



Bruno Miguel Carvalho Santos

# PONTES TÉRMICAS LINEARES EM EDIFÍCIOS COM ESTRUTURA METÁLICA LEVE (LSF): LIGAÇÃO PAREDE-PAREDE

LINEAR THERMAL BRIDGES IN LIGHTWEIGHT STEEL FRAMING BUILDINGS —  
WALL TO WALL CONNECTION

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

Coimbra, 7 de Setembro de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Bruno Miguel Carvalho Santos

# **PONTES TÉRMICAS LINEARES EM EDIFÍCIOS COM ESTRUTURA METÁLICA LEVE (LSF): LIGAÇÃO PAREDE-PAREDE**

## **LINEAR THERMAL BRIDGES IN LIGHTWEIGHT STEEL FRAMING BUILDINGS — WALL TO WALL CONNECTION**

Dissertação de Mestrado Integrado 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.

Coimbra, 7 de Setembro de 2018

## RESUMO

Nos últimos anos a crise ambiental/energética tem vindo a revelar-se como um dos mais complexos problemas que o Homem enfrenta. O setor da construção é um dos setores com maior impacto no meio ambiente e, por isso, tem vindo a ser alvo de regulamentação e a adaptar-se através da criação de novas soluções e da mudança de práticas, que influenciam atividades diversas desde a extração de matérias primas ao consumo de energia em edifícios.

O sistema construtivo com estrutura leve em aço enformado a frio (LSF) apresenta-se como uma solução com enorme potencial para atingir um elevado nível de sustentabilidade. A matéria prima principal, o aço, é 100% reciclável e confere várias vantagens aos edifícios construídos em LSF, tais como a excelente relação peso – resistência estrutural, a simplificação de processos construtivos e a análise favorável de custo – benefício. Sucede, porém, que a alta condutibilidade térmica do aço pode limitar o desempenho térmico destes edifícios. As pontes térmicas criadas pelos perfis deste material revelam-se determinantes na caracterização térmica da envolvente e, por consequência, nas necessidades energéticas operacionais do edifício.

No decorrer deste trabalho serão abordadas estas pontes térmicas, especialmente, as pontes térmicas lineares. Irá ser realizado uma análise que determina a influência da posição do isolamento térmico, a espessura do isolamento e a existência de perfis de aço no desempenho térmico de uma ponte térmica linear. Esta ponte térmica é a ligação entre duas paredes exteriores. Foi utilizado o método dos elementos finitos, com recurso ao programa *Therm*.

**Palavras-chave:** Lightweight Steel Framing; LSF; ponte térmica linear; eficiência do isolamento térmico; desempenho térmico.

## ABSTRACT

In the last years the environmental/energy crisis has revealed itself as one of the most complex problems the human race has to face. The building sector is one of the sectors with the highest impact on the environment, that is why it has been the aim of regulations and it has been adapting itself through the creation of new solutions and change of practices, that influences different activities from raw material extraction to buildings energy consumption.

The Lightweight Steel Framing (LSF) construction is a solution with enormous potential to achieve a high level of sustainability. The main raw material, steel, is 100% recyclable and ensures various advantages to the LSF constructed buildings, such as an excellent weight to structural strength ratio, the simplification of building processes and the favorable cost – benefit analysis. Although, the steel's high thermal conductivity limits the thermal performance of these buildings. Thermal bridges are created by the steel profiles and they have been deemed determinant on the envelope's thermal characterization, therefore on the building's operational energy demand.

These thermal bridges will be approached throughout this work, especially the linear thermal bridges. It will be made an analysis that determines the influence of the thermal insulation position, the insulation thickness and the existence of steel profiles on the thermal performance of a linear thermal bridge. This analysis will focus on a connection between two façade walls. The finite element method will be used through the software *Therm*.

**Keywords:** Lightweight Steel Framing; LSF; linear thermal bridge; thermal insulation efficiency; thermal performance.



## ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação .....	1
1.2 Objetivo .....	2
1.3 Estrutura da Dissertação .....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 A Crise Ambiental e Energética .....	3
2.1.1 Caracterização e o Impacto da Indústria da Construção.....	4
2.1.2 Panorama Nacional.....	6
2.2 Enquadramento Legislativo .....	7
2.3 Caracterização Térmica de Edifícios .....	8
2.3.1 Processos de Troca de Calor.....	9
2.3.2 A Transmissão de Calor em Edifícios .....	11
2.3.3 Pontes Térmicas.....	14
2.4 O Sistema Construtivo LSF - <i>Lightweight Steel Framing</i> .....	16
2.4.1 História e Origem .....	17
2.4.2 Materiais de Construção .....	18
2.4.3 Vantagens e Desvantagens .....	21
2.4.4 Desempenho Térmico.....	22
3 CASO DE ESTUDO .....	26
3.1 Objetivo e Enquadramento .....	26
3.1.1 Definição da PTL em Estudo .....	27
3.2 Metodologia.....	29
3.2.1 Definição do Modelo Geométrico .....	31
3.2.2 Definição de Materiais e das Condições de Fronteira .....	33
3.2.3 Verificação do Método .....	35
3.3 Apresentação de Resultados e Discussão .....	38
3.3.1 Sistema Frio.....	38

---

3.3.2 Sistema Quente .....	41
3.3.3 Sistema Híbrido .....	43
3.4 Discussão Final.....	46
3.4.1 Enquadramento dos Resultados.....	47
4 Conclusões.....	50
4.1 Trabalhos Futuros .....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52
ANEXOS	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Influência das decisões de projeto nos impactos e custos de um edifício médio Europeu e Norte Americano (Kohler and Moffatt, 2003). .....	5
Figura 2.2 - Fluxo de calor 1D (Freitas, 2007). .....	12
Figura 2.3 - Exemplo de uma ponte térmica na ligação de duas paredes de um edifício em betão armado com isolamento pelo exterior. a) Linhas isotérmicas. b) Linhas de fluxo de calor (Piló, 2012). .....	14
Figura 2.4 - PTP provocada por um pilar de betão armado inserido numa parede de alvenaria (Freitas, 2007). .....	15
Figura 2.5 - Estrutura de uma moradia unifamiliar construída com o sistema LSF (Futureng, 2018e). .....	17
Figura 2.6 - Tipos de cortes transversais dos perfis mais utilizados em LSF (LSK, 2005). ....	19
Figura 2.7 - Aplicação de placas de revestimento: (a) placas OSB no exterior; (b) placas de gesso cartonado no interior (Futureng, 2018e). .....	20
Figura 2.8 - Representação de uma união com parafusos em LSF (LSK, 2005). .....	20
Figura 2.9 - Classificação de sistemas LSF, distribuição de temperaturas. (a) Construção fria; (b) Construção híbrida; (c) Construção quente (Atsonios et al., 2018). .....	23
Figura 2.10 - Medidas de mitigação de pontes térmicas: (a) Redução da massa de aço; (b) Redução da área de contacto entre aço e revestimento; (c) Elemento de corte térmico; (d) Fitas de borracha entre perfil e revestimento (Santos et al., 2014a). .....	25
Figura 3.11 - Pormenor construtivo da ligação entre duas paredes (Futureng, 2018d). .....	27
Figura 3.12 - Dimensões do perfil C 150 x 2 mm. .....	28
Figura 3.13 – Representação da junção entre duas paredes exteriores em estudo. ....	28
Figura 3.14 – Modelo base geométrico com LSF. ....	32
Figura 3.15 - Modelo base geométrico sem LSF. ....	33
Figura 3.16 - Modelos base geométricos utilizados no cálculo de (a) $U1, LSF$ e (b) $U2, LSF$ . ..	33
Figura 3.17 - Distribuição de temperaturas obtida no caso de teste 1 da norma EN ISO 10211. ....	36
Figura 3.18 - Distribuição de temperaturas e taxa de transferência de calor obtidos no caso de teste 2 da norma EN ISO 10211. ....	36
Figura 3.19 - Distribuição de temperaturas e taxa de transferência de calor obtidos no cálculo de $UHOM, H3$ . .....	37
Figura 3.20 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 1 no sistema frio. .	39
Figura 3.21 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 2 no sistema frio. .	39
Figura 3.22 - Coeficientes de transmissão térmica linear das PTL's do sistema frio. ....	40

---

Figura 3.23 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 1 no sistema quente. ....	41
Figura 3.24 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 2 no sistema quente. ....	42
Figura 3.25 - Coeficientes de transmissão térmica linear das PTL's do sistema quente. ....	42
Figura 3.26 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 1 no sistema híbrido. ....	44
Figura 3.27 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 2 no sistema híbrido. ....	44
Figura 3.28 - Coeficientes de transmissão térmica linear das PTL's do sistema híbrido. ....	45
Figura 3.29 - Coeficientes de transmissão térmica linear das PTL's. ....	46

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Resumo de ligações em estudo e definição das espessuras das várias camadas.	29
Quadro 3.2 - Quadro resumo dos coeficientes de condutibilidade térmica.....	34
Quadro 3.3 - Quadro resumo da resistência térmica e dos coeficientes de condutibilidade térmica da caixa de ar. ....	34
Quadro 3.4 - Quadro resumo das condições de fronteira. ....	35
Quadro 3.5 – Quadro resumo do enquadramento dos valores de $\Psi_{LSF}$ .....	48
Quadro 3.6 - Fatores de temperatura superficial das PTL's.....	49

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e Motivação

A crise ambiental é reconhecida, atualmente, como um problema à escala global e apresenta-se como um dos mais complexos que o Homem tem de enfrentar. O reconhecimento deste problema ocorreu na década de 70 e, desde então têm-sido realizados estudos e criadas medidas com o objetivo de mitigar os avanços desta crise e consequentes efeitos. Apesar disto, este processo tem-se revelado algo lento, especialmente, pela necessidade de regulamentação e mudança de práticas em setores com um maior impacto no meio ambiente. As pressões políticas e socioeconómicas também se revelaram um entrave ao alcance deste objetivo.

Um dos setores com maior peso na catalisação desta crise, é o setor da construção. Com efeito a extração de matérias primas, o elevado consumo de energia, a produção de resíduos e o ritmo desmedido de construção, têm vindo a revelar-se altamente prejudiciais ao meio ambiente. No entanto, a construção também se afirma como um dos setores de maior relevo na economia mundial, pelo que se revela premente a aplicação de medidas cada vez mais sustentáveis.

Posto isto, e tendo em conta a crescente demanda pelo conforto e qualidade de vida, o setor da construção tem vindo a adaptar-se com a implementação de soluções alternativas e mais sustentáveis. O sistema construtivo com estrutura leve em aço: Lightweight Steel Framing (LSF) tem vindo a afirmar-se como uma destas soluções. Este tipo de construção utiliza um esqueleto estrutural composto por perfis de aço galvanizado e enformado a frio, o que confere ao edifício uma excelente relação entre peso e resistência mecânica. Além disso, é um sistema capaz de atingir elevados níveis de sustentabilidade, uma vez que o aço é 100% reciclável e apresenta bons resultados em análises custo – benefício.

Em contrapartida, o desempenho térmico destes edifícios tem sido apontado como uma das desvantagens deste tipo de construção. Tendo em conta a alta condutibilidade térmica do aço, as pontes térmicas criadas pela introdução de perfis deste material potenciam o fraco desempenho térmico e, por consequência, o aumento das necessidades energéticas durante o período de vida útil do edifício – energia operacional. Uma vez que a energia operacional representa a maior parcela do consumo energético de edifícios, o desempenho térmico de construções em LSF tem vindo a ser alvo de estudo.



## 1.2 Objetivo

O objetivo principal desta dissertação é o estudo do desempenho térmico de edifícios com estrutura LSF, mais concretamente, o estudo de pontes térmicas lineares. Para isto, vai ser realizado uma revisão bibliográfica focada no tema das pontes térmicas e no desempenho térmico destes edifícios. Estes edifícios apresentam diferentes desempenhos térmicos consoante o tipo de sistema considerado. Estes sistemas podem classificar-se em frio, quente e híbrido, sendo que o posicionamento do isolamento térmico é o fator diferenciador. O sistema frio prevê a colocação do isolamento na caixa de ar e o quente no exterior da parede. O sistema híbrido utiliza os dois sítios na colocação do isolamento.

Após este enquadramento teórico, irá ser efetuado um estudo que avalie o impacto da posição do isolamento térmico, da espessura do isolamento e da existência de perfis de aço no desempenho térmico de pontes térmicas lineares.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos. O primeiro é a introdução, onde o leitor se encontra, é realizada uma breve introdução ao tema e são explicados os objetivos principais do trabalho.

O segundo capítulo é o da revisão bibliográfica. Neste capítulo são realizados um levantamento de dados e um enquadramento teórico de conceitos relevantes ao desenvolvimento do trabalho. É abordado o tema da crise ambiental e energética onde é definido o impacto do setor da construção. Também no âmbito destas crises, são abordadas as políticas nacionais e europeias adotadas no setor da construção. Neste seguimento, a caracterização térmica de edifícios é também objeto de estudo. Aqui é realizada uma apresentação dos processos de troca de calor e é feita uma introdução à forma como são aplicados ao estudo de edifícios. Por último, é apresentado o sistema construtivo LSF e é feito o enquadramento do desempenho térmico destes edifícios.

O terceiro capítulo refere-se ao caso de estudo, onde é exposto o objetivo do estudo e a metodologia de análise é definida. Adicionalmente, todos os dados, procedimentos e ferramentas utilizadas são referenciadas ao longo deste capítulo. No final, os resultados são apresentados e são alvo de discussão.

O quarto capítulo diz respeito à conclusão onde são, rapidamente, compiladas as ideias chave a reter desta dissertação. Também são sugeridos temas a abordar em trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A Crise Ambiental e Energética

Atualmente, a crise ambiental é um dos maiores e mais complexo problema a nível mundial. É uma crise que se caracteriza pelo estado degradado do meio ambiente que põe em causa a sua capacidade de autossustentação. Como causas desta situação estão o crescimento desmedido da população mundial, o contínuo desenvolvimento das atividades humanas a partir da revolução industrial e a constante procura pelo aumento do conforto e da qualidade de vida. O conceito de crise ambiental e o consequente estudo tiveram início nos anos 70 após grandes catástrofes naturais e a perceção de que a poluição e os seus efeitos não eram apenas fenómenos localizados. Ficou claro que a crise ambiental deve ser tratada como um problema internacional e, desde então, têm surgido várias iniciativas de diferentes níveis de relevância, para aprofundar conhecimentos e combater os seus efeitos.

Em 1972, foi criado pela Organização da Nações Unidas (ONU), o Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA). O PNUA é uma agência que coordena todas as atividades de caráter ambiental a nível internacional, facilita a comunicação e acordo entre países e presta assistência na implementação de medidas em países em vias de desenvolvimento. Em 1992 foi responsável pela criação da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (CQNUAC), um tratado que incide sobre um dos maiores catalisadores da crise ambiental, a emissão de gases do efeito de estufa (World Meteorological Organization, 2017). Desde então, este tratado tem vindo a ser atualizado, sendo o Protocolo de Quioto (1997) e o Acordo de Paris (2015) as atualizações mais conhecidas.

O Protocolo de Quioto foi um tratado assinado por 37 países e a União Europeia (UE) que expirou em 2015. O objetivo do documento era impor nos países aderentes uma redução de 5,2% nas emissões de 6 tipos de gases de efeito de estufa, até o final do ano de 2012. O Acordo de Paris, a entrar em vigor a partir de 2020, segue como sucessor do protocolo de Quioto e foi assinado por 195 países. Este acordo tem como objetivo o controlo da temperatura terrestre, tendo como meta uma subida máxima de 2°C acima dos níveis do período pré-industrial. Estas iniciativas internacionais impulsionaram a mudança de atitude perante o meio ambiente e a sua conservação por parte das administrações locais. Embora num processo lento, os países e comunidades, têm vindo a implementar ações sobre as suas atividades socioeconómicas tais como a promoção de energias renováveis, a reforma e regulamentação mais rigorosa dos setores

mais consumidores de energia, a aplicação de novas tecnologias na gestão de resíduos e a proteção de florestas. Apesar das medidas implementadas, a nível internacional, este esforço conjunto tem sido alvo de crítica por parte da comunidade científica que estuda a eficácia das mesmas, concluindo que as metas não têm sido atingidas e são insuficientes dado o panorama actual do meio ambiente (Ripple et al., 2017). Entre as razões apontadas para a falha das metas estão a falta de medidas coercitivas e fiscalizadoras, pressões políticas e socioeconómicas, e a grande desigualdade entre países desenvolvidos e em desenvolvimento (Almer and Winkler, 2017; The Lancet Planetary Health, 2018).

Por último, dado o relevo indiscutível no estudo da crise ambiental e de todas as temáticas a ela associadas, apresenta-se o conceito de desenvolvimento sustentável. A definição de desenvolvimento sustentável é reconhecida mundialmente e foi apresentada, em 1987, como uma das prioridades estratégicas na proteção do meio ambiente. O desenvolvimento sustentável é definido pela “*procura por satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades*” (World Commission on Environment and Development, 1987).

### **2.1.1 Caracterização e o Impacto da Indústria da Construção**

A construção é a base de praticamente todas as atividades do ser humano. Por esta razão, é uma indústria tão essencial para a sobrevivência e o sucesso do ser humano, servindo vários sectores através do valor adicionado pelo ambiente construído. Entre os sectores com maior peso, a nível mundial, estão o dos edifícios residenciais com 38%, infraestruturas básicas com 32%, edifícios institucionais e comerciais com 18%, e edifícios industriais com 13% (World Economic Forum, 2016). As estruturas principais dos edifícios têm períodos de vida úteis entre os 50 a 100 anos, particularidade que faz com que mais de 50% do edificado existente esteja, ainda, operacional em 2050. Esta percentagem aumenta para os 75% quando apenas são contabilizados os países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) (International Energy Agency, 2012).

A indústria da construção, além de moldar a rotina diária do ser humano, é um dos sectores com maior impacto na economia mundial. Estima-se que represente 5% do Produto Interno Bruto (PIB) dos países desenvolvidos e 8% do PIB dos países em desenvolvimento. Quanto à representatividade em termos de população ativa, a indústria emprega, mundialmente, mais de 100 milhões de pessoas (World Economic Forum, 2016).

Por sua vez, os impactos no meio ambiente não seguem os efeitos positivos que a construção tem na economia mundial. É a indústria da construção a responsável pelo maior consumo de recursos e matérias primas sendo o consumo de ferro, por exemplo, de pelo menos 50% da

produção mundial (World Economic Forum, 2016). Também a nível mundial, os edifícios residenciais e comerciais são responsáveis por 32% do consumo total de energia e emitem 26% das emissões totais de CO<sub>2</sub> (International Energy Agency, 2012). Na UE os edifícios representam 40% do consumo de energia, sendo os edifícios residenciais os mais consumidores com 63% desse consumo (Balaras et al., 2007). Como em todas as indústrias, a produção de subprodutos na construção também representa uma quota relevante nos impactos no meio ambiente. Estes subprodutos, designados por Resíduos de Construção e Demolição (RCD), só na UE representam entre 25% a 30% da produção total de resíduos, sendo a indústria mais penalizadora neste aspeto (European Commission, 2018).

Tendo isto em conta, a indústria da construção apresenta uma relevância significativa em aspetos socioeconómicos e um enorme potencial na mitigação das emissões de gases de efeito de estufa. Ficou claro a extrema importância do investimento em medidas coercitivas e prescritivas, em instrumentos de apoio financeiro, em tecnologia e mão de obra qualificada capaz de aumentar a eficiência durante todo o ciclo de vida das construções – Anteprojeto; Construção; Utilização e manutenção; Demolição. Como é possível observar na Figura 2.1, as decisões tomadas antes da construção têm grande impacto sobre os impactos ambientais e os custos do edifício durante a sua utilização. A energia operacional do edifício é a parcela com maior expressão sobre os impactos ambientais e custos do mesmo, uma vez que é a responsável pelo consumo de 80% a 85% de toda a energia consumida ao longo do ciclo de vida (Sharma et al., 2011). O facto de se observar uma percentagem desta ordem de grandeza é explicado pelas necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício, contribuindo com 55% a 74% desse consumo, condicionado pela localização geográfica e pelo sistema de aquecimento de água do edifício (Santos et al., 2011).

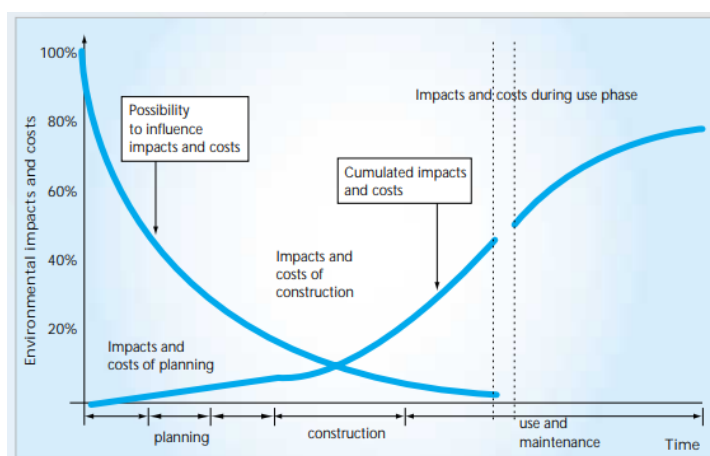


Figura 2.1 - Influência das decisões de projeto nos impactos e custos de um edifício médio Europeu e Norte Americano (Kohler and Moffatt, 2003).

O aumento dos preços de terrenos, em função do seu decréscimo, o aumento da população mundial e a atual oferta de edificado faz com que a reabilitação e a construção vertical sejam os modos de construção mais ajustados ao mercado atual. A construção vertical apresenta um sério compromisso entre o controlo da densidade populacional e a contenção de tecidos urbanos, protegendo habitats naturais enquanto proporciona ao Homem um ambiente urbano de qualidade (Ibrahim, 2007). A reabilitação é a modalidade de construção com maior impacto na eficiência energética a pequeno e médio prazo (El-Darwish and Gomaa, 2017; Vilches et al., 2017). Tendo em conta todas as operações de reabilitação e de pequenas renovações, seja no edificado ou nos sistemas energéticos a eles associados, é perceptível a real necessidade de aliar a eficiência energética à indústria da construção.

Posto isto, a indústria e todos os seus intervenientes, têm vindo a adaptarem-se e a desenvolverem-se numa direção cada vez mais sustentável. A sustentabilidade atingiu, portanto, um patamar de carácter obrigatório em vez de ser apenas uma característica desejada por alguns. Em todo o mundo, são visíveis os esforços de incentivar, regulamentar e impor as diretrizes da sustentabilidade ao longo de todas as etapas do ciclo de vida das construções (Shan and Hwang, 2018; World Economic Forum, 2016).

### **2.1.2 Panorama Nacional**

O sector da construção em Portugal desenvolveu-se, sobretudo, após a adesão do país à Comunidade Económica Europeia (CEE) em 1986. O acesso a fundos europeus e a livre circulação de pessoas e bens serviram de impulso ao crescimento da indústria, consolidando a sua importância na economia do país. Devido à recessão da economia mundial (2008) e à entrada de um programa de resgate financeiro no país (2011), o sector registou a sua maior queda. A quebra do investimento público e privado levaram a uma evolução negativa do volume de negócios, tendo como consequência a falência de empresas e a extinção de postos de trabalho (Romão, 2015). Atualmente, o sector recuperou com vários indicadores a mostrarem valores pré-crise (Gil, 2017). A recuperação da economia mundial, nacional e o forte investimento na reabilitação de edifícios foram fatores preponderantes para esta recuperação.

O sobredimensionamento e a insustentabilidade são as principais características do tipo de construção realizada no período pré-crise. No ano de 2011, havia um excesso de 1,8 milhões de alojamentos, superando em 45% o número de famílias (INE, 2012). A construção é, na sua maioria, muito tradicional com o uso do betão armado na estrutura e elementos de alvenaria cerâmica nas paredes.

## 2.2 Enquadramento Legislativo

Portugal, como país desenvolvido e membro do projeto europeu, tem a responsabilidade e o dever de implementar a sustentabilidade na sua indústria da construção. Ser membro da UE, permite um acesso privilegiado a um conjunto de incentivos e instrumentos legislativos que têm como objetivo a harmonização de medidas e métodos a implementar pelos seus estados membros.

Este período está a ser encarado, pela UE, como um período de transição com a necessidade de enfrentar novos desafios impostos pela crise ambiental. O sector energético europeu revela fraquezas estruturais graves, designadamente, a sua dependência relativamente a fontes externas de energia e provenientes de combustíveis fósseis, o aumento da emissão de gases com efeito de estufa e a pouca expressão do sector no panorama energético internacional (European Commission, 2000). Com o objetivo de alcançar a eficiência energética, a sustentabilidade e tendo conhecimento dos impactos dos edifícios nestas metas, a construção tem vindo a ser alvo de regulamentação por parte da UE. Esta regulamentação é regida por um conjunto de diretivas do Parlamento Europeu e do Conselho.

No ano de 2002 entrou em vigor a diretiva 2002/91/CE – “*Energy Performance in Buildings Directive*” (EPBD). Este documento atua, diretamente, no desempenho energético dos edifícios, através da implementação de medidas coercitivas com medidas que passam pelo enquadramento de uma metodologia de cálculo do desempenho energético integrado dos edifícios; a imposição de requisitos mínimos de desempenho energético em edifícios novos e em edifícios reabilitados de grande dimensão; a certificação energética de edifícios; e a inspeção regular e avaliação de caldeiras e instalações de ar condicionado. Ademais, os países membros são encorajados a estudarem e aplicarem medidas extraordinárias que visem o objetivo comum. A fim de garantir uma transposição eficaz desta diretiva pelos seus estados membros, a UE elaborou diversos documentos normativos que detalham os métodos e metodologias de cálculo necessários na correta avaliação do desempenho energético dos edifícios.

A transposição da diretiva 2002/91/CE para o ordenamento jurídico nacional resultou, em 2006, na criação e aprovação de três decretos-lei (DL): o DL n.º 78/2006 de 04/04/2006 – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE); o DL n.º 79/2006, de 04/04/2006 – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE); e o DL n.º 80/2006, de 04/04/2006 – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).



Em 2010 a diretiva 2002/91/CE foi revogada com a entrada em vigor da 2010/31/EU. Esta última diretiva veio renovar o então conhecido EPDB, de modo a dar resposta aos crescentes desafios impostos pela crise ambiental e à ambição da UE em atingir melhores resultados no desempenho energético do seu parque edificado. A renovação veio introduzir o conceito de edifícios com necessidades energéticas quase nulas (NZEB's), sendo que o consumo deve ser assegurado por fontes de energia renovável. Este tipo de edifícios será imposto em toda a construção nova, o mais tarde até 31 de dezembro de 2020. Além disto, de forma geral, a nova diretiva veio impor uma maior exigência na metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios, nos requisitos mínimos de desempenho, nas avaliações dos sistemas técnicos e nas utilizações de fontes de energia renováveis.

Após a experiência adquirida na transposição da diretiva 2002/91/CE e posterior aplicação, o país teve a oportunidade de rever e melhorar a sua regulamentação do desempenho térmico dos edifícios. No ano de 2013, a adaptação da diretiva 2010/31/EU para o ordenamento jurídico nacional veio reformular o regime até então estabelecido. Esta operação foi realizada com a aprovação do DL n° 118/2013, de 20/08/2013, que num único diploma aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

### **2.3 Caracterização Térmica de Edifícios**

Como já foi visto, a eficiência energética de um edifício é muito dependente da sua energia operacional, nomeadamente a energia alocada para as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Também foi possível observar a dependência do conforto do ser humano com os avanços da indústria da construção. Neste seguimento, é imperativo considerar o conforto térmico como um requisito essencial dos edifícios e proceder ao estudo da caracterização térmica dos mesmos.

O conforto térmico do utilizador de um edifício é um conceito qualiquantitativo. Isto significa que é dependente de fatores suscetíveis de medição como a humidade, a temperatura e a velocidade do ar, e fatores narrativos como o estado mental e os hábitos diários de cada pessoa (Khedari et al., 2000). Para atingir o conforto térmico pretendido o correto planeamento da envolvente do edifício é essencial, dado o seu impacto no controlo do ambiente interior e, por conseguinte, nas necessidades de aquecimento e arrefecimento (Gouveia, 2008; Kheiri, 2018). A envolvente é um sistema que consiste na conjugação de materiais opacos e transparentes que influenciam as trocas de calor com o exterior. Para melhor entender este assunto é importante uma breve introdução aos processos de troca de calor e das características térmicas de um edifício que serão relevantes no decorrer desta dissertação.

### 2.3.1 Processos de Troca de Calor

Sempre que existem diferenças de temperatura entre elementos, ou em partes distintas do mesmo elemento, verifica-se a transferência de energia térmica. Esta energia transferida designa-se por calor e ocorre do ponto mais quente para o mais frio, respeitando o princípio da conservação da energia, até atingirem o ponto de equilíbrio térmico. A ocorrência da transferência de calor ocorre sempre no “caminho” de menor resistência térmica, característica essencial para melhor entender as pontes térmicas que serão, abordadas no subcapítulo seguinte.

Temos, portanto, o calor como uma medida de energia e não de temperatura, como é utilizada no quotidiano. A transferência de calor é realizada por três processos que podem coexistir:

#### **Condução:**

É a transferência de energia provocada pela movimentação de partículas no interior de um corpo. Pode ocorrer em todos os estados da matéria e é definida pela Lei de Fourier (1822). A Lei de Fourier dita que o fluxo de calor, numa dada direção, entre dois pontos é proporcional ao negativo do gradiente de temperatura entre eles.

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

sendo:

$dQ_x$  o fluxo de calor na direção  $x$ ;

$\lambda$  o coeficiente de condutibilidade térmica do material. Este coeficiente determina o calor que atravessa, perpendicularmente, um material quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário [ $W/m \cdot ^\circ C$ ];

$d\theta$  a diferença de temperaturas entre pontos [ $^\circ C$ ];

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

#### **Convecção:**

A troca de calor por convecção ocorre no interior de um fluido ou na fronteira deste com uma superfície sólida. A ocorrência deste processo é justificada pela dilatação térmica e regras de

flutuabilidade dos fluidos, que provocam a movimentação natural dos mesmos. A convecção é o processo responsável por fenômenos como a movimentação do manto terrestre ou a simples movimentação ascensional do ar quente emitido por um radiador. Ademais, é um processo que também pode ser forçado quando a movimentação do fluido é originada por forças externas.

Este fenômeno, no caso da transferência de calor entre uma superfície e um fluido, é regido pela equação de Newton (1701):

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

sendo:

$h_c$  a condutância térmica superficial por convecção. A condutância térmica 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 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ];

A a área da superfície [ $m^2$ ];

$\theta_s$  a temperatura da superfície [ $^\circ C$ ];

$\theta_f$  a temperatura do fluido [ $^\circ C$ ].

### **Radiação:**

A transferência de calor por radiação é resultado da radiação eletromagnética emitida por todos os corpos em todos os estados da matéria, em função da temperatura absoluta e estado da sua superfície. Ao contrário dos processos anteriores, a radiação não necessita de um meio físico a servir de suporte. A lei que rege este fenômeno data de 1879 quando Joseph Stefan, a partir de resultados experimentais, deduziu a energia emitida por um corpo negro. Mais tarde, em 1884, essa lei foi comprovada teoricamente por Ludwig Boltzmann ficando, assim, conhecido por lei de Stefan-Boltzmann.

$$Q = \sigma \times A \times \theta_s^4 [W] \quad (3)$$

Onde  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$  é a constante de Stefan-Boltzmann e A [ $m^2$ ] a área da superfície radiante.

### 2.3.2 A Transmissão de Calor em Edifícios

A forma de aplicação dos processos de troca de calor é, mais detalhadamente, estudada pela termodinâmica. De uma forma geral, o estudo da envolvente dos edifícios, está dependente das condições de homogeneidade dos elementos, do tipo de distribuição espacial de temperaturas, regime temporário em que a análise é realizada e a existência de fenómenos de acumulação e geração de calor.

Primeiramente, 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 da convecção com uma alteração:

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

sendo  $h'$  [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ] o coeficiente combinado de transferência de calor por convecção e radiação.

Esta simplificação é bastante importante no estudo da envolvente uma vez que permite tratar as radiações e convecções que ocorrem nas superfícies das paredes e nas superfícies interiores da caixa de ar. De seguida é importante fazer referência à equação geral da condução de calor:

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

onde:

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

$\dot{Q}$  é a parcela responsável pela geração de calor;

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

Tendo em conta que no decorrer desta dissertação será feita uma análise em condições de isotropia e em regime permanente, ou seja, sem geração e acumulação de calor, a equação (5) toma a forma:

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

A resolução desta equação depende essencialmente do tipo de dimensões do sistema, ou seja, para uma distribuição de temperaturas unidimensional (1D):

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

Para uma distribuição de temperaturas bidimensional (2D):

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

E para uma distribuição de temperaturas tridimensional (3D) equação (6) fica inalterada.

O caso 1D envolve a transferência de calor apenas numa direção. Aplica-se a partes da envolvente composta por um ou mais elementos homogêneos de superfícies paralelas, como se pode observar na Figura 2.2.

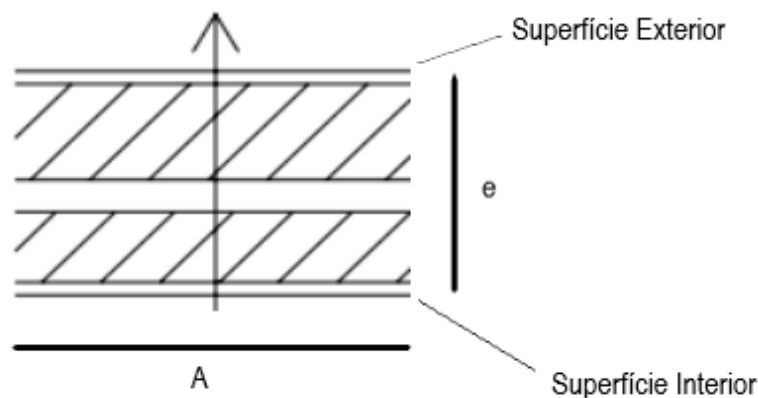


Figura 2.2 - Fluxo de calor 1D (Freitas, 2007).

Este caso é de simples resolução, sendo que a quantificação do calor transferida é feita através da lei de Fourier:

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

sendo:

$e$  a distância entre superfícies [m];

$\theta_{se}$  a temperatura da superfície exterior [°C];

$\theta_{si}$  a temperatura da superfície interior [°C].

Tendo em conta a condutância térmica (10), a resistência térmica (11) e o coeficiente de transmissão térmica (12), é possível calcular o calor transferido apenas em função de  $U$  (13).

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

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

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

$$Q = U \times A \times (\theta_e - \theta_i) \quad [W] \quad (13)$$

sendo:

$R_{se}$  a resistência térmica da superfície exterior [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ];

$R_{si}$  a resistência térmica da superfície interior [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ];

$\sum Ri$  a soma das resistências térmicas de todas as camadas constituintes da zona da envolvente em estudo [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ];

$\theta_e$  é a temperatura exterior [°C];

$\theta_i$  é a temperatura interior [°C].

Temos, portanto, o  $U$  como um parâmetro fundamental na caracterização de envolventes.



### 2.3.3 Pontes Térmicas

De uma forma bastante simplificada, as pontes térmicas são zonas da envolvente onde o fenómeno de transferência de calor é significativamente alterado por imposições físicas. As características intrínsecas das envolventes dos edifícios, nomeadamente a utilização de vários materiais e alterações de geometria, impõem a alteração localizada da resistência térmica. Como já foi analisado, o calor tende a mudar de direção consoante a resistência térmica oferecida, com a consequência de originar fluxos de calor 2D ou 3D.

As pontes térmicas mais frequentes ocorrem em junções de vários elementos construtivos. Como exemplo temos as junções entre paredes e a cobertura, o pavimento, o teto e mesmo outras paredes. Além destas, também ocorrem em junções com outros detalhes construtivos, como janelas, caixas de estore, varandas e portas. De forma geral, as zonas de ponte térmica aumentam quanto mais complexa for a envolvente do edifício.

Como é possível observar na Figura 2.3, a existência de fluxos de calor 2D resulta num incremento da taxa de transferência de calor na zona de desenvolvimento da ponte térmica. Ou seja, é uma área que penaliza o desempenho térmico do edifício, através do aumento significativo das perdas de calor no inverno e dos ganhos de calor no verão (Larbi, 2005). Em resultado das diferentes taxas de transferência de calor, a distribuição de temperaturas superficiais dos elementos construtivos vão assumir um estado heterogéneo, potenciando o aparecimento de patologias, tais como condensações superficiais, desenvolvimento de bolores e degradação de revestimentos.

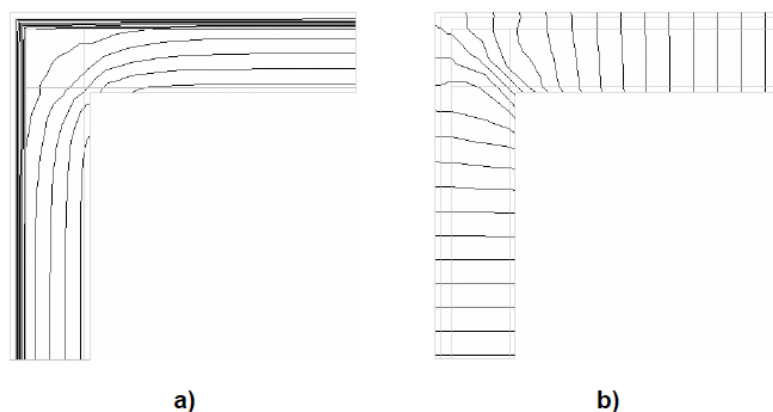


Figura 2.3 - Exemplo de uma ponte térmica na ligação de duas paredes de um edifício em betão armado com isolamento pelo exterior. a) Linhas isotérmicas. b) Linhas de fluxo de calor (Piló, 2012).

### Classificação de pontes térmicas:

Em face dos vários elementos construtivos e das diferentes geometrias que definem a envolvente de um edifício, é possível reconhecer várias zonas passíveis de ocorrência de pontes térmicas. Com o objetivo de simplificar o estudo destas zonas, é importante identificar de forma clara, cada zona em particular. Temos, portanto, dois grandes grupos de pontes térmicas, as 2D e as 3D.

As pontes térmicas 2D são as mais recorrentes 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 na zona corrente da envolvente, ou seja, em áreas onde se verifica a alteração estrutural do elemento construtivo. Um bom exemplo de uma PTP é a existência de um pilar de betão armado inserido numa parede de alvenaria, como mostra a Figura 2.4.

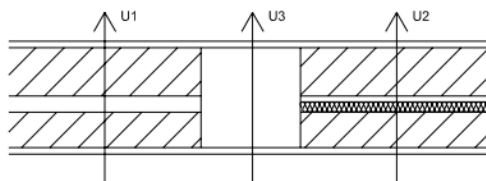


Figura 2.4 - PTP provocada por um pilar de betão armado inserido numa parede de alvenaria (Freitas, 2007).

Estas pontes térmicas são caracterizadas pelo valor de  $U_{PTP}$  [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ], que é o coeficiente de transmissão térmica da zona da PTP.

As PTL ocorrem no desenvolvimento linear de uma junção entre elementos construtivos diferentes ou em planos diferentes. A ponte térmica observada na Figura 2.3 é um bom exemplo de uma PTL. O estudo das PTL envolve o cálculo da equação (8) que dada a sua complexidade é resolvida com recurso a métodos numéricos como o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos ou o método dos elementos fronteira. Estes tipos de pontes caracterizam-se pelo valor de  $\Psi$  [ $W/m \cdot ^\circ C$ ], que representa o coeficiente de transmissão térmica linear, e que à semelhança do  $U$  no caso unidimensional se torna um parâmetro essencial na caracterização da envolvente. Por fim, a quantidade de calor transferida na zona da PTL é:

$$Q = \Psi \times L \times (\theta_e - \theta_i) \quad [W] \quad (14)$$

em que  $L$  [m] é o comprimento de desenvolvimento linear da PTL.

Ao contrário das pontes térmicas anteriores, as 3D não têm um impacto muito significativo no desempenho térmico do edifício. Tratam-se de áreas de ponte térmica bastante concentradas e são designadas de pontes térmicas pontuais. Exemplos correntes deste tipo de ponte são as ligações estruturais que existem na construção de varandas e os cantos originados pela interseção de paredes exteriores e laje de cobertura. Estas pontes são caracterizadas pelo valor de  $\chi$  [W/°C], que é o coeficiente de transmissão térmica pontual. Geralmente, devido à dificuldade acrescida no seu estudo e ao impacto pouco relevante que têm, são desprezadas pelos regulamentos nacionais de desempenho energético de edifícios. O calor transferido nestas pontes térmicas é, simplesmente, calculado por:

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

#### **2.4 O Sistema Construtivo LSF - *Lightweight Steel Framing***

O LSF, como é vulgarmente conhecido este sistema construtivo, é um sistema que usa o aço como o principal material da estrutura do edifício. Como aliás decorre da tradução daquela designação para o português: *Lightweight* que significa leve, *Steel* que é aço e *Framing* que, neste contexto, é entendido como esqueleto estrutural. O termo leve, associado ao aço, tem o objetivo de especificar um tipo de perfis que resultam da moldagem a frio de chapas de aço de baixa espessura, o que resulta em peças relativamente leves.

As principais aplicações deste tipo de construção são pequenos edifícios, em altura, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais. A construção em altura, mais de 3 pisos, e a abertura de grandes vãos, típicos de armazéns industriais, representam uma grande limitação na utilização deste sistema construtivo. No entanto, é uma boa solução quando conjugada com outros sistemas com elementos em betão armado ou elementos de aço laminado a quente. Além disto, é extremamente eficaz na reabilitação e renovação de edifícios (Futureng, 2018a).



Figura 2.5 - Estrutura de uma moradia unifamiliar construída com o sistema LSF (Futureng, 2018e).

#### 2.4.1 História e Origem

Os princípios base do sistema LSF, na verdade, têm origem noutra sistema bastante similar, o *Wood Framing*, criado no século XIX nos Estados Unidos da América. Durante o século XIX, a população do país cresceu bastante, o que implicou a procura por materiais locais e métodos de construção práticos e céleres que favorecessem a produtividade na construção de novos edifícios (Futureng, 2018c). No entanto, foi apenas nos anos que se seguiram ao término da Segunda Guerra Mundial que o LSF sofreu um considerável crescimento, sobretudo, devido a dois fatores.

A primeira influência no crescimento do LSF foi a Segunda Guerra Mundial. Após a guerra existiam inúmeros edifícios destruídos, especialmente em alguns países da Europa e no Japão. Além disto, foi um período marcado pelo regresso dos soldados aos seus países de origem o que aumentou a procura pela construção de edifícios. O esforço militar teve um impacto positivo na experiência, na mão de obra qualificada e na capacidade de produção do aço pelo que foi um fator fundamental na utilização deste material na construção de edifícios no pós-guerra. O aço surgiu, então, como um material viável na substituição da madeira no sistema *Wood Framing*. No entanto, o processo não foi imediato, uma vez que no início a utilização do aço estava limitado à construção das divisórias interiores dos edifícios (Eren, 2013).

A segunda grande influência no crescimento do LSF ocorreu na década de 80 e início dos anos 90. Durante estes anos a extração de madeira foi dificultada pela interdição há indústria

madeira, a florestas mais antigas. O reajustamento da indústria levou a um declínio na qualidade da madeira empregue na construção e a grandes flutuações no valor desta matéria prima. Ademais, o crescimento da economia Asiática e do Médio Oriente impulsionando a queda do valor do aço, proporcionou o crescimento do LSF nos Estados Unidos da América e na Austrália (Silvestre et al., 2013).

Após este crescimento explosivo houve a necessidade de regulamentar, o que até aqui era um método construtivo sem legislação específica. Foi então que, em 1997, nos Estado Unidos da América se observou a criação de um método prescritivo que assenta na união de regras e procedimentos de execução estrutural (Pires, 2013). A partir daqui proliferaram as associações de técnicos e construtores especialistas neste sistema construtivo, o que contribui para o desenvolvimento do LSF enquanto um sistema de construção profissional.

Atualmente o LSF é um sistema bem cimentado na construção de edifícios em países desenvolvidos, tais como os Estados Unidos da América, Austrália, Japão, Reino Unido, Dinamarca, Suécia e África do Sul. No resto do mundo, o interesse por este sistema construtivo é crescente (Gorgolewski, 2007). Em Portugal, o interesse pelo LSF teve início no ano de 1993 e tem vindo a acompanhar a tendência de crescimento. A tomada de consciência por parte da população, em relação à falta de qualidade da construção típica portuguesa, e os requisitos impostos pela regulamentação do desempenho térmico de edifícios, têm vindo a servir de catalisadores ao crescimento atrás referido. Este crescimento tem consequência direta nos preços, uma vez que o número de empresas a trabalhar com este sistema aumenta (Santos et al., 2011).

#### **2.4.2 Materiais de Construção**

O sistema LSF é caracterizado por ser um *dry construction system*. Ou seja, é um sistema de construção “seco” que utiliza materiais pré-fabricados e elimina a necessidade do uso de cimento e betão. Distinguem-se três grandes tipos de materiais neste sistema construtivo: o aço na estrutura principal do edifício; painéis de revestimento; e materiais de isolamento (Soares et al., 2017).

Os edifícios construídos em LSF são compostos por aço na sua estrutura principal, mais concretamente, por perfis de aço galvanizado enformados a frio. O aço apresenta uma grande vantagem, na sua relação peso/resistência. Esta característica oferece uma grande versatilidade à construção, diminuindo a quantidade de matéria-prima, especialmente quando comparado com outros sistemas construtivos mais tradicionais. O termo galvanizado indica o tratamento anti corrosão a que o aço é submetido garantindo, assim, a qualidade ao longo de todo o período de vida útil do edifício. Os perfis utilizados em LSF apresentam vários tipos de geometria e

têm, normalmente, uma espessura a variar entre os 0.45 mm e os 6 mm, dependendo do tipo de aplicação e fabricante (Soares et al., 2017).

Posto isto, os sistemas em LSF estão sujeitos às regras de dimensionamento nacionais. Em Portugal o Eurocódigo 3 – Dimensionamento de Estruturas Metálicas, é responsável por assegurar as boas práticas de dimensionamento e segurança do projeto e construção de edifícios em LSF. Quanto aos perfis mais utilizados em território nacional, devido ao ainda reduzido mercado, a oferta é limitada a perfis básicos em C e U. Estes e outros perfis encontram-se representados na Figura 2.6.

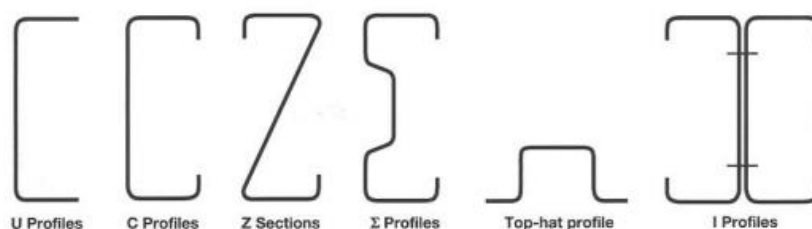


Figura 2.6 - Tipos de cortes transversais dos perfis mais utilizados em LSF (LSK, 2005).

Os painéis de revestimento, como o nome indica, têm como função revestir e dar a forma final à estrutura principal. Ou seja, são estes os elementos responsáveis por cobrir a estrutura principal e servir de suporte à colocação de isolamentos térmicos, impermeabilizações e acabamentos. Embora a função dos referidos painéis seja revestir, casos há em que os mesmos podem contribuir para a integridade da estrutura de aço principal, concretamente, pela adição de resistência mecânica lateral, vulgo contraventamento. No entanto, esta situação requer especial atenção na fase de projeto e obriga a que as placas cumpram requisitos mínimos de resistência.

Os tipos de painéis mais usuais nos sistemas LSF são as placas *Oriented Strand Board* – OSB. São placas compostas pela união de lâminas de madeira, com recurso a resinas e ceras, orientadas em camadas cruzadas, que produzem um produto final rígido, impermeável, de baixo custo e de versátil aplicação na construção de edifícios. Além das placas OSB, também são muito utilizadas as placas de gesso cartonado. A aplicação destas placas tem a finalidade de acabamento interior, pois não produzem nenhum efeito adicional na resistência estrutural.





Figura 2.7 - Aplicação de placas de revestimento: (a) placas OSB no exterior; (b) placas de gesso cartonado no interior (Futureng, 2018e).

Os materiais de isolamento são transversais a outros tipos de sistemas construtivos, variando apenas a sua aplicação de acordo com a variação da superfície de suporte. De forma geral, o isolamento térmico é assegurado pela lã de rocha, colocada entre os perfis de aço, e pelo sistema ETICS. Este sistema é colocado no exterior do edifício e recorre à utilização de placas de poliestireno expandido (EPS) (Soares et al., 2017).

A utilização dos materiais *supra* referidos é essencial na implementação do sistema LSF. Além destes, é importante referenciar os sistemas de união e aperto. Dada a característica do LSF de pré-fabricação e montagem *in-situ*, é necessário recorrer a sistemas que garantam uma qualidade de montagem constante ao longo do período de vida útil do edifício. Estes sistemas dependem essencialmente do tipo e dimensões dos materiais a unir, condições de carga, custo, durabilidade, requisitos regulamentares, experiência e disponibilidade da empresa construtora. O uso de parafusos, como mostra a Figura 2.8, é a solução mais corrente devido à resistência e durabilidade que conferem à união.

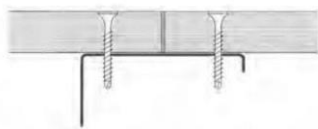


Figura 2.8 - Representação de uma união com parafusos em LSF (LSK, 2005).

### 2.4.3 Vantagens e Desvantagens

O grande crescimento do LSF, apesar de impulsionado por factores externos já explicados, esteve sempre sustentado pelas importantes vantagens que lhe são associadas. Estas vantagens diferenciam o LSF enquanto sistema construtivo capaz de produzir um produto final de qualidade, especialmente, quando comparado com sistemas mais tradicionais. Estas vantagens são evidenciadas na sustentabilidade, na análise custo-benefício, e no processo de construção do edifício (Roque and Santos, 2017).

A segurança estrutural, a rapidez de construção e a pré-fabricação são as vantagens mais relevantes proporcionadas pelo processo e os materiais utilizados na construção em LSF. O recurso a perfis de aço permite uma elevada resistência mecânica enquanto o peso da estrutura é significativamente reduzido. Comparativamente a outros sistemas construtivos, a diferença de peso pode atingir os 50%, com um impacto significativo no dimensionamento de fundações e na segurança contra sismos (Tavakoli et al., 2017). A utilização de perfis de aço também permite a melhoria dos processos de transporte e montagem, os quais por sua vez melhoram a eficiência do processo construtivo (Veljkovic and Johansson, 2007). Esta eficiência tem impacto direto nos custos do edifício, uma vez que o período de construção é reduzido. Embora o custo final de um edifício em LSF não seja, ainda, muito competitivo, a durabilidade do mesmo e a reduzida necessidade de manutenção são pontos essenciais a ter em conta numa análise custo-benefício a longo prazo (Futureng, 2018c; Mahdavinejad et al., 2011).

A sustentabilidade é outro grande apanágio do sistema LSF, especialmente pela capacidade de reciclagem e reutilização do aço que é de, praticamente, 100%. Este fator beneficia o sistema LSF numa análise de ciclo de vida, uma vez que é reduzida, consideravelmente, a produção de resíduos de demolição, ao mesmo tempo que fornece material reciclado a outros consumidores desta matéria prima (SteelConstruction.info, 2018). Esta prática insere-se nas orientações da economia circular. Outro grande fator que contribui para a sustentabilidade deste sistema é a redução de matérias primas, dos resíduos e da perturbação ambiental durante o processo de construção (Roque and Santos, 2017).

Estas vantagens conferem ao sistema LSF uma aliciante alternativa à construção de edifícios. Simultaneamente, estas vantagens servem também os propósitos das empresas de construção que trabalham com este sistema, uma vez que permitem uma poupança considerável de recursos e a simplificação de processos (Futureng, 2018b).

Por sua vez, a contabilização das desvantagens deste sistema é, geralmente, reduzida à unidade. Na verdade, podem existir desvantagens como a dificuldade no acesso a um empréstimo para este tipo de edifícios ou a pouca oferta de empresas devidamente certificadas, embora estes

fatores sejam independentes da capacidade funcional do LSF enquanto sistema construtivo. A maior desvantagem associada a este sistema construtivo é o desempenho térmico do edifício, contudo também é importante referir a necessidade de abordar o desempenho acústico e a resistência ao fogo dos edifícios (Ariyanayagam and Mahendran, 2015; Matoski and Ribeiro, 2016).

#### **2.4.4 Desempenho Térmico**

Antes de rever o desempenho térmico deste tipo de edifícios, é importante distinguir os vários tipos de sistemas LSF consoante a posição do isolamento térmico na parede exterior. Este fator revela-se fundamental na análise do desempenho térmico. Assim, é possível distinguir três tipos de sistemas: construção fria, construção híbrida e construção quente (Santos et al., 2014a). A construção fria caracteriza-se pela colocação do isolamento térmico no interior das paredes. Esta colocação implica a utilização de isolamentos maleáveis, como lãs minerais, que se adaptem à geometria dos perfis de aço, originando uma camada de isolamento com interrupções. Na construção quente utiliza-se uma camada homogénea de isolamento na parte exterior da parede, o que tem como consequência o aumento da espessura total da parede. Por fim na construção híbrida, como o nome indica, são utilizados os dois tipos anteriores de isolamento. Este tipo de sistema origina um equilíbrio entre a espessura total da parede e a colocação de isolamento. Na Figura 2.9, é possível observar os três tipos de sistemas LSF e a sua influência na distribuição de temperaturas no interior e na superfície interior das paredes.

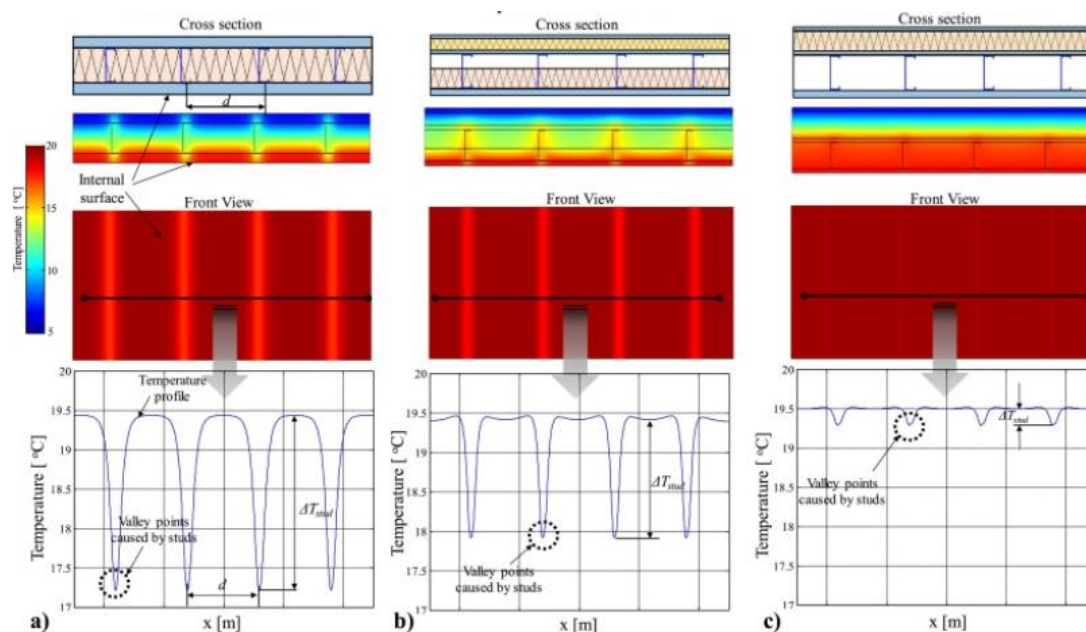


Figura 2.9 - Classificação de sistemas LSF, distribuição de temperaturas. (a) Construção fria; (b) Construção híbrida; (c) Construção quente (Atsonios et al., 2018).

Na imagem também é possível observar a influência dos perfis de aço na distribuição de temperaturas. É a existência de um esqueleto estrutural composto por perfis de aço que determina o fraco desempenho térmico deste tipo de edifícios. Com efeito, tendo em conta que o aço é um material com uma alta condutibilidade térmica, sensivelmente 25 vezes maior que o betão (Pina dos Santos and Matias, 2006), estão reunidas as condições para a proliferação de pontes térmicas. Além disto, a utilização de materiais construtivos de massa reduzida por parte deste tipo de construção contribui para o desenvolvimento de uma inércia fraca dos edifícios.

A inércia térmica fraca é uma característica típica dos edifícios em LSF. Em suma, a inércia térmica é a capacidade de um material absorver, armazenar e progressivamente libertar calor. Ou seja, é a capacidade de um material contrariar as temperaturas da sua vizinhança ao longo do tempo. Este fenómeno depende da densidade, da capacidade térmica e da condutibilidade térmica do material (Verbeke and Audenaert, 2018). Este conceito aplica-se a edifícios, na medida em que a envolvente atua como um sistema com inércia térmica própria. O efeito da inércia térmica no desempenho energético do edifício é complexo e, se por um lado uma inércia forte proporciona o armazenamento e posterior libertação de calor, por outro lado, também é necessário um maior esforço de aquecimento inicial. O inverso acontece para a inércia fraca, o que dificulta o favorecimento de todas as necessidades energéticas ao longo do período de vida útil do edifício (Hoes et al., 2011). No entanto, vários estudos mostraram um impacto benéfico da inércia forte na manutenção do conforto térmico e nas necessidades energéticas (Baggs and

Mortensen, 2006; Gregory et al., 2008). A inércia térmica também sido alvo de estudos por parte da comunidade científica, com o objetivo de analisar medidas que aumentem a inércia dos edifícios. Duas dessas medidas são a utilização de materiais que mudam de fase (PCM – *Phase Change Materials*) e sistemas de aproveitamento da forte inércia térmica do solo (Gao et al., 2018; Martins, 2017; Soares et al., 2013).

Como foi visto no subcapítulo 2.3, a transferência de calor é realizada no “caminho” de menor resistência térmica. Neste caso, a utilização de perfis de aço tem impacto negativo na resistência global das paredes pela introdução de “caminhos” que a transferência de calor privilegia. As pontes térmicas criadas pelos perfis de aço assumem uma importante influência no desempenho térmico dos edifícios, e o seu desprezo pode levar a uma avaliação em excesso de até 50% no cálculo da resistência térmica da parede (Gorgolewski, 2007).

A análise do impacto dos perfis de aço no desempenho térmico do edifício tem sido abordada pela comunidade científica que através do estudo do cálculo do coeficiente de transmissão térmica têm sido elaborados métodos simplificados, com vista à obtenção de resultados rigorosos quando comparados com os resultados obtidos utilizando o método tradicional previsto pela EN ISO 6946 (Gorgolewski, 2007; Santos et al., 2014b). O método previsto pela EN ISO 6946 tem como base a existência de camadas de elementos construtivos homogêneas, ou seja, segue a equação (12). Além disto, têm sido estudadas medidas de mitigação de pontes térmicas, sendo que as boas práticas de dimensionamento e execução se revelam essenciais. Neste aspeto é importante garantir uma camada contínua de isolamento, evitar as quebras de isolamento nas uniões de elementos da envolvente e prever uma geometria simples do edifício. No entanto, têm vindo a ser estudadas medidas que atuem diretamente nos “caminhos” de transferência de calor, ou seja, nos elementos metálicos da envolvente. A premissa destas medidas é, simplesmente, a manipulação física do “caminho” tornando-se mais complicada a transferência de calor, pelo conseqüente aumento da resistência térmica (Soares et al., 2017).

A manipulação física pode ser executada de várias formas. Os sistemas de fixação dos isolamentos devem evitar a sua perfuração, ou então fazê-la com elementos de condutibilidade térmica baixa, como o plástico. Além disto, foram estudadas outras medidas com impacto positivo no aumento da resistência térmica como: a diminuição da massa de aço e o aumento do caminho percorrido pelo fluxo de calor (equivale a um aumento de espessura), através de furos nas almas dos perfis; a diminuição da área de contato entre o banzo do perfil e os painéis de revestimento; a utilização de material com baixa condutibilidade térmica como a borracha entre os perfis de aço e os painéis de revestimento; e a utilização de elementos de corte térmico nas ligações de perfis (Lupan et al., 2016; Santos et al., 2014a). É possível observar exemplos das medidas *supra* referidas na Figura 2.10.

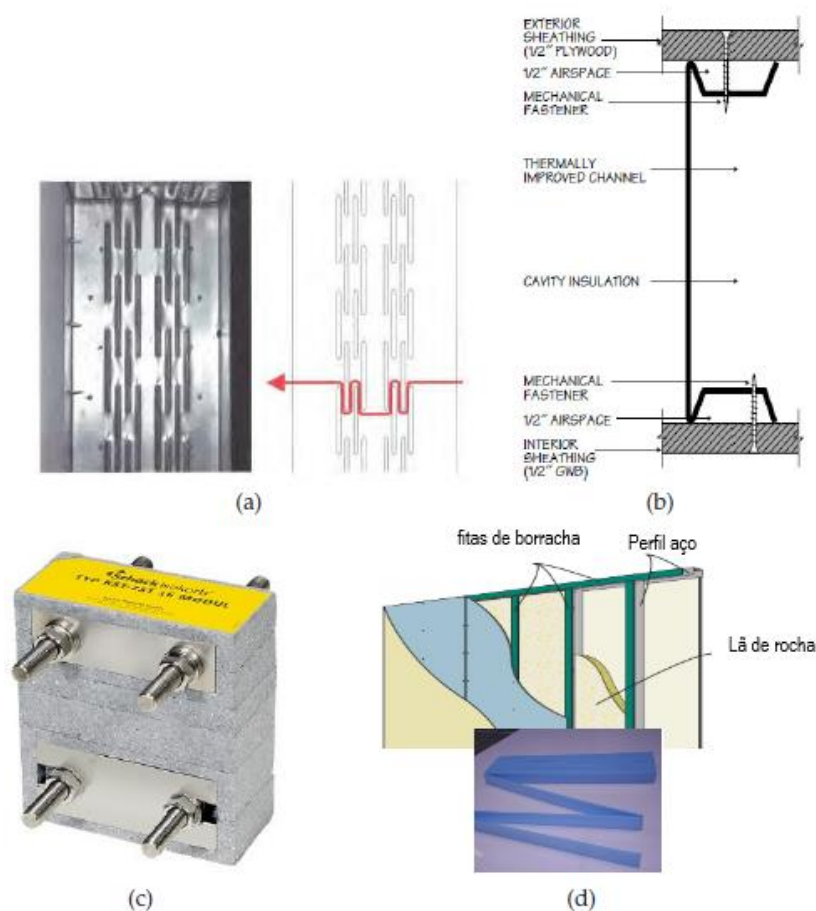


Figura 2.10 - Medidas de mitigação de pontes térmicas: (a) Redução da massa de aço; (b) Redução da área de contacto entre aço e revestimento; (c) Elemento de corte térmico; (d) Fitas de borracha entre perfil e revestimento (Santos et al., 2014a).

Não obstante a adoção destas medidas irão sempre existir zonas de pontes térmicas mais sensíveis, quer seja pelas características geométricas e/ou pela quantidade de aço que existe na zona, devido ao facto de serem zonas com solicitações de carga maiores ou de ligações a outros elementos metálicos como caixilharias.

## 3 CASO DE ESTUDO

### 3.1 Objetivo e Enquadramento

O objetivo neste capítulo é analisar uma ponte térmica linear num edifício construído em LSF. Esta análise foi realizada através da quantificação do  $\Psi$ . Foi efetuado um estudo que determina a influência da posição do isolamento térmico, da sua espessura e da existência de perfis de aço neste coeficiente, uma vez que estes são os fatores com maior relevância no desempenho térmico da envolvente. Na análise efetuada foi observado o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), aprovado pelo DL n° 118/2013, de 20/08/2013.

Antes de mais é necessário identificar a PTL, sendo que se trata de uma ligação entre duas paredes verticais. Quatro razões determinaram a escolha da PTL: a sua recorrência num edifício; a geometria desfavorável; o facto de ser uma zona onde existe mais aço, seja em perfis de reforço ou em perfis de maiores dimensões; e a sua contribuição para o tipo de estudo que se está a realizar, uma vez que esta PTL é independente de qualquer outro tipo de elemento, como uma janela ou porta, o que permite manter uma análise crítica e objetiva quanto à influência da posição do isolamento e da existência de aço.

Nos termos do referido decreto-lei, a quantificação do  $\Psi$  pode ser feita por uma de três formas:

- De acordo com a norma europeia EN ISO 10211;
- Com recurso a catálogos de pontes térmicas para várias geometrias e soluções construtivas típicas, desde que o cálculo tenha sido efetuado de acordo com a norma EN ISO 14683 com recurso à metodologia definida na EN ISO 10211;
- Com recurso aos valores por defeito previstos no próprio diploma.

Independentemente da forma escolhida, a EN ISO 14683 prevê sempre uma margem de erro associada. Esta norma especifica um erro de  $\pm 5\%$  no primeiro caso, no segundo um erro de  $\pm 20\%$  e no último um erro variável entre 0% a 50%

### 3.1.1 Definição da PTL em Estudo

O sistema LSF, como já foi referido, é caracterizado pela sua versatilidade. Neste sentido existem vários tipos de configurações ao nível de pormenores construtivos que dependem, essencialmente, do tipo de utilização do edifício e do local em que este se insere, seja a nível de oferta de matérias primas, empresas construtoras ou as características bioclimáticas da região.

A configuração da ligação entre as duas paredes exteriores em estudo foi determinada com base nos pormenores construtivos disponibilizados pela Futureng (Futureng, 2018d), uma vez que é representativa da aplicação do sistema LSF em Portugal. É importante acrescentar que a utilização deste pormenor construtivo, Figura 3.11, foi puramente académica e foi alvo de modificação ao longo do trabalho.

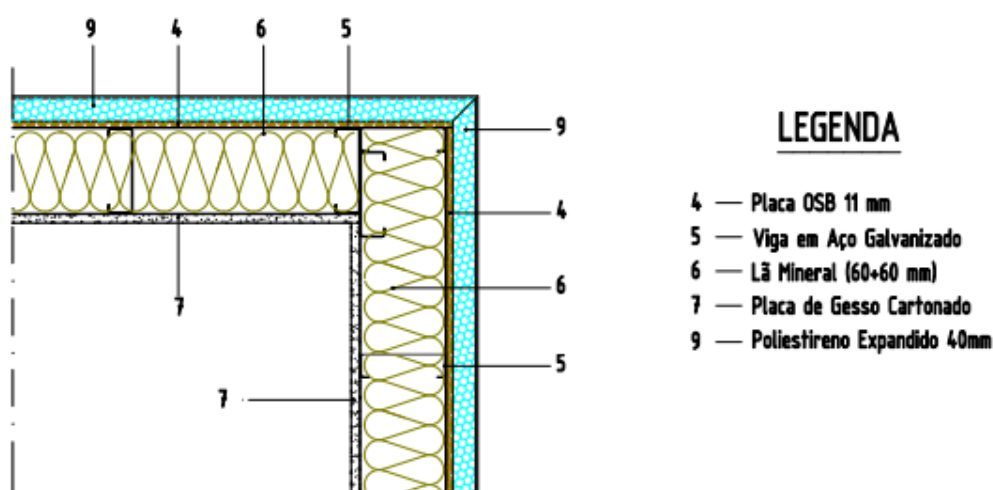


Figura 3.11 - Pormenor construtivo da ligação entre duas paredes (Futureng, 2018d).

A partir deste pormenor construtivo foram definidos perfis C 150 x 2 mm, cujas dimensões se encontram representadas na Figura 3.12. A utilização destes perfis prevê uma distância de 600 mm entre eles. Além disto, foram modificados os painéis de revestimento.



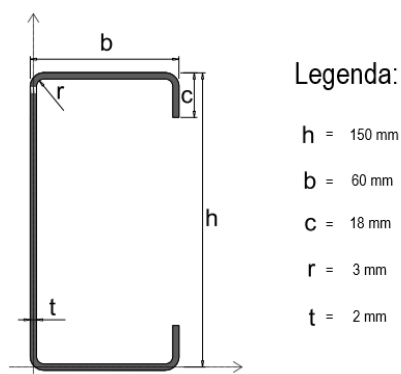


Figura 3.12 - Dimensões do perfil C 150 x 2 mm.

Posto isto, a Figura 3.13, mostra a configuração final da ligação entre as duas paredes exteriores em estudo.

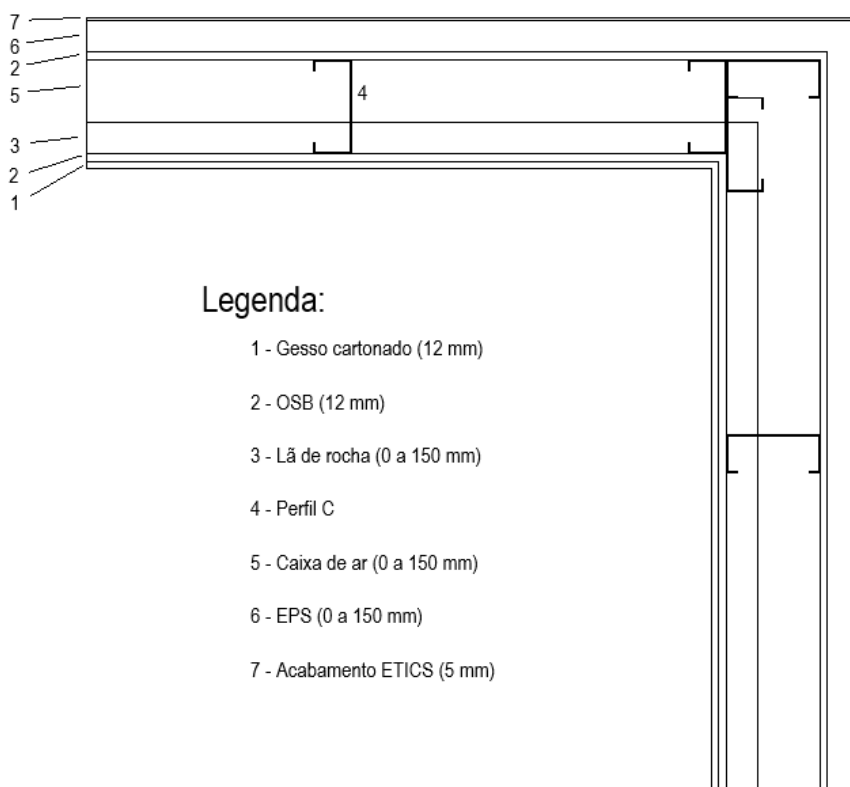


Figura 3.13 – Representação da junção entre duas paredes exteriores em estudo.

A variação da espessura das camadas de isolamento e da caixa de ar prende-se com a estratégia adotada para a avaliação da influência da posição do isolamento, da sua espessura e do aço na quantificação do  $\Psi$ . Esta estratégia é detalhada no subcapítulo seguinte.

### 3.2 Metodologia

Como referido no subcapítulo 2.4.4, existem três tipos de sistemas construtivos LSF, consoante a posição do isolamento térmico na parede exterior. Com o objetivo de avaliar a influência da posição do isolamento na quantificação do  $\Psi$ , foram considerados os três tipos de sistemas: frio, quente e híbrido. Além disto, e para cada tipo de sistema, a espessura do isolamento também foi tida em conta, fazendo-a variar entre os 25 mm e os 150 mm. Em suma, foi realizada a quantificação do  $\Psi$  em 18 ligações diferentes, correspondendo cada tipo de LSF a 6 ligações. O Quadro 3.1 faz um resumo das 18 ligações em estudo.

Quadro 3.1 - Resumo de ligações em estudo e definição das espessuras das várias camadas.

Sistema Frio			Sistema Quente			Sistema Híbrido		
Material	Esp. (mm)		Material	Esp. (mm)		Material	Esp. (mm)	
Acabamento ETICS	5		Acabamento ETICS	5		Acabamento ETICS	5	
OSB	12		EPS	150	<b>Q1</b>	EPS	75	<b>H1</b>
Lã de rocha	150	<b>F1</b>		125	<b>Q2</b>		62.5	<b>H2</b>
	125	<b>F2</b>		100	<b>Q3</b>		50	<b>H3</b>
	100	<b>F3</b>		75	<b>Q4</b>		37.5	<b>H4</b>
	75	<b>F4</b>		50	<b>Q5</b>		25	<b>H5</b>
	50	<b>F5</b>		25	<b>Q6</b>		12.5	<b>H6</b>
	25	<b>F6</b>						
Perfil C	150		OSB	12		OSB	12	
OSB	12		Perfil C	150		Lã de rocha	75	<b>H1</b>
Gesso cartonado	12		OSB	12			62.5	<b>H2</b>
			Gesso cartonado	12			50	<b>H3</b>
							37.5	<b>H4</b>
							25	<b>H5</b>
							12.5	<b>H6</b>
						Perfil C	150	
						OSB	12	
						Gesso cartonado	12	

Posto isto, as ligações designadas de F1 a F6 correspondem às paredes no sistema frio, as ligações Q1 a Q6 correspondem às paredes do sistema quente e, por sua vez, as ligações H1 a H6 às paredes do sistema híbrido. Importante referir que, tendo em conta o objetivo da análise, apenas as espessuras dos isolamentos é que são alteradas, sendo que o resto da parede se manteve constante. A fim de simplificar o processo, no sistema híbrido, adotou-se uma

distribuição equitativa entre o isolamento térmico exterior (EPS) e o isolamento térmico no interior da parede (lã de rocha).

Além disto, foi necessário avaliar a influência do aço na quantificação do  $\Psi$ . Para isso foram calculados os  $\Psi$ 's para as mesmas 18 ligações, mas sem os perfis de aço na parede. Desta forma, as paredes são constituídas apenas por camadas homogéneas, sendo que o único fluxo de calor 2D é criado pela variação da geometria na ligação (área exterior maior do que a área interior).

Posto isto foram quantificados dois  $\Psi$ 's diferentes:

- $\Psi_{LSF}$  que designa o coeficiente de transmissão térmica linear com o sistema LSF, ou seja, com o esqueleto estrutural de aço;
- $\Psi_{HOM}$  que designa o coeficiente de transmissão térmica linear homogéneo, ou seja, sem o sistema LSF.

Por último, a quantificação destes coeficientes foi realizada de acordo com a EN ISO 10211, pelo que se prevê um erro de  $\pm 5\%$ . O método padronizado nesta norma tem por base a criação de uma malha onde a temperatura em cada ponto é obtida através de um sistema de equações. Estas equações são a lei da conservação da energia ( $div\ q = 0$ ) e a lei de Fourier ( $Q = -\lambda\ grad\ \theta$ ), que são aplicadas tendo em conta as condições de fronteira, ou seja, as resistências térmicas superficiais, a temperatura exterior e interior. Uma vez conhecida a temperatura em cada ponto, ou seja, a distribuição de temperaturas na ponte térmica, é possível determinar o fluxo de calor através da aplicação da lei de Fourier.

Como foi visto no subcapítulo 2.3.3, existem métodos para a resolução deste sistema de equações. De forma geral, quanto maior for o número de pontos da malha, mais rigorosos irão ser os resultados produzidos. De qualquer forma, independentemente do método escolhido, este tem de ser verificado segundo os requisitos da norma EN ISO 10211.

Felizmente, hoje em dia as ferramentas informáticas são capazes de resolver problemas complexos com rapidez, enquanto produzem resultados de qualidade. Por isso, foi utilizado um programa de licença aberta, o *Therm*, na sua versão 7.6. Este programa de análise 2D utiliza o método dos elementos finitos para resolver a distribuição de temperaturas e fluxos de calor no modelo geométrico simulado. Neste caso o modelo geométrico é o das ligações apresentadas no Quadro 3.1.

Com recurso à ferramenta *Therm* é possível obter a taxa de transferência de calor por metro de desenvolvimento de PTL,  $\Phi$  [ $W/m$ ]. A partir daqui é possível calcular o produto do coeficiente de transferência de calor,  $L_{2D}$  [ $W/m \cdot ^\circ C$ ], através da equação:

$$L_{2D} = \frac{\Phi}{\theta_i - \theta_e} \quad (16)$$

De seguida, o coeficiente de transmissão térmica linear  $\Psi$  é calculado através da equação:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} (U_j \times l_j) \quad (17)$$

onde:

$U_j$  é o coeficiente de transmissão térmica do elemento construtivo 1D adjacente  $j$  [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ];

$l_j$  é o comprimento do elemento construtivo a que o  $U_j$  diz respeito [ $m$ ];

$N_j$  é o número de elementos adjacentes.

Importante referir que o cálculo dos  $U$ 's foi realizado de duas formas distintas. No primeiro caso, dos cálculos de  $\Psi_{LSF}$ , o  $U$  foi calculado com recurso ao programa *Therm*, uma vez que o esqueleto estrutural de aço impõe fluxos de calor 2D. O programa devolve este valor automaticamente. No caso dos cálculos de  $\Psi_{HOM}$ , o  $U$  é calculado manualmente com recurso à norma EN ISO 6946. No entanto também se poderia recorrer ao programa *Therm*, o que seria um processo mais moroso, para obter exatamente os mesmos resultados.

### 3.2.1 Definição do Modelo Geométrico

O modelo geométrico é uma representação do pormenor construtivo em estudo. A norma EN ISO 10211 estabelece regras para a criação do modelo geométrico, nomeadamente na colocação de planos de corte. Os planos de corte devem ser colocados a uma distância mínima da ponte térmica, medida na superfície interior. Esta distância mínima é 1 m ou, caso maior, 3 vezes a espessura do elemento adjacente em causa. No caso de existir um plano de simetria a uma distância inferior de 1 m da PTL, esse plano assume-se como plano de corte. O objetivo destas regras é garantir que o plano de corte é colocado num plano onde o fluxo de calor é 1D e que o modelo geométrico engloba, na sua totalidade, a área de influência da ponte térmica linear, ou

seja, a área onde os fluxos são 2D. Tendo estas regras em conta, foram utilizados dois modelos geométricos base na realização deste estudo.

O primeiro modelo serviu de base a todos os modelos geométricos utilizados na quantificação do  $\Psi_{LSF}$ . Na definição deste modelo, o critério utilizado na colocação dos planos de corte foi a existência de planos de simetria, entre perfis de aço, a menos de 1 m da PTL. Na Figura 3.14 está representado este modelo, em conjunto com a designação de cada elemento adjacente, 1 e 2.

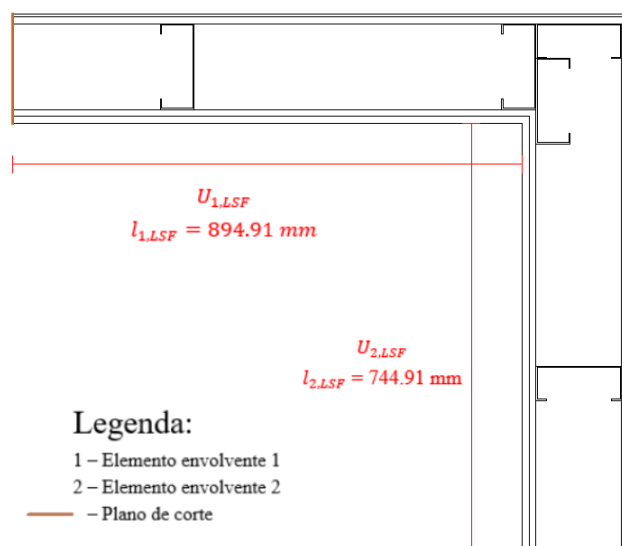


Figura 3.14 – Modelo base geométrico com LSF.

Já o segundo modelo, representado na Figura 3.15, serviu de base aos modelos geométricos utilizados na quantificação do  $\Psi_{HOM}$ . Uma vez que não existem planos de simetria, dada a existência exclusiva de camadas homogêneas, os planos de corte são colocados a, pelo menos, 1 m de distância da PTL. Como no caso da ligação Q1 as paredes adjacentes perfazem uma espessura de 341 mm, cada uma, a distância mínima do plano de corte será de 1023 mm.

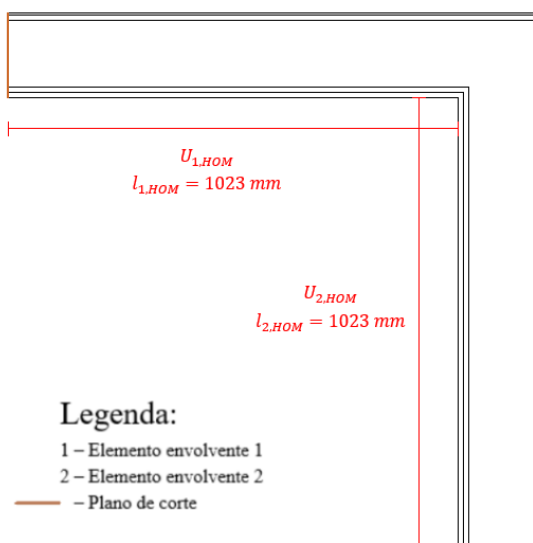


Figura 3.15 - Modelo base geométrico sem LSF.

Além destes, como modelos auxiliares, foram utilizados outros dois modelos base geométricos. Estes serviram de base aos modelos utilizados nos cálculos de  $U_{1,LSF}$  e  $U_{2,LSF}$  através do programa *Therm*. Estes modelos estão representados na Figura 3.16.

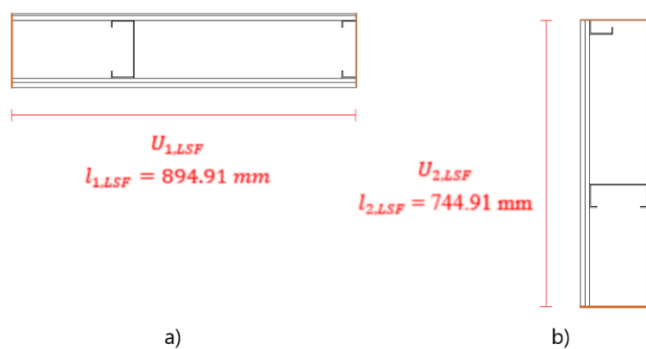


Figura 3.16 - Modelos base geométricos utilizados no cálculo de (a)  $U_{1,LSF}$  e (b)  $U_{2,LSF}$ .

### 3.2.2 Definição de Materiais e das Condições de Fronteira

Uma vez definidos o pormenor construtivo e o modelo geométrico, é necessário atribuir valores às condutibilidades térmicas dos materiais e às condições de fronteira, nomeadamente, às resistências térmicas superficiais e temperaturas interiores e exteriores.

As condutibilidades térmicas,  $\lambda$ 's, atribuídas aos materiais foram obtidas com recurso a uma publicação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), usualmente designada por ITE50 (Pina dos Santos and Matias, 2006). A exceção foi o  $\lambda$  do acabamento em ETICS, que foi atribuído com base no valor utilizado pelo artigo científico referenciado no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Quadro resumo dos coeficientes de condutibilidade térmica.

<b>Materiais</b>	<b><math>\lambda</math> [<math>W/m \cdot ^\circ C</math>]</b>	<b>Fonte</b>
Acabamento ETICS	0.75	(Santos et al., 2014b)
EPS	0.037	ITE50
OSB	0.13	ITE50
Perfil C	50	ITE50
Lã de rocha	0.042	ITE50
Gesso cartonado	0.25	ITE50

Considerando a simplificação introduzida no subcapítulo 2.3.2 – a combinação dos fenómenos de convecção e radiação – a modelação da caixa de ar é realizada através de um sólido equivalente. Neste caso, a resistência térmica associada, é prevista pelo ITE50 consoante a direção do fluxo de calor e a espessura da caixa de ar, tendo em conta que é um espaço de ar não ventilado. O cálculo do  $\lambda$  é posteriormente realizado através da equação (11). Uma vez que a direção do fluxo de calor é horizontal e a espessura da caixa de ar varia ao longo deste estudo, o Quadro 3.3 apresenta um resumo dos  $\lambda$ 's atribuídos a este “material”.

Quadro 3.3 - Quadro resumo da resistência térmica e dos coeficientes de condutibilidade térmica da caixa de ar.

<b>Material</b>	<b><math>R</math> [<math>m \cdot ^\circ C/W</math>]</b>	<b>Fonte</b>
Caixa de ar 25 a 300 mm	0.18	ITE50
<b>Espessura [mm]</b>	<b><math>\lambda</math> [<math>W/m \cdot ^\circ C</math>]</b>	
25	0.1389	
50	0.2778	
75	0.4167	
87.5	0.4861	
100	0.5556	
112.5	0.6250	
125	0.6944	
137.5	0.7639	
150	0.8333	

Por último, são definidas as condições de fronteira. Existem três tipos de fronteira a prever no modelo geométrico. Existem as fronteiras adiabáticas, definidas pela colocação dos planos de corte, onde o fluxo de calor é nulo. Além destas, existem as fronteiras interiores e exteriores que correspondem à superfície interior e exterior da parede, respetivamente. Mais uma vez, a simplificação da combinação de processos de transferência de calor é útil, e permite associar uma resistência térmica superficial às superfícies interior e exterior. Esta resistência térmica é prevista no ITE50, tendo em conta a direção de fluxo horizontal. Ademais, também foram atribuídas as temperaturas do ambiente interior e exterior. O resumo destes valores é apresentado no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Quadro resumo das condições de fronteira.

Superfície	$R [m \cdot ^\circ C/W]$	Fonte	Temperatura ambiente[ $^\circ C$ ]
Exterior	0.04	ITE50	0
Interior	0.13	ITE50	20

### 3.2.3 Verificação do Método

A utilização do método dos elementos finitos, neste caso aplicado com recurso ao programa *Therm* requer uma verificação delineada na EN ISO 10211. A norma disponibiliza dois casos padrão de teste e os respetivos resultados. Para o método de cálculo ser classificado como um método 2D rigoroso, os resultados por ele produzidos nos dois casos de teste, devem estar no intervalo previsto pela norma.

O caso de teste 1 prevê o cálculo da distribuição de temperaturas numa coluna de superfície quadrada com as condições de fronteira conhecidas. A resistência térmica nas fronteiras, ou seja, a resistência superficial, com o objetivo de ser desprezada, foi indicada como nula. No programa *Therm*, consegue-se garantir esta condição pela atribuição de um coeficiente de condutibilidade térmica de  $99999 W/m \cdot ^\circ C$  às fronteiras. Depois de calculados, os resultados mostraram-se fidedignos aos previstos pela norma. Na Figura 3.17 é apresentada a distribuição de temperaturas obtida neste caso de teste.



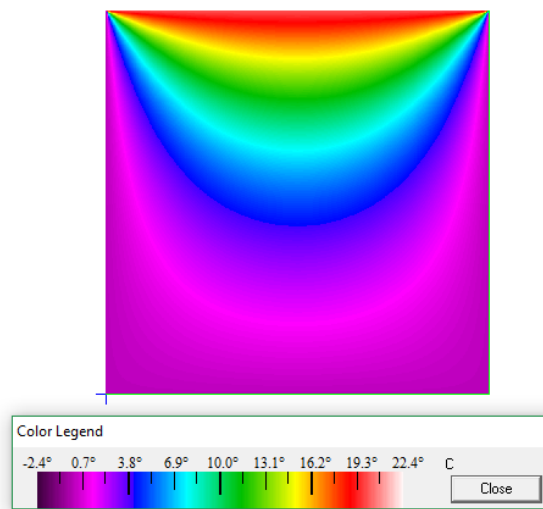


Figura 3.17 - Distribuição de temperaturas obtida no caso de teste 1 da norma EN ISO 10211.

O caso de teste 2 prevê, além do cálculo da distribuição de temperaturas, o cálculo da taxa de transferência de calor numa superfície constituída por vários materiais. Para tanto, além das temperaturas superficiais, também são facultadas as resistências superficiais e os coeficientes de condutibilidade térmica dos materiais. Mais uma vez, os resultados mostraram-se fidedignos com os que são previstos pela norma. Na Figura 3.18 é possível observar a distribuição de temperaturas obtida e o resultado da taxa de transferência de calor.

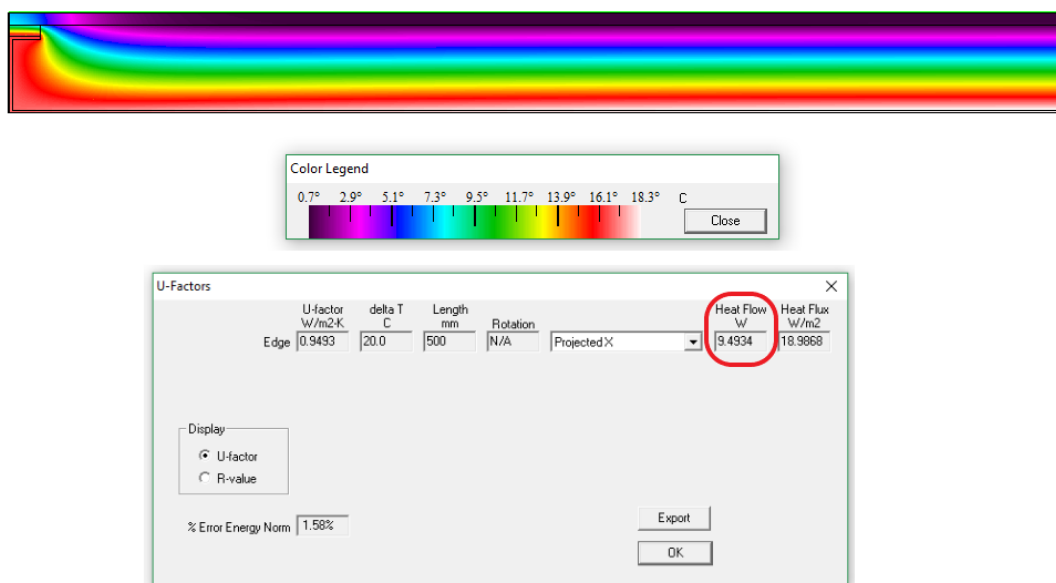


Figura 3.18 - Distribuição de temperaturas e taxa de transferência de calor obtidos no caso de teste 2 da norma EN ISO 10211.

Além disto, foi realizado um teste com o intuito de verificar os cálculos manuais utilizados no cálculo de  $U_{HOM}$ . Irá ser feita a comparação do valor obtido através do cálculo manual com o valor obtido através do programa *Therm*. Esta comparação irá incidir sobre uma parede aleatória prevista no Quadro 3.1, mais especificamente a parede que faz parte da ligação H3. O cálculo manual segue a seguinte equação:

$$U_{HOM,H3} = \frac{1}{0.13 + \frac{0.012}{0.25} + \frac{0.012}{0.13} + \frac{0.05}{0.042} + 0.18 + \frac{0.012}{0.13} + \frac{0.05}{0.037} + \frac{0.005}{0.75} + 0.04} \quad (18)$$

Temos, portanto, o resultado do cálculo manual como  $U_{HOM,H3} = 0.3194 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ . A Figura 3.19 apresenta o resultado obtido através do programa *Therm*.

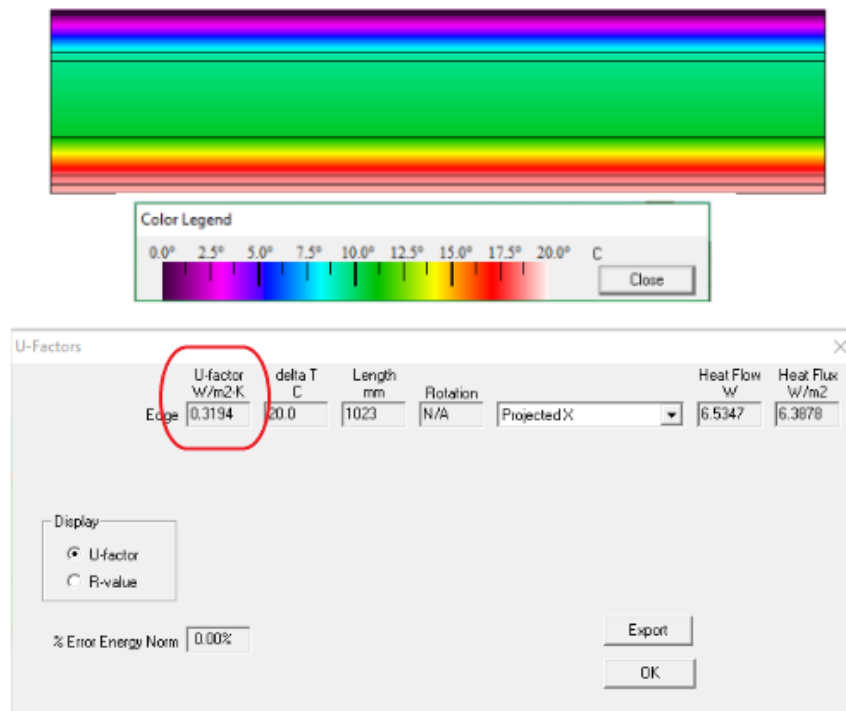


Figura 3.19 - Distribuição de temperaturas e taxa de transferência de calor obtidos no cálculo de  $U_{HOM,H3}$ .

Pela comparação dos valores, ficam verificados os cálculos manuais efetuados para obter os valores de  $U_{HOM}$ .

Por fim, é importante fazer referência às definições do *Therm* que influenciam o rigor dos resultados obtidos pelo programa. A criação da malha é inicialmente influenciada pelo *Quad*

*Tree Mesh Parameter* que estabelece o tamanho máximo de subdivisões. Este parâmetro pode assumir valores entre 3 a 12, sendo que quanto maior for, menores serão os elementos da subdivisão inicial. O valor utilizado foi 8. Tendo em conta que o método dos elementos finitos é um processo iterativo, o programa permite o utilizador definir o erro aceitável, isto é, o erro a partir do qual o programa pára as iterações e devolve o resultado. Este parâmetro é designado por *Maximum % Error Energy Norm*, e foi definido em 2%. Estes valores mantêm-se inalterados ao longo de todo o trabalho aqui apresentado.

### 3.3 Apresentação de Resultados e Discussão

Como foi abordado nos subcapítulos anteriores, a influência da posição do isolamento térmico, a sua espessura e a influência da existência de aço na quantificação do  $\Psi$  foi alvo de estudo. Para isso, no total foram realizadas 72 simulações no *Therm*: 18 ligações de PTL com LSF; 18 elementos adjacentes 1 com LSF; 18 elementos adjacentes 2 com LSF; e 18 ligações de PTL sem LSF. Foram também realizados 18 cálculos manuais de forma a obter o  $U_{HOM}$ , apenas 18 uma vez que  $U_{1,HOM} = U_{2,HOM}$ . Assim, estão agora reunidas as condições para a apresentação de resultados e discussão dos mesmos.

Os valores de  $U$  e  $\Psi$  requerem a utilização de duas casas decimais, mas no decorrer deste trabalho são utilizadas 4 tendo em conta a precisão adicional. Com o objetivo de apresentar os resultados e a sua discussão de forma clara, este subcapítulo divide-se em três partes. Cada parte é dedicada a cada um dos sistemas LSF em que a análise foi realizada, ou seja, sistema frio, quente e híbrido. Ademais, é possível consultar o Anexo A que contem os resultados na sua totalidade. Por último, o Anexo B e o Anexo C contêm imagens das distribuições de temperaturas e fluxos de calor para cada uma das ligações do sistema LSF. A consulta destas imagens revela-se importante, uma vez que quando acompanhada com a discussão de resultados, permite ao leitor uma melhor compreensão do fenómeno de transferência de calor na PTL. A opção de colocar estas imagens em anexos foi tomada com o objetivo de manter a fluência do texto que se segue e facilitar a interpretação destas imagens, através da comparação direta entre elas.

#### 3.3.1 Sistema Frio

A Figura 3.20 e a Figura 3.21 apresentam os resultados obtidos no cálculo dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos adjacentes. Os resultados apresentados incluem o  $U_{j,LSF}$ , o  $U_{j,HOM}$  e a diferença entre eles, para cada uma das ligações no sistema frio.

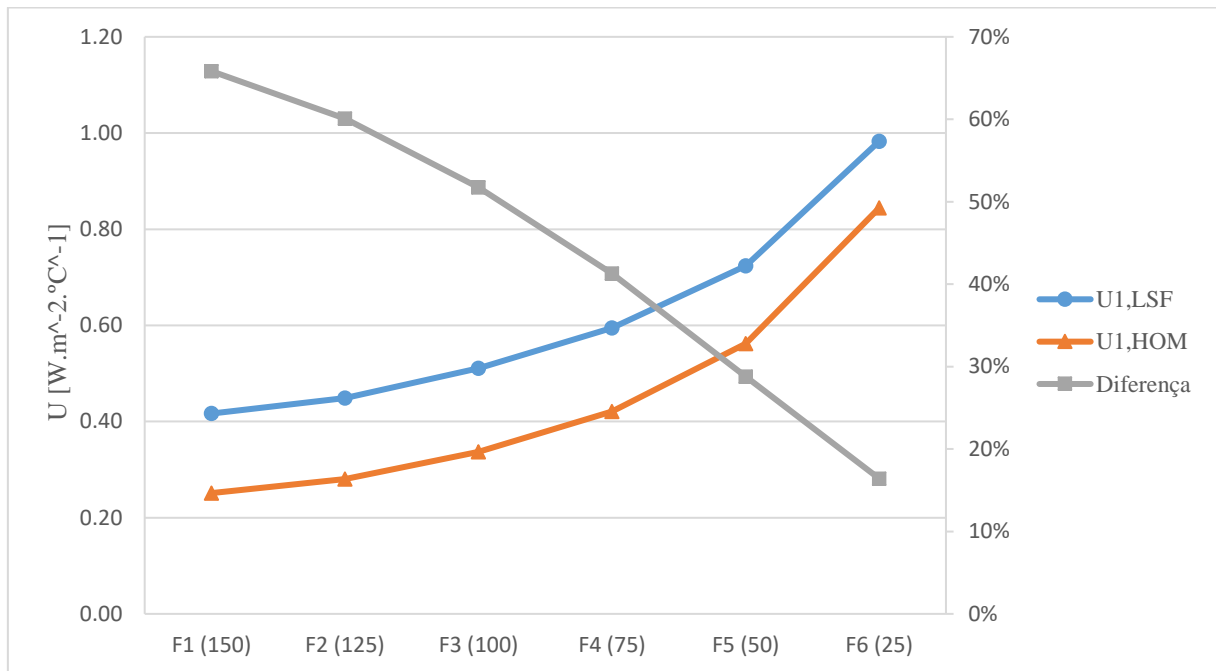


Figura 3.20 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 1 no sistema frio.

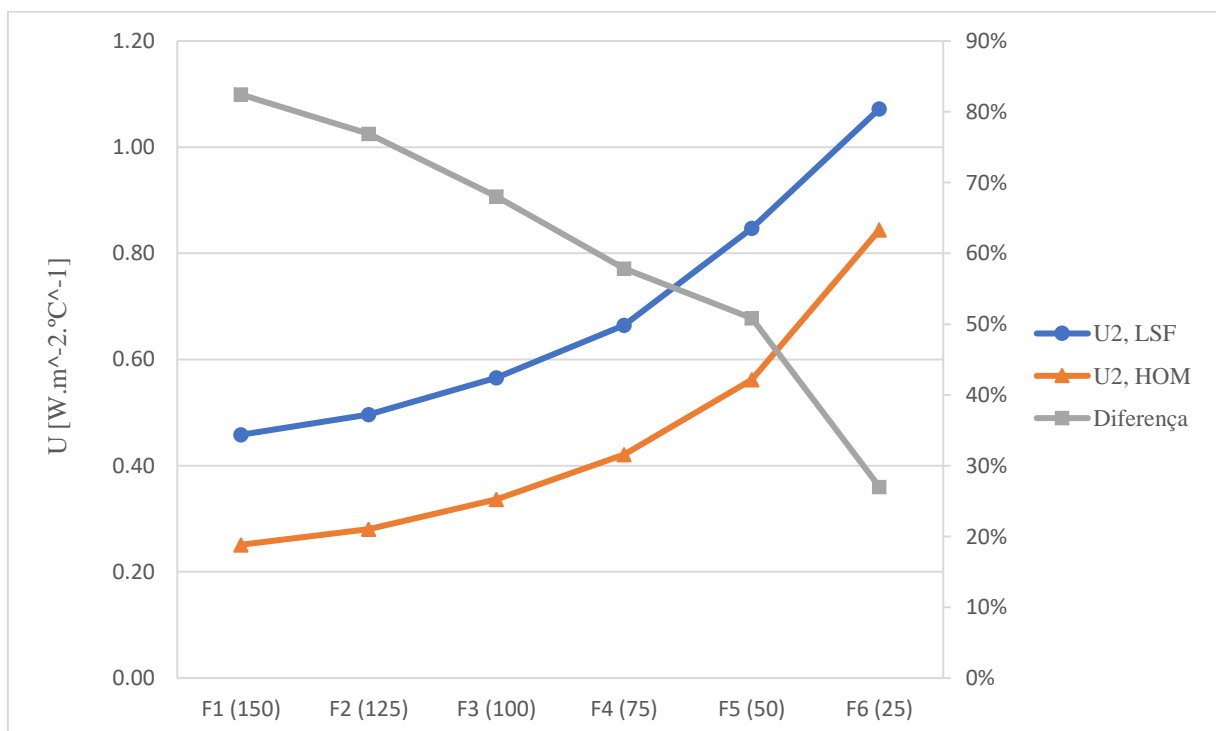


Figura 3.21 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 2 no sistema frio.

De seguida, na Figura 3.22 são apresentados os coeficientes de transmissão térmica linear das pontes térmicas do sistema frio. Estes resultados, mais detalhados, incluem a quantificação do  $\Psi_{HOM}$ , do  $\Psi_{LSF}$  e das diferenças entre eles.

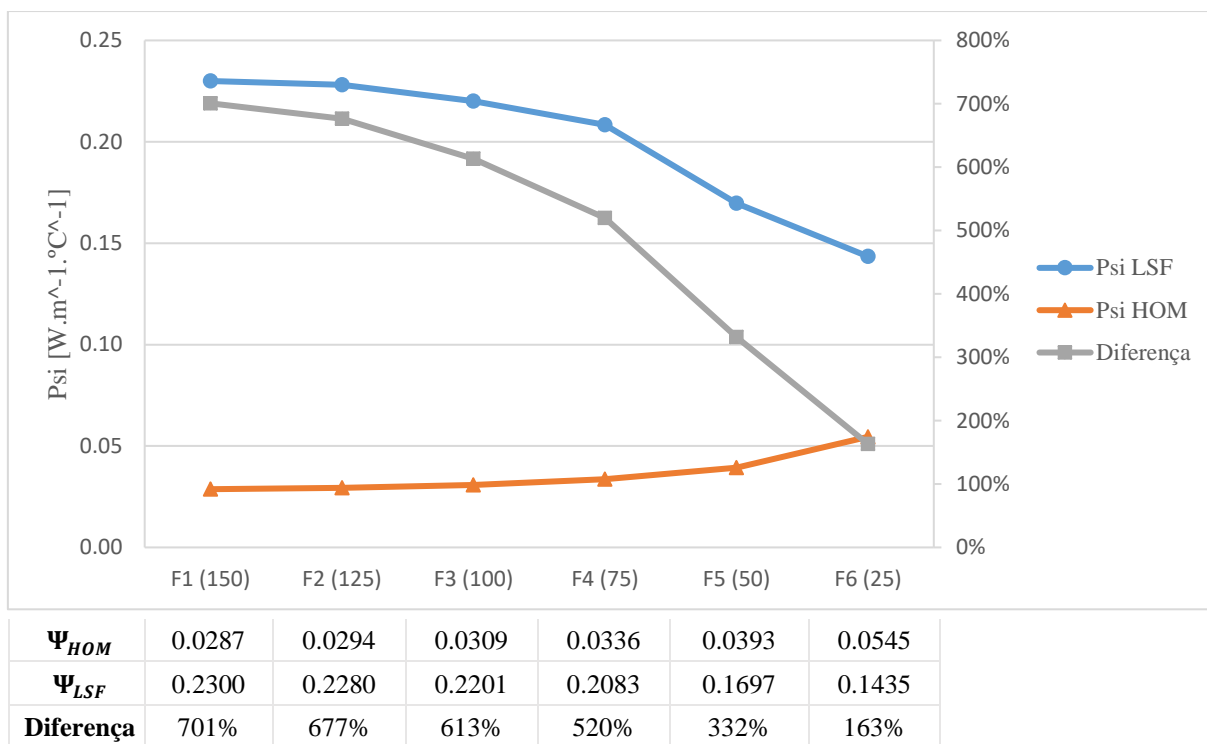


Figura 3.22 - Coeficientes de transmissão térmica linear das PTL's do sistema frio.

Após a análise dos resultados, é perceptível o impacto do esqueleto estrutural de aço no desempenho térmico destas paredes. O sistema frio é caracterizado pela camada de isolamento descontínua no interior das paredes. Estas discontinuidades provocadas pelos perfis de aço têm um impacto significativo nos valores de U, originando agravamentos na ordem dos 20% a 80%. Quanto maior a espessura da camada de isolamento descontínua, maior será a influência dos perfis de aço no valor de U.

Quanto aos valores do  $\Psi$ , as influências negativas dos perfis de aço mantêm-se. Neste caso, os agravamentos são ainda mais pronunciados atingindo valores de 163% a 701%. O agravamento mais significativo ocorre na ligação F1, em que o  $\Psi_{HOM} = 0.0287 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$  é agravado para  $\Psi_{LSF} = 0.2300 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ . Outra consideração importante a reter é a evolução inversa dos  $\Psi$ 's em função da diminuição da espessura do isolamento térmico. Enquanto o valor de  $\Psi_{HOM}$  é melhorado com o aumento da camada de isolamento, o valor de  $\Psi_{LSF}$  é agravado. Por intuição, seria de esperar o aumento deste parâmetro com o aumento do isolamento térmico, mas as discontinuidades provocadas pelos perfis de aço têm um impacto crescente à medida que do

aumento da camada de isolamento. Ou seja, com o incremento da resistência térmica nas áreas homogêneas das paredes de LSF, provocado pelo aumento do isolamento, a transferência de calor tenderá a realizar-se, cada vez mais, pelas áreas onde existem perfis de aço. Como não existe nenhuma camada de isolamento contínua, esta transferência de calor ocorre facilmente, com impacto direto no parâmetro  $\Psi_{LSF}$ . O valor de  $\Psi_{LSF}$  da ligação F6 é agravado em 60.28%, tendo em conta o mesmo valor da ligação F1.

### 3.3.2 Sistema Quente

Apresentam-se agora os resultados do cálculo dos coeficientes de transmissão térmica relativos ao sistema quente. Na Figura 3.23 e na Figura 3.24 são apresentados os valores de  $U_{j,LSF}$ , de  $U_{j,HOM}$  e a diferença entre estes em cada uma das ligações.

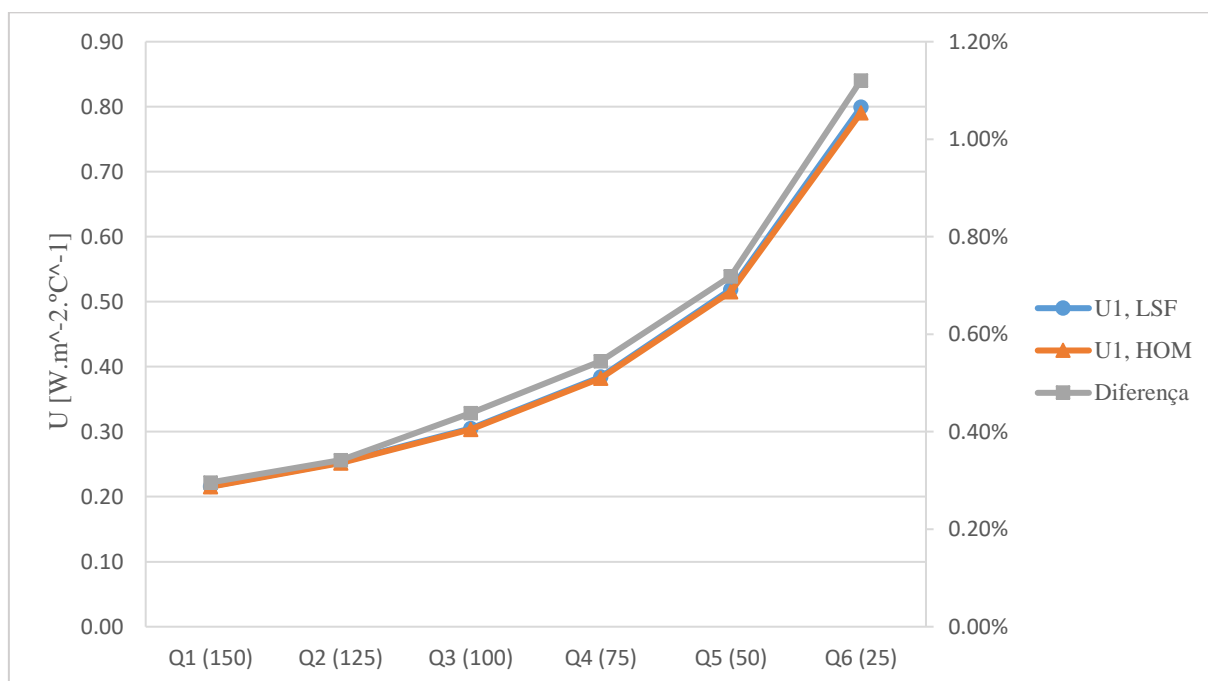


Figura 3.23 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 1 no sistema quente.

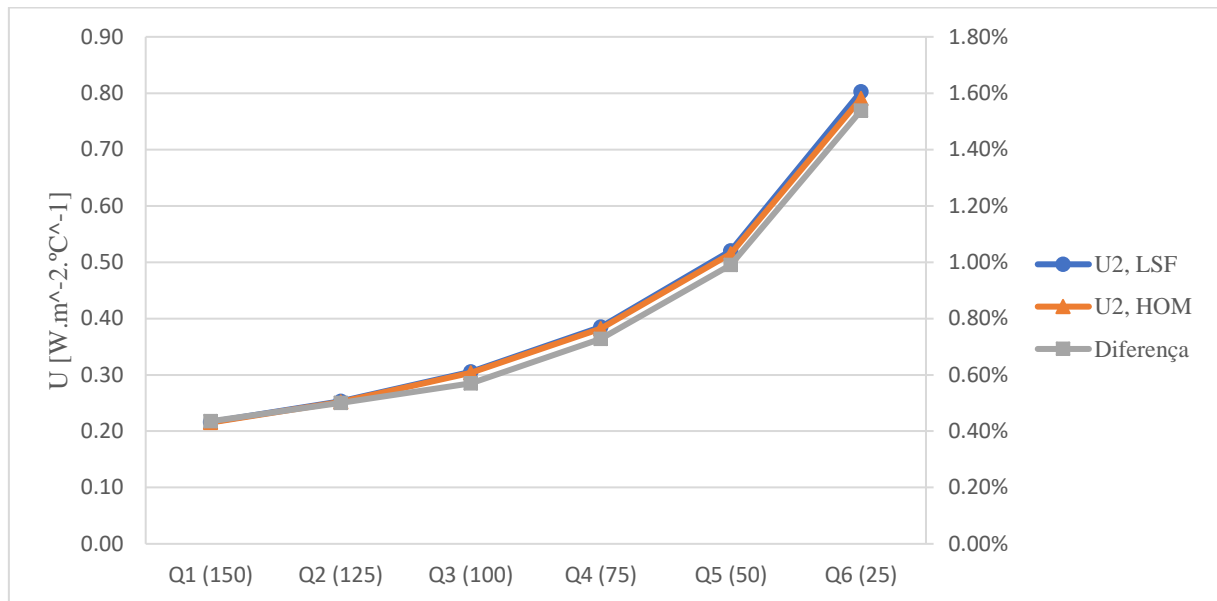
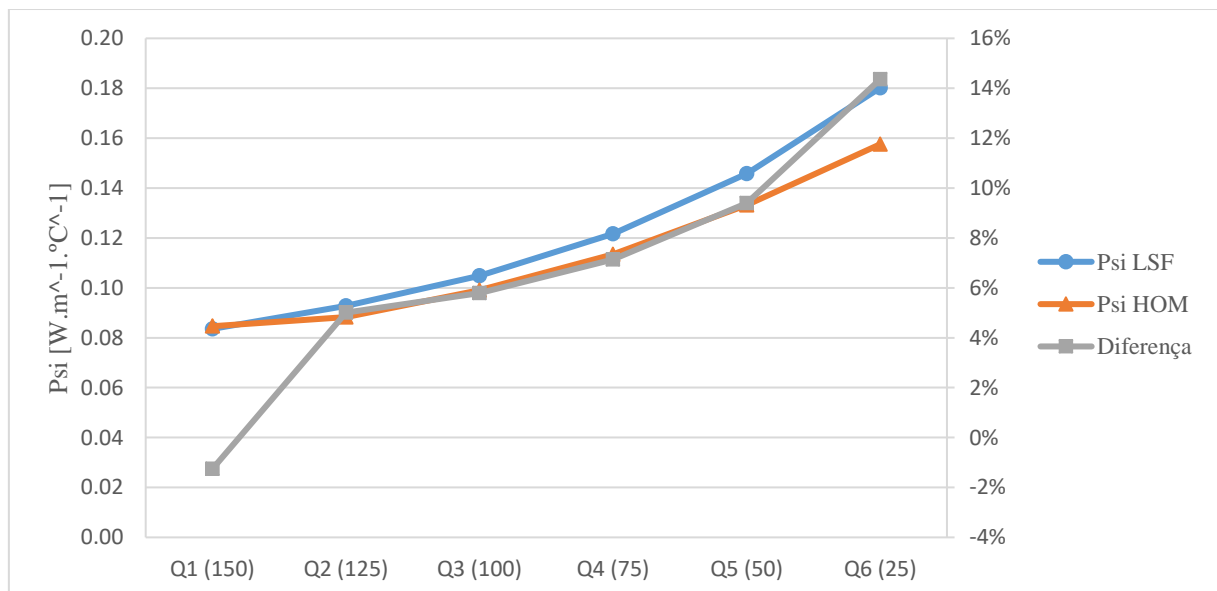


Figura 3.24 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 2 no sistema quente.

Os resultados dos cálculos de  $\Psi_{HOM}$ , do  $\Psi_{LSF}$  são apresentados na Figura 3.25, sendo também apresentadas as diferenças entre os mesmos.



$\Psi_{HOM}$	0.0846	0.0883	0.0991	0.1135	0.1332	0.1576
$\Psi_{LSF}$	0.0836	0.0927	0.1048	0.1216	0.1457	0.1802
Diferença	-1%	5%	5%	7%	9%	14%

Figura 3.25 - Coeficientes de transmissão térmica linear das PTL's do sistema quente.

Em primeiro lugar, é de destacar que a análise destes resultados comprova a eficácia de uma camada de isolamento contínua no desempenho térmico da fachada do edifício. Os valores de  $U$  sofrem um agravamento máximo de, sensivelmente, 1.6% com a introdução dos perfis de aço. Com o aumento da espessura da camada de isolamento, esse agravamento diminui, chegando aos 0.3%.

Os valores de  $\Psi$  também beneficiam com a colocação de uma camada contínua de isolamento, sendo que a ligação mais afetada pela colocação de aço é a Q6 com um agravamento de 14%. Inclusive, na ligação Q1, é curioso o facto do valor de  $\Psi_{HOM}$  ser pior do que o valor de  $\Psi_{LSF}$ , o que demonstra que os 150 mm de isolamento contínuo são suficientes para contrariar o efeito dos perfis de aço na PTL. É claro que em termos práticos a diferença de 1% ou  $0.001 W/m \cdot ^\circ C$  não é, de todo, suficiente para afirmar que um valor é melhor do que o outro.

Por último a evolução do  $\Psi_{LSF}$  é positiva com o aumento da espessura da camada de isolamento, ao contrário do que se verificou nos resultados do sistema frio, na Figura 3.22. Por outras palavras, o aumento do isolamento térmico até aos 150 mm na ligação Q1, tem um impacto positivo de 53.61% relativamente ao valor do  $\Psi_{LSF}$  da ligação Q6.

### 3.3.3 Sistema Híbrido

Finalmente, são apresentados os resultados relativos ao sistema híbrido. No seguimento dos dois sistemas anteriores, é realizada a apresentação dos valores dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos adjacentes, como é possível observar na Figura 3.26 e na Figura 3.27.



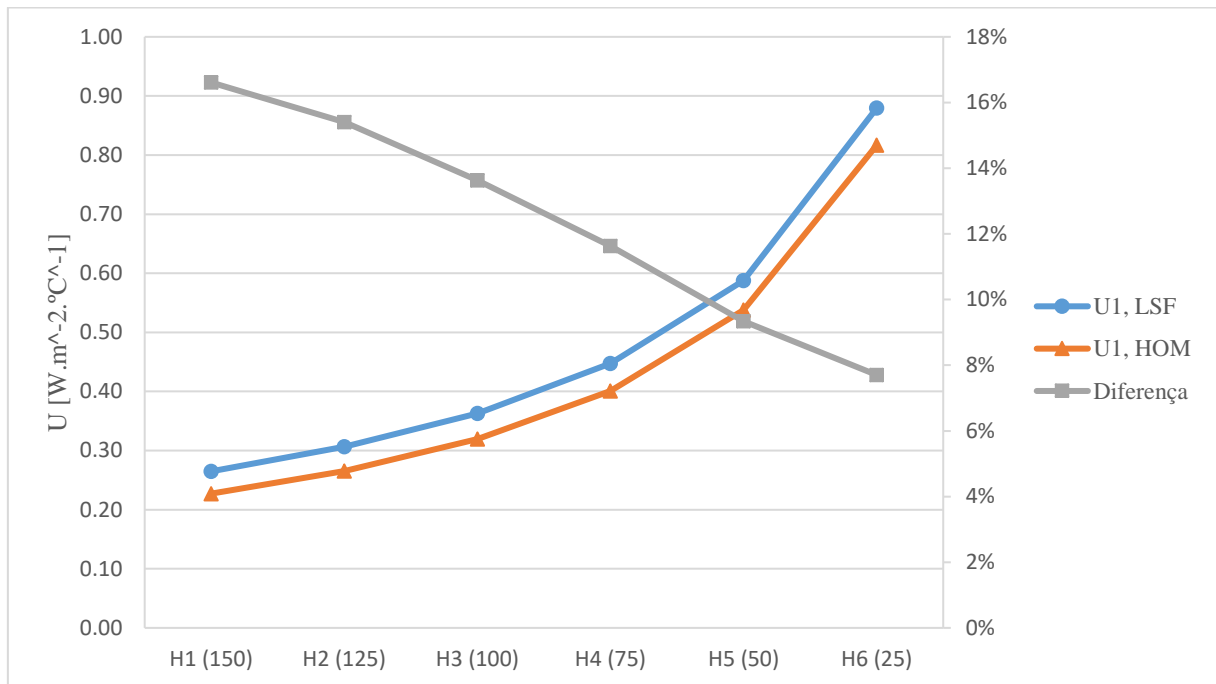


Figura 3.26 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 1 no sistema híbrido.

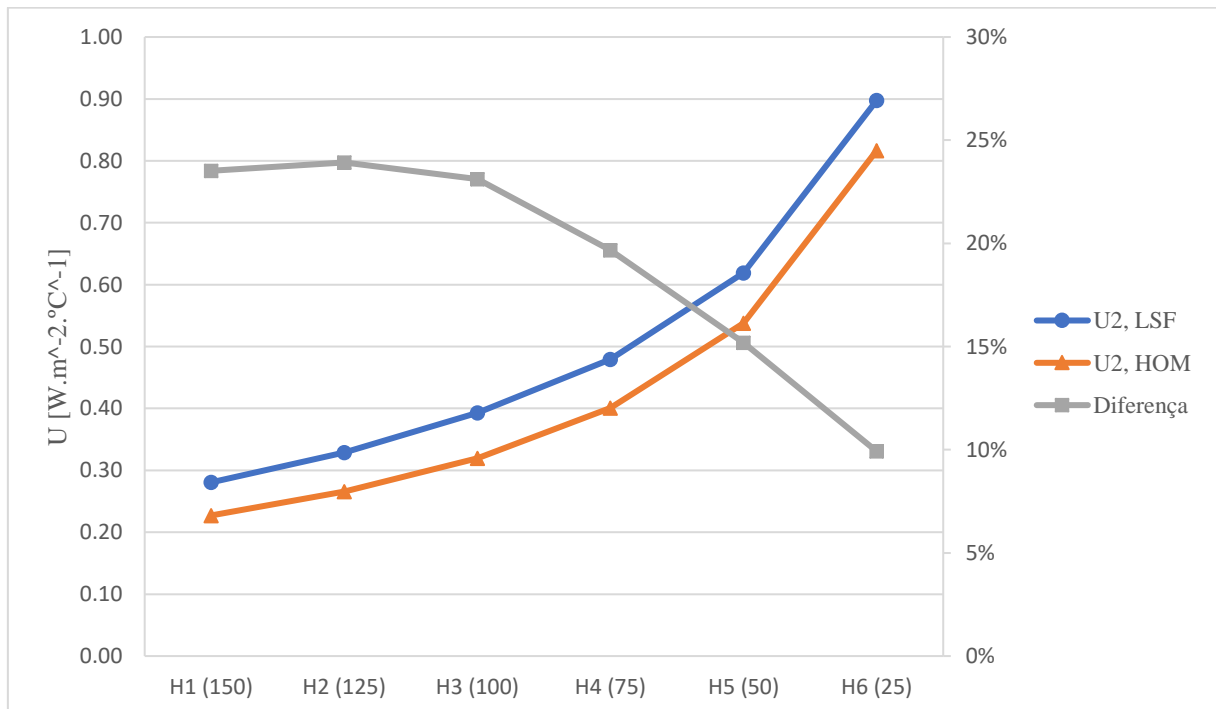


Figura 3.27 - Coeficientes de transmissão térmica do elemento adjacente 2 no sistema híbrido.

Os valores obtidos nos cálculos do  $\Psi_{HOM}$ , do  $\Psi_{LSF}$  e respetivas diferenças entre estes são apresentados na Figura 3.28.

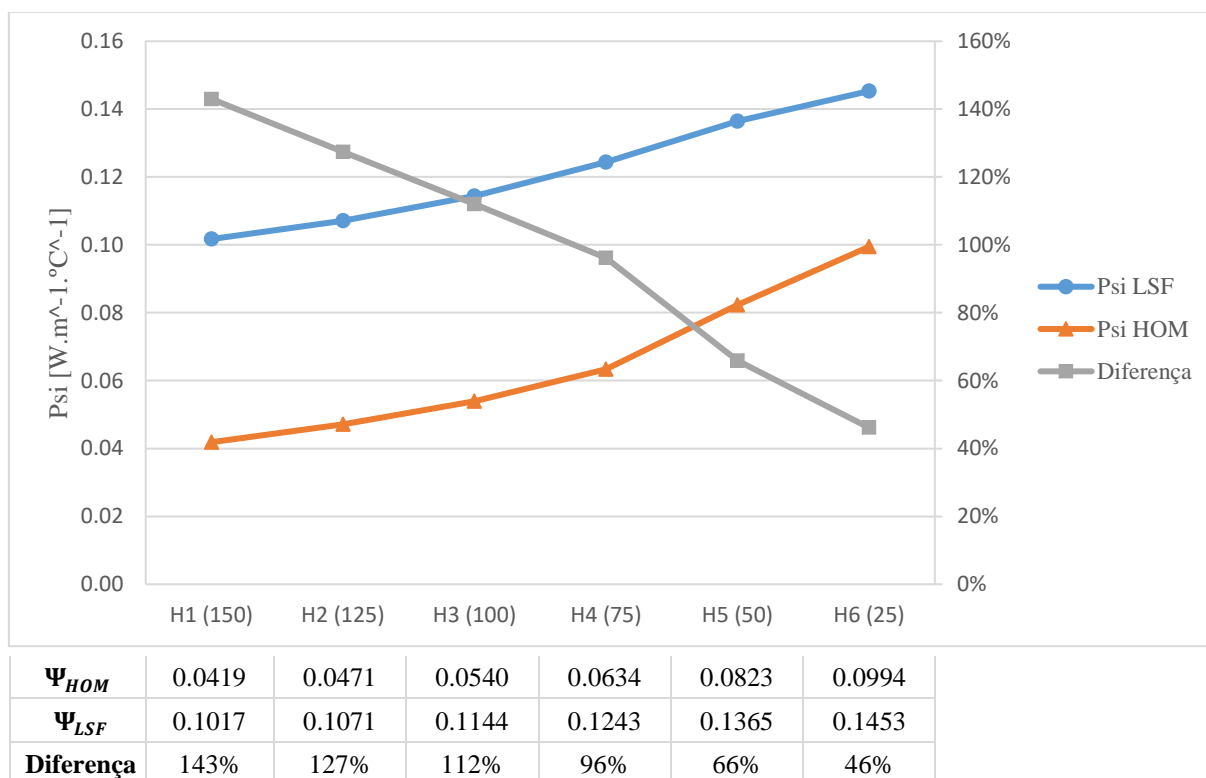


Figura 3.28 - Coeficientes de transmissão térmica linear das PTL's do sistema híbrido.

O sistema híbrido, como o nome indica, é o resultado da junção dos sistemas anteriores. Este sistema utiliza a eficácia térmica da camada contínua de isolamento exterior, de forma a mitigar os efeitos adversos provocados pelas descontinuidades da camada de isolamento no interior da parede. Apesar dos perfis de aço provocarem um agravamento dos coeficientes de transmissão térmica na ordem dos 8% a 25% (relembra-se que no sistema frio era na ordem de até aos 90%), a eficácia térmica da camada exterior de isolamento é, também neste sistema, comprovada.

Relativamente ao impacto dos perfis de aço na quantificação do  $\Psi$ , é possível observar diferenças entre os 46% e os 143%. Estes valores representam um agravamento significativo, embora não sejam tão penalizadores como os observados no sistema frio, que chegaram a atingir 701%, na ligação F1. Em situação análoga, ligação H1, também é possível observar o maior impacto dos perfis de aço (143%), o que corrobora o verificado no sistema frio, relativamente ao aumento dos fluxos de calor no aço com o aumento da espessura do isolamento no interior da parede.

No entanto, a evolução do  $\Psi_{LSF}$  mostra-se positiva à medida que a espessura de isolamento aumenta. De facto, ocorre uma diminuição do  $\Psi_{LSF}$  de 30%, o que é menos 23.61% que o mesmo parâmetro do sistema quente. Esta situação reforça a eficácia da camada contínua de isolamento no exterior, uma vez que esta é capaz de conter os aumentos de fluxos de calor provenientes do aço, à medida que a espessura do isolamento descontínuo no interior da parede aumenta. É importante ter em consideração que, neste caso, a espessura do isolamento exterior era igual ao do isolamento no interior da parede. No caso de haver uma descompensação neste equilíbrio, com a diminuição do isolamento exterior, o comportamento do  $\Psi_{LSF}$  tenderá a igualar o do sistema frio.

### 3.4 Discussão Final

Neste subcapítulo final faz-se uma última abordagem aos valores de  $\Psi_{LSF}$  e a sua variação nos sistemas construtivos em LSF. Por último, é realizado um enquadramento destes resultados e feita uma análise ao risco de ocorrência de condensações superficiais.

Na Figura 3.29 foram compilados os resultados obtidos na quantificação do  $\Psi_{LSF}$ , relativos aos três sistemas. A análise desta figura permite a comparação imediata da influência da posição do isolamento térmico na quantificação deste parâmetro.

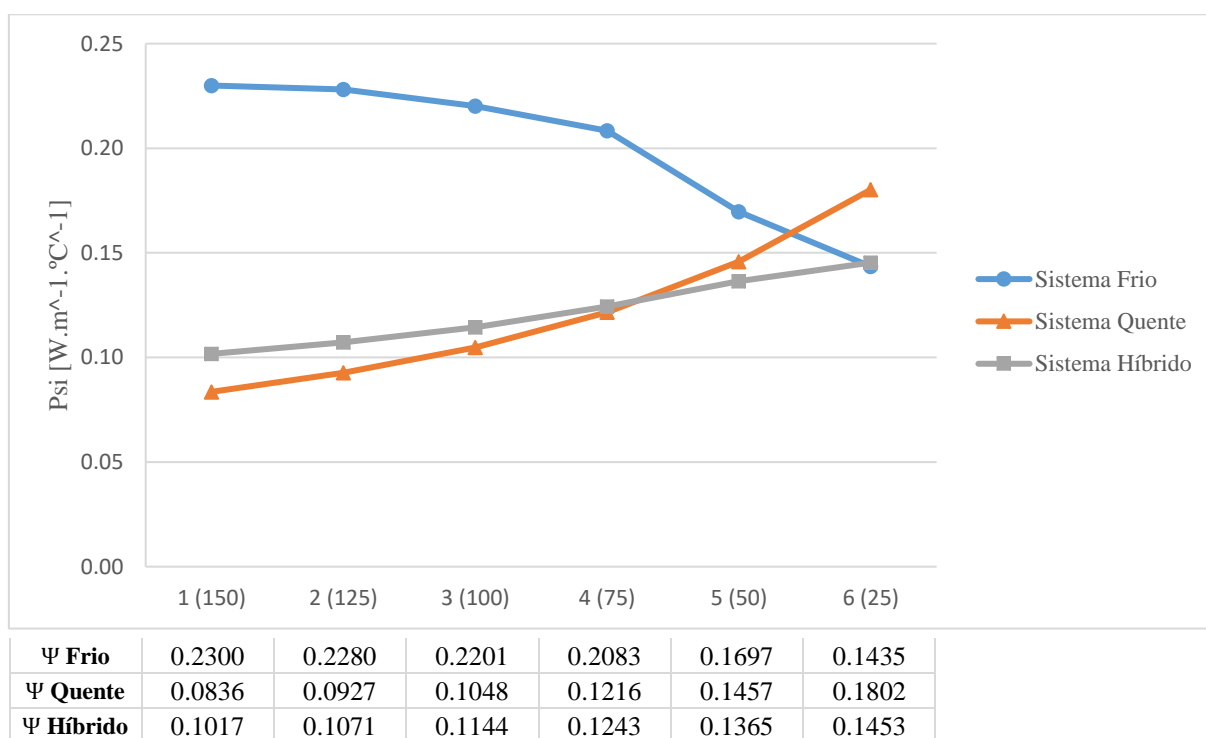


Figura 3.29 - Coeficientes de transmissão térmica linear das PTL's.

Estes resultados evidenciam o fraco desempenho térmico deste tipo de ligações num sistema frio, em particular quando a espessura de isolamento é maior. De facto, neste sistema, além do parâmetro  $\Psi_{LSF}$  apresentar uma resposta desfavorável com o aumento da espessura do isolamento, também alcança o seu melhor valor de  $\Psi_{LSF} = 0.1435 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  na mesma ligação onde os outros sistemas apresentam os seus piores valores.

Já os sistemas quente e híbrido, apresentam respostas semelhantes ao aumento do isolamento térmico, ou seja, o parâmetro  $\Psi_{LSF}$  melhora com o aumento da espessura do isolamento. No entanto, pela análise da respetiva curva, é o sistema quente que reserva a maior eficácia no melhoramento do  $\Psi_{LSF}$ , atingindo o seu melhor valor de  $\Psi_{LSF} = 0.0836 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  na ligação Q1, enquanto que a ligação H1 apresenta um valor de  $\Psi_{LSF} = 0.1017 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ .

### 3.4.1 Enquadramento dos Resultados

Neste subcapítulo é realizado o enquadramento dos  $\Psi_{LSF}$ 's, obtidos nos três sistemas construtivos. Este enquadramento é feito em duas partes. Primeiro são analisados os resultados obtidos para este parâmetro de acordo com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH). Em segundo é analisado o risco de aparecimento de condensações superficiais no desenvolvimento da ponte térmica linear em estudo.

Atualmente, o REH impõe valores máximos para os parâmetros U e  $U_{PTP}$  na construção nova e intervenções. No entanto o parâmetro  $\Psi$  não é objeto de nenhum requisito legal. Apesar disto, o REH prevê valores de  $\Psi$  que vale a pena mencionar. O primeiro é o  $\Psi_{ref}$  que é o valor adotado pelo edifício de referência para efeitos de certificação energética. Este parâmetro toma o valor de  $\Psi_{ref} = 0.40 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ . Outro valor relevante é o valor por defeito que pode ser utilizado na quantificação do  $\Psi$ . Neste caso, para este tipo de ligação, é considerado um  $\Psi = 0.10 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  no caso de isolamento térmico pelo interior, um  $\Psi = 0.40 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  no caso de isolamento pelo exterior e um  $\Psi = 0.50 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  no caso do isolamento repartido ou na caixa de ar.

Além disto, foi utilizado um catálogo de pontes térmicas lineares para quantificar o  $\Psi$  no mesmo tipo de ligação em estudo, mas considerando uma ligação típica do sistema construtivo tradicional português, betão armado e alvenaria (ITeCons, 2018). Foi considerado um pilar de betão armado, com paredes duplas de alvenaria e caixa de ar parcialmente preenchida com isolamento. As espessuras dos panos de alvenaria são de 15 cm e a espessura do isolamento é de 4 cm. Posto isto, o catálogo devolveu um valor de  $\Psi = 0.49 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ . A mesma ligação, mas com uma camada de isolamento contínuo na superfície exterior do pilar, apresenta um valor de  $\Psi = 0.34 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Tendo em conta os valores *supra* referidos e os resultados obtidos de  $\Psi_{LSF}$ , é notória a eficácia do sistema construtivo LSF no desempenho térmico deste tipo de PTL, quando comparado com o sistema tradicional. Também é importante fazer referência à diferença que existe entre os resultados de  $\Psi_{LSF}$  e os valores por defeito padronizados pelo REH. O Quadro 3.5 faz um resumo de todos os valores de  $\Psi$  aqui apresentados.

Quadro 3.5 – Quadro resumo do enquadramento dos valores de  $\Psi_{LSF}$ .

	$\Psi_{LSF}$	$\Psi_{ref}$ (REH)		$\Psi_{defeito}$ (REH)		$\Psi_{catálogo}$
<b>F1</b>	0.2300	0.40	<b>Isolamento no interior</b>	0.10	<b>Pilar betão armado; alvenaria 15+15; 4 cm isolamento</b>	0.49
<b>F6</b>	0.1435					
<b>Q1</b>	0.0836		<b>Isolamento no exterior</b>	0.40	<b>+ isolamento na superfície exterior do pilar</b>	0.34
<b>Q6</b>	0.1802					
<b>H1</b>	0.1017	<b>Isolamento repartido ou na caixa de ar</b>	0.50			
<b>H6</b>	0.1453					

Relativamente à análise do risco de condensações superficiais, é utilizado um parâmetro previsto pela norma EN ISO 10211. Este parâmetro designa-se por fator de temperatura superficial, ou  $f_{Rsi}$ . É um parâmetro adimensional calculado pela seguinte fórmula:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (19)$$

onde  $\theta_{si}$  [°C] é a temperatura da superfície interior.  $\theta_i$  [°C] e  $\theta_e$  [°C] são as temperaturas do ambiente interior e do ambiente exterior, respetivamente.

Neste caso, foi avaliado o risco de condensação ao longo do desenvolvimento linear da ponte térmica em estudo, para as 18 ligações do sistema construtivo LSF. A temperatura da superfície interior foi obtida através do programa *Therm* tendo em conta os modelos até aqui estudados com as mesmas condições de fronteira. A legislação nacional não prevê a aplicação de valores mínimos para o fator de temperatura superficial,  $f_{Rsi,min}$ . No entanto, é possível encontrar bibliografia que estuda o tema e indica valores de  $f_{Rsi,min}$  que podem ser utilizados como referência. Neste caso, os valores utilizados foram obtidos pela aplicação da norma EN ISO 13788 ao panorama bioclimático nacional (Vieira, 2002). Estes valores variam consoante a zona climática prevista para a estação de arrefecimento, no entanto, importa referir que o zoneamento utilizado na obtenção destes valores é o do antigo regulamento, ou seja, o RCCTE. Posto isto,

foram recolhidos os seguintes valores, tendo em conta um edifício de higrometria média (habitação não sobreocupada e corretamente ventilada):  $f_{Rsi,min} = 0.826$  para a zona climática II;  $f_{Rsi,min} = 0.796$  para a zona climática I2; e  $f_{Rsi,min} = 0.642$  para a zona climática I3. No Quadro 3.6 estão representados os valores de  $f_{Rsi}$  das ligações estudadas.

Quadro 3.6 - Fatores de temperatura superficial das PTL's.

Sistema Frio			Sistema Quente			Sistema Híbrido		
	$\theta_{si}$ [°C]	$f_{Rsi}$		$\theta_{si}$ [°C]	$f_{Rsi}$		$\theta_{si}$ [°C]	$f_{Rsi}$
<b>F1</b>	12.9	0.6450	<b>Q1</b>	18.5	0.9250	<b>H1</b>	16.3	0.8150
<b>F2</b>	12.8	0.6400	<b>Q2</b>	18.3	0.9150	<b>H2</b>	15.8	0.7900
<b>F3</b>	12.5	0.6250	<b>Q3</b>	18	0.9000	<b>H3</b>	15.3	0.7650
<b>F4</b>	12.1	0.6050	<b>Q4</b>	17.6	0.8800	<b>H4</b>	14.9	0.7450
<b>F5</b>	11.4	0.5700	<b>Q5</b>	16.9	0.8450	<b>H5</b>	14.2	0.7100
<b>F6</b>	11.3	0.5650	<b>Q6</b>	15.5	0.7750	<b>H6</b>	13.3	0.6650

Como se pode observar, as ligações do sistema quente são as que apresentam melhor desempenho higrotérmico. O sistema frio é o sistema que apresenta o maior risco de ocorrência de condensações superficiais, revelando-se incapaz de cumprir os valores de  $f_{Rsi,min}$ .

## 4 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi a análise de pontes térmicas lineares (PTL) no sistema construtivo Lightweight Steel Framing (LSF). Sendo o aço um material com um coeficiente de condutibilidade térmica elevado, sensivelmente 25 vezes maior que o do betão, é evidente a importância do estudo do desempenho térmico deste tipo de soluções construtivas. Foram considerados três sistemas LSF - frio, quente e híbrido, diferentes entre si quanto ao posicionamento da camada de isolamento térmico. Esta análise foi realizada através da quantificação do parâmetro  $\Psi$ , com recurso à norma EN ISO 10211. O método dos elementos finitos foi aplicado através da utilização de um programa de análise bidimensional (2D), o *Therm*.

Foi realizado um estudo que avaliou a influência de três variáveis na quantificação do  $\Psi$ . As variáveis em estudo foram o posicionamento do isolamento térmico, a espessura das camadas de isolamento térmico e a existência do esqueleto estrutural de aço. O estudo incidiu sobre a ligação de duas paredes exteriores, uma PTL escolhida com critério tendo em vista a discussão objetiva dos resultados perante as variáveis consideradas. Por fim, os resultados obtidos na quantificação de  $\Psi$  foram enquadrados e foi avaliado o risco de ocorrência de condensações.

Pelos resultados obtidos, foi possível observar a grande influência que o aço pode exercer na quantificação do  $\Psi$ . Esta influência traduz-se num agravamento deste parâmetro consoante o tipo de sistema. No caso de sistemas frios o parâmetro sofre um agravamento de até 701%. Já no caso de sistemas quentes, este agravamento assume os valores mais conservadores, com um agravamento máximo registado de 14%. Por sua vez, nos sistemas híbridos o agravamento registou valores intermédios, entre os 46% e os 143%.

A variação da espessura das camadas de isolamento, como seria de esperar, também se mostrou determinante na variação do  $\Psi$ . Foi avaliada uma variação na espessura entre os 25 mm e os 150 mm, com incrementos de 25 mm. O sistema híbrido teve em consideração a distribuição equitativa de isolamento entre o exterior e a caixa de ar. A análise dos resultados mostrou que a variação do  $\Psi$  não é coerente entre os três sistemas LSF. O sistema frio revelou um agravamento de 60% com o aumento total da espessura do isolamento. Já os sistemas quente e híbrido, revelaram, respetivamente, melhorias de 53% e de 30%.

Estes resultados revelam o bom desempenho térmico do sistema quente, proporcionado pela eficácia da camada contínua de isolamento exterior. A inexistência de descontinuidades no isolamento térmico, impostas pelos perfis de aço, também se mostra como um fator relevante no desempenho térmico do sistema quente. Estas conclusões são suportadas pelos valores de  $\Psi$  que nos sistemas quente e híbridos atingiram valores de  $\Psi = 0.0836 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  a  $\Psi = 0.1802 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ . O sistema frio alcançou o seu melhor resultado de  $\Psi = 0.1435 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  para uma espessura de 25 mm, onde os outros sistemas registaram os seus piores resultados.

Por fim, ficou registado o bom desempenho térmico destas soluções quando comparadas com soluções tradicionais, de betão armado e alvenaria. No entanto, o sistema frio é, sem dúvida, o sistema a evitar do ponto de vista do desempenho térmico, inclusive, foi o sistema que mostrou riscos de ocorrência de condensações superficiais no desenvolvimento linear da ponte térmica.

#### 4.1 Trabalhos Futuros

Tendo em conta o trabalho desenvolvido e a importância do estudo do desempenho térmico destas soluções, são propostos os seguintes tópicos indicativos de trabalhos a realizar no futuro:

- Realizar a validação dos resultados obtidos através de dados experimentais;
- Comparar os resultados obtidos com a quantificação do  $\Psi$  através de uma análise tridimensional, considerando a existência de perfis de aço horizontais de contraventamento, na zona da ponte térmica linear;
- Alargar o universo de estudo a outros tipos de pontes térmica lineares, inclusive considerando outros elementos construtivos como janelas ou portas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almer, C., & Winkler, R. (2017). "Analyzing the effectiveness of international environmental policies: The case of the Kyoto Protocol". *Journal of Environmental Economics and Management*, 82(December 1997), 125–151.
- Ariyanayagam, A. D., & Mahendran, M. (2015). "Fire design rules for load bearing cold-formed steel frame walls exposed to realistic design fire curves". *Fire Safety Journal*, 77, 1–20.
- Atsonios, I. A., Mandilaras, I. D., Kontogeorgos, D. A., & 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.
- Baggs, D., & Mortensen, N. (2006). "Thermal Mass in Building Design Actions towards Sustainable Outcomes". *The BDP Environment Design Guide*, 1(May).
- Balaras, C. A., Gaglia, A. G., Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., & Lalas, D. P. (2007). "European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings". *Building and Environment*, 42(3), 1298–1314.
- Decreto-Lei nº 118/2013. Diário da República nº 159/2013, Série I de 2013-08-20. Ministério da Economia e do Emprego. 4988-5005.
- EN ISO 10211:2017 (2017). "Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations". *Internacional Organization for Standardization*. Genebra, Suíça.
- EN ISO 14683:2017 (2017). "Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values". *Internacional Organization for Standardization*. Genebra, Suíça.
- EN ISO 6946:2017 (2017). "Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods". *Internacional Organization for Standardization*. Genebra, Suíça.
- El-Darwish, I., & Gomaa, M. (2017). "Retrofitting strategy for building envelopes to achieve energy efficiency". *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 579–589.
- Eren, Ö. (2013). "A comparison with light steel frame constructional building systems for housing". *World Applied Sciences Journal*, 25(3), 354–368.

- European Commission. (2018). "Construction and demolition waste - Environment - European Commission". Retirado a 8 de Julho de 2018 de [http://ec.europa.eu/environment/waste/construction\\_demolition.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm)
- European Commission. (2000). "Green paper: Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply" (Vol. 3). Bruxelas, Bélgica.
- European Light Steel Construction Association (LSK). (2005). "European Lightweight Steel-framed Construction". Arcelor.
- Freitas, V. (2007). "Implicações Construtivas do Novo RCCTE na concepção de paredes de alvenaria". Seminário sobre Paredes de Alvenaria, P.B. Lourenço et al. (eds.), 2007.
- Futureng. (2018a). "Aplicações Principais do LSF". Retirado a 28 de Julho de 2018 de <http://www.futureng.pt/aplicacoes-principais-do-lsf>
- Futureng. (2018b). "Desempenho do sistema LSF - Futureng". Retirado a 15 de Julho de 2018 de <http://www.futureng.pt/desempenho>
- Futureng. (2018c). "Origens e história do LSF". Retirado a 15 de Julho de 2018 de <http://www.futureng.pt/origens>
- Futureng. (2018d). "Pormenores Construtivos". Retirado a 1 de Fevereiro de 2018 de <http://www.futureng.pt/pormenores-construtivos>
- Futureng. (2018e). "Pormenores Construtivos". Retirado a 15 de Julho de 2018 de <http://www.futureng.pt/portfolio:futureng>
- Gao, J., Li, A., Xu, X., Gang, W., & Yan, T. (2018). "Ground heat exchangers: Applications, technology integration and potentials for zero energy buildings". *Renewable Energy*, 128, 337–349.
- Gil, C. (2017). "O Sector da Construção em Portugal 2017 - 1º semestre". Relatório Semestral do Sector da Construção em Portugal. Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção (IMPIC). Lisboa, Portugal.
- Gorgolewski, M. (2007). "Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing". *Building and Environment*, 42(1), 230–236.
- Gouveia, P. (2008). Caracterização dos impactes da envolvente no desempenho térmico dos edifícios. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- Gregory, K., Moghtaderi, B., Sugo, H., & Page, A. (2008). "Effect of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential constructions systems". *Energy and Buildings*, 40(4), 459–465.

- Hoes, P., Trcka, M., Hensen, J. L. M., & Hoekstra Bonnema, B. (2011). "Investigating the potential of a novel low-energy house concept with hybrid adaptable thermal storage". *Energy Conversion and Management*, 52(6), 2442–2447.
- Ibrahim, E. (2007). "High-Rise Buildings – Needs & Impacts". *CIB World Building Congress 2017*, CIB2007(269), 1998–2008.
- INE. (2012). "Parque Habitacional em Portugal: Evolução na última década". *Destaque: Informação à Comunicação Social*, 1–10. Lisboa, Portugal.
- International Energy Agency. (2012). "Pathways to a clean energy system". *Energy Technology Perspectives 2012*. Paris, França.
- ITeCons. (2018). "Catálogo de Pontes Térmicas Lineares". Retirado a 20 de Agosto de 2018 de <https://www.itecons.uc.pt/catalogoptl/index.php?module=catlg>
- Khedari, J., Yamtraipat, N., Pratintong, N., & Hirunlabh, J. (2000). "Thailand ventilation comfort chart". *Energy and Buildings*, 32(3), 245–249.
- Kheiri, F. (2018). "A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(March), 897–920.
- Kohler, N., & Moffatt, S. (2003). "Life-cycle analysis of the built environment". *Industry and Environment*, 26(2–3), 17–21.
- Larbi, A. Ben. (2005). "Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings". *Energy and Buildings*, 37(9), 945–951.
- Lupan, L. M., Manea, D. L., & Moga, L. M. (2016). "Improving Thermal Performance of the Wall Panels Using Slotted Steel Stud Framing". *Procedia Technology*, 22, 351–357.
- Mahdavinejad, M., Hajian, M., & Doroodgar, A. (2011). "Role of LSF technology in economic housing for urban sustainability, case of Iran". *Procedia Engineering*, 21, 2–7.
- Martins, B. F. M. (2017). "Materiais de Mudança de Fase ( PCM ) para Melhoria do Desempenho Térmico de Edifícios". Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto. Porto, Portugal
- Matoski, A., & Ribeiro, R. S. (2016). "Evaluation of the acoustic performance of a modular construction system: Case study". *Applied Acoustics*, 106, 105–112.
- Piló, R. (2012). "Análise qualitativa dos valores de cálculo utilizados para efeitos da avaliação do impacto das pontes térmicas lineares no desempenho energético dos edifícios residenciais". Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa. Almada, Portugal.

- Pina dos Santos, C. A., & Matias, L. (2006). "Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios - ITE 50". Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC. Lisboa, Portugal
- Pires, J. (2013). "O método prescritivo na construção de moradias em aço leve". Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Galetti, M., Alamgir, M., Crist, E., ... 15, 364 scientist signatories from 184 countries. (2017). "World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice". *BioScience*, 67(12), 1026–1028.
- Romão, T. (2015). "Evolução do Sector da Construção em Portugal: Aplicação do Modelo Structure - Conduct - Performance". Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- Roque, E., & Santos, P. (2017). "The Effectiveness of Thermal Insulation in Lightweight Steel-Framed Walls with Respect to Its Position". *Buildings*, 7(4), 13.
- Santos, P., Gervásio, H., Simões da Silva, L., & Gameiro Lopes, A. (2011). "Influence of climate change on the energy efficiency of light-weight steel residential buildings". *Civil Engineering and Environmental Systems*, 28(4), 325–352.
- Santos, P., Martins, C., & Simões da Silva, L. (2014a). "Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems". *Metallurgical Research & Technology*, 111(6), 329–338.
- Santos, P., Martins, C., & Simões da Silva, L. (2014b). "Thermal performance of lightweight steel framed wall: The importance of flanking thermal losses". *Journal of Building Physics*, 38(1), 81–98.
- Shan, M., & Hwang, B. gang. (2018). "Green building rating systems: Global reviews of practices and research efforts". *Sustainable Cities and Society*, 39(February), 172–180.
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V., & Varun. (2011). "Life cycle assessment of buildings: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871–875.
- Silvestre, N., Pires, J., & Santos, A. (2013). "Manual de Conceção de Estruturas e Edifícios em LSF - Light Steel Framing". CMM.
- Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R., & Santos, P. (2013). "Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency". *Energy and Buildings*, 59, 82–103.
- Soares, N., Santos, P., Costa, J. J., & Simões da Silva, L. (2017). "Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction : a review", 1–52.

- SteelConstruction.info. (2018). "Recycling and reuse - Steelconstruction". Retirado a 20 de Julho de [https://www.steelconstruction.info/Recycling\\_and\\_reuse](https://www.steelconstruction.info/Recycling_and_reuse)
- Tavakoli, D. B., Bareshadat, N., Tafrihi, M., & Abbaspour, E. (2017). "Investigation of LSF Structure Effect on Economy and Sustainable Housing in Iran. Case Study: 50m<sup>2</sup> Units". *Review of European Studies*, 9(3), 30.
- The Lancet Planetary Health. (2018). "Can the Paris Agreement save us from a climate catastrophe?". *The Lancet Planetary Health*, 2(4), e140.
- Veljkovic, M., & Johansson, B. (2007). "Light steel framing for residential buildings". *Thin-Walled Structures*, 44(12), 1272–1279.
- Verbeke, S., & Audenaert, A. (2018). "Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(August 2017), 2300–2318.
- Vieira, N. (2002). "Humidade superficial critica". Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto. Porto, Portugal.
- Vilches, A., Garcia-Martinez, A., & Sanchez-Montañes, B. (2017). "Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review". *Energy and Buildings*, 135, 286–301.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*.
- World Economic Forum. (2016). "Shaping the Future of Construction. A Breakthrough in Mindset and Technology". World Economic Forum (WEF). Cologny, Suíça.
- World Meteorological Organization. (2017). "The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016". *World Meteorological Organization Bulletin*, (13).

## ANEXO A – Resultados Completos

### Sistema Frio

c/LSF	Lã de Rocha [mm]	$U_{1,LSF}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$U_{2,LSF}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$\Phi$ [W]	$L_{2D}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]	$\Psi_{LSF}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]
F1	150	0.4166	0.4583	18.8838	0.9442	0.2300
F2	125	0.4490	0.4961	19.9882	0.9994	0.2280
F3	100	0.5109	0.5657	21.9740	1.0987	0.2201
F4	75	0.5949	0.6646	24.7150	1.2358	0.2083
F5	50	0.7236	0.8476	28.9730	1.4487	0.1697
F6	25	0.9828	1.0723	36.4350	1.8218	0.1435

s/LSF	Lã de Rocha [mm]	$U_{1,HOM}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$U_{2,HOM}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$\Phi$ [W]	$L_{2D}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]	$\Psi_{HOM}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]
F1	150	0.2512	0.2512	10.8540	0.5427	0.0287
F2	125	0.2805	0.2805	12.0641	0.6032	0.0294
F3	100	0.3367	0.3367	14.3938	0.7197	0.0309
F4	75	0.4211	0.4211	17.9015	0.8951	0.0336
F5	50	0.5619	0.5619	23.7780	1.1889	0.0393
F6	25	0.8442	0.8442	35.6360	1.7818	0.0545

### Sistema Quente

c/LSF	Lã de Rocha [mm]	$U_{1,LSF}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$U_{2,LSF}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$\Phi$ [W]	$L_{2D}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]	$\Psi_{LSF}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]
Q1	150	0.2160	0.2163	8.7598	0.4380	0.0836
Q2	125	0.2529	0.2533	10.1546	0.5077	0.0927
Q3	100	0.3051	0.3055	12.1079	0.6054	0.1048
Q4	75	0.3843	0.3850	15.0456	0.7523	0.1216
Q5	50	0.5190	0.5204	19.9564	0.9978	0.1457
Q6	25	0.7994	0.8027	29.8700	1.4935	0.1802

s/LSF	Lã de Rocha [mm]	$U_{1,HOM}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$U_{2,HOM}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$\Phi$ [W]	$L_{2D}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]	$\Psi_{HOM}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]
Q1	150	0.2154	0.2154	10.5052	0.5253	0.0846
Q2	125	0.2520	0.2520	12.0794	0.6040	0.0883
Q3	100	0.3038	0.3038	14.4112	0.7206	0.0991
Q4	75	0.3822	0.3822	17.9099	0.8955	0.1135
Q5	50	0.5153	0.5153	23.7500	1.1875	0.1332
Q6	25	0.7905	0.7905	35.5000	1.7750	0.1576

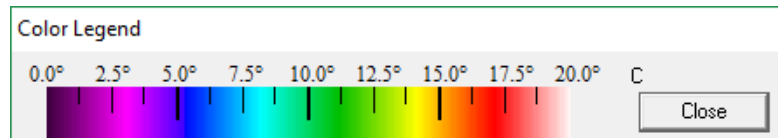
### Sistema Híbrido

c/LSF	Lã de Rocha [mm]	EPS [mm]	$U_{1,LSF}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$U_{2,LSF}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$\Phi$ [W]	$L_{2D}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]	$\Psi_{LSF}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]
H1	75	75	0.2649	0.2806	10.9557	0.54779	0.1017
H2	62.5	62.5	0.3064	0.329	12.5283	0.62642	0.10714
H3	50	50	0.3629	0.3932	14.6409	0.73205	0.11439
H4	37.5	37.5	0.4473	0.4795	17.6364	0.88182	0.12435
H5	25	25	0.5878	0.6192	22.475	1.12375	0.13648
H6	12.5	12.5	0.8794	0.8975	32.017	1.60085	0.14532

s/LSF	Lã de Rocha [mm]	EPS [mm]	$U_{1,HOM}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$U_{2,HOM}$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$\Phi$ [W]	$L_{2D}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]	$\Psi_{HOM}$ [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]
H1	75	75	0.2272	0.2272	10.1328	0.5066	0.0419
H2	62.5	62.5	0.2655	0.2655	11.8062	0.5903	0.0471
H3	50	50	0.3194	0.3194	14.1480	0.7074	0.0540
H4	37.5	37.5	0.4007	0.4007	17.6644	0.8832	0.0634
H5	25	25	0.5376	0.5376	23.6430	1.1822	0.0823
H6	12.5	12.5	0.8165	0.8165	35.4000	1.7700	0.0994

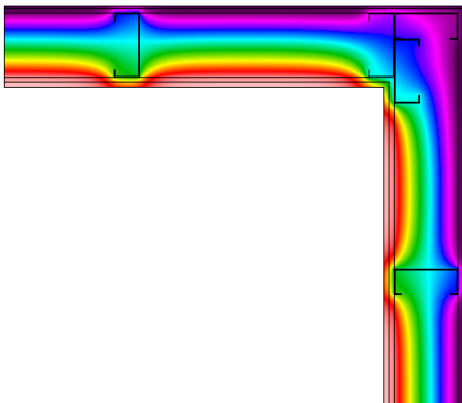
## ANEXO B – Distribuições de Temperaturas

### Legenda

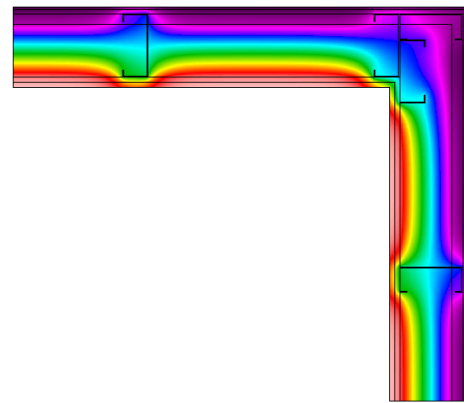


### Sistema Frio

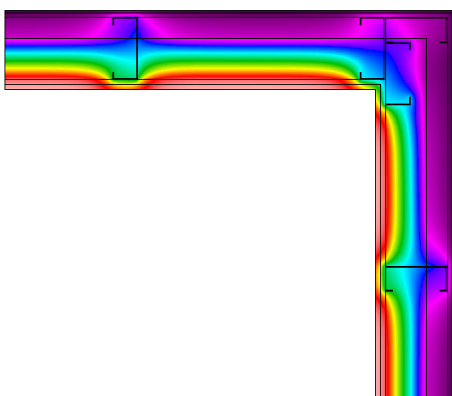
F1 (150 mm):



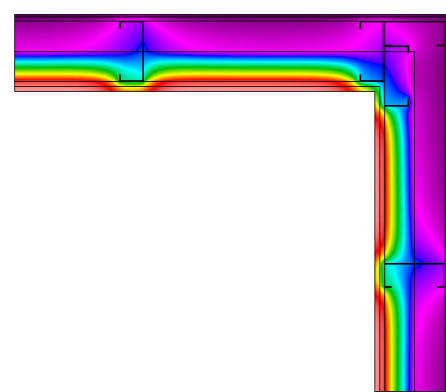
F2 (125 mm):



F3 (100 mm):



F4 (75 mm):

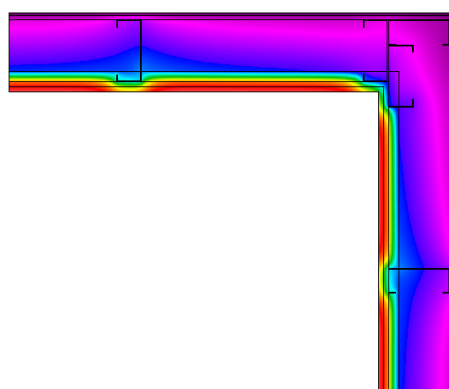




F5 (50 mm):

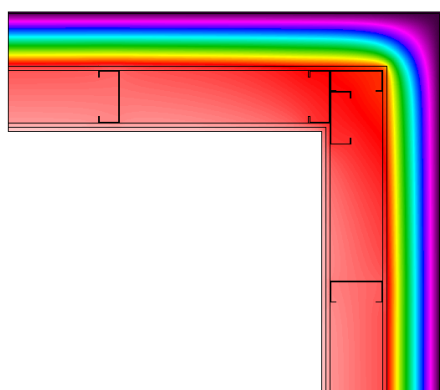


F6 (25 mm):

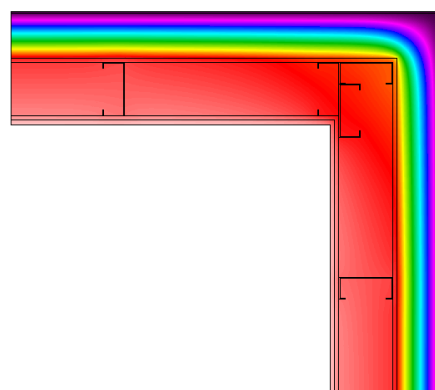


**Sistema Quente**

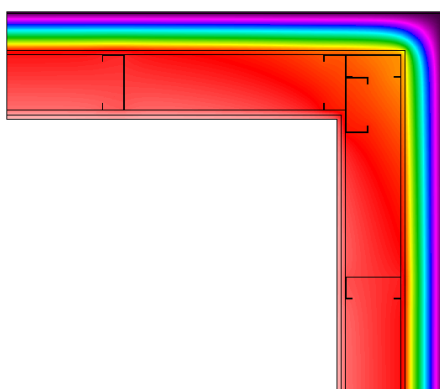
Q1 (150 mm):



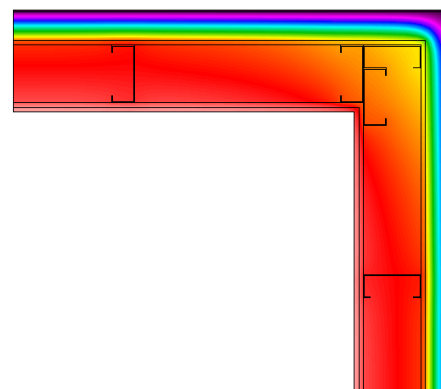
Q2 (125 mm):



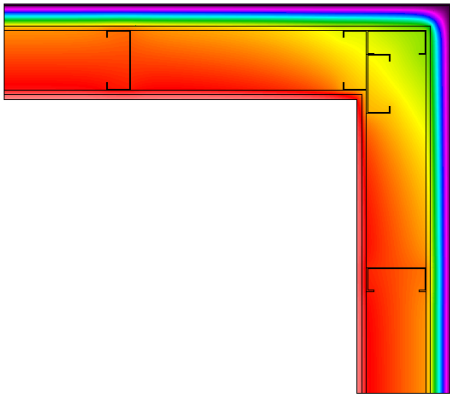
Q3 (100 mm):



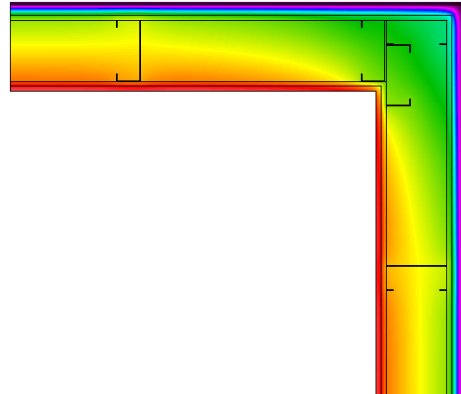
Q4 (75 mm):



Q5 (50 mm):



Q6 (25 mm):

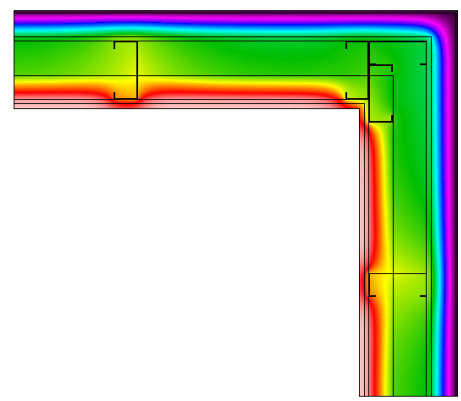


**Sistema Híbrido**

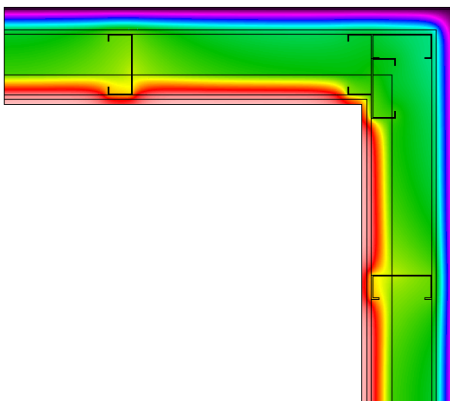
H1 (150 mm):



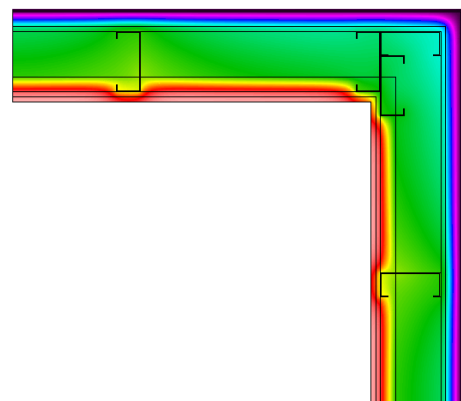
H2 (125 mm):



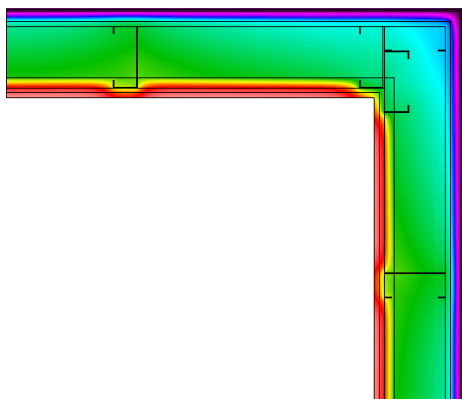
H3 (100 mm):



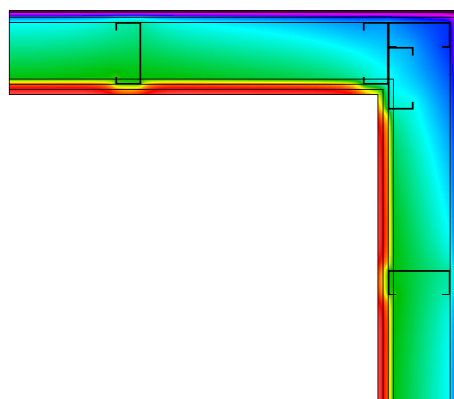
H4 (75 mm):



H5 (50 mm):

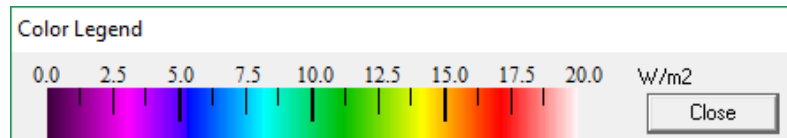


H6 (25 mm):



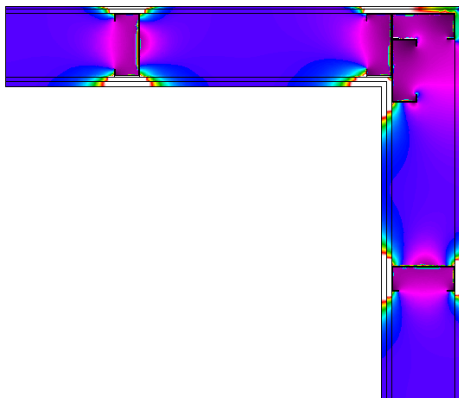
## ANEXO C – Distribuição de Fluxos de Calor

### Legenda

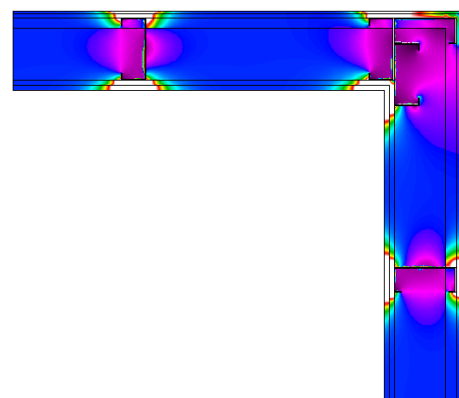


### Sistema Frio

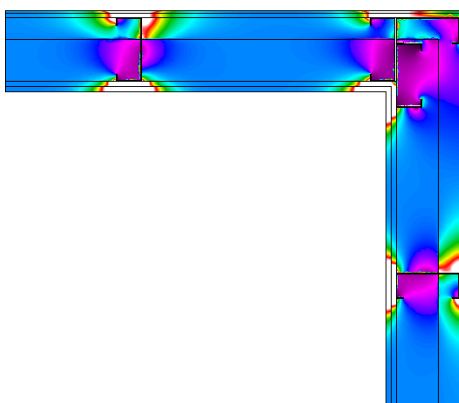
F1 (150 mm):



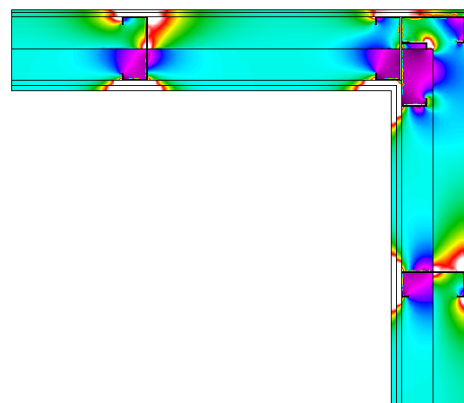
F2 (125 mm):



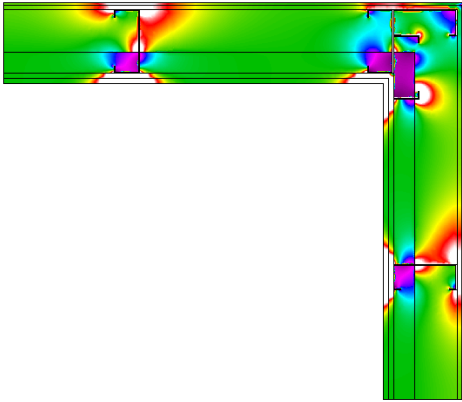
F3 (100 mm):



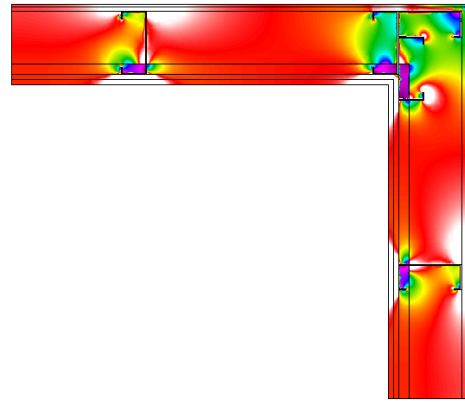
F4 (75 mm):



F5 (50 mm):

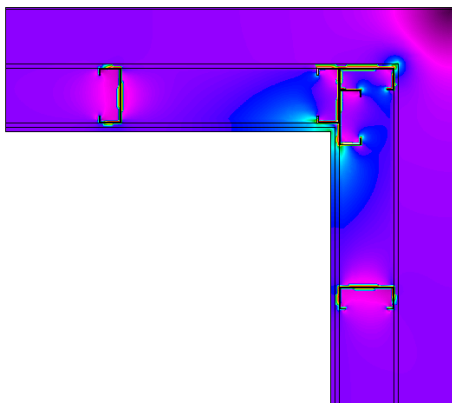


F6 (25 mm):

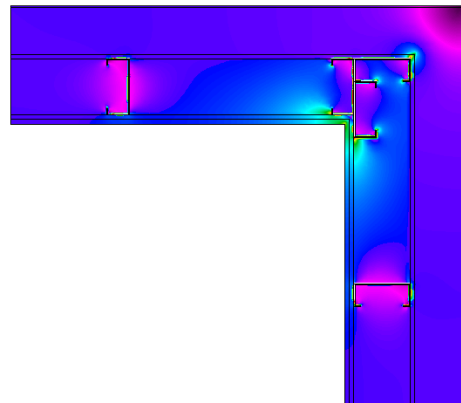


**Sistema Quente**

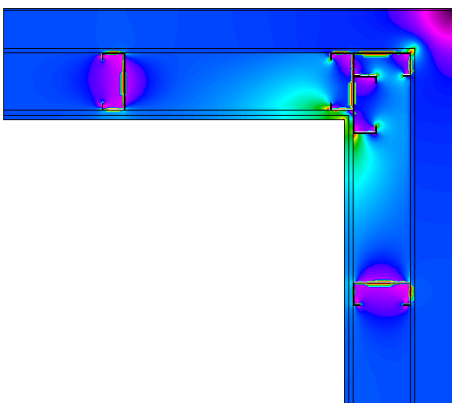
Q1 (150 mm):



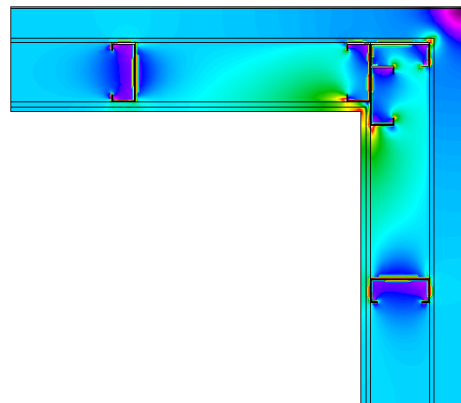
Q2 (125 mm):



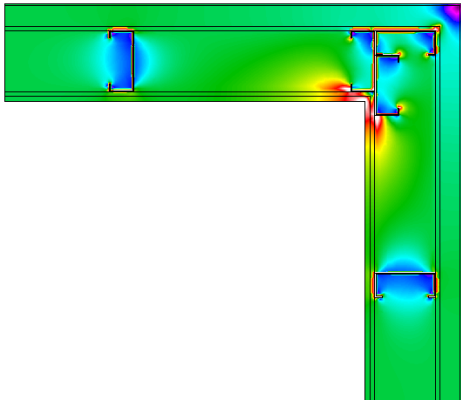
Q3 (100 mm):



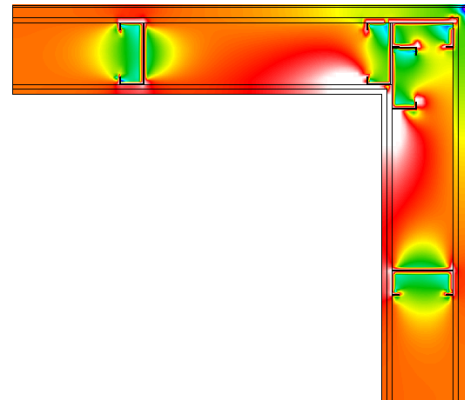
Q4 (75 mm):



Q5 (50 mm):

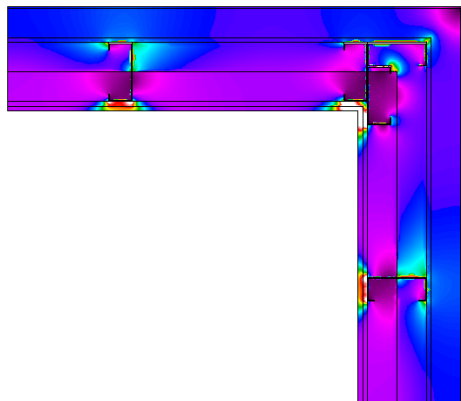


Q6 (25 mm):

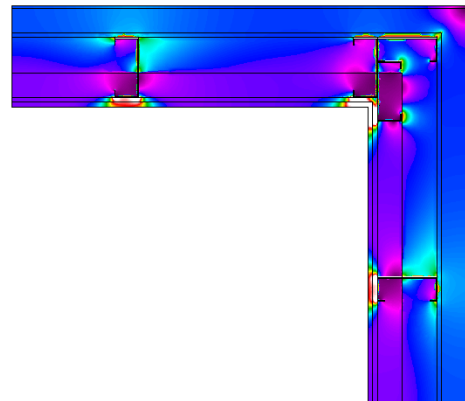


**Sistema Híbrido**

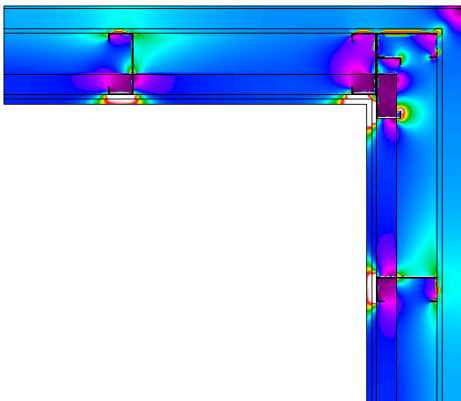
H1 (150 mm):



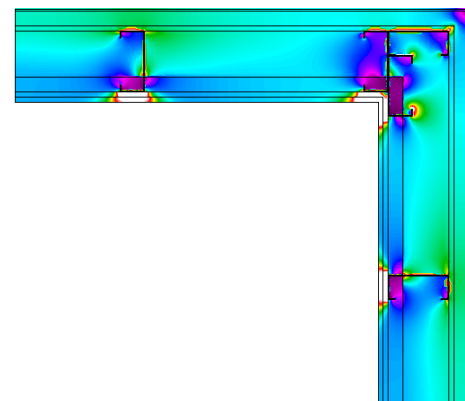
H2 (125 mm):



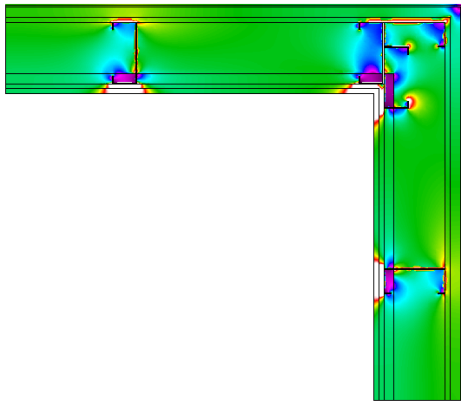
H3 (100 mm):



H4 (75 mm):



H5 (50 mm):



H6 (25 mm):

