limitado de graus de liberdade utilizado para modelar o comportamento de cada elemento. Assume-se que os elementos estão conectados entre si, mas apenas em juntas interconectadas, cujos vértices são denominados de nós. Quando existem descontinuidades estruturais os limites dos elementos finitos devem coincidir com essas

---

descontinuidades. O processo de representar um componente como um conjunto de elementos finitos, é conhecido como discretização, exemplificado na Figura 2.6(a).

Para obter uma solução única da equação diferencial de Fourier deve-se definir determinadas condições ao problema, conhecidas por condições iniciais e de fronteira. As condições iniciais especificam a temperatura dentro de um corpo no instante  $t = 0$ , a partir da qual se conhecerá a distribuição de temperatura no sólido.

Os elementos construtivos estão limitados por uma superfície denominada contorno. É necessário saber o que acontece no contorno pois este pode estar sujeito a diferentes condições, designadas condições de fronteira. Tipicamente existem dois tipos de condições de fronteira (Chapra e Canale, 2008): (1) Condição de Dirichlet ou fixa, que corresponde a uma temperatura prescrita na superfície do contorno, que pode ser uma constante ou uma função das coordenadas e do tempo; (2) Condição de Neuman, ou de segundo tipo, que corresponde ao fluxo de calor incidente na superfície de contorno, que pode ser uma constante ou uma função das coordenadas e do tempo. No caso de não existir nenhum fluxo de calor, através de determinado limite, este denomina-se fronteira adiabática. As condições de fronteira térmica modelam a ligação entre o sólido estudado e o ambiente exterior, sendo de diferentes tipos, dependendo do fenómeno físico envolvido (e.g. convecção, radiação). Na Figura 2.6(b) são apresentadas as condições de fronteira térmica, mais usuais na resolução de problemas de transferência de calor. Estas condições estão representadas para um domínio bidimensional ( $\Omega$ ) onde ocorrem trocas de calor devido a uma temperatura ambiente prescrita ( $\Gamma_T$ ) e/ou devido a um fluxo de calor, que tanto por ser por convecção ( $\Gamma_q$ ) e/ou por radiação ( $\Gamma_h$ ) (Gomes, 2019).

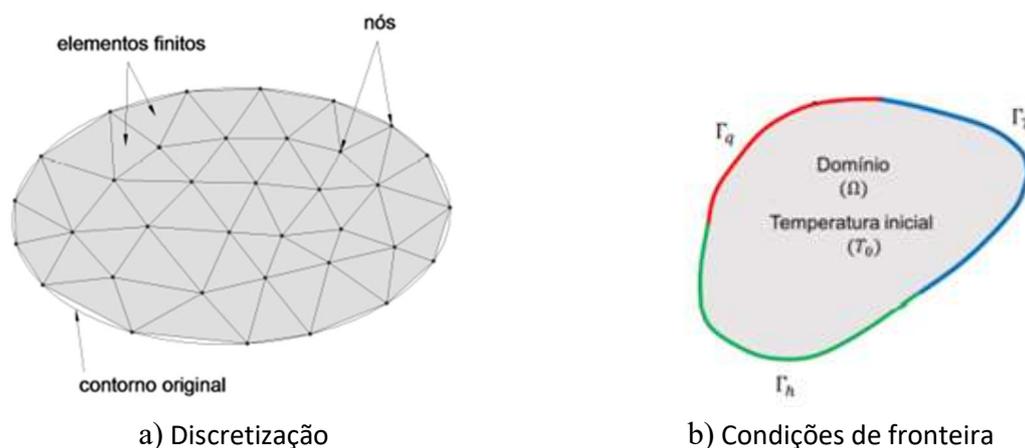


Figura 2.6 - Método dos elementos finitos (Gomes, 2019).

## 2.4.2 Abordagem ao problema numérico computacional de transferência de calor

Independentemente do *software* a utilizar, há um conjunto de procedimentos a adotar para realizar uma análise numérica do comportamento térmico de um elemento construtivo. Este procedimento consiste em: (1) Modelar a geometria do elemento a estudar; (2) Definir as propriedades de cada material (e.g. condutibilidade térmica, emissividade); (3) Definir as condições de fronteira (e.g. resistências térmicas superficiais, temperatura do ar ambiente); (4) Escolher e refinar a malha de elementos finitos. Este passo é um dos mais complexos de todo este processo, uma vez que, é necessário atingir o equilíbrio entre a precisão dos resultados (conseguida com o máximo número possível de nós/elementos), e a velocidade e capacidade do computador resolver o modelo (quantos mais nós e elementos maior o tempo de análise e a memória ocupada); (5) Cálculo numérico, este é resolvido pelo *software*, o utilizador apenas tem de verificar se todas as etapas anteriores foram bem executadas; e, (6) Avaliação de resultados, normalmente o objetivo é avaliar propriedades como a resistência térmica ou o coeficiente de transmissão térmica superficial e/ou linear, mas também é possível analisar distribuições de temperatura e fluxos de calor que atravessam o elemento. Estas seis etapas estão representadas na Figura 2.7, é possível observar que para diferentes modelos geométricos e para diferentes *softwares* o procedimento a adotar é o mesmo.

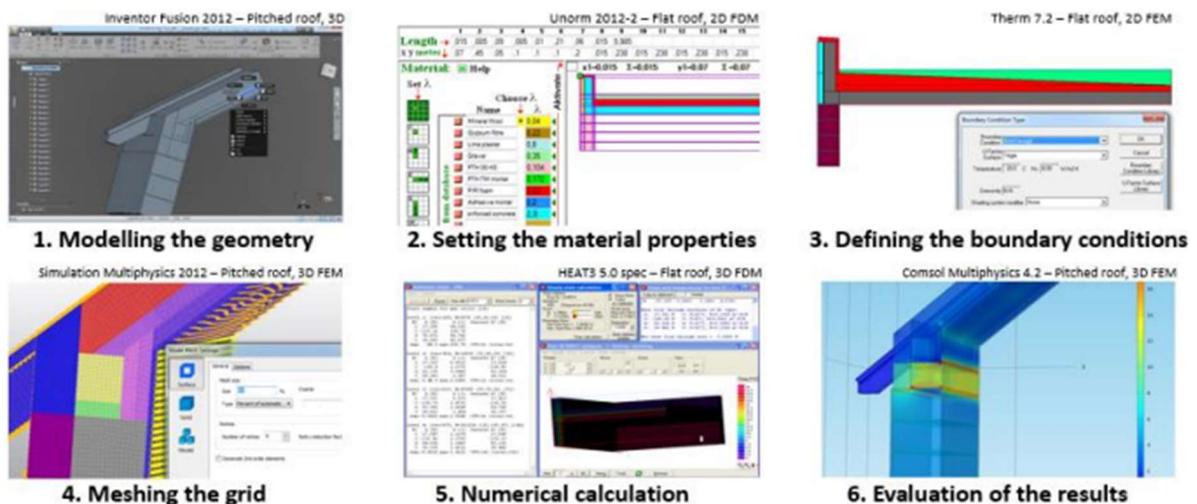


Figura 2.7 - Metodologia para a simulação numérica com diferentes geometrias e *softwares* (Nagy, 2014).

### 2.4.3 Software disponível para simulação numérica do comportamento térmico

Existem disponíveis, atualmente, vários *softwares* desenvolvidos especificamente para a simulação numérica do comportamento térmico de elementos construtivos. Com o objetivo de facilitar a escolha do *software* para trabalhos futuros, dentro desta temática, foi feita uma pesquisa/recolha dos programas mais utilizados, pela comunidade científica e projetistas, para a resolução de problemas de transferência de calor.

No Quadro 2.1 apresenta-se o nome de cada *software*; as dimensões de aplicação (2D ou 3D); o regime de transferência de calor em que se aplicam (transiente/estacionário); as geometrias aceites pelo programa (pode ser forma livre ou apenas retângulos); se é calculado automaticamente o coeficiente de transmissão térmica linear  $\psi$ ; e o tipo de licença (comercial/gratuita). Todos estes softwares calculam o valor do coeficiente de transmissão térmica superficial e/ou a resistência térmica e/ou o fluxo de calor.

Quadro 2.1 - Resumo dos *softwares* disponíveis para simulação numérica.

Software	2D/3D	Regime	Forma: livre/retangular	Cálculo automático do $\psi$	Licença
AnTherm	3D	Estacionário	Retangular	Sim	Comercial
Argos	2D	Estacionário	Livre	Sim	Comercial
Bisco	2D	Estacionário	Livre	Sim	Comercial
David32	3D	Estacionário	Retangular	Não	Comercial
Flixo	2D	Estacionário	Livre	Não	Comercial
KOBRA	3D	Estacionário	Retangular	Sim	Grátis
KOBRU66	3D	Estacionário	Retangular	Não	Comercial
Solido	3D	Estacionário	Livre	Não	Comercial
<b>Therm</b>	<b>2D</b>	<b>Estacionário</b>	<b>Livre</b>	<b>Não</b>	<b>Grátis</b>
Trisco	3D	Estacionário	Retangular	Sim	Comercial
Unorm	3D	Estacionário	Retangular	Sim	Grátis
<b>Ansys</b>	<b>3D</b>	<b>Estacionário/Transiente</b>	<b>Livre</b>	<b>Não</b>	<b>Comercial</b>
Voltra	3D	Transiente	Retangular	Sim	Comercial
Bistra	2D	Transiente	Livre	Sim	Comercial
Cype therm	2D	Estacionário	Livre	Sim	Comercial

Nesta dissertação são desenvolvidos modelos 2D e 3D, por isso utilizaram-se dois *softwares* diferentes, o Therm (2017) e o Ansys (2018), que serão descritos e validados no Capítulo 3.

## 2.5 O sistema construtivo em *Lightweight Steel Framed* (LSF)

A denominação “*Lightweight Steel Framed*” refere-se a um sistema construtivo com estrutura leve, em aço enformado a frio. Este sistema construtivo é usualmente denominado pela sua abreviatura, LSF. Este tipo de construção metálica, ilustrado na Figura 2.8, distingue-se de estruturas que usam perfis laminados a quente (e.g. com secções em IPE, HEB), pois apresenta um peso significativamente inferior.



Figura 2.8 - Estrutura de uma moradia construída em LSF (ROCKS 3D, 2022).

### 2.5.1 Materiais de construção

O LSF é um sistema construtivo “seco” que utiliza materiais pré-fabricados e reduz quase totalmente a necessidade do uso de água e betão. Neste tipo de construção são utilizados três grandes tipos de materiais: (1) os perfis de aço enformado a frio na estrutura principal do edifício; (2) os painéis de revestimento; e, (3) os materiais de isolamento térmico e acústico (P. Santos e Aroso, 2019).

O principal material constituinte deste sistema construtivo é o aço. Nos perfis, este deve ser estrutural (S), ou seja, com baixo teor em carbono, o que confere maior ductilidade. Para garantir proteção contra a corrosão, o aço passa por um processo de galvanização por imersão a quente. Este processo garante a durabilidade do sistema construtivo, durante toda a vida útil, ou seja, a estrutura metálica mantém a função para a qual foi desenvolvida, praticamente em todos os ambientes. Depois de sofrer o processo de galvanização de forma contínua e por imersão a quente, o aço adquire uma nova especificação (GD) (Silvestre et al., 2013).

Os elementos em aço enformado a frio dividem-se em duas grandes categorias: os perfis e as chapas (painéis de chapa e chapas perfiladas). Os perfis, peças de eixo reto e secção uniforme, são obtidos a partir de chapas de aço com espessuras que variam normalmente entre 1.5 mm e 4.0 mm, no entanto, quando os perfis não têm qualquer função estrutural esta espessura pode ser reduzida a 0.6 mm (LSK, 2005). Contudo, os valores de espessura podem variar, consoante o fabricante e os requisitos específicos de aplicação (Ferreira, 2014). Quanto à geometria dos perfis, as formas mais frequentes são secções em U, C, Z ou I (resultante da união de dois perfis em C), ilustradas na Figura 2.9.

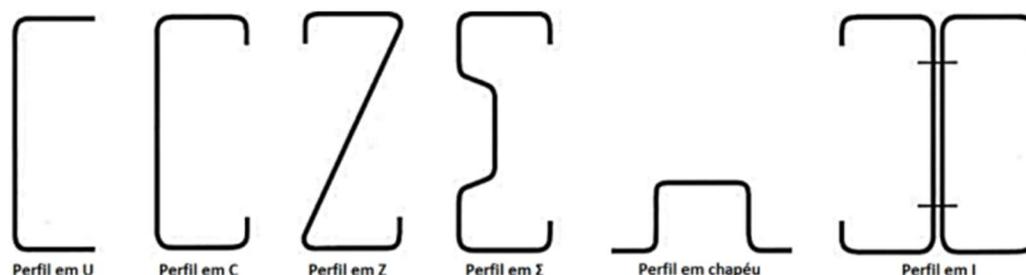


Figura 2.9 - Secções transversais de perfis estruturais de aço enformados a frio (LSK, 2005).

A solução mais comum para o revestimento de uma estrutura em LSF, caracteriza-se por conter vários materiais de isolamento térmico/acústico, e consiste no preenchimento da caixa de ar, entre os perfis de aço, por lã mineral, sendo depois revestida toda a estrutura metálica por painéis estruturais de aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (OSB, do inglês “*Oriented Strand Board*”). Para revestimento exterior é comum o recurso ao isolamento térmico contínuo pelo exterior (ETICS, do inglês “*External Thermal Insulation Composit System*”). Para o revestimento interior (paredes e tetos) é utilizado o gesso cartonado (Ferreira, 2014).

Embora a função dos referidos painéis estruturais seja revestir, podem também contribuir para a integridade da estrutura, concretamente, pela adição de resistência mecânica lateral, vulgarmente denominado contraventamento. No entanto, esta situação requer especial atenção

na fase de projeto sendo necessário que os painéis cumpram requisitos mínimos de resistência. Os tipos de painéis estruturais mais usuais no sistema construtivo em LSF são em OSB, representado na Figura 2.10(a), mas também existem no mercado alternativas, como placas de óxido de magnésio, representadas na Figura 2.10(b) (com melhor resistência à humidade e ao fogo) e placas cimentícias (com melhor moldagem e resistência ao fogo) (FUTURENG, 2022).



a) OSB – “Oriented Strand Board” (2fcs, 2022)



b) Placas de óxido de magnésio (MAGOXX®, 2022)

Figura 2.10 - Revestimento estrutural na construção em LSF.

Como se observa na Figura 2.10(a), depois do revestimento estrutural exterior, é comum utilizar ETICS, este tipo de revestimento protege o edifício, garante a sua estética e favorece o conforto térmico da habitação, minimizando as pontes térmicas, como será comprovado ao longo desta dissertação. Os principais componentes do ETICS são a camada de isolamento térmico (e.g. EPS, XPS) e o acabamento final em reboco delgado armado (Ferreira, 2014). Para além desta solução de revestimento, outras soluções podem ser usadas, como paredes pré-fabricadas de betão (com barreiras pára-vapor) e/ou fachadas ventiladas, que são outra solução de revestimento comum, apto para receber como revestimento final todas as soluções disponíveis no mercado, tais como painéis fenólicos e pedras (Silvestre et al., 2013) .

O revestimento interior das paredes e tetos é feito à base de painéis de gesso cartonado, nas paredes resistentes exteriores, é comum a sobreposição de duas placas de gesso cartonado, de forma a aumentar a sua resistência. Além dos painéis de gesso, existem outros materiais possíveis de aplicar para a constituição das paredes, mas, é sempre aconselhado a aplicação de pelo menos um revestimento de placas de gesso, ou materiais com propriedades equivalentes, como a resistência ao fogo (Ferreira, 2014; Moreira, 2012) .

No interior das paredes em LSF é utilizada a lã mineral, como representado na Figura 2.11(a), uma das vantagens reside no facto do isolamento estar inserido na caixa de ar entre os perfis constituintes das paredes, reduzindo assim a sua espessura e consequentemente, aumentando a

área útil do edifício, outra grande vantagem é o aumento do desempenho térmico e acústico das paredes (Roque et al., 2019) .

O uso adequado de membranas de estanqueidade ao ar (Figura 2.11(b)) é muito relevante para controlar as perdas de calor devido às infiltrações de ar em edifícios de LSF, principalmente em climas frios (P. Santos, 2017). Em edifícios novos com maior isolamento térmico nível, a infiltração pode ser responsável por cerca de 25% e 3% das perdas no aquecimento e arrefecimento, respetivamente (Kalamees, 2007). Além da redução da energia de aquecimento, outra vantagem do uso adequado dessas membranas é a mitigação do risco de condensação internas, dada a redução no teor de humidade dentro das paredes em LSF (LSK, 2005) .



a) Lã mineral entre os perfis  
(Tyre4BuildIns, 2022)



b) Membrana de estanqueidade  
(Soares et al., 2017)

Figura 2.11 - Exemplos de elementos constituintes de paredes em LSF.

Devido à corrente utilização do LSF, de pré-fabricação e montagem *in-situ*, é necessário recorrer a sistemas de união e aperto que garantam uma qualidade de montagem constante no tempo de vida útil do edifício. O uso de parafusos auto-perfurantes, representados na Figura 2.12, é a solução mais corrente devido à resistência e durabilidade que conferem à ligação. Há também outros métodos de fixação, como: pregos, rebites, soldaduras, cavilhas, grampos e colagens.

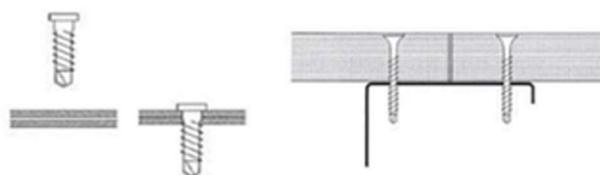


Figura 2.12 - Sistema de união e aperto com parafusos auto-perfurantes (LSK, 2005).

### 2.5.2 Vantagens e desvantagens

O rápido crescimento do LSF é justificado/sustentado pelas relevantes vantagens que lhe são associadas. Estas vantagens diferenciam o LSF enquanto sistema construtivo capaz de produzir um produto final de qualidade e a um preço competitivo, especialmente, quando comparado com os sistemas construtivos tradicionais (FUTURENG, 2022) .

A sustentabilidade é uma das grandes vantagens do sistema construtivo em LSF, nomeadamente pela capacidade de reciclagem e reutilização do aço, 99 % do aço resultante de demolição de estruturas em LSF é reaproveitado, sendo 86-89% para reciclagem e 10-13% para nova utilização (Lawson, 2009) . Este fator beneficia o sistema LSF numa análise de ciclo de vida, uma vez que a reduzida produção de resíduos de demolição, aliado ao facto de fornecer material reciclado a outros consumidores de aço insere-se nas orientações da economia circular. A redução de matéria-prima e resíduos, ou seja, menor perturbação ambiental durante o processo de construção, assim com a durabilidade do mesmo e a reduzida necessidade de manutenção são pontos essenciais a ter em conta numa análise custo-benefício a longo prazo (Roque e Santos, 2017).

Por se tratar de uma construção “seca”, o risco de patologias relacionadas com humidades é muito reduzido. Os edifícios em LSF têm assim associado outro fator de sustentabilidade que é o baixo consumo de água para a sua construção e fabricação, pois a água utilizada para produzir aço é reutilizável (Lawson, 2009).

O facto ser utilizada a pré-fabricação permite a adaptação a uma economia de produção em massa (Roque e Santos, 2017). Também garante um melhor controlo de qualidade, facilita a produção em série, diminui os prazos de execução em obra e as perturbações no estaleiro (Silvestre et al., 2013) . Dadas as características, como a sua leveza, facilidade de transporte e montagem, este sistema tem bastante potencial de uso em reabilitação de edifícios e também de exportação para outros países que não têm a sua indústria da construção desenvolvida (P. Santos e Aroso, 2019).

O uso de revestimento adequado, como o gesso cartonado, ETICS e a lã mineral, proporcionam a este sistema construtivo um elevado desempenho térmico e acústico, e um bom desempenho na segurança ao fogo (Silvestre et al., 2013) .

Por sua vez, podem existir desvantagens como a necessidade de mão de obra especializada e/ou a pouca oferta de empresas de construção devidamente certificadas, embora estes fatores sejam independentes da capacidade funcional do sistema construtivo em LSF (FUTURENG, 2022).

---

Do ponto de vista estrutural, existem duas principais condicionantes. A primeira está relacionada com o facto de apenas ser possível construir até 3 pisos, quando utilizado em construção residencial. A abertura de grandes vãos é outra condicionante deste sistema construtivo. Contrariamente à construção tradicional (em betão e alvenaria), a distribuição de cargas é contínua ao longo de todo o perímetro do edifício, logo, a abertura de grandes vãos vai influenciar a transmissão de cargas, podendo condicionar o desempenho sísmico da estrutura (Ferreira, 2014).

O desempenho térmico é visto como um dos maiores inconvenientes do sistema construtivo em LSF. As pontes térmicas causadas pela elevada condutividade térmica do aço podem originar perdas de calor significativas através da envolvente do edifício e por isso, devem ser consideradas e tratadas de forma adequada. Os edifícios em LSF são classificados com inercia térmica fraca, ou seja, tem pouca capacidade para reter calor nos elementos envolventes, originando assim grandes amplitudes térmicas no interior do edifício. No entanto, a energia necessária para climatização é menor, uma vez que o coeficiente de condutibilidade térmica dos materiais é baixo, em comparação com os coeficientes dos materiais usados na construção tradicional (e.g. alvenaria). Uma das grandes preocupações a ter na construção destes edifícios são os ganhos solares exagerados no Verão, sendo por isso necessário investir em vidros de qualidade e em bons dispositivos de proteção solar, como portadas ou estores (P. Santos, 2017).

### **2.5.3 Comportamento térmico de estruturas em LSF**

O comportamento térmico das construções em LSF depende de diversos fatores que devem ser avaliados durante as fases de projeto e conceção do edifício, embora as características deste sistema construtivo possam potenciar vários problemas no seu desempenho térmico, existem inúmeras estratégias que podem ser utilizadas com a finalidade de melhorar o seu desempenho térmico e energético.

A presença dos perfis em aço e frequência de fenómenos de transferência de calor 2D, nos edifícios em LSF, fazem com que o método de cálculo analítico, do coeficiente de transmissão térmica superficial ( $U$ ), não seja trivial. Na verdade, o Método Combinado ISO 6946 (2017) não é aplicável a componentes de edifícios onde o isolamento térmico é interrompido por metal, como acontece frequentemente na construção em LSF. De facto, dado o enorme contraste de condutibilidade térmica entre a estrutura de aço e os materiais de isolamento térmico utilizados, há um forte efeito de ponte térmica, sendo mais difícil avaliar com precisão a resistência (ou transmissão) térmica deste tipo de elemento construtivos (Kosny et al., 1994; P. Santos et al., 2020).

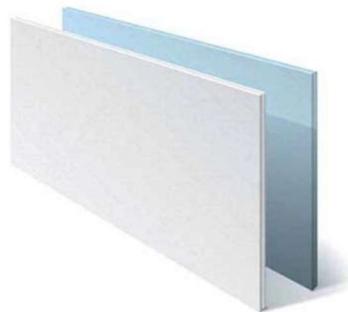
Existem vários métodos analíticos desenvolvidos especialmente para elementos construtivos em LSF, como: (1) os Métodos “*Gorgolewski*” (Gorgolewski, 2007); (2) o Método “*ASHRAE Zone*” (Kosny et al., 1994); e, (3) o Método “*ASHRAE Modified Zone*” (ASHRAE, 2017). Santos *et al.* (2020) realizaram uma revisão dos processos de cálculo e compararam a precisão destes métodos analíticos para estimar o coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) de paredes em LSF, com este estudo concluiu-se que o método com melhores resultados é o método “*ASHRAE Modified Zone*” com 4.1% de erro e o pior “*Gorgolewski Method 2*” com 9,9 % de erro.

Como referido na Subsecção anterior, a utilização de materiais de massa reduzida por parte deste tipo de construção contribui para uma inércia fraca. Resumidamente, a inércia térmica é a capacidade de um material absorver, armazenar e progressivamente libertar calor. Este fenómeno depende principalmente da massa volúmica, do calor específico e da condutibilidade térmica do material. Há vários estudos que mostraram o impacto positivo da inércia forte nas necessidades energéticas dos edifícios e também na manutenção do seu conforto térmico, o que levou, nos últimos anos, a serem realizados vários trabalhos/investigações para contrariar o efeito da inercia térmica fraca no desempenho dos edifícios em LSF (Verbeke e Audenaert, 2018).

Existem várias estratégias para aumentar a inércia térmica dos edifícios em LSF: (1) O uso de ETICS, pode levar a um aumento da inércia térmica, uma vez que a massa térmica em contato direto com o ambiente interno do edifício é maior, levando a flutuações de temperatura reduzidas no interior do edifício. (2) O uso de materiais de construção maciços é outra estratégia possível, por exemplo, o uso de betão como camada de revestimento de piso, sendo muitas vezes esta solução incompatível com este tipo de construção “leve”. (3) Uma solução passiva como construir uma parede interior de Trombe, aproveitando pedras (Figura 2.13(a)), em frente a uma grande janela exposta a sul, a fim de capturar os ganhos de calor solar durante o dia e soltá-lo durante a noite (Lohmann e Santos, 2020). (4) O uso de materiais que mudam de fase (PCM – do inglês “*Phase Change Materials*”), representados Figura 2.13(b), como revestimento faz aumentar, não só a inercia térmica, mas também o conforto térmico em geral (Soares et al., 2013). (5) Também é possível aproveitar a enorme massa/inércia térmica do solo, uma maneira de aproveitar essa diferença de temperatura favorável é construir um permutador de calor terra-ar (EAHE – do inglês “*Earth-Air Heat Exchanger*”) e forçar o ar externo a fluir através de um sistema de tubagem subterrânea antes de ser insuflado no edifício, como ilustrado na Figura 2.13(c) (Rosa et al., 2020).



a) Parede de Trombe (TreeHugger, 2018)



b) PCM- *Phase Change Materials* (ThermaCool, 2017)

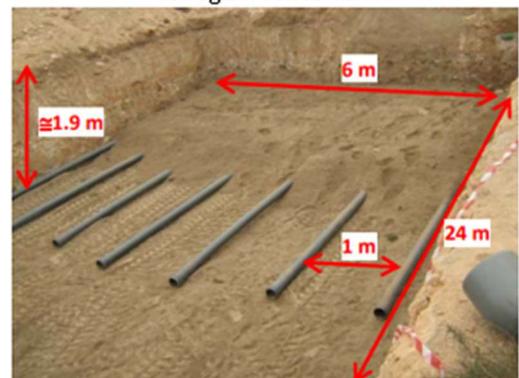
Entrada de ar c/ filtro



Ventilação mecânica



Tubagem subterrânea



c) EAHE – *Earth-Air Heat Exchanger* (Rosa et al., 2020)

Figura 2.13 - Estratégias para aumentar a inércia térmica dos edifícios em LSF.

É possível distinguir três tipos de sistemas construtivos em LSF, consoante a posição do isolamento: construção fria, construção híbrida e construção quente (P. Santos, Martins e Silva, et al., 2014).

Na construção fria o isolamento térmico é colocado na caixa de ar das paredes (entre os perfis). Para isso recorre-se a isolamentos maleáveis (e.g. lã mineral), que se adaptam à geometria dos perfis de aço, originando uma camada de isolamento com interrupções, originando significativas pontes térmicas (Roque e Santos, 2017).

Na construção híbrida, o isolamento térmico é colocado em duas zonas: na caixa de ar (e.g. lã mineral) e de forma contínua pelo exterior (e.g. ETICS). Este sistema apresenta melhor desempenho térmico que o anterior e um equilíbrio entre a espessura total da parede e a colocação de isolamento térmico.

Na construção quente utiliza-se uma camada contínua de isolamento no exterior da parede (e.g. ETICS), o que tem como consequência o aumento da espessura total da parede. Este tipo de construção tem um desempenho térmico superior aos dois descritos anteriormente (Roque e

Santos, 2017). Na Figura 2.14, é possível observar os três tipos de sistemas LSF e a sua influência na distribuição de temperaturas das paredes.

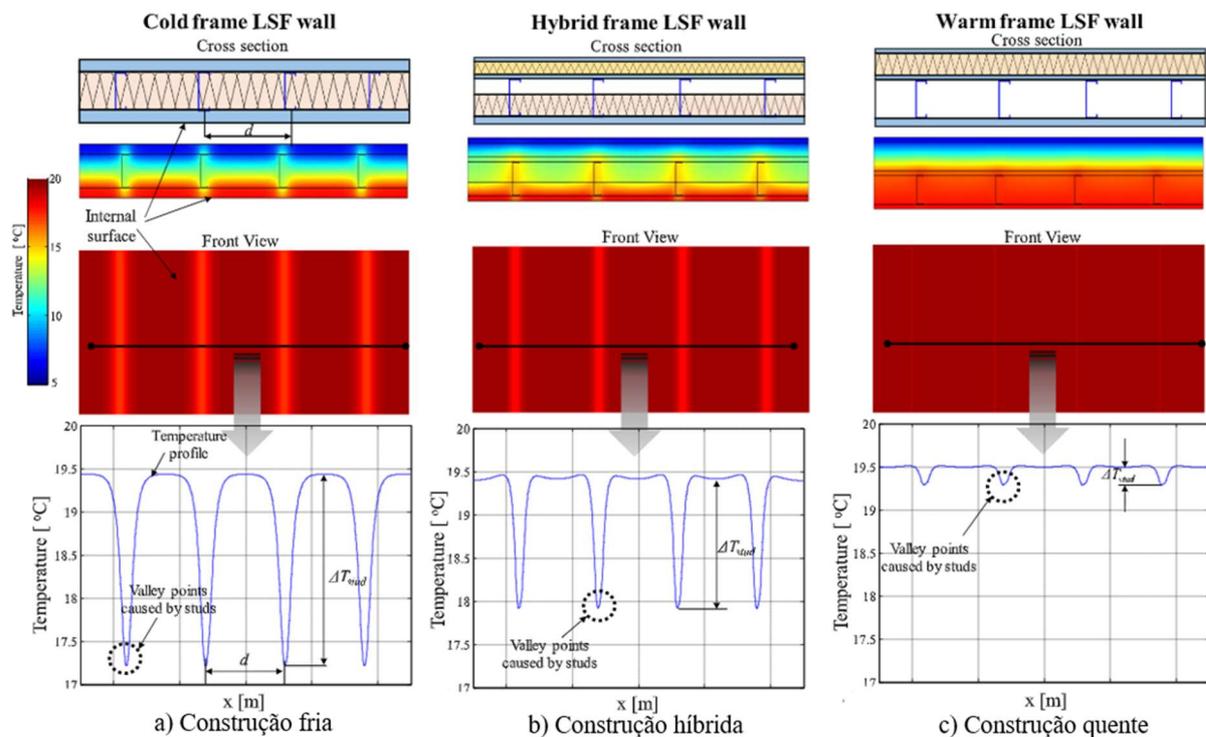


Figura 2.14 - Distribuição de temperaturas nas mesmas condições de fronteira ( $\theta_i=20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta_e=5\text{ }^\circ\text{C}$ ) (Atsonios et al., 2018).

Na Figura 2.14, é também de notar que devido à presença de perfis de aço, as paredes em LSF podem apresentar pontes térmicas significativas, afetando negativamente o desempenho térmico dos edifícios. A elevada condutibilidade térmica do aço ( $50\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) é responsável pelo aumento do fluxo de calor através das zonas da envolvente onde se inserem os perfis metálicos e, conseqüentemente, pelo aumento das necessidades energéticas destinadas a manter o conforto térmico do edifício. Como tal, a aplicação de estratégias de minimização de pontes térmicas é fundamental para melhorar o desempenho térmico e energético das construções em LSF.

### 2.5.4 Estratégias de mitigação de pontes térmicas

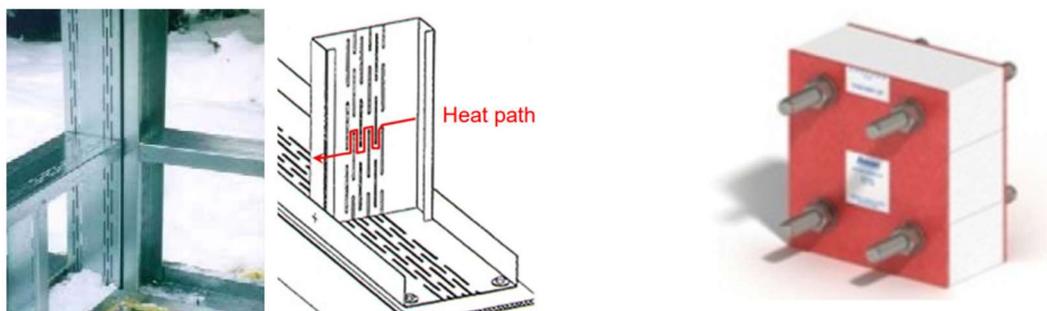
Com o objetivo de mitigar o efeito desfavorável das pontes térmicas originadas pelo aço, têm sido realizados um conjunto significativo de trabalhos para avaliar e melhorar o comportamento térmico das soluções construtivas em LSF.

Kosny e Christian (1995) mostraram que a utilização de isolamento térmico contínuo pelo exterior (ETICS) é uma forma eficaz de melhorar o desempenho térmico dos edifícios em LSF, e de reduzir as pontes térmicas originadas pela elevada condutibilidade do aço.

Höglund e Burstrandb (1998) analisaram uma maneira eficiente para reduzir o fluxo de calor através dos perfis em aço, reduzindo a sua área através da introdução de ranhuras na alma do perfil, como ilustrado na Figura 2.15(a). Além disso, também concluíram que os banzos dos perfis em aço funcionam como coletores de calor, ou seja, se o comprimento do banzo diminui, o valor de  $U$  também diminui. É importante salientar que esta redução de aço pode reduzir a sua resistência mecânica, por isso deve ser considerada na fase do projeto estrutural (Veljkovic e Johansson, 2007).

Martins *et al.* (2016) avaliaram o desempenho de perfis de aço perfurados com duas áreas diferentes de perfuração. Além disso, dois modelos foram avaliados: (1) apenas perfis verticais com ranhuras e (2) todos os perfis perfurados (verticais e horizontais). Concluiu-se que o uso de perfis de aço perfurados, verticais, permite reduzir o valor  $U$  da parede LSF em 3.2 e 3.5%, para área de perfuração inferior e superior, respetivamente. Além disso, usando perfis verticais e horizontais com ranhuras de maior área de perfuração, coeficiente de transmissão térmica foi reduzido em 4.5%.

Introduzir cortes térmicos (Figura 2.15(b)) nos elementos construtivos salientes (e.g. varandas), também se revela uma boa estratégia de mitigação de pontes térmicas em edifícios em LSF, permitindo a criação de uma barreira para a transmissão de calor entre o exterior e o interior do edifício (P. Santos, Martins, et al., 2014).



a) Perfis perfurados (P. Santos et al., 2012)

b) Corte térmico para elementos salientes  
(cort@rtec, 2022)

Figura 2.15 - Estratégias de mitigação de pontes térmicas em estruturas em LSF.

Outra das estratégias estudadas é reduzir a área de contacto entre o perfil metálico e a superfície da parede como ilustrado na Figura 2.16(a), uma vez que a maior parte do fluxo de calor transmitido, através de um elemento construtivo em LSF, ocorre nos perfis em aço, dada a sua alta condutividade térmica. Esta redução de contato e conseqüente redução do fluxo de calor através do aço pode ser alcançada usando perfis com reentrância nos banzos, originando assim um pequeno espaço de ar entre o perfil e os painéis de revestimento. A Figura 2.16(b) ilustra como a melhoria de desempenho térmico obtida depende do tamanho da reentrância do banzo. Neste caso, obteve-se uma melhoria da resistência térmica de 9% e 16%, para recuo de ¼” e ½”, respetivamente, tendo como referência um perfil de aço padrão.

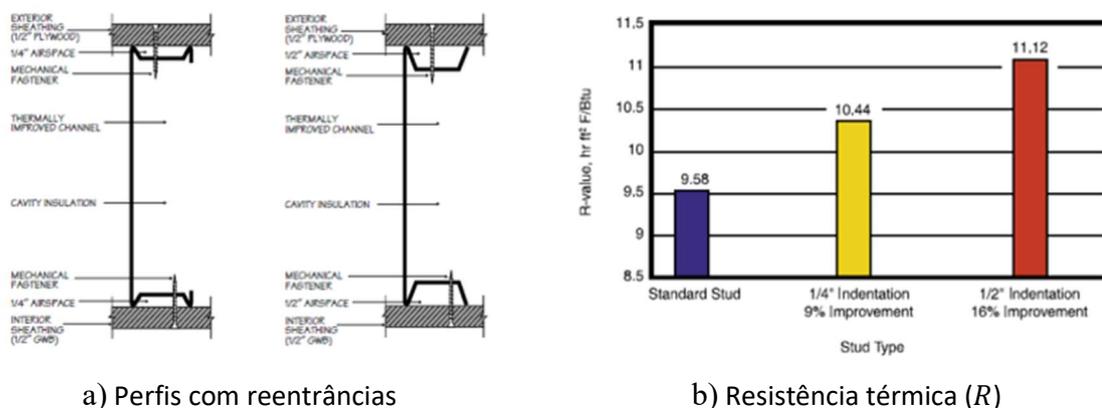


Figura 2.16 - Redução da área de contacto perfil-parede (ThermaChannel, 2018).

Para melhorar a resistência mecânica e obter maior rigidez são utilizadas ligações macho-fêmea entre perfis. Martins *et al.* (2016) avaliaram a melhoria do desempenho térmico deste tipo de perfis de aço em comparação com os perfis padrão. Obteve-se uma diminuição do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) de apenas 0.4 e 0.2% para os perfis macho-fêmea com 15 e 25mm de profundidade, respetivamente. Estes os resultados mostraram que esta estratégia não é eficiente para mitigar pontes térmicas em estruturas de LSF.

É frequente em módulos de parede em LSF, haver conexões com chapa de aço, afetando negativamente o desempenho térmico. Martins *et al.* (2016) compararam o desempenho térmico desta conexão de chapa de aço com o uso de parafusos de fixação alternativos, foi obtida uma diminuição no valor  $U$  de 2.1%.

Uma das estratégias mais utilizadas atualmente, é a colocação de tiras de Corte Térmico (CT) nos banzos dos perfis metálicos, como ilustrado na Figura 2.17. Martins *et al.* (2016) avaliaram o desempenho de tiras de corte térmico de espuma isolante ( $\lambda = 0.037$  W/ (m K)) num modulo

de parede em LSF, onde foram utilizadas duas tiras de borracha: 5 e 10 mm de espessuras, os resultados mostraram uma melhoria do desempenho térmico de 1.9 e 3.5% para a tira de borracha mais fina e mais grossa, respetivamente.

P. Santos e Mateus (2020) também estudaram o desempenho de tiras de CT em paredes resistentes e não resistentes, onde se testaram 3 materiais (Aerogel, borracha e um composto de borracha e cortiça) e 3 posições das tiras (interior, exterior e ambos os lados), foi concluído, com este estudo, que as tiras de CT apenas no lado interior e exterior têm desempenhos muito semelhantes, no entanto, as tiras de CT do lado exterior mostram ter melhor desempenho em paredes LSF resistentes/exteriores. Como esperado, o uso de tiras de CT, em ambos os lados, conduz a um aumento significativo do desempenho das paredes, quando comparado com a aplicação de apenas uma tira de CT. O material com o melhor desempenho foi o aerogel, mas apenas na configuração de duas tiras de CT de aerogel, para uma parede não estrutural em LSF, foi atingida a resistência térmica prevista para uma parede homogénea (sem perfis de aço), permitindo mitigar totalmente o efeito de pontes térmicas em estruturas leves em aço.

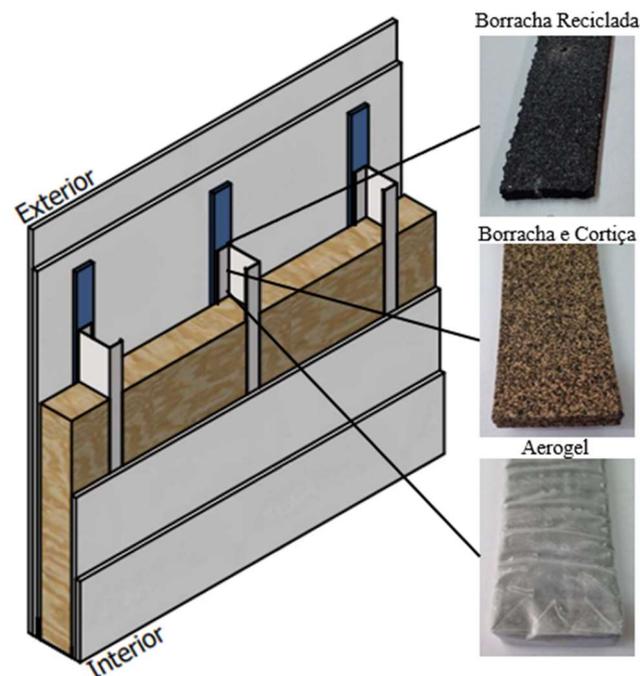


Figura 2.17 - Exemplo da aplicação de tiras de corte térmico (Tyre4BuildIns, 2022).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo apresentam-se os materiais e métodos utilizados no estudo paramétrico realizado no decorrer desta dissertação. É feita uma descrição das paredes e materiais em estudo, assim como dos modelos numéricos e condições de fronteira aplicadas. Utilizaram-se dois *softwares* de cálculo numérico, o Therm (2017), para simulações 2D, e o Ansys (2018), para simulações 3D. Foi comparada a precisão de ambos e também realizada a sua validação, segundo a ISO 10211 (2017) e através de um método experimental.

Para avaliar a influência das dimensões e condutibilidade térmica das tiras de CT e do isolamento contínuo pelo exterior, realizou-se um estudo paramétrico, detalhado no Capítulo 4. De modo a quantificar e comparar a melhoria no desempenho, das duas soluções, este estudo foi realizado sobre paredes LSF de referência que são apresentadas na Secção 3.1.

#### 3.1 Descrição das Paredes e Materiais em Estudo

As paredes de referência são representativas da composição habitual de uma parede estrutural em LSF. Estas paredes, representadas na Figura 3.1, são compostas pelos mesmos materiais.

A parede ilustrada na Figura 3.1(a) é composta por: perfil metálico estrutural C90 x 43 x15 x 1.5 mm, painel de gesso cartonado (lado interior) com 12.5 mm, OSB (12 mm), lã mineral (preenchendo totalmente a caixa de ar) e OSB (12 mm) do lado exterior.

A parede representada na Figura 3.1(b) apresenta a mesma composição, com diferença no revestimento exterior, que é composto por ETICS, com EPS (50 mm) e acabamento final (5 mm). Para as duas paredes descritas foram estudados os dois espaçamentos entre os perfis de aço mais correntes, nas paredes de fachada em LSF, 400 e 600 mm (Silvestre et al., 2013).

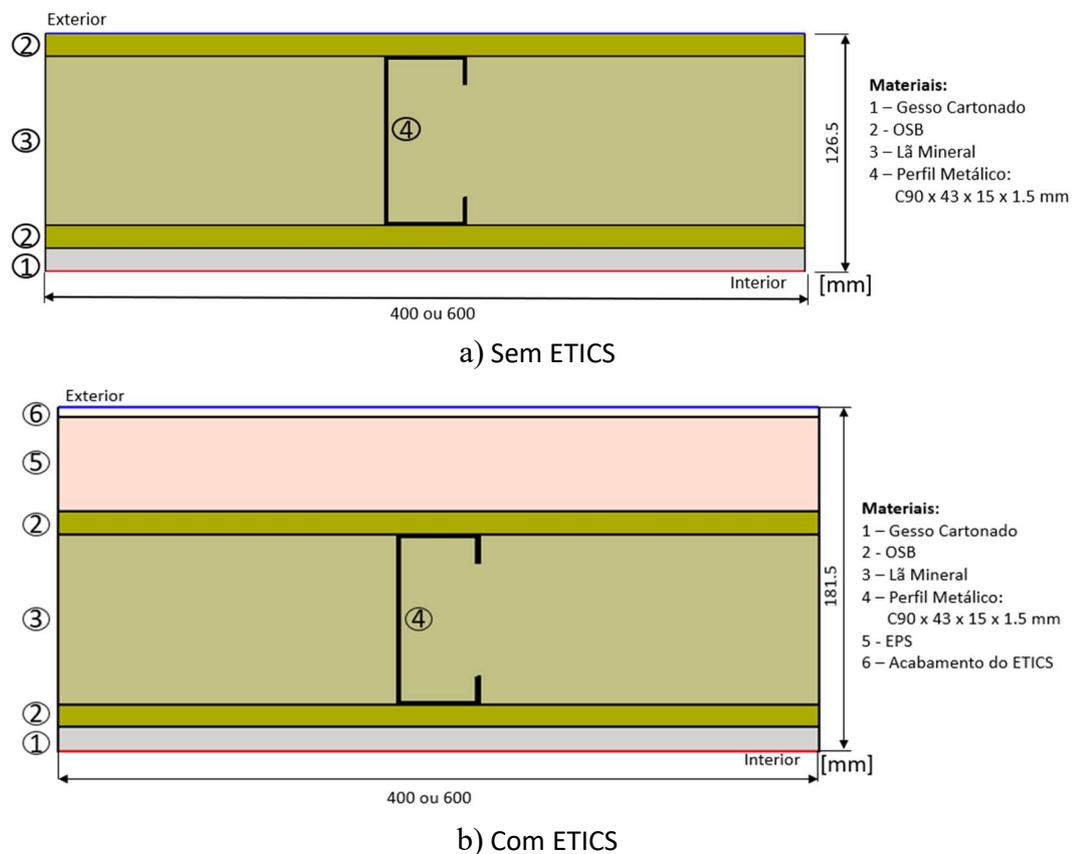


Figura 3.1 - Paredes em LSF de referência.

As propriedades dos materiais constituintes das paredes LSF em estudo, nomeadamente a condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) e a espessura, estão apresentados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Propriedades dos materiais constituintes das paredes LSF de referência.

Material	Espessura [mm]	$\lambda$ [W/(m·K)]	Referência
Painel de gesso cartonado	12.5	0.175	(Gyptec ibérica, 2022)
OSB - “Oriented Strand Board”	12.0	0.100	(Kronospan, 2022)
Lã mineral	90.0	0.035	(Volcalis, 2022)
Perfil metálico (C90×43×15×1.5)	90.0	50.000	(C. Santos e Matias, 2006)
EPS - Poliestireno Expandido	50.0	0.036	(LNEC, 2015)
Acabamento final do ETICS	5.0	0.450	(WEBERTHERM UNO, 2018)

## 3.2 Modelos Numéricos

### 3.2.1 Discretização do domínio

O estudo paramétrico realizado ao longo desta dissertação apresenta-se em regime permanente /estacionário, ou seja, a temperatura no domínio depende apenas da posição e não varia no tempo. Para minimizar o tempo e esforço de cálculo computacional, apenas foi modelada uma parte representativa das secções transversais de paredes resistentes em LSF.

Nos modelos realizados no *software* Therm, representou-se a secção transversal bidimensional representada na Figura 3.1. Neste *software* definiu-se um erro máximo nos cálculos do MEF de 2% para todos os modelos avaliados neste estudo.

No Ansys modelou-se a mesma secção transversal da Figura 3.1, mas em 3D, com dimensões 400 mm de comprimento e 400 mm de altura. A abordagem de cálculo passou por refinar a malha (reduzindo as dimensões dos elementos finitos) até que os resultados apresentem variações menores ou iguais a 1%, ou seja, verificar-se a convergência.

As propriedades térmicas dos materiais utilizados nessas simulações são caracterizadas pela condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) e pela emissividade ( $\epsilon$ ), que foi considerada igual a 0.9 em todos os materiais.

### 3.2.2 Condições de fronteira

Foram definidos para cada modelo dois conjuntos de condições de fronteira: (1) temperaturas do ar ambiente, as temperaturas interior e exterior foram definidas em 20°C e 0°C, respetivamente; e, (2) resistências térmicas superficiais, que foram definidas de acordo com a ISO 6946 (2017), para o interior ( $R_{Si}$ ) 0.13 (m<sup>2</sup>·K) /W e para o exterior ( $R_{Se}$ ) 0.04 (m<sup>2</sup>·K) /W. Os valores estão representados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Condições de fronteira para o estudo paramétrico.

Temperatura ambiente [°C]		Resistência superficial [(m <sup>2</sup> ·K) /W]	
Interior ( $\theta_i$ )	20	Interior ( $R_{Si}$ )	0.13
Exterior ( $\theta_e$ )	0	Exterior ( $R_{Se}$ )	0.04

### 3.2.3 Validação dos modelos numéricos com os Casos de teste da ISO 10211

Como já foi referido anteriormente, o Anexo C da ISO 10211 apresenta casos de teste para validar a precisão dos modelos numéricos. Uma vez que os resultados numéricos, obtidos nesta dissertação, foram comparados com valores de referência, realizados a paredes com a mesma configuração e materiais (P. Santos e Poologanathan, 2021) e também validados com recurso a um método experimental, optou-se por fazer apenas a verificação para dois (um 2D e um 3D) dos quatro casos de teste apresentados na norma. Os testes de caso escolhidos foram os que têm fluxos de calor bidimensional, originados por materiais com grandes diferenças de condutibilidade térmica, como acontece nas paredes em LSF.

Para validar o THERM recorreu-se ao teste 2, ilustrado na Figura 3.2, que representa um caso de transferência de calor 2D. Para validar o modelo não devem existir diferenças maiores que 0.1 °C na temperatura e 0.1 W/m no fluxo de calor. Os resultados apresentados no Quadro 3.3 demonstram a correta utilização do *software* Therm.

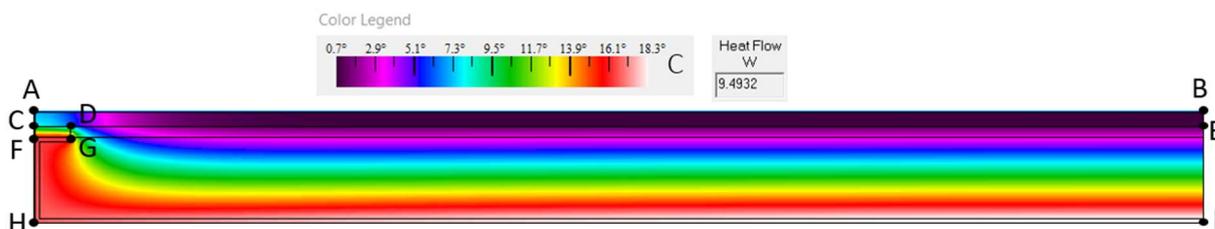


Figura 3.2 - Teste 2 da ISO 10211: Distribuição de temperatura e fluxo de calor, no Therm.

Quadro 3.3 - Resultados para o caso de teste 2 da ISO 10211.

Pontos	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Temperaturas ISO 10211 [°C]	7.1	0.8	7.9	6.3	0.8	16.4	16.3	16.8	18.3
Temperaturas Therm [°C]	7.1	0.8	7.9	6.3	0.8	16.4	16.3	16.8	18.3
Fluxo de calor ISO 10211 [W/m]				9.50	Fluxo de calor Therm [W/m]			9.49	

Para a validação do *software* Ansys recorreu-se ao caso de teste 4, que representa uma barra de aço a atravessar uma camada de isolamento, este caso está representado na Figura 3.3. Para que o modelo seja considerado válido não deve haver desvios maiores que 1% no fluxo de calor e de 0.005 °C na temperatura. Os resultados presentes no Quadro 3.4 validam a utilização deste *software* de cálculo numérico.

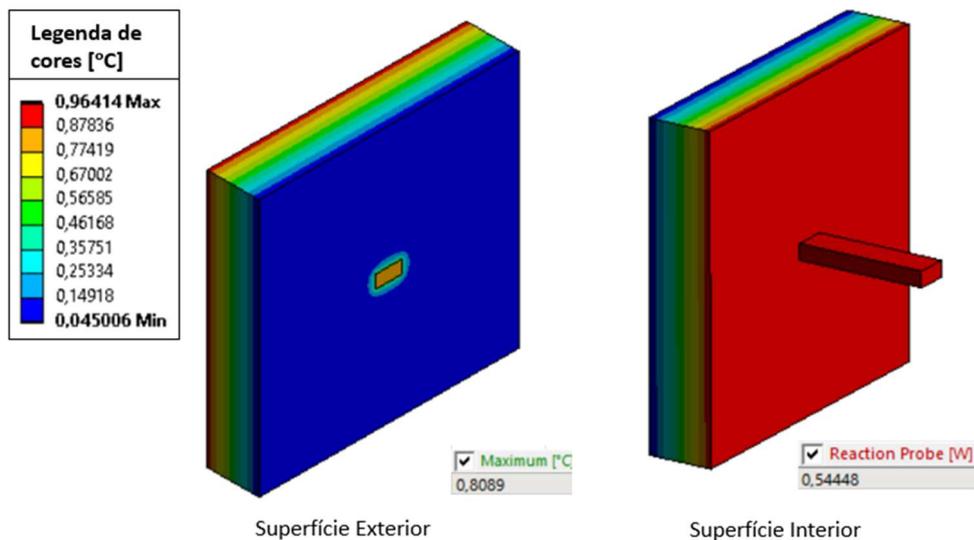


Figura 3.3 - Teste 4 da ISO 10211: Distribuição de temperatura e fluxo de calor, no Ansys.

Quadro 3.4 - Resultados para o caso de teste 4 da ISO 10211.

	ISO 10211	Ansys	Diferença
Fluxo de calor [W]	0.540	0.544	0.8%
Temperatura máxima na superfície exterior [°C]	0.805	0.809	-0.004

### 3.2.4 Comparação da precisão entre os softwares Therm e Ansys

Foi comparada a precisão entre os dois *softwares*, para as duas paredes de referência apresentadas na Figura 3.1, com um espaçamento entre perfis de 400 mm. A discretização e as condições de fronteira aplicadas são as descritas nas subsecções 3.2.1 e 3.2.2, respetivamente.

Os resultados numéricos para a parede sem ETICS estão representados na Figura 3.4, foram obtidos valores de resistência térmica de 1.559 (m<sup>2</sup>·K) /W no Therm e 1.551 (m<sup>2</sup>·K) /W no Ansys, o que corresponde a uma diferença de 0.5 %.

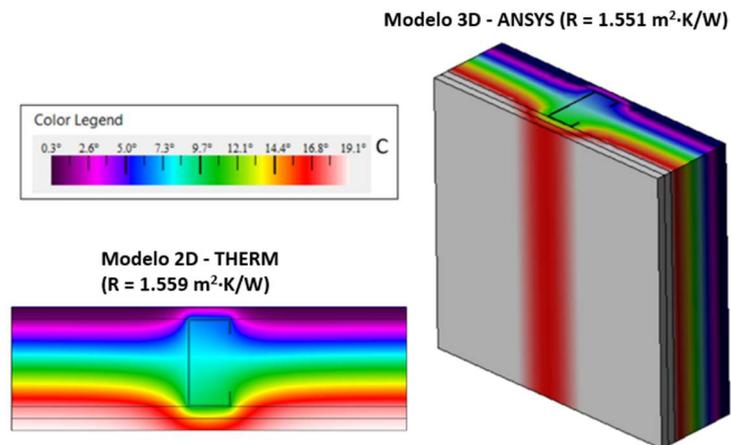


Figura 3.4 - Comparação da precisão dos modelos numéricos, na parede em LSF sem ETICS: Distribuição de temperaturas e resistência térmica.

Os resultados numéricos para a parede com ETICS estão representados na Figura 3.5, foram obtidos valores de 3.204 e 3.197 ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ ) para o Therm e Ansys, respectivamente, o que corresponde a uma diferença de 0.2 %.

Em ambos os modelos o *software* Ansys apresentou valores de resistência térmica ligeiramente inferiores, não ultrapassando 0.5 % de diferença. Também se verificou que a distribuição de temperaturas é igual nos dois modelos.

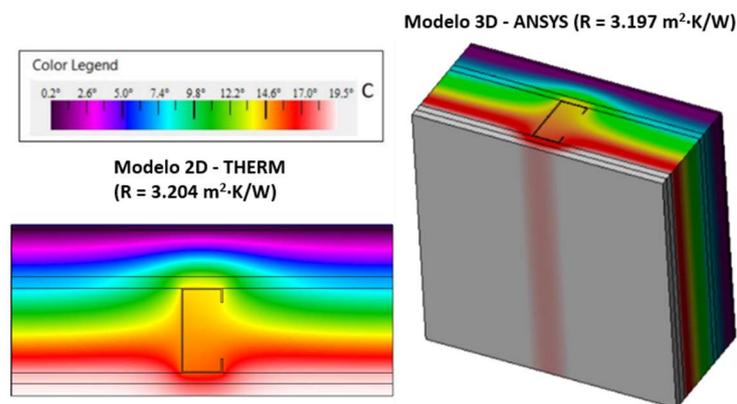


Figura 3.5 - Comparação da precisão dos modelos numéricos, na parede em LSF com ETICS: Distribuição de temperaturas e resistências térmica.

### 3.2.5 Validação dos modelos numéricos com resultados experimentais

Para uma percepção da fiabilidade dos resultados numéricos, fez-se uma comparação dos valores obtidos numericamente, com valores resultantes de medições experimentais em condições controladas. Para isso, recorreu-se ao trabalho experimental que tem sido desenvolvido ao longo do projeto de investigação *Tyre4buildins*, onde foram testados protótipos laboratoriais de paredes em LSF com a mesma configuração e materiais das representadas na Figura 3.1, com espaçamento entre perfis de 400 mm.

O método experimental utilizado foi o dos termofluxímetros (“*Heat Flow Meter Method*”), realizado segundo a norma ISO 9869-1 (2014). Os protótipos de parede em LSF foram colocados entre duas câmaras climáticas, conforme ilustrado na

Figura 3.6(a). A câmara quente é aquecida por uma resistência elétrica, enquanto a câmara fria é arrefecida por um frigorífico. O perímetro dos protótipos é coberto por 80 mm de isolamento de espuma de poliuretano, com condutividade de  $0.036 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , para minimizar as perdas de calor através do perímetro dos protótipos. Foram usados, em cada lado das paredes (quente e frio), dois medidores de fluxo de calor (HFM, do inglês “*Heat Flux Meter*”), sensores Hukseflux, modelo HFP01, com precisão de  $\pm 3\%$ , e seis termopares (TCs, do inglês *ThermoCouples*) tipo K (1/0.315) PFA, certificados com precisão classe 1, totalizando quatro medidores de fluxo de calor e doze TCs. Para obter as medidas em duas zonas distintas de comportamento térmico, dos protótipos de parede, os sensores foram colocados um sobre o perfil de aço vertical do meio e o outro no meio da caixa de ar, conforme ilustrado na

Figura 3.6(b) (P. Santos e Mateus, 2020). No artigo P. Santos e Mateus (2020), o procedimento experimental é explicado mais detalhadamente.

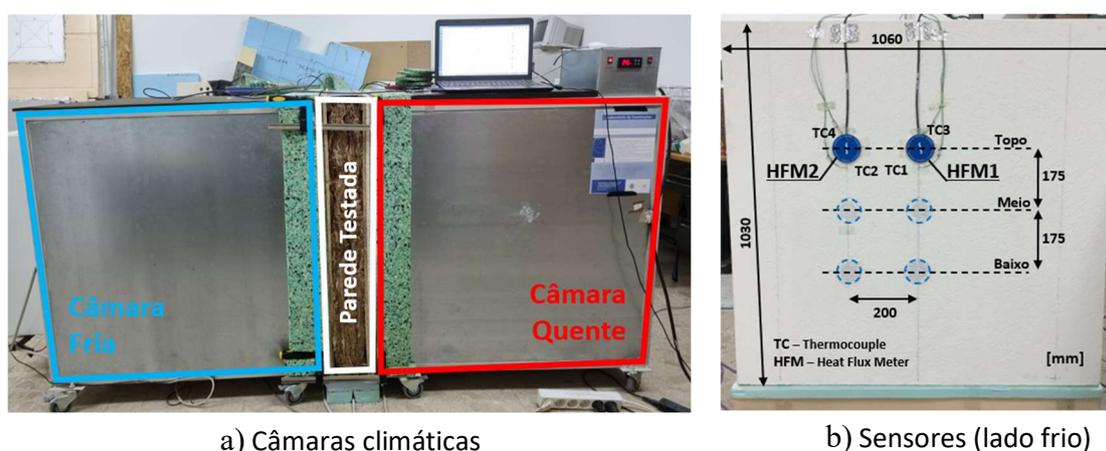


Figura 3.6 - Equipamento experimental (P. Santos e Mateus, 2020).

Os resultados presentes no Quadro 3.5 mostram que os modelos numéricos apresentam valores muito próximos dos medidos experimentalmente. É de notar que o *software* Therm apresenta valores mais próximos do experimental (0.1% de diferença). No Ansys também se obtiveram valores muito próximos do método dos termofluxímetros, mais uma vez, para este *software* foram obtidos valores de resistência térmica inferiores, -0.5 e -0.1 %. para as paredes sem ETICS e com ETICS, respetivamente.

Quadro 3.5 - Comparação de resultados experimentais e numéricos.

Método	R [m <sup>2</sup> ·K/W]	
	Parede sem ETICS	Parede com ETICS
Medições - “ <i>Heat Flow Meter</i> ”	1.558 (P. Santos e Mateus, 2020)	3.200 (P. Santos e Poologanathan, 2021)
Modelo 2D - Therm	1.559	3.204
Desvio Percentual	+0.1%	+0.1%
Modelo 3D - Ansys	1.551	3.197
Desvio Percentual	-0.5%	-0.1%

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Ao longo deste capítulo apresentam-se e comentam-se os resultados dos estudos paramétricos feitos a paredes em LSF, obtidos através de simulações numéricas de transferência de calor. Os valores são apresentados em resistência térmica ( $R$ ) e/ou pelo coeficiente de transmissão térmica superficial ( $U$ ). É feita uma análise aos valores de resistência térmica das paredes de referência, em seguida realiza-se um estudo paramétrico onde se pretende avaliar a influência das dimensões e condutibilidade térmica das tiras de CT, e a influência da espessura e condutibilidade térmica do isolamento contínuo pelo exterior, no desempenho térmico das paredes em LSF. Por último, avalia-se e compara-se a eficácia de tiras de CT provenientes da reciclagem de borracha de pneus (em fim de vida).

### 4.1 Paredes de Referência

Começando por uma análise mais detalhada da Figura 3.4 e Figura 3.5, apresentadas na Secção 3.2.4, e comparando a variação de temperatura para cada parede, é de notar que as temperaturas superficiais interiores são inferiores na parede sem ETICS, a diferença de temperaturas entre a zona sem perfil (caixa de ar) e com perfil é mais elevada na parede sem ETICS. É, portanto, o ETICS uma estratégia de mitigação de pontes térmicas bastante eficiente, não só aumenta a resistência térmica da parede (diminuindo as perdas de calor para o exterior) como diminui as diferenças de temperatura superficiais interiores, reduzindo a possibilidade de ocorrência de condensações superficiais.

As paredes de referência para o estudo paramétrico, que foram descritas na Secção 3.1, têm os valores de resistência térmica apresentados na Figura 4.1. Analisando os resultados observa-se que, tal como descrito anteriormente, ao colocar ETICS numa parede em LSF a resistência térmica aumenta significativamente, é de notar que o ETICS apresenta ligeiramente mais influência para o afastamento entre perfis de 400 mm, com 106 % de melhoria em relação á parede sem ETICS (de referência) contra 89% para o espaçamento de 600 mm. Aumentar o espaçamento entre perfis, de 400 para 600 mm, também conduz a um aumento na resistência térmica da parede, que é mais pronunciado na parede sem ETICS (+19%) do que na parede com ETICS (+9%).

Os quatro valores, apresentados na Figura 4.1 vão ser utilizados nos estudos paramétricos das Secções 4.2 e 4.3, como referência.

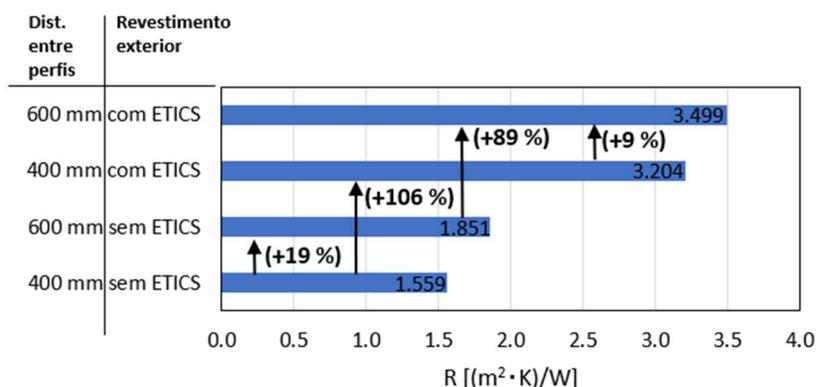


Figura 4.1 - Valores de resistência térmica das paredes, em LSF, de referência.

## 4.2 Influência das Dimensões e Condutibilidade das Tiras de Corte Térmico

Como referido na Secção 2.5.4, o uso de tiras de Corte Térmico, nos banzos dos perfis metálicos das paredes em LSF, é uma das estratégias mais eficazes na mitigação de pontes térmica. Nesse sentido, pretende-se avaliar a melhoria de desempenho térmico em função das dimensões e condutibilidade térmica das tiras de CT.

Para avaliar a influência da dimensão e condutibilidade térmica das tiras de CT, no desempenho térmico de uma parede em LSF, foram utilizados quatro parâmetros: (1) Espessura, fixando a largura em 50 mm e fazendo variar a espessura entre 5 e 15 mm (Este casos são representados da Figura 4.3 à Figura 4.6 por (a) e (b) para afastamentos de 400 e 600 mm, respetivamente); (2) Largura, fixando a espessura em 10 mm e fazendo variar a largura entre 30 e 70 mm (Este casos são representados da Figura 4.3 à Figura 4.6 por (c) e (d) para afastamentos de 400 e 600 mm, respetivamente); (3) Condutibilidade térmica, para os dois casos anteriores avaliou-se o desempenho térmico em função do  $\lambda$ , para isso usaram-se cinco valores: 7.5, 15, 30, 60 e 120 mW/(m·K); e, (4) Número de tiras de CT: uma (do lado exterior) e duas (em ambos os lados). Estes parâmetros estão representados na Figura 4.2, para a parede sem ETICS, sendo que foram utilizados os mesmos parâmetros na parede com ETICS.

Devido à grande expansibilidade da lã mineral (Volcalis, 2022), considerou-se que quando se inserem tiras de CT nos perfis das paredes de referência, a lã mineral deixa de estar pressionada e aumenta o seu volume, preenchendo totalmente os espaços vazios na caixa de ar, como se

exemplifica na Figura 4.2. Considera-se também que com a expansão a sua condutibilidade térmica não é alterada.

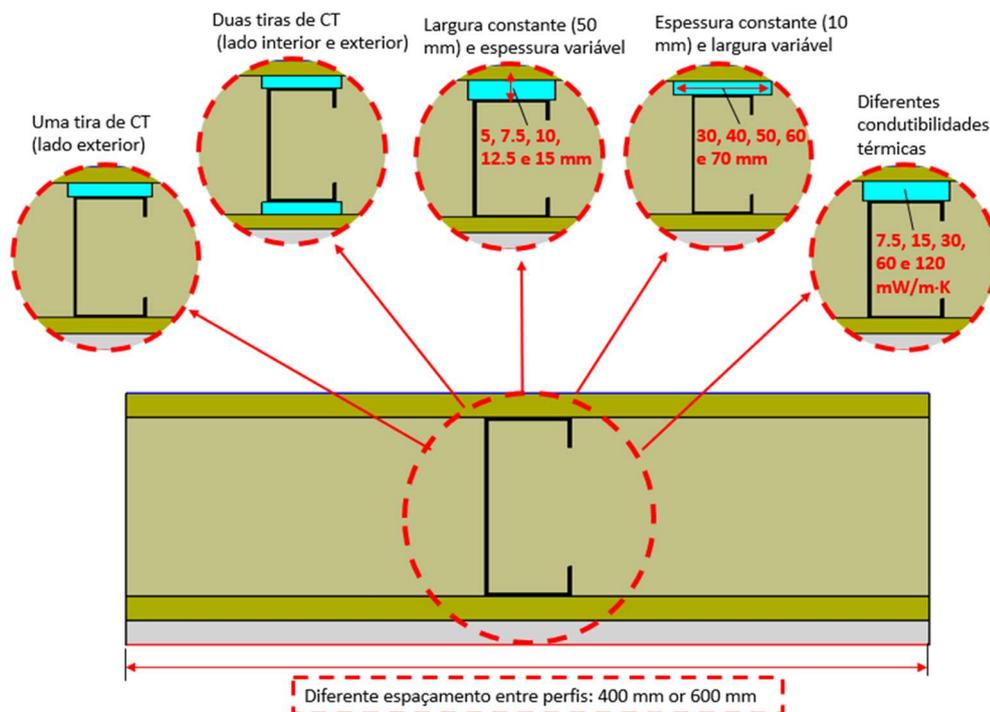


Figura 4.2 - Ilustração esquemática dos parâmetros estudados nas paredes LSF.

#### 4.2.1 Parede LSF sem ETICS com uma tira de corte térmico

O primeiro caso estudado representa a colocação de uma tira de CT numa parede resistente sem ETICS (Figura 3.1(a)). Os resultados, apresentados na Figura 4.3(a), mostram que mesmo para uma tira de CT de 5 mm o valor de  $R$  aumenta. Este aumento é tanto maior quanto menor for a condutibilidade térmica da tira de CT, note-se que o valor de  $R$  aumenta de 1.556 (valor de referência) para 1.667 ( $m^2 \cdot K$ )/W para o material com 120  $mW/(m \cdot K)$ , enquanto para o material com 7.5  $mW/(m \cdot K)$  aumenta para 2.140 ( $m^2 \cdot K$ )/W. Também o aumento da espessura da tira de CT é mais eficiente para materiais com baixa condutibilidade térmica, comparando o aumento da espessura de 5 para 15 mm nos dois extremos de condutibilidade térmica, observa-se um aumento de 0.233 e 0.485 ( $m^2 \cdot K$ )/W para 120 e 7.5  $mW/(m \cdot K)$ , respetivamente.

Os gráficos da Figura 4.3(b) apresentam a mesma tendência que os anteriores, mas neste caso a presença dos perfis não é tão significativa, pois há menos quantidade de aço presente na

parede. O aumento de espessura de 5 para 15 mm, para as de condutibilidades térmicas de 120 e 7.5 mW/(m · K), corresponde a um acréscimo de resistência de 0.244 e 0.447 (m<sup>2</sup> · K)/W, respetivamente. Em relação ao aumento comparativamente ao valor de referência, verificam-se aumentos máximos (para 15 mm de espessura) de 20 e 52 % para as tiras de CT de condutibilidades térmicas de 120 e 7.5 mW/(m · K), respetivamente. Na Figura 4.3(a), o aumento é superior (21 e 68 %) o que comprova que a resistência térmica não é tão dependente das propriedades das tiras de corte térmico, para um afastamento entre perfis de 600 mm.

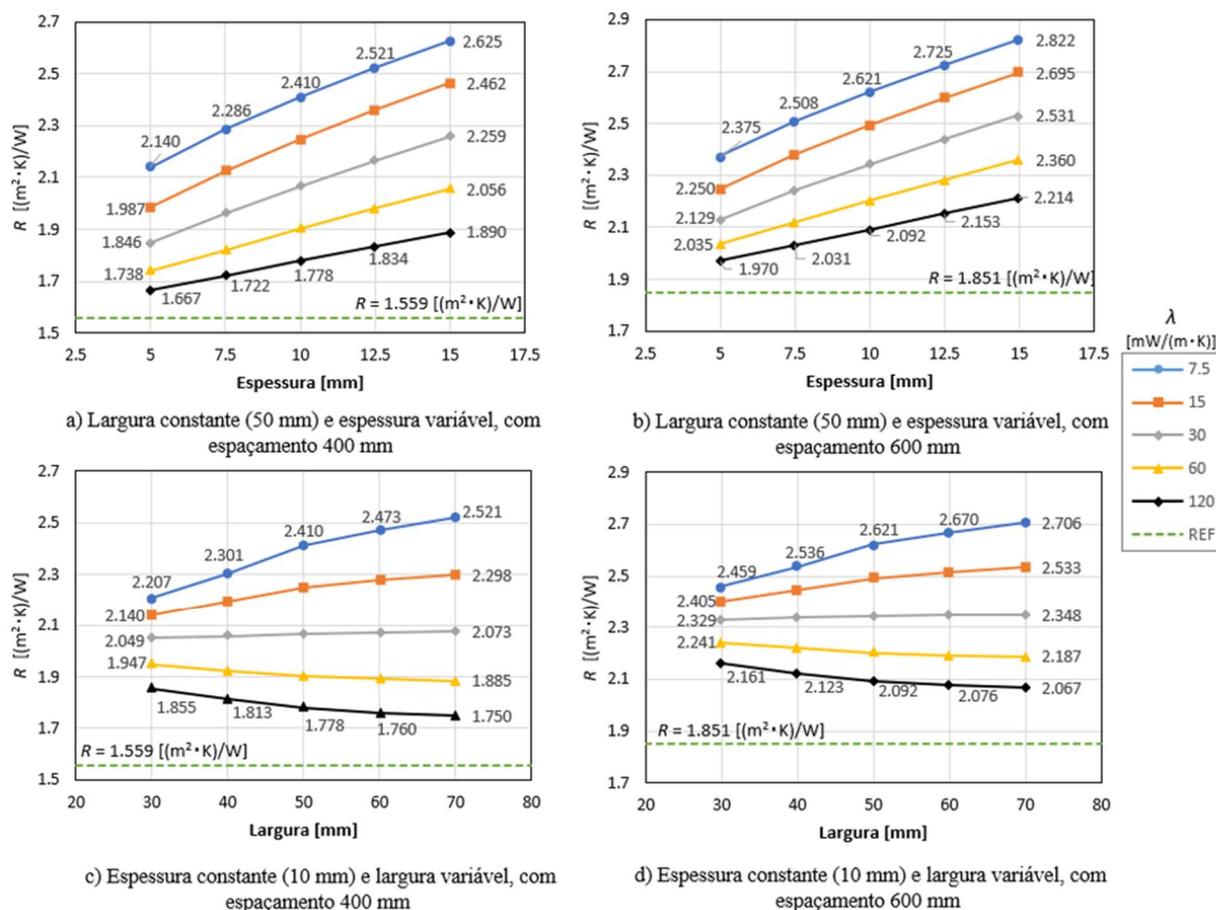


Figura 4.3 - Influência de uma tira de CT na resistência térmica de uma parede resistente sem ETICS.

Comparando os gráficos da Figura 4.3 (a) e (c), percebe-se que as tiras de CT de 5 mm de espessura e 50 mm de largura apresentam pior desempenho que as tiras de CT de 10 mm de espessura e 30 mm de largura, também se observa que aumentar 2.5 mm na espessura apresenta melhores resultados que aumentar 10 mm de largura. É, portanto, mais eficaz aumentar a espessura que a largura das tiras de CT, este facto é justificado pelo aumento, consequente, da espessura total da parede que leva a um acréscimo de resistência térmica. Enquanto, para o

aumento da espessura das tiras, o  $R$  da parede aumenta sempre (para qualquer  $\lambda$ ), o mesmo não se verifica para o aumento da largura, neste último caso só se verifica a melhoria de resistência térmica para materiais com condutibilidade térmica inferior à da lã mineral (presente na caixa de ar).

As linhas cinza, da Figura 4.3 (c) e (d), apresentam valores praticamente constantes à medida que se aumenta a largura, o que significa que para tiras de CT, com valores de condutibilidade térmica desta grandeza, 30 mW/(m · K), é praticamente igual ter 30 ou 70 mm de largura (assumindo as condições deste estudo: a lã mineral preenche totalmente os espaços existentes na caixa de ar).

É também evidente que inserir uma tira de CT de materiais com elevado desempenho térmico, numa parede em LSF, provoca um significativo aumento na resistência térmica que pode chegar aos 68 % (com 7.5 mW/m · K) e 58 % (com 15 mW/m · K), para o caso em que a tira de CT tem 15 mm de espessura, 10 mm de largura e um afastamento entre perfis de 400 mm. Para o mesmo afastamento entre perfis e dimensões, mas para materiais com condutibilidades térmicas de 30, 60 e 120 mW/(m · K) observam-se aumentos de 45, 32 e 21 %, respetivamente.

Os resultados completos apresentados na Figura 4.3 encontram-se no Anexo A.

#### 4.2.2 Parede LSF sem ETICS com duas tiras de corte térmico

Em seguida, modelou-se o comportamento da mesma parede (Figura 3.1(a)), mas para a colocação de duas tiras de CT. Analisando a Figura 4.4 observa-se que, os gráficos apresentados têm a mesma aparência que os da Figura 4.3, ou seja, o comportamento é semelhante assim como as conclusões, citadas anteriormente. Neste caso, com duas tiras de CT, o desempenho térmico é superior verificando-se um aumento máximo, em relação às paredes de referência (na tira com  $\lambda = 7.5$  [mW/(m · K)] e 15 mm de espessura), de 119 e 90 % para o espaçamento entre perfis de 400 e 600 mm, respetivamente. Para as tiras de CT com  $\lambda = 120$  [mW/(m · K)] e 15 mm de espessura verifica-se um aumento de 41 e 38 %, para os espaçamentos entre perfis de 400 e 600 mm, respetivamente.

É de notar que apenas para o material com menor condutibilidade térmica (espessuras de 12.5 e 15 mm, para 400 mm de afastamento, e espessura de 15 mm, para 600 mm de afastamento), os valores de  $R$  das paredes de referência, com ETICS, são atingidos. Estes resultados mostram que são necessárias tiras de CT com espessuras maiores que as estudadas para atingir valores de resistência térmica equiparados aos das paredes com ETICS (composto por EPS).

Todos os valores apresentados nos gráficos da Figura 4.4 estão apresentados no Anexo B.

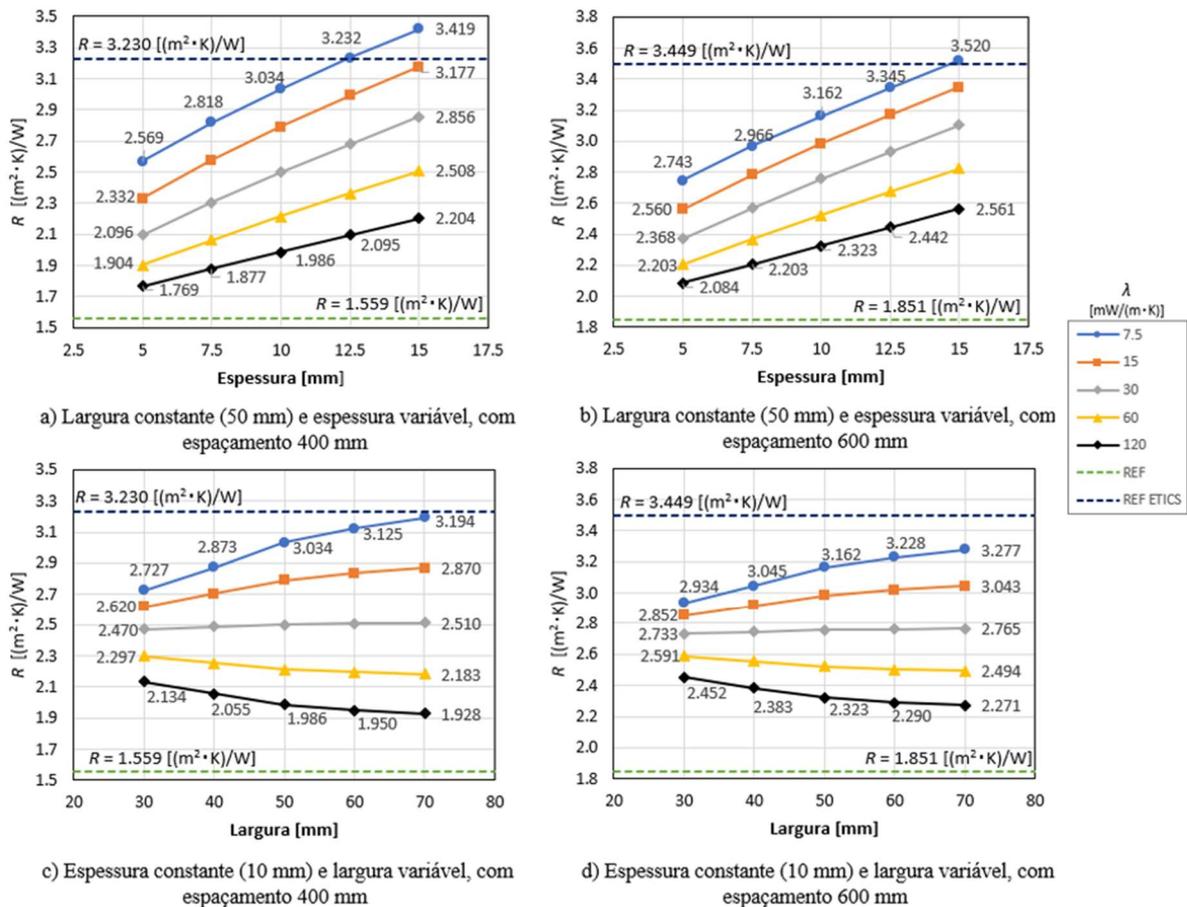


Figura 4.4 - Influência de duas tiras de CT na resistência térmica de uma parede resistente sem ETICS.

#### 4.2.3 Parede LSF com ETICS e uma tira de corte térmico

O terceiro caso estudado foi a colocação de uma tira de CT numa parede resistente exterior com ETICS, Figura 3.1(b), os resultados estão representados na Figura 4.5. Mais uma vez, observou-se o mesmo padrão no aumento das resistências térmicas da parede em função das dimensões e condutibilidade térmica das tiras de CT, mas neste caso as retas são menos inclinadas e estão mais próximas umas das outras, em comparação com o caso da parede sem ETICS. Ou seja, a influência das tiras de CT é inferior nas paredes exteriores com ETICS.

É de notar que para o caso em que a parede já tem ETICS, a introdução de uma tira de CT não proporciona um aumento tão acentuado de resistência térmica (em relação à referência) como na parede sem ETICS. O aumento máximo de resistência verificou-se para as mesmas tiras de

CT dos casos anteriores ( $\lambda = 7.5$  [mW/(m · K)] e 15 mm de espessura), neste caso é de 25 e 21 % para o espaçamento entre perfis de 400 e 600 mm, respetivamente. Para a tira de CT com  $\lambda = 120$  [mW/(m · K)] e 15 mm de espessura, verifica-se um aumento reduzido, de 8 e 9 %, para os espaçamentos entre perfis de 400 e 600 mm, respetivamente. Todos os valores apresentados nos gráficos da Figura 4.5 estão apresentados no Anexo C.

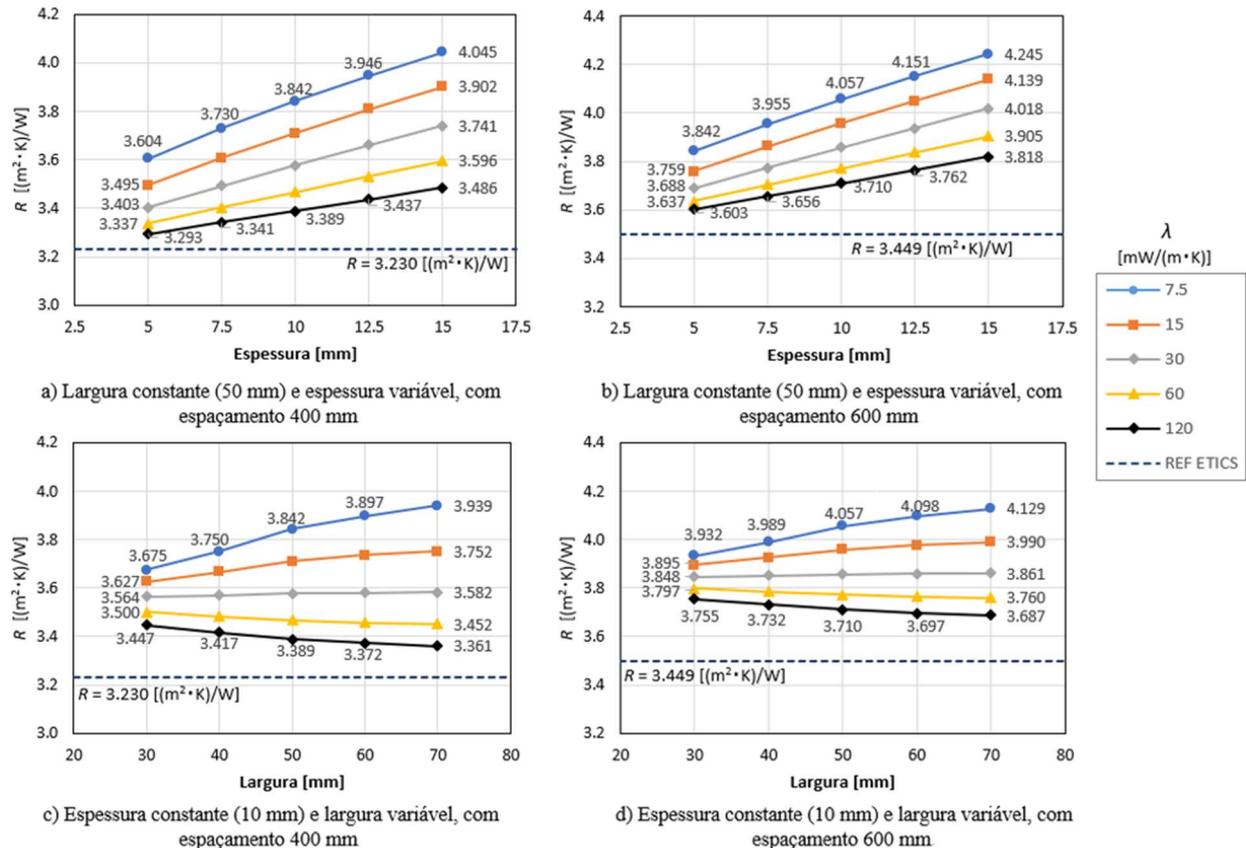


Figura 4.5 - Influência de uma tira de CT na resistência térmica de uma parede resistente com ETICS.

#### 4.2.4 Parede LSF com ETICS e duas tiras de corte térmico

O último dos casos estudados, foi a colocação de duas tiras de corte térmico na parede exterior com ETICS. Esta configuração resulta em paredes com elevada resistência térmica, e por consequência valores de  $U$  bastante baixos podendo chegar a valores de 0.20 W/(m<sup>2</sup>·K), para as tiras de CT com condutibilidade mais baixa. Mais uma vez, verificou-se que a influência das tiras de CT numa parede em LSF com ETICS não é tão significativo quando comparado a uma parede sem ETICS, para o caso de duas tiras de CT e ETICS os valores de  $R$  têm um aumento

máximo (para o material com 7.5 mW/(m·K) e 15 mm de espessura), em relação à referência, de 49 e 41 % para o afastamento entre perfis de 400 e 600 mm, respectivamente. As tiras de CT com  $\lambda = 120$  [mW/m·K] e 15 mm de espessura apresentam um aumento de 18 %, para os dois espaçamentos entre perfis avaliados. Os valores de resistência térmica para todos os casos estudados estão apresentados no Anexo D.

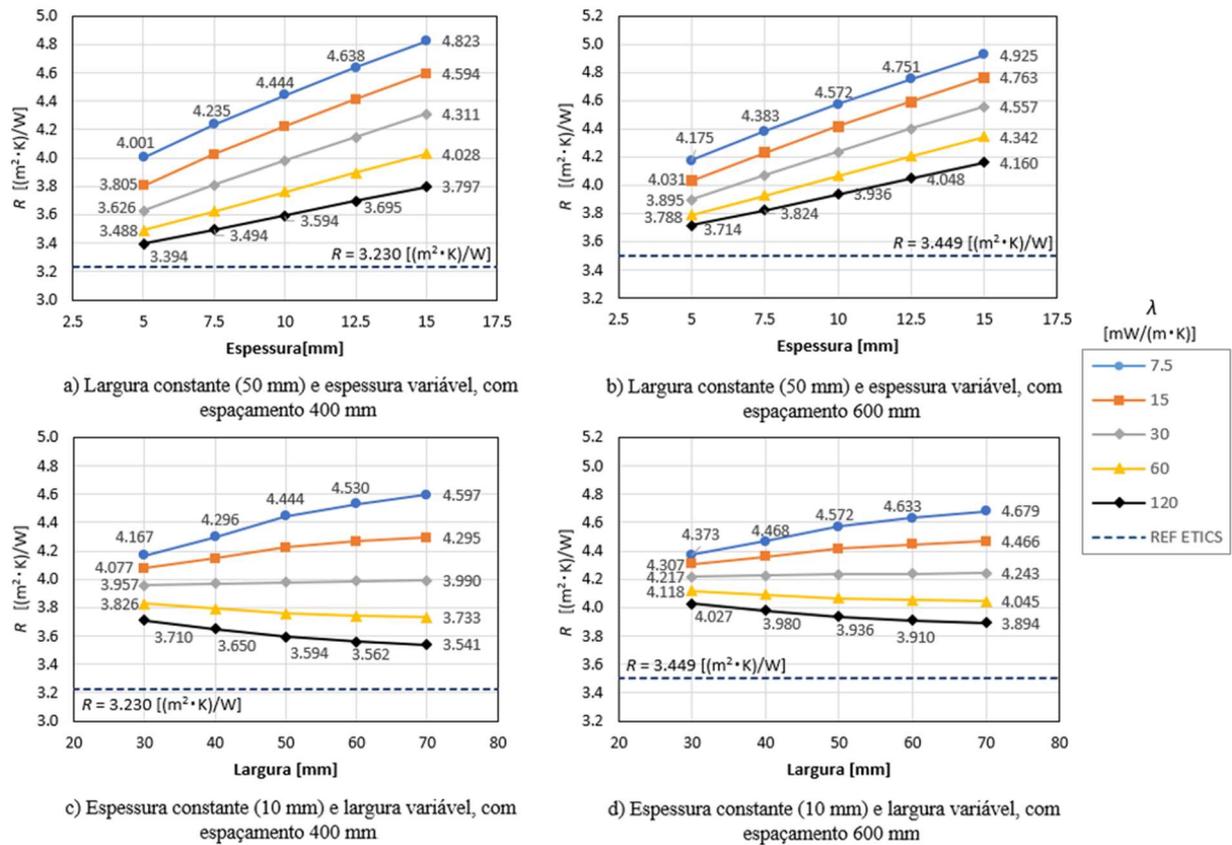


Figura 4.6 - Influência de duas tiras de CT na resistência térmica de uma parede resistente com ETICS.

### 4.3 Influência da Espessura e Condutibilidade do Isolamento Térmico Contínuo pelo Exterior

Para estudar a influência da espessura e condutibilidade térmica do isolamento presente no ETICS, adicionou-se à parede de referência (sem ETICS), representada na Figura 3.1(a), isolamento contínuo pelo exterior. Adotou-se um procedimento semelhante ao estudo anterior e fez-se variar a espessura, do isolamento, entre 30 e 70 mm assim como a sua condutibilidade térmica entre 7.5 e 120 mW/(m·K).

As retas, dos gráficos presentes na Figura 4.7, têm inclinações bastante diferentes, sendo que a inclinação aumenta à medida que a condutibilidade térmica do material diminui. A Figura 4.7(a) apresenta os valores de resistência térmica, para a variação de espessura entre 30 e 70 mm, na parede com afastamento entre perfis de 400 mm, esta variação toma valores de 0.368, 0.712, 1.377, 2.701, e 5.355 ( $m^2 \cdot K$ )/W, para valores de condutibilidade térmica de 120, 60, 30, 15, 7.5 mW/ ( $m \cdot K$ ), respetivamente. A Figura 4.7(b) apresenta a mesma variação de espessuras, mas para a parede com afastamento entre perfis de 600 mm, verificam-se aumentos de 0.374, 0.718, 1.384, 2.709, 5.360 ( $m^2 \cdot K$ )/W, para valores de condutibilidade térmica de 120, 60, 30, 15, 7.5 mW/ ( $m \cdot K$ ), respetivamente.

Em relação ao aumento de resistência térmica, comparativamente à parede de referência sem ETICS (Figura 3.1(a)), também é maior para o afastamento de 400 mm entre perfis. A reta azul apresenta valores entre 279 % (para 30 mm de espessura) e 622% para 70 mm de espessura); a reta laranja valores entre 148 e 321 %; a reta cinza apresenta valores entre 80 e 168 %; a reta amarela valores entre 43 e 89 %; e a reta preta apresenta valores entre 23 e 47%. Estes valores, demonstram que o ETICS é sempre uma boa solução, nas paredes em LSF, mas é mais eficiente quando composto por um material de isolamento térmico, ou seja  $\lambda < 65$  mW/ ( $m \cdot K$ ) e  $R > 0.30$  ( $m^2 \cdot K$ )/W (C. Santos e Matias, 2006) .

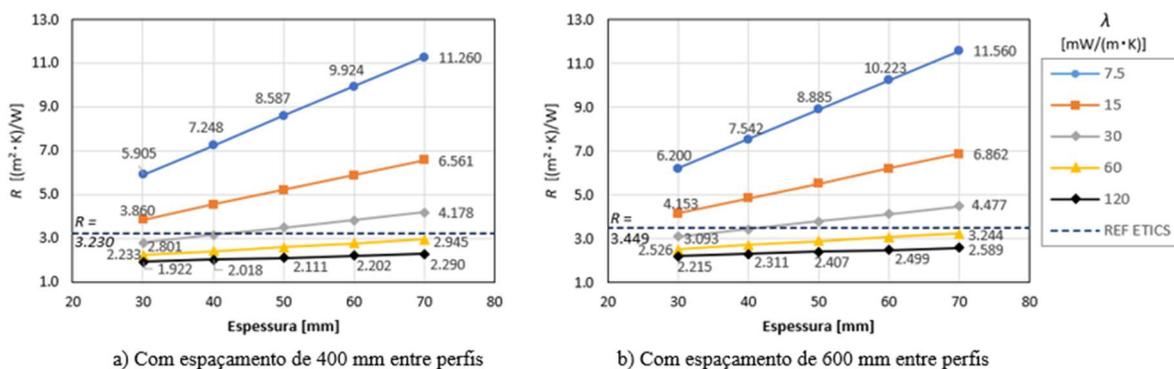


Figura 4.7 - Influência da espessura e da condutibilidade do isolamento contínuo pelo exterior na resistência térmica de uma parede em LSF.

Como é possível perceber na Figura 4.7, os materiais com condutibilidade térmica de 7.5 e 15 mW / ( $m \cdot K$ ) apresentam um elevado desempenho, com valores máximos de resistência térmica (para 70 mm de espessura e 600 mm de espaçamento entre perfis) de 11.560 e 6.862 ( $m^2 \cdot K$ )/W (que representam valores de  $U$  de 0.09 e 0.14 W/ ( $m^2 \cdot K$ )), respetivamente. Para materiais com condutibilidade de 60 e 120 mW/ ( $m \cdot K$ ) não se atingem os valores da parede de referência com ETICS (composto por isolamento térmico em EPS), de facto, pode se

concluir que o uso de materiais com condutibilidade térmica igual ou superior a  $60 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , não é eficiente, pois o aumento de espessura não conduz a um aumento significativo de resistência térmica da parede. Os resultados numéricos completos encontram-se no Anexo E.

#### 4.4 Comparação Entre o Uso de Tiras de Corte Térmico e o ETICS

Uma das principais vantagens das paredes em LSF é que mesmo com espessura reduzida consegue-se atingir valores de resistência térmica elevados. O uso de tiras de CT em conjunto com ETICS, conduz a paredes com espessuras ligeiramente superiores, neste sentido pretende-se comparar estas duas soluções e avaliar o seu desempenho separadamente.

Selecionou-se, entre os modelos dos estudos paramétricos anteriores, as configurações de parede que conduzem ao mesmo valor de espessura. Obtiveram-se duas configurações que correspondem à parede de referência, presente na Figura 3.1(a): (1) com duas tiras de corte térmico de 15 mm (estudado na Subsecção 4.2.2); e (2) com isolamento contínuo pelo exterior com 30 mm de espessura (estudado na Secção 4.3). O que corresponde a uma espessura total de parede de 156.5 mm. Os resultados para as paredes descritas, com espaçamento entre perfis de 400 mm estão representados na Figura 4.8.

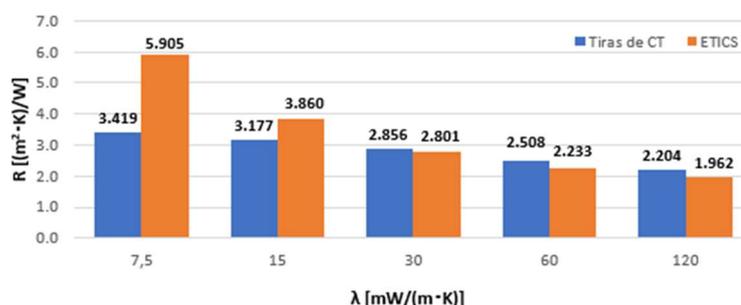


Figura 4.8 - Comparação entre duas tiras de CT (15 mm de espessura cada) e isolamento contínuo pelo exterior com (30 mm de espessura) numa parede exterior, em LSF (espessura total de 156.5 mm).

Na condutibilidade térmica de  $7.5 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  é verificada a maior diferença entre as duas soluções (73 %), para  $15 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  verifica-se uma diferença de 22 %. Nestes dois materiais é clara a vantagem da sua utilização contínua pelo exterior.

Para a condutibilidade térmica de  $30 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  observam-se praticamente os mesmos valores de resistência térmica nas duas soluções (2 % de diferença), ainda assim com valores superiores para as tiras de CT. Neste caso, a escolha entre as duas soluções, passa também pela

facilidade de aplicação (sendo mais prática a aplicações continua pelo exterior) e pelo facto que já foi referido anteriormente: o ETICS conduz a um aumento da inércia térmica dos edifícios. Já as tiras de CT conduzem a uma poupança de material, mas mais tempo perdido na sua aplicação.

Para os valores de condutibilidade térmica mais elevados, 60 e 120 mW/(m · K) verificou-se que o uso de tiras de CT apresenta maior resistência térmica, este facto é justificado pela conclusão citada anteriormente: não é eficiente o uso de materiais com condutibilidade térmica superior a 60 mW/(m · K) no ETICS. Nas tiras de CT, não sendo também muito eficiente o uso destes materiais, conduz a um aumento/expansão da lã mineral na caixa de ar o que provoca melhores resultados em relação ao ETICS.

Apesar desta comparação, é importante realçar que o uso conjunto destas estratégias, em paredes exteriores, proporciona um elevado isolamento térmico e uma mitigação eficaz das pontes térmica originadas pelos perfis de aço, sendo a sua utilização conjunta ideal para reduzir as perdas de calor através das paredes em LSF.

#### 4.5 Desempenho das Novas Tiras de Corte Térmico

Nas Secções anteriores ficou comprovada a eficiência das tiras de CT na mitigação do efeito das pontes térmicas nos edifícios em LSF. Aliar este benefício, que conduz a uma poupança de energia operacional, à reutilização e redução de resíduos potencia os edifícios numa análise de ciclo de vida, contribuindo para uma construção mais eficiente e sustentável.

Nesta Secção pretende-se avaliar numericamente o desempenho das tiras de CT desenvolvidas no âmbito do projeto *Tyre4BuildIns* (Durães et al., 2022). Estas tiras são constituídas por um compósito de borracha reciclada, proveniente de pneus em fim de vida, coladas com resinas a um material super-isolante, i.e., com condutibilidade térmica muito reduzida (aerogel). Para isso, simulou-se numericamente o comportamento térmico das paredes em LSF, presentes na Figura 3.1, com tiras de CT deste material e comparou-se o seu desempenho com outras tiras de CT constituídas apenas por borracha reciclada de pneus. As dimensões da secção transversal e condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) dos materiais estão presentes no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Materiais das tiras de corte térmico em estudo.

Material	Dimensões* [mm]	$\lambda$ [W/(m·K)]	Referência
Borracha reciclada de pneus	10x50	0.122	(ITeCons, 2012)
Compósito de borracha reciclada e aerogel	10x50	0.016	(Durães et al., 2022)

\* Dimensões da secção transversal

Estudaram-se cinco casos diferentes, todos com 400 mm de afastamento entre perfis: (C1) A parede de referência sem ETICS (Figura 3.1(a)); (C2) Corresponde à introdução de duas tiras de corte térmico na parede C1; (C3) A parede de referência com ETICS (Figura 3.1(b)); (C4) Caso em que a mesma parede apresenta uma tira de CT no lado exterior; e, (C5) Que corresponde a duas tiras de CT (uma em cada lado) e ETICS.

O resumo dos casos estudados está no Quadro 4.2, assim como a espessura total de parede, para cada caso, e os valores do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) calculados no *software* Ansys.

Quadro 4.2 - Resumo dos casos estudados: materiais, espessura da parede e coeficiente de transmissão térmica superficial ( $U$ ).

Caso	ETICS	Material, número, e posição das Tiras de Corte Térmico		Espessura [cm]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
		1-Borracha reciclada de pneus	2-Compósito de borracha reciclada de pneus e aerogel		
C1	-	-	-	12.7	0.58
C2.1	-	Duas - Ambos os lados	-	14.7	0.47
C2.2	-	-	Duas - Ambos os lados	14.7	0.34
C3	<input checked="" type="checkbox"/>	-	-	18.2	0.30
C4.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Uma - Lado exterior	-	19.2	0.28
C4.2	<input checked="" type="checkbox"/>	-	Uma - Lado exterior	19.2	0.26
C5.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Duas - Ambos os lados	-	20.2	0.27
C5.2	<input checked="" type="checkbox"/>	-	Duas - Ambos os lados	20.2	0.23

A análise dos resultados comprova a melhoria no desempenho térmico das paredes em LSF com a utilização de tiras de CT. Esta melhoria é mais pronunciada nas tiras do novo material compósito de borracha e aerogel, a diferença absoluta no valor de  $U$  entre as duas tiras é de 0.13 W/ (m<sup>2</sup>·K) no caso C2, 0.02 W/ (m<sup>2</sup>·K) no caso C4 e 0.04 W/ (m<sup>2</sup>·K) no caso C5.

O aumento (em relação à referência) correspondente a duas tiras de CT na parede sem ETICS é de 20 e 41 %, já na parede com ETICS verifica-se um aumento de 10 e 23 % para a borracha e para o compósito de borracha com aerogel, respetivamente. O que demonstra, mais uma vez, a maior influência das tiras de CT numa parede sem ETICS. É também importante citar que estas percentagens incluem não só a vantagem da introdução das tiras de CT, mas também o aumento de espessura de lã mineral na caixa de ar das paredes, que leva a um duplo benefício.

Na Figura 4.9 os valores de  $U$  obtidos numericamente, são enquadrados na legislação portuguesa de desempenho térmico de edifícios. Os coeficientes de transmissão térmica superficial ( $U$ ) máximos, da envolvente opaca dos edifícios de habitação em contacto com o

exterior, em Portugal Continental, são de 0.40, 0.35 e 0.30 W/ (m<sup>2</sup> K) para as zonas climáticas I1, I2 e I3, respetivamente.

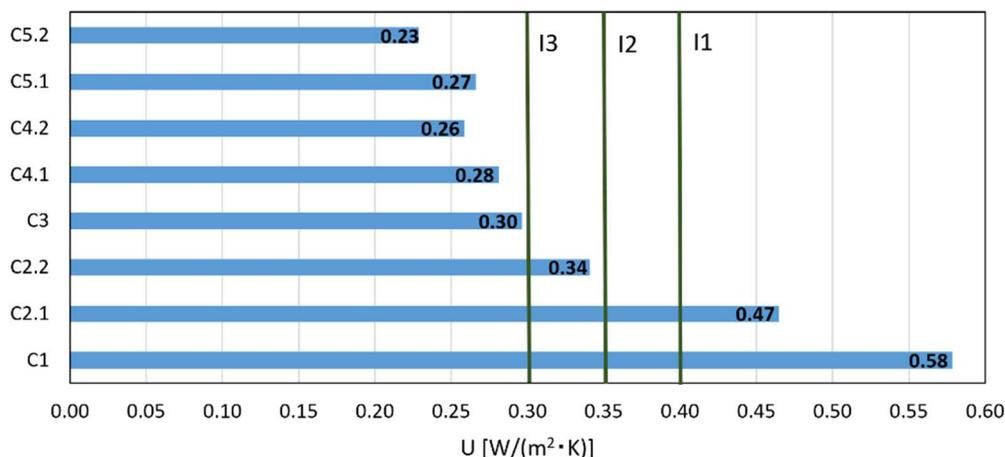


Figura 4.9 - Comparação dos coeficientes de transmissão térmica superficial ( $U$ ) das paredes em estudo com os máximos impostos na Portaria n.º 138-I/2021.

A parede sem ETICS (C1) não cumpre os requisitos impostos para o valor de  $U$ . Com a colocação de duas tiras de CT de borracha (C2.1) continua a não cumprir, mas observa-se uma melhoria de 0.11. W/ (m<sup>2</sup>·K). Para as tiras de CT do material compósito (C2.2) observa-se um aumento de 0.24 W/ (m<sup>2</sup>·K), fazendo com que esta parede apresente valores de  $U$  menores que os correspondentes às zonas I1 e I2. Este caso (C2.2), não apresentando revestimento próprio para exterior, mostra-se uma boa solução para paredes divisórias interiores com requisitos térmicos (e.g. em contacto com garagens ou corredores de circulação), nestes casos as resistências superficiais são superiores, o que corresponderia a um valor mais baixo de  $U$  que o registado.

As paredes com ETICS (C3, C4 e C5), cumprem os máximos impostos na Portaria n.º 138-I/2021. Com a aplicação de tiras de CT atingem-se valores ainda mais baixos, sendo que para a aplicação do novo material compósito atingem valores de 0.26 e 0.22 W/ (m<sup>2</sup>·K), para a colocação de uma e duas tiras de CT, respetivamente.

O benefício resultante da utilização de tiras de CT do novo material compósito de borracha e aerogel, não se traduz apenas na diminuição do valor de  $U$ . Devido à sua baixa condutibilidade térmica, a introdução destas tiras nos banzos dos perfis metálicos provoca uma diminuição do fluxo de calor, através destes, o que se traduz numa menor diferença de temperatura entre a zona do perfil e a zona da caixa de ar, eliminando o risco de condensações superficiais, como se pode observar na Figura 4.10.

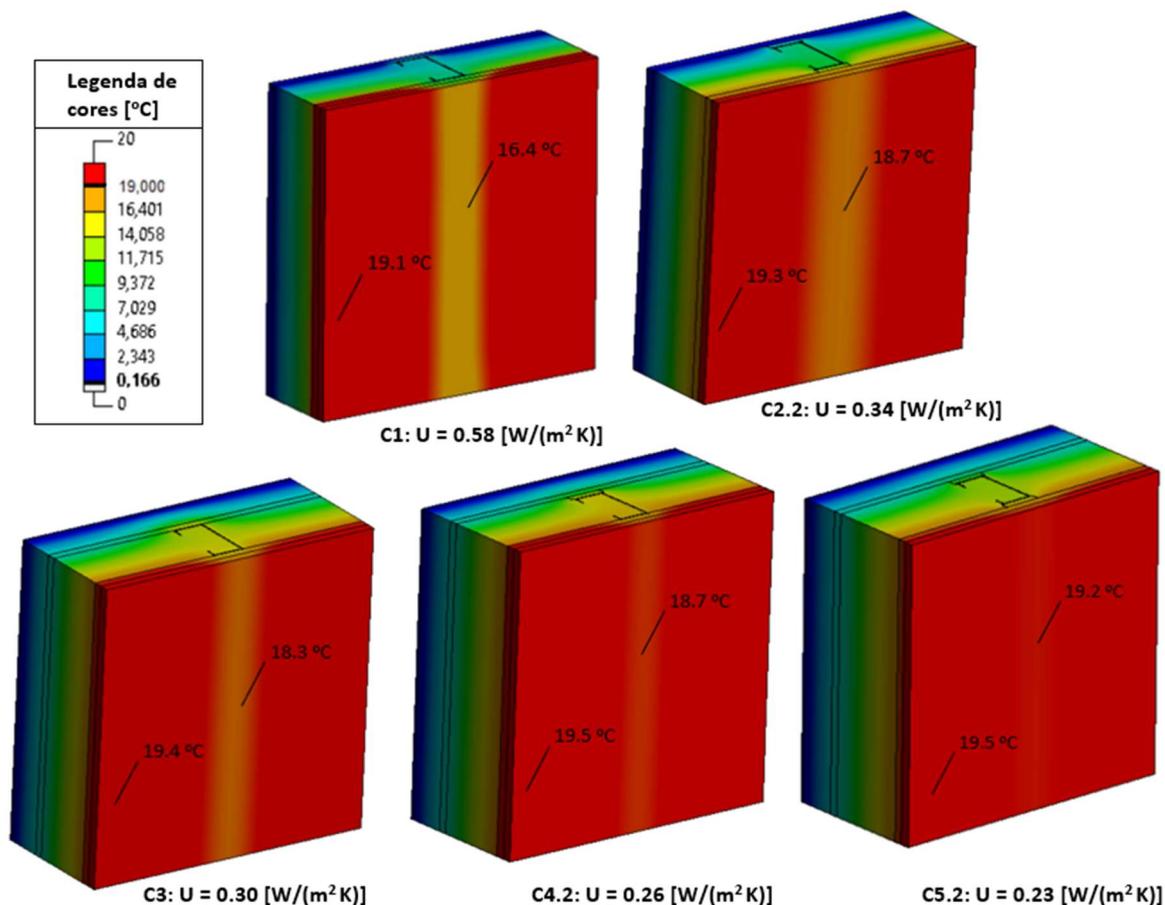


Figura 4.10 - Distribuição de temperaturas e coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) das paredes de referência, com e sem tiras de corte termico do composto de borracha reciclada e aerogel.

Na Figura 4.10 é de notar o benefício que a utilização de tiras de CT do novo material composto introduz nas paredes em LSF. O caso C1, apenas com isolamento térmico na caixa de ar, apresenta diferenças de temperaturas superficiais, no lado quente, de 2.7 °C. Com duas tiras de CT deste material (caso C2.2) a diferença passa a 0.6 °C, a temperatura na zona do perfil é 18.7 °C, maior que a registada para o caso C3 (parede com ETICS e sem tiras de CT). Neste caso (C3) a diferença de temperatura entre a zona do perfil e a zona da caixa de ar também é mais elevada, assumindo o valor de 1.1 °C. Com a introdução de uma tira de CT nesta parede a diferença de temperatura diminui para 0.8. O último caso, C5.2, apresenta a temperatura mais elevada na zona do perfil (19.2 °C) e uma diferença de temperaturas entre as zonas da caixa de ar e do perfil de apenas 0.3 °C, ou seja, a temperatura superficial interna é praticamente homogénea. Este facto, mostra que as tiras de CT deste material composto de borracha e aerogel permitem mitigar quase totalmente o efeito das pontes térmicas originados pelos perfis de aço, nas paredes em LSF.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação apresentou-se uma revisão das várias estratégias de mitigação de pontes térmicas aplicáveis a estruturas em LSF. No estudo paramétrico realizado, foram avaliadas e comparadas duas das estratégias mais eficazes para o efeito, nomeadamente, a utilização de tiras de CT e a utilização de isolamento contínuo pelo exterior. Realizou-se uma análise numérica, que decorreu sobre paredes resistentes em contacto com o exterior.

Provou-se que dois *softwares* diferentes (Therm e Ansys) apresentam valores da mesma ordem de grandeza, com diferenças não superiores a 0.5 %. Também foi demonstrado que as simulações numéricas apresentam valores muito próximos de medições realizadas em condições laboratoriais.

Os dois tipos de paredes de referência estudados (com e sem ETICS) apresentam desempenhos térmicos distintos. A parede com ETICS demonstrou ser uma boa solução para parede de fachada em contacto com exterior. A parede sem ETICS, não cumprindo os requisitos para ser colocada em contacto com o exterior, mostrou-se uma possível opção para parede divisória em contacto com espaços não uteis.

Foram também estudados dois espaçamentos diferentes entre os perfis de aço, 400 e 600 mm, este estudo confirmou que as paredes com 600 mm de afastamento apresentam melhor desempenho térmico, pois apresentam menos quantidade de aço. Devido a este facto, as estratégias de mitigação de pontes térmicas estudadas apresentam uma maior influência nas paredes com 400 mm de espaçamento entre perfis.

Confirmou-se que o isolamento contínuo pelo exterior é uma boa solução, principalmente quando composto por um material de isolamento térmico, com  $\lambda$  entre 7.5 e 30 mW/(m · K). O aumento da espessura de isolamento é mais eficaz para estes materiais, sendo que o aumento de 30 para 70 mm, nas paredes de 400 mm de afastamento entre perfis, para as condutibilidades de 7.5 e 15 e 30 mW/(m · K) resultou num aumento na resistência térmica de 5.355, 2.701 e 1.377 (m<sup>2</sup> · K)/W, respetivamente. No isolamento de 60 e 120 mW/(m · K) o aumento foi bastante inferior, sendo 0.712 e 0.368 (m<sup>2</sup> · K)/W, respetivamente.

Em relação à influência das dimensões das tiras de CT no desempenho térmico das paredes, observou-se que é mais eficaz aumentar a espessura que a largura das tiras. Para todos os casos estudados ficou demonstrado que aumentar 2.5 mm a espessura é mais eficaz que aumentar 10

mm a largura. Este facto é justificado pelo conseqüente aumento da espessura total da parede, que resulta num aumento de resistência térmica. O melhor desempenho foi conseguido nas tiras de CT com 15 mm de espessura e 50 mm de largura. Como era de esperar, foi também observado, que duas tiras de corte térmico conduzem a uma maior mitigação do efeito de ponte térmica, comparando com a utilização de apenas uma. A influência das tiras de corte térmico é mais notável nas paredes sem ETICS, pois com a utilização de ETICS o efeito das pontes térmicas originadas pelo aço já se encontra mitigado.

A condutibilidade térmica dos materiais constituintes das tiras de CT é também um fator preponderante no seu desempenho térmico. Demonstrou-se que quanto menor a condutibilidade das tiras maior a sua eficiência. Aumentar a espessura das tiras de CT é tanto melhor quanto menor for a sua condutibilidade, ainda assim se verificou que para todas as condutibilidades estudadas o aumento da espessura resulta sempre num acréscimo de resistência térmica das paredes. Já aumentar a largura apenas se verificou eficiente para materiais com condutibilidades menores a  $30 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Sendo que para valores de  $30 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  as larguras de 30 e 70 mm apresentam praticamente a mesma resistência térmica. Para valores de condutibilidade superiores a  $30 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  verificou-se que aumentar a largura das tiras de CT faz reduzir a resistência térmica das paredes.

Comparando as duas soluções, ETICS e tiras de CT, ficou claro que a utilização do ETICS para materiais de baixa condutibilidade conduz a valores mais elevados de resistência térmica. Para a utilização de materiais na ordem de grandeza de  $30 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  os resultados entre ETICS e tiras de CT são semelhantes. Pelo facto do ETICS conduzir a um aumento da inércia térmica dos edifícios e pela facilidade de aplicação (é mais prática a aplicações contínua pelo exterior que colocar tiras de CT em todos os banzos dos perfis da estrutura) conclui-se que é uma solução que deve ser sempre utilizada nas paredes exteriores em LSF. A utilização conjunta das duas soluções, apesar de aumentar a espessura da parede, conduz a desempenhos térmicos bastante superiores, sendo uma alternativa recomendada para atingir altos índices de isolamento nos edifícios em LSF.

Por último avaliou-se a eficácia de tiras de CT constituídas por materiais provenientes da reciclagem da borracha de pneus em fim de vida. Ficou demonstrado que para os dois materiais estudados, o coeficiente de transmissão térmica superficial diminui, o material compósito de borracha e aerogel apresentou melhores resultados, o que confirma o benefício térmico da adição de aerogel à borracha reciclada de pneus. Para duas tiras de CT, deste material, na parede sem ETICS observou-se uma diminuição de  $0.24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , enquanto para a parede com ETICS o aumento foi inferior,  $0.07 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Esta melhoria no valor de  $U$  corresponde a uma menor perda de calor pela envolvente, e por sua vez um aumento na eficiência energética dos

edifícios em LSF. Também se verificou, na parede com ETICS, que com duas tiras de CT do compósito de borracha reciclada e aerogel, as temperaturas superficiais, na zona do perfil e na zona da caixa de ar, são praticamente homogêneas, com apenas 0.3 °C de diferença.

Comprova-se assim, que as duas estratégias de minimização de pontes térmicas avaliadas são bastante eficientes, sendo que, como era de esperar, quanto maior a espessura e menor a condutibilidade térmica, do isolamento contínuo pelo exterior e/ou das tiras de CT, melhor o desempenho térmico das paredes LSF.

No decorrer desta dissertação, ficou bem presente que as paredes em LSF apresentam valores baixos de  $U$ , principalmente quando têm ETICS. Estes valores são ainda mais notáveis devido à reduzida espessura destas paredes, note-se que a parede exterior estudada, com ETICS (50 mm de EPS e 5 mm de acabamento) e duas tiras de corte térmico do material compósito de borracha e aerogel, apresenta um  $U$  de 0.23 W/(m<sup>2</sup>·K) para uma espessura de apenas 20.2 cm. Estes baixos valores de  $U$  são fundamentais para manter o conforto térmico dos edifícios sem grandes gastos de energia, enquanto a reduzida espessura potencia a área útil de construção.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Com o objetivo de prosseguir o trabalho desenvolvido na presente dissertação, apresentam-se algumas sugestões de futuros:

Realizar modelos 3D mais complexos onde se avalie a influência da presença de tiras de CT nos perfis metálicos utilizados no contraventamento das estruturas em LSF.

Validar os resultados obtidos, no Capítulo 4, com recurso a métodos experimentais, em condições controladas.

Validar experimentalmente se a condutibilidade da lã mineral se pode considerar constante com o aumento do volume.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 2fcs@ (2022). <https://doisfcs.com/doisfcs-portfolio-arquitecto>. Consultado em: 25/05/2022.
- Adene. (2021). “Manual SCE - Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios.” Adene. Portugal.
- ANSYS Workbench. (2018). Software version 19.1. ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA. [www.ansys.com/products](http://www.ansys.com/products).
- ASHRAE. (2017). “*Handbook of Fundamentals (SI Edition)*”. ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2017.
- Atsonios, I. A., Mandilaras, I. D., Kontogeorgos, D. A., e Founti, M. A. (2018). “*Two new methods for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance of cold frame lightweight steel-framed walls*”. *Energy and Buildings*, 170, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.069>
- Bragança, L., Vieira, S. M., e Andrade, J. B. (2014). “*Early stage design decisions: The way to achieve sustainable buildings at lower costs*”. *The Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/365364>
- Chapra, S. C., e Canale, R. P. (2008). “*Métodos numéricos para engenharia*.” Quinta edição. McGraw-Hill. New York, USA.
- Commission on Environment, W. (1987). “*Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Towards Sustainable Development*” 2. Part II. Common Challenges Population and Human Resources 4.
- cort@rtec.@(2022). <https://cortartec.net/produtos/estruturas/isoladores-de-corte-termico>. Consultado em: 25/05/2022.
- Despacho nº 8745. (2020). Diário da República, 2.a série. Nº 178 de 11 de setembro de 2020.
- Durães, L., Mendes, A., Pontinha, A., e Santos, P. (2022). “*Fibre-reinforced aerogel composites from mixed silica and rubber sols and a method to produce the rubber-silica aerogel composites*” (Patent No. PCT/IB2022/050094). WIPO - World Intellectual Property Organization.
- EU. (2002). Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios.
-

- 
- EU. (2010). Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios.
- EU. (2018a). Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings and on energy efficiency.
- EU. (2018b). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. Official Journal of the European Union, 2018(L 328), 82–209.
- EU. (2022). Legislation in Progress Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast).
- European Commission. (2022). REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_3131](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131)
- European Commission – Department: Energy. (2020). Energy efficiency in buildings.
- Ferreira, M. (2014). “O sistema construtivo com estrutura leve em aço”. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciência e Tecnologia Universidade de Coimbra.
- FUTURENG. @ (2022). <http://www.futureng.pt/materiais>. Consultado em: 01/06/2022.
- Gervásio, H., Santos, P., Martins, R., e Simões da Silva, L. (2014). “*A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design*”. Building and Environment. 73, 256–270. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.015>
- Global CCS. (2021). Global Status Report 2021.
- Gomes, F. (2019). “Modelos de Elementos Finitos na Análise de Problemas Termomecânicos”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Técnico Lisboa.
- Gorgolewski, M. (2007). “*Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing*.” Building and Environment. 42(1), 230–236.
- Gyptec Ibérica. (2022). Technical Sheet: Standard Gypsum Plasterboard. [https://www.gyptec.eu/documentos/Ficha\\_Tecnica\\_Gyptec\\_A.pdf](https://www.gyptec.eu/documentos/Ficha_Tecnica_Gyptec_A.pdf)
- Höglund, T., e Burstrand, H. (1998). “*Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls*”. In Thin-Walled Structures (Vol. 32). www.sbi.se
- Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T., e Lavine, A. (2007). “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”. Sixth Edition. John Wiley & Sons, Inc. USA.
-

- 
- ISO 6946. (2017). “*Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation methods*”. International Organization for Standardization.
- ISO 9869-1. (2014). “*Thermal insulation – Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance. Part 1: Heat flow meter method*”.
- ISO 10211. (2017). “*Thermal bridges in building construction-Heat flows and surface temperatures*”.
- ITeCons. (2011). “Catálogo de Pontes Térmicas Lineares”. Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico Em Ciências de Construção, Coimbra. <https://www.itecons.uc.pt/catalogoptl/index.php?module=catlg>
- ITeCons. (2012). Test report HIG 363/12 - Determination of Thermal Resistance.
- Kalamees, T. (2007). “*Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia*”. *Building and Environment*, 42(6), 2369–2377.
- Kheiri, F. (2018). “*A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design*”. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 92, pp. 897–920). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080>
- Koher, N., e Moffatt, S. (2003). “*Life-cycle analysis of the built environment*”. *Industry and Environment*. 26(2–3), 17–21. <https://www.researchgate.net/publication/279711810>
- Kosny, J., e Christian, J. E. (1995). “*Thermal evaluation of several configurations of insulation and structural materials for some metal stud walls*”. *Energy and Buildings*, 22(2), 157–163. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(94\)00913-5](https://doi.org/10.1016/0378-7788(94)00913-5)
- Kosny, J., Christian, J. E., Barbour, J., e Goodrow, J. (1994). “*Thermal Performance of Steel Framed Walls*”. Oak Ridge National Laboratory. USA.
- Kronospan. (2022). Technical Sheet: Kronobuild Materials. <https://de.kronospan-express.com/public/files/downloads/kronobuild/kronobuild-en.pdf>
- Lawson. (2009). “Sustainability of steel in housing and residential buildings”. The Steel Construction Institute, SCI Publication P370. [www.steel-sci.org](http://www.steel-sci.org)
- LNEC. (2015). Documento de Homologação: Tincoterm EPS - Sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior. <http://www.lnec.pt/fotos/editor2/tincoterm-eps-sistema-co-1.pdf>
- Lohmann, V., & Santos, P. (2020). “*Trombe wall thermal behavior and energy efficiency of a light steel frame compartment: Experimental and numerical assessments*”. *Energies*. MDPI,13(11). <https://doi.org/10.3390/en13112744>
-

- LSK. (2005). European Lightweight Steel-framed Construction. Arcelor.
- MAGOXX®. (2022). <https://mgoboard.pt>. Consultado em: 03/06/2022.
- Martins, C. (2020). “HOT-BOX APPARATUS DESIGN AND CONSTRUCTION FOR THE DETERMINATION OF THERMAL PERFORMANCE OF BUILDING ELEMENTS”. Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Martins, C., Santos, P., e da Silva, L. S. (2016). “Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: A parametric study”. *Journal of Building Physics*, 39(4), 342–372. <https://doi.org/10.1177/1744259115572130>
- Moreira, M. (2012). “Utilização de Perfis Enformados a Frio em Obras de Reabilitação Construção e Reabilitação”. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Construção e Reabilitação, Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Nagy, B. (2014). “Comparative analysis of multi-dimensional heat flow modeling Optimisation of buildings and building elements from life cycle and building physics perspective based on complex numeric modelling”. <https://doi.org/10.13140/2.1.2666.4003>
- Pepper, D., & Heinrich, J. (2017). “The Finite Element Method Basic Concepts and Applications with MATLAB®”. MAPLE, and COMSOL (3. ed). CRC Press.
- 3D. (2022). <https://rocks3dholding.com>. Consultado em: 06/06/2022.
- Roque, E., e Santos, P. (2017). “The effectiveness of thermal insulation in lightweight steel-framed walls with respect to its position.” *Buildings*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/buildings7010013>
- Roque, E., Santos, P., e Pereira, A. C. (2019). “Thermal and sound insulation of lightweight steel-framed façade walls”. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(2), 156–176. <https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1506677>
- Rosa, N., Soares, N., Costa, J., Santos, P., e Gervásio, H. (2020). “Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate”. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100649>
- Santos, B. (2018). “Pontes Térmicas Lineares em Edifícios com Estrutura Metálica leve (LSF): Ligação parede-parede”. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciência e Tecnologia Universidade de Coimbra.
- Santos, C., e Matias, L. (2006). ITE50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal.

- 
- Santos, P. (2017). “*Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings*”. In *Energy Efficient Buildings*. InTech. <https://doi.org/10.5772/66136>
- Santos, P., e Aroso, B. (2019). “O Sistema Construtivo em LSF”. *Materiais de Construção* (APCMC – Associação Portuguesa Dos Comerciantes de Materiais de Construção), 187(Ano XXXV), 50–58.
- Santos, P., Gervásio, H., Simões da Silva, L., e Lopes, A. G. (2011). “*Influence of climate change on the energy efficiency of light-weight steel residential buildings*”. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 28(4), 325–352. <https://doi.org/10.1080/10286608.2011.637624>
- Santos, P., Lemes, G., e Mateus, D. (2020). “*Analytical methods to estimate the thermal transmittance of LSF walls: Calculation procedures review and accuracy comparison*”. In *Energies* (Vol. 13, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en13040840>
- Santos, P., Martins, C., da Silva, L. S., e Bragança, L. (2014). “*Thermal performance of lightweight steel framed wall: The importance of flanking thermal losses*”. *Journal of Building Physics*, 38(1), 81–98. <https://doi.org/10.1177/1744259113499212>
- Santos, P., Martins, C., e Simões Da Silva, L. (2014). “*Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems*”. *Metallurgical Research and Technology*, 111(6), 329–338. <https://doi.org/10.1051/metal/2014035>
- Santos, P., e Mateus, D. (2020). “*Experimental assessment of thermal break strips performance in load-bearing and non-load-bearing LSF walls*”. *Journal of Building Engineering*, 32, 101693. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101693>
- Santos, P., e Poologanathan, K. (2021). “*The importance of stud flanges size and shape on the thermal performance of lightweight steel framed walls*”. *Sustainability* (Switzerland), 13(7), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su13073970>
- Santos, Paulo., Silva, L. S. da., e Ungureanu, V. (2012). “*Energy efficiency of light-weight steel-framed buildings*”. *European Convention for Constructional Steelwork (ECCS)*.
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V., e Varun. (2011). “*Life cycle assessment of buildings: A review*”. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 1, pp. 871–875). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.008>
- Silvestre, N., Pires, J., e Santos, A. (2013). “Manual de Conceção de Estruturas e Edifícios em LSF-Light Steel Framing” (1a). CMM. Portugal.
- Simões, N. (2015). *Apontamentos da disciplina Comportamento Térmico e Energético de Edifícios*, 2015. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
-

- Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R., e Santos, P. (2013). “*Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency*”. In *Energy and Buildings* (Vol. 59, pp. 82–103). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>
- Soares, N., Martins, C., Gonçalves, M., Santos, P., da Silva, L. S., e Costa, J. J. (2019). “*Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review*”. In *Energy and Buildings* (Vol. 182, pp. 88–110). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.021>
- Soares, N., Santos, P., Gervásio, H., Costa, J. J., e Simões da Silva, L. (2017). “*Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review*”. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 78, pp. 194–209). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>
- THERM. (2017). Software version 7.6.1 (7.6.1). Lawrence Berkeley National Laboratory, United States Department of Energy. <https://windows.lbl.gov/software/therm>
- ThermaChannel. (2018). Website “ThermaChannel - Energy-Efficient Steel Framing”: [www.thermachannel.com](http://www.thermachannel.com).
- ThermaCool. (2017). Website “ThermaCool Phase Change Technology”: <http://therma.cool>.
- TreeHugger. (2018). Website “TreeHugger – Making Sustainability Sexy”: [www.treehugger.com](http://www.treehugger.com).
- Tyre4BuildIns. (2022). Research project Tyre4BuildIns - “*Recycled tyre rubber resin-bonded for building insulation systems towards energy efficiency.*” <https://tyre4buildins.dec.uc.pt>.
- Veljkovic, M., e Johansson, B. (2007). “*Light steel framing for residential buildings*”. *Thin-Walled Structures*, 44(12), 1272–1279. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.01.006>
- Verbeke, S., e Audenaert, A. (2018). “*Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use*”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2300–2318. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.08.083>
- Volcalis. (2022). Technical Sheet: Alpha Mineral Wool. [https://www.volcalis.pt/categoria\\_file\\_docs/fichatecnica\\_volcalis\\_alpharollo-386.pdf](https://www.volcalis.pt/categoria_file_docs/fichatecnica_volcalis_alpharollo-386.pdf)
- WEBERTHERM UNO. (2018). Technical sheet: Weber Saint-Gobain ETICS finish mortar. Saint-Gobain Weber Portugal, S.A. [www.pt.weber/files/pt/2019-04/FichaTecnica\\_weberthermuno.pdf](http://www.pt.weber/files/pt/2019-04/FichaTecnica_weberthermuno.pdf)
- World Meteorological Organization. (2019). “*GREENHOUSE GAS BULLETIN*”. (15). World Meteorological Organization.

## ANEXO A - Resultados: Parede sem ETICS (1 tira de CT)

Quadro A.1 - Parede LSF sem ETICS com uma tira de corte térmico.

$\lambda$ [mW/(m·K)]	50 mm de largura			10 mm de espessura		
	Espessura [mm]	$R$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W]		Largura [mm]	$R$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W]	
		400 mm de espaçamento	600 mm de espaçamento		400 mm de espaçamento	600 mm de espaçamento
7.5	5	2.140	2.375	30	2.207	2.459
	7.5	2.286	2.508	40	2.301	2.536
	10	2.410	2.621	50	2.410	2.621
	12.5	2.521	2.725	60	2.473	2.670
	15	2.625	2.822	70	2.521	2.706
15	5	1.987	2.250	30	2.140	2.405
	7.5	2.127	2.379	40	2.193	2.448
	10	2.248	2.493	50	2.248	2.493
	12.5	2.359	2.597	60	2.278	2.517
	15	2.462	2.695	70	2.298	2.533
30	5	1.846	2.129	30	2.049	2.329
	7.5	1.961	2.240	40	2.058	2.336
	10	2.066	2.343	50	2.066	2.343
	12.5	2.165	2.439	60	2.070	2.346
	15	2.259	2.531	70	2.073	2.348
60	5	1.738	2.035	30	1.947	2.241
	7.5	1.821	2.119	40	1.923	2.220
	10	1.901	2.201	50	1.901	2.201
	12.5	1.979	2.282	60	1.891	2.192
	15	2.056	2.360	70	1.885	2.187
120	5	1.667	1.970	30	1.855	2.161
	7.5	1.722	2.031	40	1.813	2.123
	10	1.778	2.092	50	1.778	2.092
	12.5	1.834	2.153	60	1.760	2.076
	15	1.890	2.214	70	1.750	2.067

## ANEXO B - Resultados: Parede sem ETICS (2 tiras de CT)

Quadro B.1 - Parede LSF sem ETICS com duas tiras de corte térmico.

$\lambda$ [mW/(m·K)]	50 mm de largura			10 mm de espessura		
	Espessura [mm]	$R$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W]		Largura [mm]	$R$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W]	
		400 mm de espaçamento	600 mm de espaçamento		400 mm de espaçamento	600 mm de espaçamento
7.5	5	2.569	2.743	30	2.727	2.934
	7.5	2.818	2.966	40	2.873	3.045
	10	3.034	3.162	50	3.034	3.162
	12.5	3.232	3.345	60	3.125	3.228
	15	3.419	3.520	70	3.194	3.277
15	5	2.332	2.560	30	2.620	2.852
	7.5	2.576	2.784	40	2.704	2.917
	10	2.791	2.983	50	2.791	2.983
	12.5	2.990	3.169	60	2.837	3.019
	15	3.177	3.345	70	2.870	3.043
30	5	2.096	2.368	30	2.470	2.733
	7.5	2.306	2.569	40	2.485	2.745
	10	2.499	2.756	50	2.499	2.756
	12.5	2.681	2.933	60	2.506	2.761
	15	2.856	3.102	70	2.510	2.765
60	5	1.904	2.203	30	2.297	2.591
	7.5	2.061	2.364	40	2.253	2.554
	10	2.213	2.521	50	2.213	2.521
	12.5	2.363	2.673	60	2.194	2.504
	15	2.508	2.822	70	2.183	2.494
120	5	1.769	2.084	30	2.134	2.452
	7.5	1.877	2.203	40	2.055	2.383
	10	1.986	2.323	50	1.986	2.323
	12.5	2.095	2.442	60	1.950	2.290
	15	2.204	2.561	70	1.928	2.271

## ANEXO C - Resultados: Parede com ETICS (1 tira de CT)

Quadro C.1 - Parede LSF com ETICS e uma tira de corte térmico.

$\lambda$ [mW/(m·K)]	50 mm de largura			10 mm de espessura		
	Espessura [mm]	$R$ [(m <sup>2</sup> ·K) /W]		Largura [mm]	$R$ [(m <sup>2</sup> ·K) /W]	
		400 mm de espaçamento	600 mm de espaçamento		400 mm de espaçamento	600 mm de espaçamento
7.5	5	3.604	3.842	30	3.675	3.932
	7.5	3.730	3.955	40	3.750	3.989
	10	3.842	4.057	50	3.842	4.057
	12.5	3.946	4.151	60	3.897	4.098
	15	4.045	4.245	70	3.939	4.129
15	5	3.495	3.759	30	3.627	3.895
	7.5	3.607	3.862	40	3.666	3.925
	10	3.710	3.959	50	3.710	3.959
	12.5	3.808	4.049	60	3.735	3.977
	15	3.902	4.139	70	3.752	3.990
30	5	3.403	3.688	30	3.564	3.848
	7.5	3.492	3.774	40	3.570	3.852
	10	3.577	3.857	50	3.577	3.857
	12.5	3.660	3.936	60	3.580	3.859
	15	3.741	4.018	70	3.582	3.861
60	5	3.337	3.637	30	3.500	3.797
	7.5	3.402	3.704	40	3.484	3.784
	10	3.467	3.771	50	3.467	3.771
	12.5	3.531	3.837	60	3.458	3.764
	15	3.596	3.905	70	3.452	3.760
120	5	3.293	3.603	30	3.447	3.755
	7.5	3.341	3.656	40	3.417	3.732
	10	3.389	3.710	50	3.389	3.710
	12.5	3.437	3.762	60	3.372	3.697
	15	3.486	3.818	70	3.361	3.687

## ANEXO D - Resultados: Parede com ETICS (2 tiras de CT)

Quadro D.1 - Parede LSF com ETICS e duas tiras de corte térmico.

$\lambda$ [mW/(m·K)]	50 mm de largura			10 mm de espessura		
	Espessura [mm]	$R$ [(m <sup>2</sup> ·K) /W]		Largura [mm]	$R$ [(m <sup>2</sup> ·K) /W]	
		400 mm de espaçamento	600 mm de espaçamento		400 mm de espaçamento	600 mm de espaçamento
7.5	5	4.001	4.175	30	4.167	4.373
	7.5	4.235	4.383	40	4.296	4.468
	10	4.444	4.572	50	4.444	4.572
	12.5	4.638	4.751	60	4.530	4.633
	15	4.823	4.925	70	4.597	4.679
15	5	3.805	4.031	30	4.077	4.307
	7.5	4.024	4.231	40	4.149	4.360
	10	4.224	4.415	50	4.224	4.415
	12.5	4.413	4.592	60	4.266	4.446
	15	4.594	4.763	70	4.295	4.466
30	5	3.626	3.895	30	3.957	4.217
	7.5	3.807	4.068	40	3.968	4.226
	10	3.981	4.235	50	3.981	4.235
	12.5	4.147	4.398	60	3.986	4.240
	15	4.311	4.557	70	3.990	4.243
60	5	3.488	3.788	30	3.826	4.118
	7.5	3.625	3.928	40	3.792	4.092
	10	3.760	4.067	50	3.760	4.067
	12.5	3.895	4.205	60	3.743	4.054
	15	4.028	4.342	70	3.733	4.045
120	5	3.394	3.714	30	3.710	4.027
	7.5	3.494	3.824	40	3.650	3.980
	10	3.594	3.936	50	3.594	3.936
	12.5	3.695	4.048	60	3.562	3.910
	15	3.797	4.160	70	3.541	3.894

## ANEXO E - Resultados: ETICS (espessura e condutibilidade)

Quadro E.1 - Parede LSF com isolamento contínuo pelo exterior de espessura e condutibilidade térmica variável.

ETICS $\lambda$ [mW/(m <sup>o</sup> C)]	Espessura [mm]	R [(m <sup>2</sup> ·oC) /W]	
		400 mm de espaçamento	600 mm de espaçamento
7.5	30	5.905	6.200
	40	7.248	7.542
	50	8.587	8.885
	60	9.924	10.223
	70	11.260	11.560
15	30	3.860	4.153
	40	4.543	4.836
	50	5.219	5.515
	60	5.891	6.189
	70	6.561	6.862
30	30	2.801	3.093
	40	3.153	3.445
	50	3.498	3.794
	60	3.839	4.137
	70	4.178	4.477
60	30	2.233	2.526
	40	2.418	2.711
	50	2.597	2.893
	60	2.772	3.070
	70	2.945	3.244
120	30	1.922	2.215
	40	2.018	2.311
	50	2.111	2.407
	60	2.202	2.499
	70	2.290	2.589