



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

Estratégias de Minimização de Pontes Térmicas em Paredes com Estrutura Metálica Leve

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

Autor

Vítor Diogo Pedro Costa

Orientador

Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

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

Coimbra, Julho, 2016

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos, o meu sincero agradecimento pela grande disponibilidade e comprometimento demonstrados ao longo do presente trabalho.

Aos meus Pais Vítor e Aida, irmã, avós e restante família, o meu sincero e eterno sentimento de gratidão, por serem o meu grande pilar ao longo deste percurso académico e de toda a minha vida, fazendo com que tudo ficasse mais fácil nos momentos mais difíceis, apoiando-me sempre e dando-me a estabilidade necessária para que tudo corresse pelo melhor.

Aos meus colegas e amigos do curso de Engenharia Civil, que de alguma forma me ajudaram e contribuíram para a realização desta dissertação, bem como do resto do curso, proporcionando-me equilíbrio, toda a ajuda necessária e oferecendo-me momentos inesquecíveis ao longo do meu percurso académico.

Uma palavra de agradecimento a todos os Professores e Funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, que de alguma forma e em algum momento do meu percurso académico contribuíram e me ajudaram a ganhar conhecimento nas mais diversas áreas da Engenharia Civil.

A todos os Professores e Funcionários da Universidade Federal de Santa Catarina por toda a disponibilidade e ajuda prestada durante o ano que passei em intercâmbio no Brasil.

RESUMO

Atualmente, a construção em aço leve, também denominada por *Light Steel Framing* (LSF), começa a ganhar força em edifícios habitacionais não só por toda a Europa, mas também em Portugal. Nestes edifícios com estrutura metálica, as pontes térmicas originadas pela elevada condutibilidade térmica do aço, necessitam ainda de mais atenção no sentido de as mitigar, visto que este é um material com piores características térmicas quando comparado com os materiais mais tradicionais como o betão ou o tijolo. As perdas de calor originadas pelas pontes térmicas podem representar uma importante parcela da energia consumida para aquecimento (30%), podendo estas serem superiores aos benefícios extraídos da utilização de coletores solares térmicos para produção de água quente sanitária.

Ao longo desta dissertação são estudadas algumas estratégias de minimização de pontes térmicas em edifícios com estrutura metálica leve constituída por perfis enformados a frio. Para além da revisão do estado da arte sobre esta temática, analisa-se o valor do coeficiente de transmissão térmica de cada elemento, verificando-se assim qual a variação deste parâmetro térmico após a implementação de cada uma destas estratégias. Esta análise foi feita com o auxílio de um *software* de cálculo em elementos finitos, “*THERM*”, que foi também sujeito a uma validação ao longo deste trabalho.

Com este trabalho conseguiram obter-se melhorias no comportamento térmico do elemento parede numa estrutura em LSF, sendo a espessura de isolamento térmico e a posição deste, os dois fatores mais preponderantes para a melhoria do seu comportamento térmico. Além disso, foi possível quantificar o erro das duas metodologias de cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U), consoante o tipo de estrutura estudada.

PALAVRAS-CHAVE

Edifícios; Paredes; Estrutura metálica leve; LSF; Pontes térmicas; Metodologias de avaliação; Estratégias de mitigação; Estudo paramétrico.

ABSTRACT

Currently, the construction of lightweight steel, also called *Light Steel Framing* (LSF), starts to gain momentum in residential buildings not only across Europe but also in Portugal. In these buildings with steel structure, thermal bridges caused by the high conductivity of the steel, need further attention in order to be mitigated as this is a material with poorer thermal characteristics when compared to more traditional materials such as concrete or brick. Heat losses arising from thermal bridges may represent a significant portion of the energy consumed for heating (30%) at the point that these may be greater than the benefits derived from the use of solar thermal collectors for domestic hot water.

Throughout this thesis, some minimization strategies of thermal bridges in buildings with light steel structure consisting of cold the shaped profiles were studied. In addition to reviewing the state of the art about this issue, it was analyzed the value of heat transfer coefficient of each element, checking up the variation of this thermal parameter after the implementation of each one of these strategies. This analysis was done with the aid of a calculation software for Finite Element, "*THERM*", which was also subject to a validation throughout this work.

This work managed to obtain improvements in the thermal behaviour of a wall in LSF structure, with the thickness of insulation and his position revealing to be the most preponderant factors to obtain improvements in the thermal parameters. Furthermore, it was managed to understand which were the errors of the two calculation methods of U-value, depending on the type of structure studied.

KEY WORDS

Buildings; Walls; Light steel structure; LSF; Thermal bridges; Assessment methodologies; Mitigation strategies; Parametric study.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Enquadramento | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.3. Organização da dissertação..... | 3 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 1 |
| 2.1. Introdução | 1 |
| 2.2. Conceitos fundamentais | 4 |
| 2.2.1. Transmissão de calor | 4 |
| 2.2.1.1. Transmissão de Calor por Condução | 5 |
| 2.2.1.2. Transmissão de Calor por Convecção | 6 |
| 2.2.1.3. Transmissão de Calor por Radiação..... | 8 |
| 2.2.2. Regimes de transmissão de calor: permanente e transitório..... | 9 |
| 2.2.3. Condutibilidade térmica | 10 |
| 2.2.4. Resistência térmica..... | 12 |
| 2.2.4.1. Resistência térmica de materiais | 12 |
| 2.2.4.2. Resistências térmicas superficiais | 12 |
| 2.2.4.3. Resistência térmica de espaço de ar | 13 |
| 2.2.4.4. Resistência térmica total..... | 14 |
| 2.2.5. Coeficiente de transmissão térmica | 15 |
| 2.2.6. Pontes térmicas | 16 |
| 2.2.6.1. Definição e conceito genérico | 16 |
| 2.2.6.2. Tipologia de pontes térmicas..... | 17 |
| 2.2.6.3. Causas e consequências das pontes térmicas | 19 |
| 2.2.7. Estratégias de minimização de pontes térmicas | 20 |
| 2.3. Legislação portuguesa..... | 22 |
| 2.4. Normas europeias | 23 |
| 2.5. Métodos de cálculo do coeficiente de transmissão térmica U | 24 |
| 2.5.1. Método de cálculo EN ISO 6946..... | 26 |

| | |
|---|----|
| 2.5.2. Método de cálculo BRE <i>Digest</i> 465 (Doran e Gorgolewski, 2002)..... | 28 |
| 3. SOFTWARE UTILIZADO | 30 |
| 3.1. Introdução | 30 |
| 3.2. Âmbito de aplicação | 30 |
| 3.3. Dados de entrada (<i>inputs</i>) | 30 |
| 3.4. Resultados (<i>outputs</i>) | 31 |
| 3.5. Validação do <i>software</i> | 33 |
| 4. ESTUDO PARAMÉTRICO..... | 35 |
| 4.1. Introdução | 35 |
| 4.2. Influência da espessura e posição do isolamento térmico | 35 |
| 4.2.1. Estrutura quente..... | 36 |
| 4.2.2. Estrutura híbrida | 40 |
| 4.2.3. Estrutura fria..... | 46 |
| 4.3. Influência do comprimento de contacto e do espaçamento entre perfis metálicos..... | 50 |
| 4.3.1. Estrutura quente..... | 52 |
| 4.3.2. Estrutura híbrida | 53 |
| 4.3.3. Estrutura fria..... | 54 |
| 4.4. Influência da modificação do perfil metálico | 56 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 60 |
| 5.1. Conclusões | 60 |
| 5.2. Trabalhos futuros | 62 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 63 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Exemplo de construção de moradia unifamiliar em LSF (Futureng@, 2016)..... | 1 |
| Figura 2.2 - Mecanismos de transferência de calor (Silva, 2006). | 5 |
| Figura 2.3 - Transmissão de calor por condução. Lei de Fourier (Rodrigues e Piedade, 1998). | 6 |
| Figura 2.4 - Transferência de calor por convecção. Lei de Newton (Rodrigues e Piedade, 1998)..... | 8 |
| Figura 2.5 - Pontes térmicas devidas a diferentes materiais (à esquerda) e devido a alterações da espessura (à direita) (Valério, 2007). | 17 |
| Figura 2.6 - Exemplo de pontes térmicas bidimensionais ou lineares numa moradia (ITeCons, catálogo de pontes térmicas lineares, 2011)..... | 18 |
| Figura 2.7 - Exemplo de pontes térmicas: a) tridimensionais resultantes de duas ou mais pontes térmicas lineares; b) ponte térmica pontual resultante da ligação de três elementos planos (EN ISO 10211 – 2, 2001)..... | 18 |
| Figura 2.8 – Estratégias de mitigação de pontes térmicas: a) aumento do caminho do fluxo de calor; b) fitas de corte térmico; c) corte térmico em elementos construtivos salientes; d) redução da área de contacto entre o perfil metálico e os painéis de revestimento (Santos <i>et al</i> , 2014)..... | 21 |
| Figura 2.9 – Módulo de parede usado como referencia para caso de estudo (Santos <i>et al</i> , 2014)..... | 21 |
| Figura 2.10 - Exemplo de construção quente em LSF, com isolamento apenas pelo exterior (Dias, 2011)..... | 25 |
| Figura 2.11 - Exemplo de construção híbrida em LSF com isolamento rígido no exterior e moldável na caixa-de-ar junto do perfil metálico (Dias, 2011)..... | 26 |
| Figura 2.12 - Secções e camadas de um componente termicamente não homogéneo (EN ISO 6946, 2007)..... | 27 |
| Figura 3.1 – <i>Output</i> do “ <i>THERM</i> ”: coeficiente de transmissão térmica U; fluxo de calor; ΔT ; e erro possível dos resultados. | 31 |
| Figura 3.2 - <i>Outputs</i> do “ <i>THERM</i> ”: a) malha de elementos finitos; b) linhas isotérmicas; c) vetores do fluxo de calor. | 32 |
| Figura 3.3 - <i>Outputs</i> do “ <i>THERM</i> ”: a) distribuição de temperaturas; b) distribuição do fluxo de calor. | 32 |
| Figura 3.4 - Elemento construtivo utilizado para validação do <i>software</i> “ <i>THERM</i> ”. | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.1 - Elemento parede com estrutura quente: 100 mm de EPS..... | 36 |
| Figura 4.2 – Localização dos cortes C (1) e C (2) no módulo de parede analisado. | 37 |
| Figura 4.3 - Variação do valor de U em função da espessura do isolamento térmico pelo exterior: estrutura quente..... | 40 |
| Figura 4.4 - Elemento parede com estrutura híbrida: 75 mm de EPS e 25 mm de lã de rocha. | 41 |
| Figura 4.5 - Variação do valor de U em função da espessura das camadas de isolamento térmico: estrutura híbrida. | 45 |
| Figura 4.6 - Elemento parede com estrutura fria: 100 mm de lã de rocha. | 46 |
| Figura 4.7 - Variação do valor de U em função da espessura das camadas de isolamento térmico: estrutura fria. | 49 |
| Figura 4.8 - Constituição da parede analisada no software “THERM: exemplo em estrutura quente. | 51 |
| Figura 4.9 – Perfis metálicos com as diferentes áreas de contacto assinaladas: a) perfil padrão C com 50 mm de contacto; b) 16 mm de contacto; c) 8 mm de contacto; d) 4 mm de contacto..... | 51 |
| Figura 4.10 - Variação do valor de U [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] em função do comprimento de contacto e do espaçamento entre perfis metálicos: estrutura quente. | 52 |
| Figura 4.11 - Variação do valor de U [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] em função do comprimento de contacto e do espaçamento entre perfis metálicos: estrutura híbrida. | 54 |
| Figura 4.12 - Variação do valor de U [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] em função do comprimento de contacto e do espaçamento entre perfis metálicos: estrutura fria. | 55 |
| Figura 4.13 – a) Perfil padrão C; b) respetiva modificação com introdução de espaço de ar. . | 56 |
| Figura 4.14 – Quatro paredes analisadas com diferentes perfis metálicos: a) perfil padrão C; b) perfil com espaço de ar de $\frac{1}{4}$ polegada; c) perfil com espaço de ar de $\frac{1}{2}$ polegada; d) perfil com espaço de ar de $\frac{3}{4}$ polegada. | 57 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 2.1 - Valores do peso específico e condutibilidade térmica de diversos materiais de construção (Pina dos Santos, C. A. e Matias, L. 2006)..... | 11 |
| Quadro 2.2 - Condutibilidade térmica de diversos isolantes térmicos. | 11 |
| Quadro 2.3 - Resistências térmicas superficiais (REH, 2013). | 13 |
| Quadro 2.4 - Resistências térmicas de espaços de ar não ventilados (REH, 2013)..... | 14 |
| Quadro 2.5 - Valores por defeito dos coeficientes de transmissão térmica lineares ψ [W/(m.°C)] retirados da tabela do REH 02.07..... | 15 |
| Quadro 2.6 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos dependendo da zona climática do edifício (REH, 2013). | 16 |
| Quadro 3.1 - Resistências térmicas de cada camada e resistência térmica total do elemento usado para validação do <i>software</i> | 34 |
| Quadro 4.1 - Resistências térmicas do elemento calculadas para os dois cortes C (1) e C (2) em estrutura quente. | 37 |
| Quadro 4.2 - Parâmetros térmicos calculados para as diferentes espessuras de isolamento térmico pelo exterior e erro máximo (e_{max}) previsto pela EN ISO 6946: estrutura quente. | 39 |
| Quadro 4.3 - Coeficientes de transmissão térmica obtidos através do “ <i>THERM</i> ” e através da EN ISO 6946 e a respetivo erro tendo como referência o “ <i>THERM</i> ”..... | 39 |
| Quadro 4.4 – Espessuras de isolamento térmico dos três casos estudados em estrutura híbrida | 41 |
| Quadro 4.5 - Resistências térmicas do elemento calculadas para os dois cortes C (1) e C (2) em estrutura híbrida..... | 42 |
| Quadro 4.6 - Parâmetros térmicos de estrutura híbrida calculados para as diferentes espessuras de isolamento térmico pela EN ISO-6946 e pela <i>BRE Digest 645</i> (Doran e Gorgolewski, 2002). | 43 |
| Quadro 4.7 - Cociente entre os limites superior e inferior da resistência térmica total e respetivo erro máximo e_{max}) previsto pela EN ISO 6946: estrutura híbrida..... | 44 |
| Quadro 4.8 - Coeficientes de transmissão térmica obtidos através do <i>Therm</i> , da EN ISO-6946 e da <i>BRE Digest 645</i> (Doran e Gorgolewski, 2002) e o respetivo erro tendo como referência o “ <i>THERM</i> ”: estrutura híbrida..... | 44 |
| Quadro 4.9 - Resistências térmicas do elemento calculadas para os dois cortes C (1) e C (2) em estrutura fria. | 47 |

| | |
|--|----|
| Quadro 4.10 - Parâmetros térmicos de estrutura fria calculados para as diferentes espessuras de isolamento térmico pela EN ISO-6946 e pela <i>BRE Digest 645</i> (Doran e Gorgolewski, 2002). | 48 |
| Quadro 4.11 - Cociente entre os limites superior e inferior da resistência térmica total e respetivo erro máximo (e_{\max}) previsto pela EN ISO 6946: estrutura fria. | 48 |
| Quadro 4.12 - Coeficientes de transmissão térmica obtidos através do <i>Therm</i> , da EN ISO-6946 e da <i>BRE Digest 645</i> (Doran e Gorgolewski, 2002) e o respetivo erro tendo como referência o “ <i>THERM</i> ”: estrutura fria..... | 49 |
| Quadro 4.13 – Valores de U [$W/ (m^2 \cdot ^\circ C)$] da análise do comprimento de contacto e espaçamento entre perfis metálicos: estrutura quente. | 52 |
| Quadro 4.14 – Valores de U [$W/ (m^2 \cdot ^\circ C)$] do comprimento de contacto e espaçamento entre perfis metálicos: estrutura híbrida. | 53 |
| Quadro 4.15 – Valores de U [$W/ (m^2 \cdot ^\circ C)$] da análise do comprimento de contacto e espaçamento entre perfis metálicos: estrutura fria. | 55 |
| Quadro 4.16 – Resistência e condutibilidade térmica dos espaços de ar e respetivos parâmetros necessários ao seu cálculo. | 58 |
| Quadro 4.17 – Valor de U para cada parede com os diferentes perfis metálicos e respetiva variação do valor do perfil padrão C. | 59 |

SIMBOLOGIA

- θ_e – Temperatura da superfície exterior [°C];
 θ_i – Temperatura da superfície interior [°C];
 e_{\max} – Erro máximo previsto pela EN ISO 6946 no cálculo da resistência térmica [%];
 R''_T – Limite inferior da resistência térmica total [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
 R'_T – Limite superior da resistência térmica total [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
 R_T – Resistência térmica total [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
 R_{ar} – Resistência térmica do espaço de ar não ventilado [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
 R_g – Resistência térmica da cavidade de ar [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
 R_j – Resistência térmica equivalente para camadas não homogêneas [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
 R_{se} – Resistência térmica superficial exterior [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
 R_{si} – Resistência térmica superficial interior [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
 θ_f – Temperatura de fluido [°C];
 θ_s – Temperatura de corpo sólido [°C];
 R – Resistência térmica [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
 U – Coeficiente de transmissão térmica [$W / (m^2 \cdot ^\circ C)$];
 ΔT – Diferença de temperatura [°C];
 λ – Condutibilidade térmica do material [$W / (m \cdot ^\circ C)$];
 λ_j – Condutibilidade térmica da camada j [$W / (m \cdot ^\circ C)$];
 ρ – Peso específico [Kg/m^3];
 Ψ – Coeficiente de transmissão térmica linear [$W / (m \cdot ^\circ C)$];
 e – Espessura [m];
 e_j – Espessura da camada j [m];
 s – Espaçamento entre perfis metálicos [mm];
 ε – Emissividade [--].

ABREVIATURAS

EPS – Poliestireno expandido;

ETICS – *External Thermal Insulation Composite System*;

ICB – Aglomerado de cortiça expandida;

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

LSF – *Light Steel Framing* (Estrutura leve em aço);

NZEB's – *Nearly Zero Energy Buildings*.

OSB – *Oriented Strand Board*;

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios;

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços;

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação;

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios;

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios;

XPS – Poliestireno extrudido;

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Ao longo dos últimos anos a indústria da engenharia civil tem vindo a evoluir e começado a ter em conta diversos pontos cada vez mais importantes não só para o bem-estar pessoal, mas também para a preservação do planeta. Indo um pouco mais além do que a simples preocupação estrutural dos edifícios, a térmica é um dos fatores que tem vindo a ganhar relevância, sendo por isso o tema desta dissertação interessante na medida em que se irá avaliar as pontes térmicas em edifícios de construção com estrutura metálica leve, sabendo de antemão que, se não forem corretamente abordadas, serão os principais pontos de fuga de calor do interior para o exterior no que diz respeito à zona opaca destes edifícios, aumentando os custos e consumo de energia. O impacto total das pontes térmicas no aumento das necessidades de aquecimento é significativo, podendo chegar a 30% (Martins *et al*, 2016).

A construção em estrutura metálica leve, ou *Light Steel Framing* (LSF), que é objeto de estudo ao longo desta dissertação, é um tipo de construção relativamente nova que tem vindo a crescer nos últimos anos em Portugal e um pouco por toda a Europa. Este tipo de construção tem algumas vantagens, tais como o custo menos elevado, o maior conforto acústico ou a sua durabilidade, mas também algumas desvantagens quando comparada com a construção mais tradicional e corrente, apresentadas mais á frente neste trabalho (@Futureng, 2016).

Neste trabalho será feita uma análise, através de um *software* de modelação numérica, ao desempenho térmico de diferentes tipos de elementos parede utilizados no sistema de construção LSF, na qual serão testadas três diferentes soluções no que toca a posição do isolamento e que vai diferenciar a estrutura em três tipos (Doran e Gorgolewski, 2002):

Construção com estrutura fria – Este tipo de construção diz-se de estrutura fria se a camada de isolamento térmico se encontrar na caixa-de-ar entre os perfis metálicos e, como tal, não existe qualquer isolamento exterior aos perfis metálicos de aço, o que decerto não será a melhor solução para minimizar as pontes térmicas em LSF.

Construção com estrutura quente – Na estrutura quente, a camada de isolamento será colocada pelo exterior, como por exemplo ETICS (*External Thermal Insulation Composite System*), que vai originar o isolamento térmico de toda a estrutura metálica e o consequente aumento da temperatura da mesma.

Construção com estrutura híbrida – Neste tipo de construção, vão ser utilizadas camadas de isolamento térmico em diferentes locais da estrutura, podendo colocar-se uma camada entre os perfis de aço e outra do lado exterior das mesmas para tentar reduzir as pontes térmicas através do aço.

Apesar de este trabalho se focar mais nos benefícios térmicos deste tipo de construção em estrutura metálica leve, esta tem muitas outras vantagens que serão referidas no capítulo 2.1. Assim, este tipo de construção surge como uma opção no ramo da construção que poderá vir a ganhar terreno à construção tradicional, num futuro não muito distante.

1.2. Objetivos

O objetivo central desta dissertação consiste em definir e avaliar estratégias de mitigação de pontes térmicas em edifícios de estrutura leve em aço para que se consigam obter neste tipo de edifícios melhores desempenhos térmicos.

Como tal, pretende-se fazer uma avaliação e comparação dos valores do coeficiente de transmissão térmica (U) de vários elementos construtivos com estrutura leve em aço utilizando diferentes estratégias de mitigação de pontes térmicas. Dentro destas estratégias será avaliada a influência da posição do isolamento térmico, analisando-se os casos de estrutura quente, híbrida e fria e, em cada um destes casos, irá ainda estudar-se a influência da espessura da camada de isolamento térmico e a respetiva evolução do coeficiente de transmissão térmica.

Outra estratégia de mitigação de pontes térmicas estudada será a modificação dos perfis metálicos usados que, numa primeira parte, serão modificados de modo a criar um espaço de ar com uma resistência térmica adicional entre os banzos do perfil e os materiais adjacentes e, numa segunda parte, vão ser modificados para que se consiga analisar a influência no valor de U da área de perfil metálico em contacto com os painéis adjacentes. Neste último caso será ainda avaliada a influência do espaçamento entre perfis metálicos numa parede em LSF.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo um deles a presente Introdução na qual se enquadra o tema da mesma e se definem os objetivos principais para este trabalho.

No segundo capítulo, de forma a introduzir e clarificar as ideias base, abordam-se os conceitos fundamentais para uma melhor perceção da temática em análise, tais como mecanismos e regimes de transmissão de calor e alguns parâmetros térmicos necessários. É também abordada a temática das pontes térmicas e a legislação aplicável. Por fim, explicam-se duas metodologias simplificadas de cálculo do coeficiente de transmissão térmica para estruturas leves em aço.

No terceiro capítulo é analisado o *software* de análise térmica utilizado no presente trabalho, explicando sucintamente alguns conceitos para a utilização do mesmo e algumas das suas funcionalidades. É ainda feita uma validação do modelo.

No quarto capítulo apresenta-se o estudo paramétrico realizado ao longo deste trabalho, incidente em estratégias de mitigação de pontes térmicas analisadas, sendo o coeficiente de transmissão térmica e a resistência térmica dos elementos construtivos os parâmetros principais de comparação. Os resultados são obtidos através do *software* de análise térmica ou dos métodos simplificados de cálculo.

No quinto e último capítulo são apresentadas as principais conclusões extraídas deste trabalho, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Introdução

Ao longo dessa dissertação é feito um estudo de minimização de pontes térmicas em elementos parede de edifícios com estrutura metálica leve em aço, construção esta que é usualmente denominada por *Light Steel Framing* (LSF). Este tipo de construção, ilustrado na Figura 2.1, distingue-se de estruturas que usam perfis laminados a quente com secções em I, H ou U e com um peso muito superior ao peso das estruturas em LSF. A definição deste termo pode ser explicada através da tradução e significado de cada termo. Começando pelo termo *Steel* este provem do inglês e indica o material construtivo usado, o aço. O aço utilizado neste tipo de estruturas é um aço com resistência e galvanização adequada à construção de estruturas conforme a legislação para este tipo de estruturas, que será abordada mais a frente. O termo *Light* ou leve é aquele que distingue este tipo de estrutura das outras também metálicas sendo que, neste caso, os elementos de aço são produzidos com chapa de aço e são de espessura fina o que, comparativamente aos perfis laminados a quente, vai dar a estrutura um peso muito menor o que vai também reduzir a necessidade de utilização de equipamentos e maquinaria pesada durante a sua construção. Por fim, o termo *Framing* dirige-nos para uma construção composta por vários elementos individuais ligados entre si de forma a estes funcionarem em conjunto e conseguirem dar forma e suportar todo o edifício (Futureng@, 2016).



Figura 2.1 - Exemplo de construção de moradia unifamiliar em LSF (Futureng@, 2016).

Apesar de ser um sistema de construção ainda novo, começa a ser cada vez mais explorado e tem como aplicações principais a construção de edifícios residenciais ou a reabilitação urbana.

Para o primeiro caso de construção de edifícios residenciais, este tipo de construção é bastante aconselhável na medida em que garante um bom conforto térmico e acústico, duas das características mais apreciadas para se viver e, para muitas famílias preocupadas com a sustentabilidade do planeta, será a forma ideal de construção visto que garante maior eficiência económica, uma grande poupança de recursos naturais e humanos e ainda menores impactes ambientais nas soluções adotadas em fase de projeto, construção, utilização, reutilização e reciclagem da edificação.

Quanto à reabilitação urbana, este tipo de construção é também bastante apelativo porque os materiais usados são de peso reduzido o que, por vezes, faz com que este seja uma das melhores opções quando se quer por exemplo dividir espaços, acrescentar novos pisos ou remodelar telhados antigos, visto que a estrutura antiga é pouco sobrecarregada, o que permite reduzir a carga que esta suportará e consequentemente eliminar problemas que poderiam ser de difícil resolução com outros materiais mais pesados como os tradicionais de alvenaria e betão (Futureng@, 2016).

Como já foi referido anteriormente, este sistema construtivo apresenta um grande número de vantagens quando comparado com as construções tradicionais mas, poderá trazer também algumas desvantagens em certos casos tais como: a resistência a mudança do mercado; a menor inércia térmica de um edifício deste tipo, o que pode influenciar o seu desempenho térmico; também o facto de ser uma construção metálica poderá trazer problemas no caso de construções em altura ou de aberturas excessivas de vãos devido a ser uma construção com muitas ligações rotuladas, o que pode provocar demasiada flexibilidade na estrutura, sendo que se não for um edifício muito alto esta desvantagem torna-se num ponto positivo pois dará uma melhor estabilidade ao edifício em caso de sismo.

Quanto às vantagens, podemos dar como exemplos a segurança estrutural, devido ao baixo peso estrutura existe uma consequente diminuição dos riscos de assentamentos e tudo o que a eles vem associado e também uma melhor resposta em caso de sismos; o conforto térmico e acústico que são alcançados com materiais que dificultam tanto a condução térmica como a transmissão de ondas sonoras tais como as lãs minerais, as placas OSB (*Oriented Strand Board*) ou o EPS (poliestireno expandido); a rapidez de construção, que vai também influenciar um custo mais competitivo no mercado, devido a esta construção ser feita com fixações mecânicas ao invés de argamassas o que resulta na poupança do tempo de secagem ou devido à facilidade da colocação de sistemas elétricos por não ser necessário abrir roços,

por exemplo; a durabilidade da estrutura visto serem utilizados materiais construtivos com um tempo de vida elevado como por exemplo as placas OSB ou o aço galvanizado.

Visto que esta dissertação incide um pouco mais na vertente da térmica destes edifícios e por este tipo de construção poder ter algumas vantagens e outras desvantagens neste ponto específico, irá agora falar-se um pouco mais em detalhe sobre este assunto. A grande discussão neste ponto quando se constrói em sistema de LSF é a chamada inércia térmica, que é a capacidade que o edifício vai ter para contrariar as variações de temperatura no seu interior, reduzindo as transferências de calor, o que acontece devido a capacidade que os elementos construtivos têm em armazenar calor. Assim, será fácil perceber que neste sistema de construção, as paredes vão ser constituídas por elementos com menor massa que as construções tradicionais e por isso, este vai ser um sistema com uma menor inércia térmica, havendo a exceção dos casos de reabilitação em que as paredes antigas poderão ser aproveitadas para se obter uma maior inércia térmica, principalmente nos casos em que o isolamento térmico é colocado pelo exterior. Apesar desta desvantagem na retenção de energia do edifício, o facto da inércia térmica ser mais reduzida vai trazer a vantagem de a maior parte dos seus materiais possuírem uma condutibilidade térmica mais baixa, o que poderá fazer com que se obtenha um coeficiente de transmissão térmica mais baixo. Em termos práticos, a grande diferença entre ter uma inércia forte ou fraca é que quando esta é forte, ao aquecer uma divisão, iremos estar a fornecer calor também às paredes envolventes e estas vão armazená-lo, quando a inércia é fraca aquecemos ou arrefecemos apenas o interior da divisão, de forma mais rápida, poupando energia.

Quanto aos dispositivos legais, após o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) ter sido revogado, são o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE), juntamente com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), os instrumentos que regulam o conforto térmico e a qualidade de ar interior dos edifícios sendo que para os edifícios habitacionais, os quais serão estudados nesta dissertação, o mais importante será o REH.

Para secções constituídas por camadas de materiais homogéneos, o SCE remete para a metodologia de cálculo da norma europeia (EN ISO 6946, 2007). Quanto à construção em aço, noutros países nos quais já estará mais desenvolvida, existem algumas metodologias de cálculo para o coeficiente de transmissão térmica neste tipo de estruturas (Gorgolewski, 2007) e ainda um conjunto de publicações como por exemplo a BRE *Digest* 465 (Doran e Gorgolewski, 2002), que apresenta um método parecido ao da norma EN ISO 6946, mas com

a grande vantagem de poder ser aplicado a estruturas em aço leve. Esta temática da normalização será abordada em maior detalhe mais a frente neste 2º capítulo desta dissertação.

2.2. Conceitos fundamentais

2.2.1. Transmissão de calor

Com a evolução da engenharia civil e de todo o ramo da construção, o comportamento térmico dos edifícios tem vindo a ganhar cada vez maior importância e, por essa razão, um projeto de construção deve ter em conta os fenómenos que regem o comportamento térmico dos edifícios e que se traduzem nas ações que influenciam as variações das temperaturas interiores dos mesmos.

De forma a conseguir estudar e prever o comportamento térmico há a necessidade de perceber a forma de propagação de calor através dos elementos construtivos. Para perceber melhor este modo de propagação existem princípios básicos e leis da termodinâmica que nos permitem dizer que a transmissão de calor, quer entre pontos do mesmo elemento, quer entre dois elementos distintos, ocorre sempre que entre eles se verificar uma diferença de temperatura. Para além disso, podemos ainda afirmar que esta transmissão de calor faz-se sempre do elemento a temperaturas mais altas para o elemento a temperaturas mais baixas e com conservação de energia, ou seja, o calor que o elemento mais quente vai perder é o mesmo que o elemento mais frio irá receber (Valério, 2007).

Estes fenómenos de transferência de calor podem dividir-se em três tipos de processos, que serão explicados de seguida, sendo eles: condução, convecção e radiação, representados na Figura 2.2. De uma maneira geral, na maior parte dos casos, estes tipos de transferência de calor podem acontecer em simultâneo.

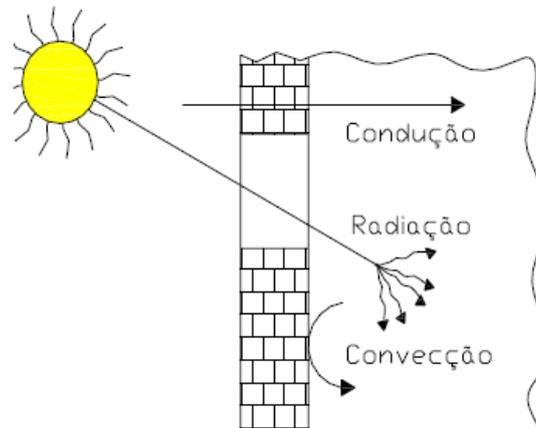


Figura 2.2 - Mecanismos de transferência de calor (Silva, 2006).

2.2.1.1. Transmissão de Calor por Condução

A transmissão de calor por condução pode ocorrer entre dois pontos do mesmo corpo ou entre dois corpos diferentes, se estes estiverem fisicamente ligados. Esta forma de transferência de calor acontece devido a energia interna de cada corpo, sendo que, em zonas a temperaturas mais elevadas, com mais energia, vão-se originar movimentos das moléculas e átomos do corpo, que associados a diferentes orientações dos mesmos, vão fazer com que estes colidam e que, conseqüentemente, se gere energia que vai ser transferida para outros pontos com níveis energéticos mais baixos, ou seja, a temperaturas inferiores.

Este tipo de transferência de calor por condução ocorre em geral em corpos sólidos, ainda que possa também ocorrer em líquidos e gases. No caso de líquidos e sólidos que não sejam bons condutores, esta transferência será consequência das variações longitudinais da estrutura em que se inserem. Já nos sólidos que sejam metais, como por exemplo o aço, a transferência de calor por condução será parecida com a condução elétrica, ou seja, consequência do movimento dos elétrons livres presentes nas moléculas do material. Por fim, nos gases, a transferência de calor será devida à colisão elástica das moléculas.

Esta forma de transferência de calor é regida pela Lei de Fourier, ilustrada na Figura 2.3 que, por sua vez, é consistente com as leis da termodinâmica. Esta lei, demonstrada pela expressão (2.1), permite-nos afirmar que o fluxo de calor (dQ_x) que atravessa um determinado material é proporcional ao produto da área atravessada pelo gradiente de calor e às suas diferenças de temperatura superficiais e é inversamente proporcional á espessura do material atravessado (Rodrigues e Piedade, 1998).

$$Q = \frac{\lambda \times A \times (\theta_e - \theta_i)}{e}, \quad (2.1)$$

onde,

λ – condutibilidade térmica do material [W/ (m. °C)];

A – Área da placa [m²];

θ_e – Temperatura da superfície exterior [°C];

θ_i – Temperatura da superfície interior [°C];

e – Espessura da placa [m].

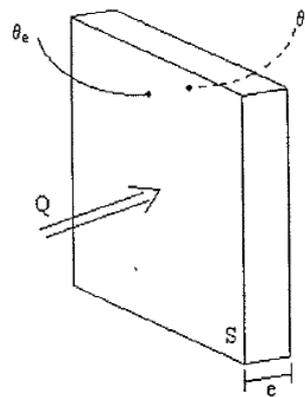


Figura 2.3 - Transmissão de calor por condução. Lei de Fourier (Rodrigues e Piedade, 1998).

Pela equação da Lei de Fourier, apresentada pela expressão (2.1) apresentada acima e ilustrada na Figura 2.3, podemos verificar que o parâmetro de proporcionalidade é a condutibilidade térmica, representada por λ , que será explicada mais a frente na subsecção 2.2.3 (Piedade e Rodrigues, 1998).

2.2.1.2. Transmissão de Calor por Convecção

Como explicado na subsecção 2.2.1.1, o mecanismo de transferência por condução dá-se, regra geral, nos sólidos. Ainda que esta possa também ser vista nos fluidos (gases e líquidos), o mecanismo de transferência de calor mais usual nestes é aquele sob o qual se vai incidir nesta subsecção: a convecção.

A explicação para que este seja o principal mecanismo de transferência de calor nos fluidos deve-se ao facto dos gases e líquidos estarem habitualmente em movimento e, ao invés do

calor ser transportado apenas devido aos movimentos das moléculas e átomos do corpo, como acontece na condução, este vai ser transmitido pelas correntes do fluido, ou seja, pelos seus movimentos. Esta forma de transmissão de calor pode ocorrer apenas no interior do fluido ou entre este e uma superfície sólida, sendo que, neste último caso, vai haver uma forte influência deste mecanismo no desempenho térmico do edifício porque os materiais sólidos (paredes do edifício) estarão em contacto, por exemplo, com o ar, quer no interior quer no exterior do edifício, originando assim a convecção (Rodrigues e Piedade, 1998).

Como já foi dito anteriormente, para que haja convecção tem que haver um movimento do fluido, seja ele ar ou água e, neste ponto, podemos distinguir dois tipos de convecção. Se o movimento do fluido ocorrer de uma forma natural, ou seja, se este for originado pelas diferenças de pressões dentro dele causadas pelas diferenças de temperaturas, então estamos na presença da chamada convecção natural. Se, por outro lado, o movimento do fluido for originado por ações externas, devido a aparelhos como bombas, ventiladores ou dispositivos de sucção, por exemplo, esta denomina-se convecção forçada.

Um fenómeno bastante importante na transmissão de calor por convecção é a ventilação, que tem ganho cada vez mais importância sobretudo porque na construção mais recente, com o objetivo de se reduzirem as perdas de calor, tem vindo a aumentar-se a estanquidade da envolvente dos edifícios o que reduz a taxa de infiltração de ar nestes. Como tal, o despacho nº 15793-I/2013 do REH indica expressões para o cálculo das perdas de calor por renovação do ar durante a estação de aquecimento e para o “caso de a ventilação ser assegurada por meios providos de dispositivos de recuperação de calor do ar extraído” (Silva, 2006).

Tal como na condução (2.2.1.1), também a transmissão de calor por convecção poderá ser traduzida pela expressão linear (2.2), neste caso dada pela Lei de Newton que está ilustrada na Figura 2.4.

$$Q = h_c \times S \times (\theta_s - \theta_f) , \quad (2.2)$$

onde,

- h_c – coeficiente de condutância térmica superficial por convecção [$W / (m^2 \cdot ^\circ C)$];
- S – Superfície do sólido em contacto com o fluido [m^2];
- θ_s – Temperatura do corpo sólido [$^\circ C$];
- θ_f – Temperatura do corpo fluído [$^\circ C$].

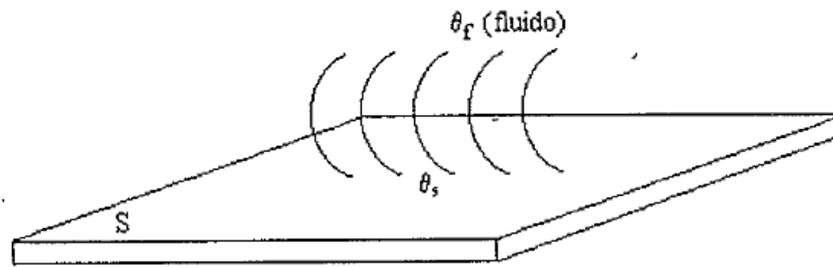


Figura 2.4 - Transferência de calor por convecção. Lei de Newton (Rodrigues e Piedade, 1998).

A expressão (2.2) acima apresentada e ilustrada na Figura 2.4 representa então o fluxo de calor transmitido por convecção entre um corpo sólido e um fluido proporcional à área considerada e tendo em conta a diferença de temperatura existente entre o fluido e o sólido. É ainda visto na Lei de Newton o parâmetro hc que representa o coeficiente de condutância térmica superficial por convecção. Apesar de este coeficiente não ser constante e depender de fatores como a diferença de temperatura existente ou o tipo de fluido, a sua utilização é bem aceite em casos práticos visto que os erros por este causado não são significativos.

2.2.1.3. Transmissão de Calor por Radiação

O terceiro e último mecanismo de transmissão de calor é a radiação térmica. Este difere dos dois mecanismos acima explicados na medida em que nos anteriores era necessário um suporte físico para se dar a transmissão e neste isso não é necessário.

A radiação térmica consiste num fenómeno existente em todos os corpos que deriva do facto de estes emitirem e absorverem radiação eletromagnética em função da sua temperatura absoluta e do estado físico da sua superfície, parâmetros estes que ao variarem vão originar diferentes comprimentos de onda (Rodrigues e Piedade, 1998). Este fenómeno ocorre assim, sempre que existam duas superfícies a temperaturas diferentes, independentemente do meio que esteja a separá-las. No setor da construção, e mais concretamente analisando um edifício, todas as superfícies deste, tais como paredes e janelas, irão emitir e receber radiação de outras superfícies que estejam no seu campo visual.

Na transmissão de calor por radiação, podemos distinguir dois tipos de radiações que são importantes analisar no prisma do comportamento térmico do nosso edifício: as radiações de comprimentos de ondas eletromagnéticas maiores, ondas longas, que são aquelas que são provenientes de outras superfícies e por isso se encontram a uma temperatura mais baixa, e as

radiações com comprimentos de onda menores, ondas curtas, que são as ondas que estão associadas a temperaturas mais elevadas, como por exemplo a radiação solar.

Durante a transmissão de calor por radiação, uma superfície vai receber energia radiante, energia esta que poderá ser absorvida, refletida ou transmitida. Se analisarmos a fachada de um edifício, regra geral, podemos distinguir dois tipos de zonas: a zona opaca, como é o caso das paredes, e a envidraçada, à qual pertencem as janelas. Na perspetiva da radiação de ondas longas, estas, ao incidir quer na região opaca, quer na região envidraçada, vai ser apenas absorvida e refletida porque o coeficiente de transmissão associado a ondas com este comprimento é praticamente nulo. Já nas radiações de ondas curtas, como por exemplo a radiação solar, para além de ser refletida e absorvida, vai também ser transmitida, o que vai ter uma forte influência no desempenho térmico do interior do edifício (Valério, 2006).

2.2.2. Regimes de transmissão de calor: permanente e transitório

Ao falar de regimes de transmissão de calor podemos caracterizar dois tipos diferentes: o regime transitório ou variável e o regime permanente ou estacionário. Para se perceber melhor a diferença entre eles vai-se exemplificar uma situação em que seja possível diferenciar os dois.

Imagine-se uma parede com ambas as faces paralelas e inicialmente à mesma temperatura. Visto estarem à mesma temperatura na fase inicial não ocorrem quaisquer trocas de calor. A certa altura aumenta-se subitamente a temperatura numa das faces da parede para um valor mais alto e constante, originando assim o início da transferência de calor da face que está a uma temperatura mais elevada para a face com a temperatura mais baixa. Durante um certo intervalo de tempo, sempre com as temperaturas de cada face a manterem-se constantes (uma mais elevada que outra), o interior da parede irá ter diferentes distribuições de temperaturas com cada ponto da mesma a variar a sua temperatura. Em certo momento, a temperatura no interior da parede irá finalmente manter-se constante em cada ponto, não variando mais.

Assim, nesta situação, podemos facilmente identificar e caracterizar os dois regimes de transmissão de calor. No período em que a temperatura de cada ponto do interior da parede se estava alterar, diz-se que a parede estava em regime transitório. Já quando a temperatura estabilizou com cada face a manter-se a uma temperatura constante, uma mais elevada que outra, podemos dizer que a parede estava em regime permanente.

Pode então dizer-se que o regime transitório é aquele em que o regime de calor é variável nas diferentes secções da parede ou, por outras palavras, o fluxo que entra é diferente do fluxo que sai. Dentro deste, pode identificar-se um caso de periodicidade em que a temperatura vai variando de forma constante e cíclica segundo determinada lei e que pode ser visto, por exemplo, na situação da fachada de um edifício em Portugal, na qual a temperatura vai variar da noite para o dia e causar aquele a que podemos chamar um regime periódico.

Já o regime permanente é aquele em que as temperaturas se mantêm constantes sem se alterarem mais, visto que os pontos interiores da parede já apresentam uma saturação térmica. É então um regime em que o fluxo de calor se mantêm constante, ou seja, o fluxo de calor que entra é igual ao que sai (Celso.d.A, 1981).

2.2.3. Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica, representada pela letra λ , é uma característica típica de um material de construção e define-se como a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente 1m desse material, quando este é sujeito a um gradiente de temperatura unitário [$^{\circ}\text{C}$]. Este parâmetro pode variar consoante o tipo de material, a porosidade, humidade, temperatura ou até mesmo consoante o estado físico em que se encontra. Por exemplo, a água quando se encontra a temperaturas baixas e fica no estado sólido pode apresentar valores de condutibilidade térmica de 2,18 [$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$] mas, ao derreter a temperaturas mais elevadas passa ao estado líquido e este valor passa a ser de 0,58 [$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$], o acontece essencialmente devido à densidade do material, diminuindo do estado sólido para o líquido (Grade, 2013).

Para a situação corrente dos materiais construtivos pode afirmar-se que os dois fatores que mais influenciam a condutibilidade térmica são o peso específico e o teor de humidade, que fazem com que, regra geral, a condutibilidade térmica varie no mesmo sentido destes (Rodrigues e Piedade, 1998).

Sabe-se que materiais com uma condutibilidade térmica mais elevada vão conduzir o calor de forma mais rápida do que os materiais que tenham um valor de λ menos elevado. Assim, e falando especificamente na sequência desta dissertação, materiais com elevada condutibilidade térmica como por exemplo o aço, com λ na ordem dos 50 [$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$], são genericamente considerados como dissipadores de calor e os materiais com uma condutibilidade térmica não superior a 0,065 [$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$] consideram-se como isolantes

térmicos. De seguida, no Quadro 2.1 e no Quadro 2.2, são apresentados valores de materiais com condutibilidades altas e baixas, respetivamente.

No Quadro 2.1 são apresentados valores do peso específico (ρ) e da condutibilidade térmica de diferentes materiais de construção, no qual se pode observar que o material mais importante para a realização desta dissertação, o aço (assinalado a azul), apresenta uma condutibilidade térmica muito elevada quando comparado com outros materiais de construção como o betão ou a madeira, por exemplo, evidenciando-se uma maior necessidade de isolamento.

Quadro 2.1 - Valores do peso específico e condutibilidade térmica de diversos materiais de construção (Pina dos Santos, C. A. e Matias, L. 2006).

| Materiais de construção | ρ [Kg/m³] | λ [W/ (m. °C)] |
|-----------------------------------|---|--|
| Aço | 7800 | 50 |
| Pedra – Granito | 2500-2700 | 2,8 |
| Betão normal | 2000-2300 | 1,65 |
| Vidro de quartzo | 2200 | 1,4 |
| Argamassa de rebocos tradicionais | 1800-2000 | 1,3 |
| Material cerâmico | 1800-2000 | 0,77 |
| Madeira densa | 750-870 | 0,23 |

No Quadro 2.2 são apresentadas alguns valores de condutibilidades térmicas, retirados do ITE 50 devido a tratar-se uma referência nacional, de diferentes tipos de isolantes térmicos que poderão ser usados de forma a tentar minimizar as perdas de calor, por exemplo em edifícios em LSF.

Quadro 2.2 - Condutibilidade térmica de diversos isolantes térmicos (Pina dos Santos, C. A. e Matias, L. 2006).

| Isolante térmico | λ [W/ (m. °C)] |
|-------------------------|--|
| ICB | 0,045 |
| EPS | 0,040 |
| Lã-de-rocha | 0,040 |
| Lã-de-vidro | 0,040 |
| XPS | 0,037 |

2.2.4. Resistência térmica

2.2.4.1. Resistência térmica de materiais

A resistência térmica, R , é um parâmetro térmico de um determinado material que pode ser definido como o inverso da condutibilidade térmica λ , já explicado na secção 2.2.3, e pode ser calculado multiplicando o inverso da condutibilidade térmica do material pela sua espessura, como a seguir representado na expressão (2.3).

$$R = \frac{1}{\lambda} * e, \quad (2.3)$$

onde,

R – resistência térmica [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

λ – condutibilidade térmica [$W/(m \cdot ^\circ C)$];

e – espessura da camada [mm].

Para o caso de se querer calcular a resistência térmica de um elemento composto por várias camadas, esta pode obter-se somando a resistência térmica de cada uma das camadas, como demonstra a expressão (2.4):

$$R = \sum_{j=1}^n R_j = \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{\lambda_j}, \quad (2.4)$$

em que:

n – Número de camadas;

j – Número da camada;

e_j – espessura da camada j [mm];

λ_j – condutibilidade térmica da camada j [$W/(m \cdot ^\circ C)$].

2.2.4.2. Resistências térmicas superficiais

Para o cálculo da resistência térmica total de um elemento, há sempre que ter em conta as resistências térmicas superficiais, interior (R_{si}) e exterior (R_{se}). Estas resistências dizem respeito a superfície do elemento em estudo, interior ou exterior, que se encontra em contacto com o ar.

Os valores das resistências térmicas superficiais encontram-se tabelados no REH, do qual se retirou o Quadro 2.3, que indica os valores a serem usados para R_{si} e R_{se} , dependendo estes do sentido do fluxo de calor, do ângulo que o elemento em causa faz com a vertical e dos locais entre os quais se estará a dar a troca de calor, podendo variar entre interior, exterior e local não aquecido. Estes valores foram definidos de acordo com a EN-ISO 6946 ou com as publicações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Quadro 2.3 - Resistências térmicas superficiais (REH, 2013).

| Sentido do fluxo de calor | | Resistência térmica [$m^2 \cdot ^\circ C / W$] | |
|---------------------------|-------------|--|-------------------|
| | | Exterior R_{se} | Interior R_{si} |
| Horizontal | | 0,04 | 0,13 |
| Vertical | Ascendente | 0,04 | 0,10 |
| | Descendente | 0,04 | 0,17 |

O REH, publicado pelo Decreto- Lei n.º 118/2013, refere ainda que se o elemento que está a ser analisado separar uma divisão interior de um espaço não útil, deverá ser utilizado por duas vezes o valor de R_{si} , um correspondente ao interior da fração, e outro correspondente ao interior do espaço não útil.

2.2.4.3. Resistência térmica de espaço de ar

Apesar dos espaços de ar poderem ser classificados como ventilados ou não ventilados, o REH apenas fornece valores tabelados para espaços não ventilados com espessuras de caixa-de-ar entre os 5mm e os 300 mm, ilustrados no Quadro 2.4. Para os espaços com espessura superior a 300 mm, o REH refere que não deve ser considerada uma resistência única e por isso o balanço das perdas e ganhos térmicos deve ser feito de acordo com a norma EN-ISO 13789, pelo que tal espaço deverá ser considerado um espaço não útil. De seguida apresentam-se, no Quadro 2.4, os valores das resistências térmicas de espaços de ar não ventilados fornecidos pelo REH.

Quadro 2.4 - Resistências térmicas de espaços de ar não ventilados (REH, 2013).

| Direção e sentido do fluxo de calor | Espessura (mm) | R_{ar} [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] |
|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Horizontal | < 5 | 0,00 |
| | 5 | 0,11 |
| | 10 | 0,15 |
| | 15 | 0,17 |
| | 25 a 300 | 0,18 |
| Vertical ascendente | < 5 | 0,00 |
| | 5 | 0,11 |
| | 10 | 0,15 |
| | 15 a 300 | 0,16 |
| Vertical descendente | < 5 | 0,00 |
| | 5 | 0,11 |
| | 10 | 0,15 |
| | 15 | 0,17 |
| | 25 | 0,19 |
| | 50 | 0,21 |
| | 100 | 0,22 |
| | 300 | 0,23 |

2.2.4.4. Resistência térmica total

A resistência térmica total de um elemento, R_T , opaco não é mais que a soma das resistências descritas acima, deverão ser somadas as duas resistências superficiais, interior e exterior, as resistências térmicas de cada elemento constituinte e ainda a resistência térmica da caixa-de-ar caso esta exista. Assim podemos representar a resistência térmica total de um elemento pela expressão (2.5):

$$R_T = R_{si} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{se}, \quad (2.5)$$

onde:

R_T – Resistência térmica total [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

R_{si} – Resistência superficial interior [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

$\sum_{j=1}^n R_j$ – Somatório das resistências térmicas das camadas existentes [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

R_{se} – Resistência superficial exterior [$m^2 \cdot ^\circ C/W$].

2.2.5. Coeficiente de transmissão térmica

Pode definir-se o coeficiente de transmissão térmica, também representado por U, como um fator que mede a quantidade de calor que atravessa uma determinada superfície de área unitária por unidade de diferença de temperatura entre dois ambientes que essa superfície separa. Para elementos constituídos por um ou vários materiais de espessura constante, este pode também ser definido como o inverso da resistência térmica e é dado pela expressão (2.6):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{se}}, \quad (2.6)$$

onde,

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/ (m². °C)];

R_T – Resistência térmica total [m².°C/W].

No entanto, em certas zonas de ligações entre diferentes elementos da envolvente de edifícios que se caracterizam por um aumento no fluxo de calor, fica complexo o cálculo de U. Assim, para estas zonas em edifícios de construção corrente tradicional, o REH define valores para o coeficiente de transmissão térmica linear, representado por ψ [W/(m.°C)], para diversas situações, como apresentado no Quadro 2.5. Estas zonas são chamadas de pontes térmicas lineares e serão abordadas e explicadas mais a frente nesta dissertação no ponto 2.2.5.2.

Quadro 2.5 - Valores por defeito dos coeficientes de transmissão térmica lineares ψ [W/(m.°C)] retirados da tabela do REH 02.07.

| Tipo de ligação | | Sistema de isolamento das paredes | | |
|--|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|--|
| | | Isolamento interior | Isolamento exterior | Isolamento repartido ou na caixa-de-ar de parede dupla |
| Fachada com pavimentos térreos | | 0,80 | 0,70 | 0,80 |
| Fachada com pavimento sobre o exterior ou local não aquecido | Isolamento sob o pavimento | 0,75 | 0,55 | 0,75 |
| | Isolamento sobre o pavimento | 0,10 | 0,50 | 0,35 |
| Fachada com pavimento de nível intermédio ⁽¹⁾ | | 0,60 | 0,15 ⁽²⁾ | 0,50 ⁽³⁾ |
| Fachada com varanda ⁽¹⁾ | | 0,60 | 0,60 | 0,55 |
| Fachada com cobertura | Isolamento sob a laje de cobertura | 0,10 ⁽⁴⁾ | 0,70 | 0,60 |
| | Isolamento sobre a laje de cobertura | 1,0 | 0,80 | 1,0 |

Quanto ao tema principal desta dissertação, construções em aço leve, o cálculo simplificado do U será explicado mais a frente na secção 2.5 pois apresenta características específicas devido a ser uma construção com elementos heterogéneos constituídos por aço, sendo este um material metálico com elevada condutibilidade térmica e que poderá atravessar o isolamento térmico se se optar por soluções com isolamento na caixa-de-ar.

O REH disponibiliza ainda valores máximos admissíveis para elementos opacos consoante a zona climática em que o edifício se encontre, demonstrados no Quadro 2.6.

Quadro 2.6 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos dependendo da zona climática do edifício (REH, 2013).

| $U_{máx}$ [W/(m ² .°C)] | | Zona Climática | | |
|---|-----------------------|----------------|------|------|
| | | I1 | I2 | I3 |
| Elemento da envolvente em contacto com o exterior ou espaços não úteis com $b_r > 0.7$ | Elementos verticais | 1,75 | 1,60 | 1,45 |
| | Elementos horizontais | 1,25 | 1,00 | 0,90 |
| Elemento da envolvente em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com $b_r \leq 0.7$ | Elementos verticais | 2,00 | 2,00 | 1,90 |
| | Elementos horizontais | 1,65 | 1,30 | 1,20 |

Nota: Os requisitos indicados na presente tabela, aplicam-se tanto a Portugal Continental como às Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira.

2.2.6. Pontes térmicas

2.2.6.1. Definição e conceito genérico

Ao falarmos de uma ponte térmica na construção, estamos genericamente a falar de uma zona do nosso edifício na qual existe uma alteração da geometria dos seus elementos construtivos e/ou das suas propriedades, como ilustra a Figura 2.5, alterações essas que vão originar fenómenos localizados de transferência de calor. É, assim, uma zona da envolvente do nosso edifício na qual não se poderá admitir que o fluxo de calor é unidirecional e, consequentemente, deixa de ser válido o modelo térmico de cálculo usado para outras zonas do edifício por admitir a uniformidade da resistência térmica dos elementos na sua área.

Segundo a norma EN ISO 10211 (2007), uma ponte térmica é uma parte da envolvente do edifício na qual a resistência térmica é significativamente alterada devido a totais ou parciais

penetrações de outros materiais com diferentes condutividades térmicas na sua envolvente, e/ou pela alteração da espessura da envolvente, e/ou devido à diferença entre áreas interiores e exteriores como das ligações entre paredes, pisos e tetos.

Falando especificamente no fenómeno físico, quando existe uma ponte térmica, o fluxo de calor tenta procurar a trajetória mais curta e com menos gastos de energia, aquela que percorra um caminho com uma menor resistência térmica. Assim, as linhas do fluxo de calor numa zona de ponte térmica vão tomar as direções por onde a resistência térmica seja menor, ao contrário do que acontece numa zona corrente de um edifício de construção, na qual as linhas do fluxo de calor são unidireccionais (Figura 2.5). Já em termos práticos, as pontes térmicas tem como resultado a ocorrência de maiores trocas de calor com o exterior do que era expectável numa primeira fase e conseqüentemente uma distribuição heterogénea de temperaturas, aumentando assim os consumos energéticos do edifício, sendo por isso de especial importância a existência de uma correta abordagem na construção que permita a adequada correção destas zonas.

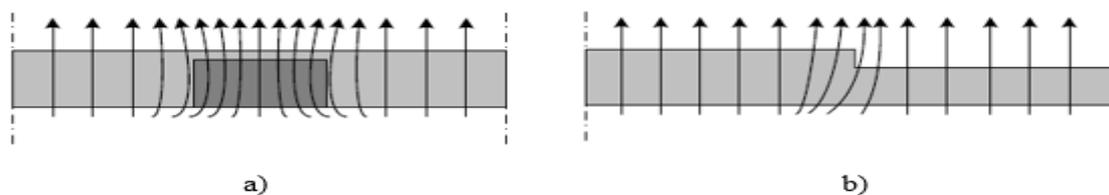


Figura 2.5 - Pontes térmicas devidas a: a) diferentes materiais; b) alterações da espessura (à direita) (Valério, 2007).

Falando mais especificamente no âmbito deste trabalho, um edifício feito com estrutura metálica em aço leve vai ter a sua resistência assegurada por materiais com condutibilidade térmica bastante elevada pelo que será interessante tentar perceber qual o impacto da estrutura nos elementos construtivos da sua envolvente (Valério, 2007).

2.2.6.2. Tipologia de pontes térmicas

Como referido na subsecção 2.2.6.1, as pontes térmicas podem ter origem quer em alterações das propriedades dos elementos construtivos, quer na alteração das suas dimensões mas, para além desta diferença, as pontes térmicas podem ser classificadas consoante os caminhos percorridos pelo fluxo de calor, em três tipos: pontes térmicas bidimensionais, tridimensionais ou pontuais.

As pontes térmicas bidimensionais, ou lineares, são as mais usuais nos edifícios de construção e caracterizam-se por surgirem da ligação de dois ou mais elementos construtivos do edifício

como por exemplo entre duas paredes verticais ou na ligação entre fachadas e pavimentos, ilustradas na Figura 2.6 e caracterizam-se por um coeficiente de transmissão térmica linear $[W/(m \cdot ^\circ C)]$.

As pontes térmicas tridimensionais, ilustradas na Figura 2.7 a), são na maior parte dos casos, o resultado da junção de duas ou mais pontes térmicas lineares, como por exemplo na intersecção entre um plano de pavimento e duas fachadas ou zonas dos bordos de varandas. Já as pontes térmicas pontuais, ilustradas na Figura 2.7 b), são tal como o nome indica, pontos do edifício em que as três dimensões são todas da mesma ordem de grandeza como por exemplo os vértices de ligação entre três elementos planos ou discontinuidades pontuais causadas pelas ancoragens de isolamentos térmicos como por exemplo ETICS (Pessoa, 2011).

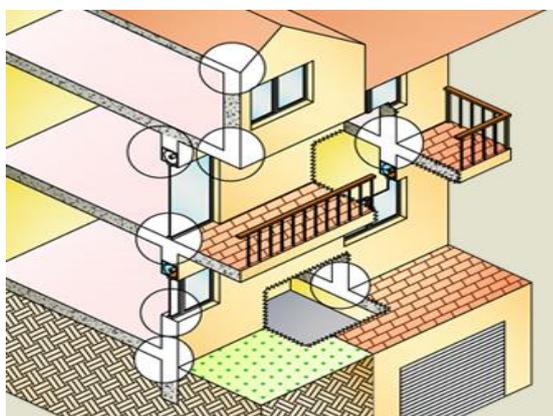


Figura 2.6 - Exemplo de pontes térmicas bidimensionais ou lineares numa moradia (ITeCons, catálogo de pontes térmicas lineares, 2011).

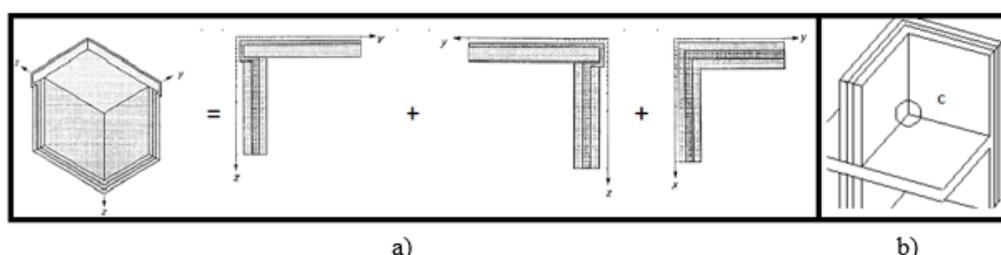


Figura 2.7 - Exemplo de pontes térmicas: a) tridimensionais resultantes de duas ou mais pontes térmicas lineares; b) ponte térmica pontual resultante da ligação de três elementos planos (EN ISO 10211 – 2, 2001).

2.2.6.3. Causas e consequências das pontes térmicas

Como já foi mencionado na subsecção 2.2.6.1, as causas das pontes térmicas podem ser variadas, estando na alteração da geometria ou das propriedades dos materiais dois bons exemplos de origem de pontes térmicas. Sucintamente, podemos dizer que a causa principal das pontes térmicas é o facto do fluxo de calor ser bidimensional ou tridimensional e a distribuição das temperaturas das superfícies interiores ser heterogénea. Como a resistência térmica destas zonas é muito inferior às resistências térmicas das zonas correntes dos edifícios as respetivas temperaturas vão ser também, de uma forma geral, inferiores, o que vai causar pontos localizados nos quais se vão atingir valores muito desfavoráveis.

Quanto as consequências e patologias associadas às pontes térmicas, apresentam-se agora três tipos, sabendo de antemão que por vezes fica difícil distingui-las visto que algumas podem ser causas de outras anomalias (Abreu, 2003):

- Condensações superficiais – Como já foi dito anteriormente, uma zona de ponte térmica vai provocar uma acentuada diminuição de temperatura superficial interior no edifício. Por vezes, em certas zonas do edifício, é atingido o chamado ponto de orvalho, que é a temperatura na qual se dá o fenómeno de condensação, por ser atingida um valor de pressão de saturação/pressão máxima de vapor. Esta pressão é atingida mais facilmente quanto mais baixas forem as temperaturas. Assim, este fenómeno é bastante corrente em zonas de pontes térmicas, principalmente durante a estação fria ou em meia estação. É importante referir que a zona de ponte térmica em si não é a causa exclusiva destas condensações superficiais, estando também fatores como a temperatura interior e exterior ou a ventilação interior dos edifícios associados a esta patologia.
- Bolores e degradação dos revestimentos – O aparecimento das condensações superficiais acima referidas podem originar este tipo de consequência mas, os bolores e a degradação dos revestimentos podem ocorrer mesmo sem condensações, se estiverem reunidas um conjunto de condições favoráveis ao desenvolvimento destes microrganismos. Se associados a presença abundante de oxigénio, que é uma condição quase sempre cumprida, estiverem fatores como a elevada humidade durante um certo período de tempo, a ausência de luz solar incidente e a fraca ventilação as condições ideais vão estar criadas para a ocorrência de bolores e degradação dos revestimentos. De referir ainda que este fenómeno é criado pela abundância de certos nutrientes que estão presentes na maior parte dos revestimentos utilizados.

- Heterogeneidade de temperaturas – Como já referido anteriormente nesta subsecção, algumas consequências vão ser causas de outras anomalias, sendo um bom exemplo disso a heterogeneidade de temperaturas causada nas zonas em que existem pontes térmicas. Devido a este fenómeno poderão, por exemplo: ser criados locais de deposição de pó em zonas de temperaturas mais baixas e o consequente aparecimento de manchas; ocorrer alterações em tintas e revestimentos ao longo das superfícies; ou dar-se a ocorrência de fissuras dos revestimentos interiores.

Posto isto, facilmente se percebe que estas zonas devem ser tidas em especial consideração porque podem estar na origem de um desempenho energético menos eficiente do edifício, bem como de uma deterioração precoce deste, o que poderá provocar danos suficientes para que se criem condições prejudiciais à saúde e bem-estar dos seus ocupantes (Abreu, 2003).

2.2.7. Estratégias de minimização de pontes térmicas

Como já foi referido, as pontes térmicas podem ser um dos principais problemas em edifícios de estrutura metálica se não forem corretamente tratadas, penalizando o comportamento térmico e a eficiência energética destes. Estes problemas tem especial importância, podendo mesmo as perdas de energia pelas pontes térmicas superiorizarem-se aos benefícios de energia de painéis solares para aquecimento de águas (Santos *et al.*, 2014). Nesta secção apresentam-se algumas estratégias de mitigação de pontes térmicas.

Santos *et al.*, 2014 refere algumas medidas de mitigação de pontes térmicas a serem usadas principalmente em edifícios com estrutura em aço, como por exemplo: aplicar uma camada contínua de isolamento térmico na superfície exterior do edifício como é o caso do ETICS ou aumentar o espaçamento entre os perfis metálicos nos elementos construtivos destes edifícios; aumentar o caminho do fluxo de calor com perfis metálicos perfurados, como demonstrado na Figura 2.8 a), de forma a reduzir as perdas de calor; introduzir fitas de corte térmico, que não são mais que umas fitas com material com menor condutibilidade térmica que são aplicadas ao longo dos perfis metálicos, como se pode ver na Figura 2.8 b); introduzir cortes térmicos nos elementos construtivos salientes, Figura 2.8 c), permitindo a criação de uma barreira para a transmissão térmica entre o exterior e o interior do edifício; por último, reduzir a área de contacto entre o perfil metálico e a superfície da parede como ilustrado na figura 2.8 d).

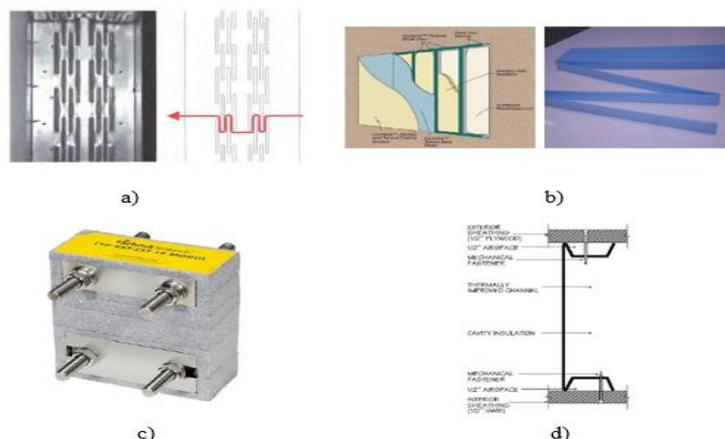


Figura 2.8 – Estratégias de mitigação de pontes térmicas: a) aumento do caminho do fluxo de calor; b) fitas de corte térmico; c) corte térmico em elementos construtivos salientes; d) redução da área de contacto entre o perfil metálico e os painéis de revestimento (Santos *et al.*, 2014)

Neste mesmo artigo (Santos *et al.*, 2014) estudou-se uma parede em LSF com três estratégias de mitigação diferentes. Numa primeira instância obteve-se o valor de U de um módulo de parede com 1,2 m de largura e 2,49 m de altura, ilustrado na Figura 2.9. Posteriormente foram feitas três alterações à parede original de referência. No primeiro caso analisou-se a influência das fitas de corte térmico na parede e concluiu-se que o valor do coeficiente de transmissão térmica teve um decréscimo de 1,9 %. No segundo caso, foi analisada uma parede com perfis metálicos perfurados, em que se obteve uma redução do valor de U de 3,2 % com a remoção de 14 % da massa do perfil. Numa terceira e última análise, as chapas metálicas de fixação do painel interior da parede foram substituídas por parafusos, conseguindo-se assim obter uma redução do valor de U na ordem dos 2,1 %.

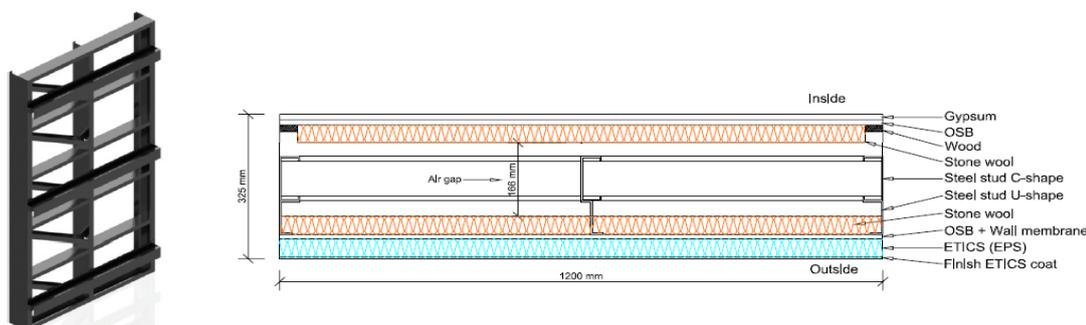


Figura 2.9 – Módulo de parede usado como referencia para caso de estudo (Santos *et al.*, 2014).

2.3. Legislação portuguesa

Relativamente ao desempenho energético de edifícios, a diretiva n.º 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho veio estabelecer exigências térmicas e de desempenho energético para novos edifícios e para edifícios já existentes mas que sejam alvo de grandes obras de renovação e promoveu, juntos dos estados membros, a obrigatoriedade de criar um sistema de implantação energética com o objetivo de informar o cidadão da qualidade térmica dos edifícios, sejam eles privados ou públicos, no momento da construção, arrendamento ou venda dos mesmos. Como consequência da transposição desta diretiva para a regulamentação nacional, criou-se o Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) e deu-se a revogação do Decreto-lei n.º 40/90 de 6 de Fevereiro e do Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE – Decreto-lei n.º 188/98 de 7 de Maio).

Em Maio de 2010, é lançada a Diretiva Europeia 2010/31/EU sobre o desempenho energético dos edifícios que vem reformular medidas importantes necessárias para uma redução da dependência energética da União Europeia e das emissões de gases com efeito de estufa. Esta Diretiva veio estabelecer novos objetivos para melhorar o desempenho energético dos edifícios, fornece um quadro geral comum para o cálculo do desempenho energético de edifícios e introduz alguns novos conceitos como os Edifícios de Energia quase Zero (NZEBs).

Para além dos pontos referidos no parágrafo anterior, a Diretiva Europeia 2010/31/EU veio indicar expressamente que a metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios deveria ter em conta normas europeias e, por isso, foi feita a nível nacional uma revisão do Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril (RCCTE). Esta revisão resultou então na revogação do anterior Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE - DL78/2006 de 4 de Abril), do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE - DL80/2006 de 4 de Abril) e do Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE - DL79/2006 de 4 de Abril) através do Decreto-Lei n.º 118/2013 que engloba num único documento o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), que por sua vez se divide no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Assim, neste momento a nível nacional, deverá também ser aplicada uma Certificação Energética a edifícios ou frações novos ou já existentes sujeitos a grandes intervenções nos termos do REH e do RECS (ITeCons@, 2016).

2.4. Normas europeias

Com a revogação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE - DL80/2006 de 4 de Abril) foi aprovado, através do Decreto-Lei n.º 118/2013 o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), que engloba o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH). O REH, que será consultado com bastante frequência durante a realização desta dissertação, foi escrito com a recomendação, por parte da Diretiva Europeia 2010/31/EU, de nas metodologias de cálculo do desempenho energético dos edifícios ter em conta normas europeias.

Assim, ao longo do REH vão sendo referidas algumas normas europeias relevantes, também para este trabalho, tais como (ISO@, 2016):

- EN ISO 13790 (2008) – *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling* – Esta norma fornece métodos de cálculo para avaliação do uso de energia anual para aquecimento e arrefecimento de edifícios residenciais ou não-residenciais, ou de apenas uma fração destes. Esta norma inclui, por exemplo, o método de cálculo para a transferência de calor por transmissão e ventilação da zona de edifício quando esta é aquecida ou arrefecida até uma temperatura interna constante. Esta norma foi pela última vez revista no ano de 2012.
- EN ISO 13789 (2007) – *Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method* – É especificado nesta norma um método e são fornecidas convenções de cálculo de coeficientes de transmissão térmica e de transferência de calor de ventilação para edifícios ou partes de edifícios. Esta norma é aplicável tanto à perda de calor (a temperatura interna maior do que a temperatura externa) como ao calor ganho (temperatura interna mais baixa do que a temperatura externa). Para a finalidade da norma ISO 13789 (2007), o espaço aquecido ou arrefecido, é assumido como estando a temperatura uniforme. Esta norma foi revista no ano de 2011.
- EN ISO 6946 (2007) – *Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method* – Esta norma será uma das mais importantes ao longo desta dissertação visto que fornece o método de cálculo da resistência térmica dos componentes de construção e elementos de construção, excluindo portas, janelas e outras unidades de vidros, parede de cortina, componentes que envolvem a transferência de calor em elementos em contacto com o chão, e elementos que são projetados para ser permeáveis ao ar. Também fornece um método

aproximado de cálculo que pode ser utilizado para elementos com camadas não homogêneas. Esta norma exclui do seu âmbito de aplicação construções em que as camadas isolantes são ligados por elementos de metal, como em alguns tipos de construção em LSF. Para esses casos, como auxílio de cálculo do coeficiente de transmissão térmica, é utilizada a BRE Digest 465 (2002) – *U-values for light steel-frame construction* – que fornece um método para avaliar valores U em construções com estrutura de aço leve, validado usando os procedimentos descritos na EN ISO 10211-1 (2007) e permite valores de U calculados por meio de um método simplificado. É semelhante ao método dado na EN ISO 6946 (2007).

- EN ISO 10211 (2007) – *Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations* – Esta norma estabelece as especificações para uma imagem tridimensional e um modelo geométrico bidimensional de uma ponte térmica para o cálculo numérico de fluxos de calor, a fim de avaliar a perda de calor total a partir de um edifício ou parte dele, ou de temperaturas mínimas de superfície, a fim de avaliar o risco de condensação superficial. A ISO 10211 (2007) também pode ser utilizada para a derivação de transmissão térmica linear e pontual e de fatores de temperatura de superfície.

2.5. Métodos de cálculo do coeficiente de transmissão térmica U

Sendo a temática deste trabalho a minimização das pontes térmicas em edifícios de estrutura leve em aço, um dos pontos importantes a ser analisado foi o cálculo das perdas de calor, que são resultado do coeficiente de transmissão térmica U. Esta secção vai então incidir sobre algumas metodologias do cálculo simplificado do U.

Como já foi referido na secção 1.1 desta dissertação, uma construção em LSF poderá ser de três tipos consoante a localização do isolamento térmico: construção fria, híbrida ou quente. Ao longo da dissertação foi necessário calcular o coeficiente de transmissão térmica em vários elementos parede com as três constituições referidas. Assim, para o cálculo de U, a EN ISO 6946 sugere um método de cálculo da resistência térmica para estruturas com camadas não homogêneas com estrutura quente, ou seja, onde não existam elementos metálicos que interrompam o isolamento térmico. Apesar da norma citada (EN ISO 6946) poder ser usada para a maioria dos tipos de parede, telhados e pavimentos, incluindo construções de alvenaria e em madeira, esta exclui especificamente construções nas quais as camadas isolantes são ligadas por elementos de metal, como é o caso das estruturas frias ou híbridas no sistema de LSF. Como tal, a *BRE Digest (Doran e Gorgolewski, 2002)* apresenta também uma

metodologia de cálculo para o coeficiente de transmissão térmica U, podendo esta ser usada em construções com estrutura de aço envolvendo secções de metal que penetram o isolamento, ou seja, em construções quentes, híbridas e frias.

As Figuras 2.10 e 2.11 mostram o tipo de construção quente e híbrida, respetivamente. A diferença entre estes dois tipos de construção, como já explicado acima, é a posição do isolamento térmico. De uma maneira geral, a construção em aço leve é constituída por isolamento térmico rígido pelo exterior, que poderá ser XPS, EPS ou ICB. Junto a esta camada seguem-se por norma placas de OSB, compostas por partículas de madeira aglomeradas sob pressão e calor. A seguir a estas placas virá uma caixa-de-ar na qual irá estar o perfil metálico em aço leve diferenciando-se neste caso as construções quentes das híbridas: se na caixa-de-ar apenas se encontrar o perfil metálico, sem qualquer tipo de isolamento térmico, trata-se de uma estrutura denominada quente (Figura 2.10); se na caixa-de-ar se encontrar, para além do perfil metálico uma parte preenchida com um isolamento moldável, como por exemplo lã de rocha, a estrutura diz-se com construção híbrida (Figura 2.11) visto esta ter isolamento térmico em duas partes da estrutura e o perfil metálico penetrar nesta última camada de isolamento térmico. Por último, se a estrutura tiver apenas isolamento térmico na caixa-de-ar, esta é uma construção fria. Após a colocação destas camadas a parede será finalizada com uma placa de OSB seguida de uma ou duas placas de gesso cartonado como acabamento interior.

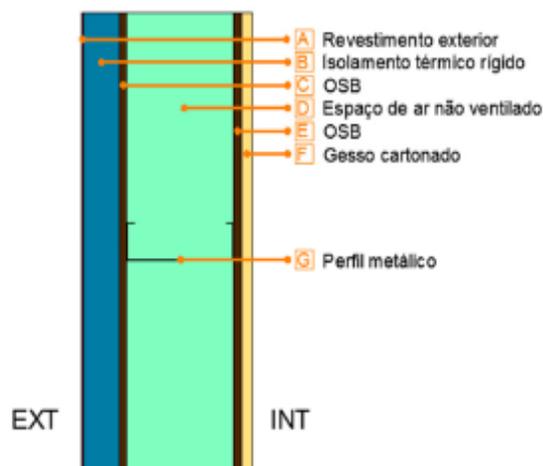


Figura 2.10 - Exemplo de construção quente em LSF, com isolamento apenas pelo exterior (Dias, 2011).

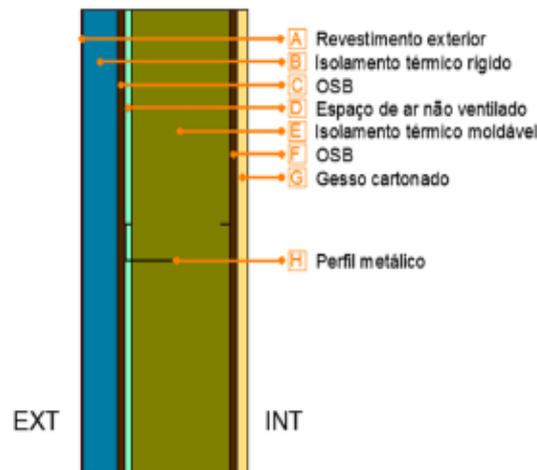


Figura 2.11 - Exemplo de construção híbrida em LSF com isolamento rígido no exterior e moldável na caixa-de-ar junto do perfil metálico (Dias, 2011).

Como já foi referido, o processo de cálculo do coeficiente de transmissão térmica U destes dois tipos de estruturas não poderá ser calculado da mesma forma. Como tal, nos subcapítulos seguintes serão apresentados dois métodos de cálculo do U consoante o tipo de estrutura, sendo a EN ISO 6946 utilizada para construções quentes e a *BRE Digest 465* (Doran e Gorgolewski, 2002) utilizada para as construções híbridas ou frias.

2.5.1. Método de cálculo EN ISO 6946

A EN ISO 6946 começa por referir, através da expressão (2.7), que a resistência térmica total [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] de um elemento é calculada pela média aritmética dos limites superior e inferior da sua resistência:

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2}, \quad (2.7)$$

onde R'_T [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] é o limite superior da resistência térmica e R''_T [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] é o limite inferior da mesma, quando o fluxo de calor é perpendicular às superfícies internas e externas do elemento e se dá apenas numa direção.

Assim, esta mesma norma diz-nos que o limite superior da resistência térmica R'_T [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] é dado pela equação (2.8):

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{fa}{R_{Ta}} + \frac{fb}{R_{Tb}} + \dots + \frac{fq}{R_{Tq}}, \quad (2.8)$$

Em que fa, fb, \dots, fq são as frações das áreas correspondentes a cada secção e $R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tq}$ [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] são as resistências térmicas de cada secção calculadas a partir da equação (2.3). Na Figura 2.12 é apresentada a imagem de um componente não homogéneo que tenta auxiliar a compreensão do cálculo de R'_T [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] na qual:

- D representa a direcção do fluxo de calor;
- “a”, “b” e “c” representam as diferentes secções da parede;
- fa, fb e fc representam as frações de área correspondentes a “a”, “b” e “c” respetivamente;
- 1, 2 e 3 representam as diferentes camadas da parede.

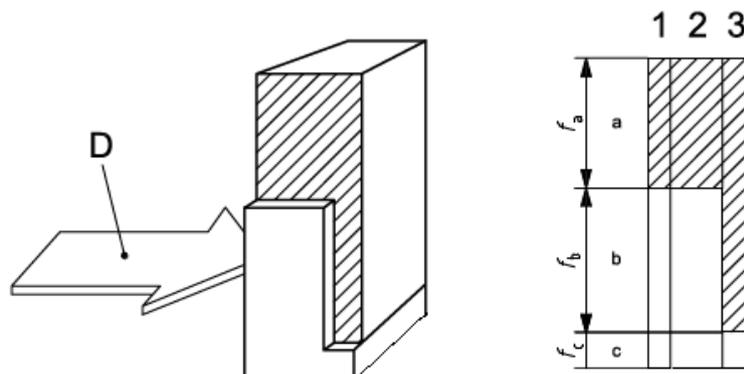


Figura 2.12 - Secções e camadas de um componente termicamente não homogéneo (EN ISO 6946, 2007).

Quanto ao limite inferior da resistência térmica total, R''_T [$m^2 \cdot ^\circ C/W$], este é determinado assumindo que todos os planos paralelos a superfície da parede são superfícies isotérmicas. Posto isto, calcula-se uma resistência térmica equivalente, R_j [$m^2 \cdot ^\circ C/W$], para cada uma das camadas não homogéneas através da expressão (2.9):

$$\frac{1}{R_j} = \frac{fa}{R_{aj}} + \frac{fb}{R_{bj}} + \dots + \frac{fq}{R_{qj}}, \quad (2.9)$$

onde fa, fb, \dots, fq são as frações de área de cada secção da camada não homogénea e $R_{aj}, R_{bj}, \dots, R_{qj}$ [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] as resistências térmicas correspondentes.

E é em seguida obtido o limite inferior da resistência térmica total, R''_T [$m^2 \cdot ^\circ C/W$], através da equação equivalente a (2.10):

$$R''_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \quad (2.10)$$

onde:

R''_T – Limite inferior da resistência térmica total [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

R_{si} – Resistência superficial interior [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

$\sum_{j=1}^n R_j$ – Somatório das resistências térmicas das camadas existentes, contabilizando as camadas homogêneas e as não homogêneas [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

R_{se} – Resistência superficial exterior [$m^2 \cdot ^\circ C/W$].

A norma EN ISO 6946 sugere ainda uma expressão (2.11) para o cálculo do erro estimado, “ e_{\max} ”, em percentagem, referindo o cociente entre os limites superior e inferior da resistência total poderá ser no máximo de 1,5, o que corresponde a um erro máximo de 20%:

$$e_{\max}[\%] = \frac{R'_T - R''_T}{2 \times R_T} \times 100 \quad (2.11)$$

Calculados os limites superior, expressão (2.8), e inferior, expressão (2.10), da resistência total, pode calcular-se a resistência total através da expressão (2.7) e o correspondente coeficiente de transmissão térmica, sendo este o inverso da resistência térmica, calculado através da expressão (2.6).

2.5.2. Método de cálculo BRE *Digest 465* (Doran e Gorgolewski, 2002)

Visto que o método de cálculo da norma EN ISO 6946 acima descrito não é aplicável a estruturas onde o isolamento térmico seja atravessado por um perfil metálico, a *BRE Digest 465* (Doran e Gorgolewski, 2002) vem colmatar esta situação com uma nova metodologia do cálculo de U. Segundo esta, é também necessário o cálculo dos limites da resistência térmica total, que se faz igualmente de acordo com a EN ISO 6946, alterando-se apenas a forma como se combinam estes valores através do fator p . Está também explícito que para o caso do isolamento térmico estar todo colocado pelo exterior, p deve assumir o valor de 0,5, o que resultará no cálculo da resistência térmica total equivalente ao descrito acima segundo a norma ISO 6946. A resistência térmica total [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] é então dada pela expressão (2.12):

$$R_T = p \times R'_T + (1 - p) \times R''_T \quad (2.12)$$

em que o valor de p é dado por duas expressões, consoante o valor da largura dos banzos d :

- Quando a largura dos banzos, d , é menor ou igual que 50 mm:

$$p = 0,8 \times \frac{R''_T}{R'_T} + 0,32 - 0,2 \times \left(\frac{600}{s}\right) - 0,04 \times \left(\frac{d}{100}\right) \quad (2.13)$$

- Quando a largura dos banzos, d , é maior que 50 mm e menor que 80 mm:

$$p = 0,8 \times \frac{R''_T}{R'_T} + 0,24 - 0,2 \times \left(\frac{600}{s}\right) - 0,04 \times \left(\frac{d}{100}\right) \quad (2.14)$$

onde,

s – Espaçamento entre perfis metálicos [mm].

Para o caso do valor p dar negativo, a *BRE Digest 645* (Doran e Gorgolewski, 2002) refere para se atribuir o valor de zero a p .

A *BRE Digest 465* (Doran e Gorgolewski, 2002) refere ainda que, visto o seu efeito já ser considerado no cálculo de p , o efeito dos banzos poderá ser desprezado no cálculo dos limites superior e inferior da resistência térmica, considerando-se apenas o efeito das almas dos perfis.

3. SOFTWARE UTILIZADO

3.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se o *software* de modelação numérica “*THERM*”, que foi utilizado para analisar a transmissão de calor e as pontes térmicas originadas pela estrutura leve em aço com diferentes constituições. Começa-se por explicar em que pode ser utilizado este *software* e apresentam-se também os dados de entrada (*inputs*) necessários à sua utilização, tais como, a definição dos materiais, a geometria dos elementos e as condições de fronteira. Apresenta-se ainda uma validação dos resultados obtidos pelo *software* e exemplos de *ouputs* do “*THERM*”.

3.2. Âmbito de aplicação

Como anteriormente referido, o *software* utilizado nesta dissertação é o “*THERM*”, versão 7.4. Este é um *software* baseado no método de elementos finitos e desenvolvido no Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) para análise de fenómenos de transferência de calor. Usando o “*THERM*” é possível modelar a transferência de calor em duas dimensões em elementos de construção, como janelas, paredes, fundações, telhados e portas. Desta forma é possível avaliar o efeito das pontes térmicas em elementos construtivos modelados bidimensionalmente (LBL@, 2016).

3.3. Dados de entrada (*inputs*)

Para se proceder à análise de elementos construtivos no *software* é necessário, numa primeira fase, desenhar esses mesmos elementos. Para facilitar este processo, o “*THERM*” tem um comando designado *underlay* que permite importar ficheiros de *CAD*. Assim, desenham-se os elementos construtivos, à escala, no *AutoCad*, e através do comando referido “carregam-se” os elementos. Após importado o desenho, surge um esboço do elemento na folha do “*THERM*” e devem verificar-se todas as medidas. Confirmadas as medidas, procede-se ao desenho de cada zona do elemento através de poligonais e usando o esboço importado do *AutoCad* e define-se qual o material de cada uma destas zonas. Estes materiais podem estar já

definidos na base de dados do programa ou poderão ser adicionados, devendo assim definir-se qual o nome do material e respetivas propriedades (e.g. condutibilidade térmica).

Definida toda a geometria do elemento, bem como os materiais e as respetivas características térmicas, devem definir-se as suas condições de fronteira. Ao executar o comando *boundary conditions (BC)* todas as fronteiras do elemento ficam automaticamente definidas como sendo adiabáticas e, como tal, deverá alterar-se consoante o exemplo que se quer testar. No caso específico desta dissertação, por se querer estudar exemplos de paredes que separassem o ambiente interior do exterior, adicionaram-se duas novas condições de fronteira, devido a estas não estarem predefinidas no *software*, para o caso de uma superfície exterior e de uma superfície interior. Para o efeito, o programa necessita de um *input* denominado em Inglês de “*Film Coefficient*” que é o inverso da resistência térmica superficial pretendida. As resistências térmicas superficiais utilizadas correspondem aos valores estipulados pelo REH (ver Quadro 2.3).

Definidas as condições de fronteira, apenas se tem que executar o algoritmo do programa e este apresentará os respetivos resultados. Se alguma das condições não estiver bem definida, será apresentada uma mensagem de erro e o modelo deverá ser revisto.

3.4. Resultados (*outputs*)

Apesar de nesta dissertação o “*THERM*” ser utilizado essencialmente para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U) de um elemento construtivo, ilustrado na Figura 3.1 juntamente com ΔT , erro e fluxo de calor atravessado, existem muitos outros resultados que podem ser obtidos através deste *software*, permitindo perceber melhor o comportamento térmico de cada elemento construtivo modelado.

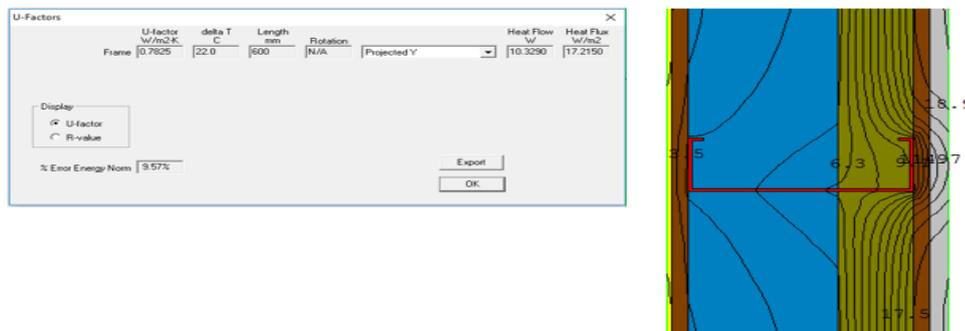


Figura 3.1 – *Output* do “*THERM*”: coeficiente de transmissão térmica U; fluxo de calor; ΔT ; e erro possível dos resultados.

Apresentam-se nesta secção alguns exemplos de possíveis *outputs* obtidos no “*THERM*”, tais como a malha de elementos finitos utilizada na rotina do programa, as linhas isotérmicas dos elementos e os vetores com a direcção do fluxo de calor, conforme exemplificado nas Figuras 3.2 a), b) e c), respetivamente.

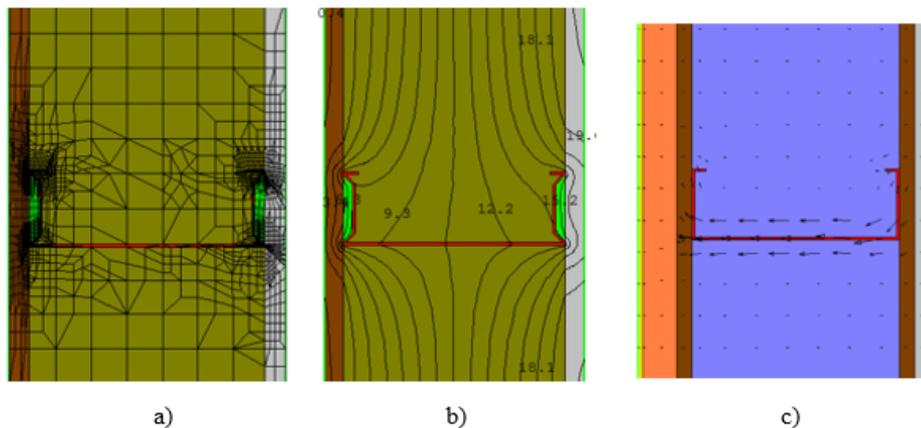


Figura 3.2 - *Outputs* do “*THERM*”: a) malha de elementos finitos; b) linhas isotérmicas; c) vetores do fluxo de calor.

Para além dos resultados acima ilustrados, este *software* fornece também a distribuição de temperaturas e do fluxo de calor no interior do elemento construtivo modelado com as respetivas legendas de cores, como se ilustra nas Figuras 3.3 a) e b).

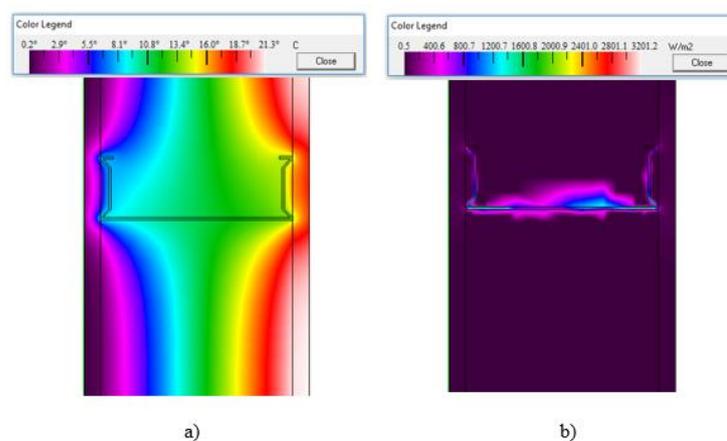


Figura 3.3 - *Outputs* do “*THERM*”: a) distribuição de temperaturas; b) distribuição do fluxo de calor.

3.5. Validação do software

Como já foi referido anteriormente, o software “*THERM*” foi utilizado nesta dissertação como uma ferramenta de cálculo para as análises térmicas feitas a diferentes elementos construtivos em LSF. Antes de se realizarem estas análises, de forma a perceber se a modelação e os valores obtidos estariam corretos, procedeu-se a uma validação do software utilizado. Assim, fez-se uma comparação dos coeficientes de transmissão térmica (U) obtidos através de cálculo analítico, pela expressão (2.6), e através de programa (método dos elementos finitos).

A estrutura analisada foi uma parede constituída apenas por camadas termicamente homogéneas, sem qualquer perfil metálico, para que fosse possível o cálculo analítico rigoroso. A Figura 3.4 ilustra a parede utilizada neste cálculo, bem como as espessuras de cada camada e as respetivas condutibilidades e resistências térmicas. Para além da modelação do elemento, foram ainda definidas as resistências térmicas superficiais, interior e exterior, retiradas do REH para o sentido de fluxo de calor horizontal, sendo $R_{si} = 0,13 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$ e $R_{se} = 0,04 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$.

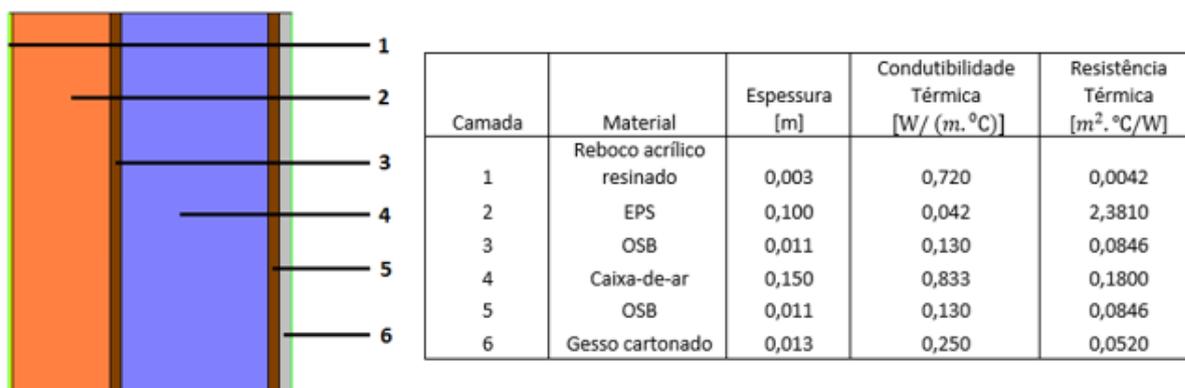


Figura 3.4 - Elemento construtivo utilizado para validação do software “*THERM*”.

O resultado obtido para o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) pelo *Therm* foi $0,3383 [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$.

De modo a verificar este valor, calculou-se de forma analítica o coeficiente de transmissão térmica do mesmo elemento. Com as espessuras e condutibilidades térmicas dos materiais constituintes conhecidas, calcularam-se, através da expressão (2.3), as resistências térmicas de cada camada e definiram-se também as resistências superficiais através dos valores fornecidos

pelo REH. Para o cálculo da resistência térmica total do elemento, como indicado na expressão (2.4), somaram-se todas as resistências térmicas anteriormente calculadas, incluindo as resistências térmicas superficiais. No Quadro 3.1 pode-se ver o valor da resistência térmica de cada camada, bem como da resistência térmica total do elemento.

Quadro 3.1 - Resistências térmicas de cada camada e resistência térmica total do elemento usado para validação do *software*.

| | | Validação | | |
|----------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------------------|---|
| Camada | Material | Espessura [m] | Condutibilidade Térmica [W/ (m. °C)] | Resistência Térmica [m ² . °C/W] |
| 1 | Reboco acrílico resinado | 0,0030 | 0,7200 | 0,0042 |
| 2 | EPS | 0,1000 | 0,0420 | 2,3810 |
| 3 | OSB | 0,0110 | 0,1300 | 0,0846 |
| 4 | Caixa-de-ar 15cm | 0,1500 | 0,8333 | 0,1800 |
| 5 | OSB | 0,0110 | 0,1300 | 0,0846 |
| 6 | Gesso cartonado | 0,0130 | 0,2500 | 0,0520 |
| Espessura total [m] | | 0,2880 | R_{si} [m ² . °C/W] | 0,1300 |
| | | | R_{se} [m ² . °C/W] | 0,0400 |
| | | | R_T [m ² . °C/W] | 2,9564 |

Com o valor da resistência térmica total calculou-se o coeficiente de transmissão térmica através da expressão (2.6). O valor de U obtido através deste cálculo analítico foi de 0,3383 [W/ (m². °C)].

Após a comparação dos valores do coeficiente de transmissão térmica obtidos das duas formas, pode-se concluir que estes são iguais e por isso considera-se o modelo validado/verificado.

4. ESTUDO PARAMÉTRICO

4.1. Introdução

Ao longo deste capítulo apresentam-se e comentam-se os resultados das análises feitas aos diferentes elementos (parede) de construção LSF através do coeficiente de transmissão térmica (U). Devido a serem feitas comparações entre valores deste parâmetro e calculadas percentagens de erro, utilizam-se ao longo deste capítulo valores de U com quatro casas decimais, de forma a conseguir obter resultados mais precisos, apesar da norma EN ISO 6946 sugerir o uso de apenas duas casas decimais.

No primeiro caso, analisou-se a influência que a espessura do isolamento térmico terá na evolução do valor do coeficiente de transmissão térmica (U) consoante a posição que o isolamento terá no elemento, ou seja, analisando os três tipos de estruturas: quente, híbrida e fria. Nesta análise, os valores de U foram não só obtidos através do *software* de modelação térmica, mas também obtidos através das duas metodologias de cálculo, descritas nas subsecções 2.5.1 e 2.5.2, por forma a comparar os valores obtidos por cada uma e a analisar o respetivo erro. Numa segunda parte, fez-se uma análise da influência da área do perfil metálico que está em contacto com as placas de OSB e, dentro de cada um destes casos, analisou-se também a influência que o espaçamento entre perfis terá no valor de U de uma parede LSF. Por fim, avaliou-se uma estratégia de mitigação de pontes térmicas que consiste em acrescentar um espaço de ar entre o perfil metálico e os painéis adjacentes, de forma a criar uma resistência térmica adicional na parede.

4.2. Influência da espessura e posição do isolamento térmico

Com o objetivo de analisar qual a influência da espessura do isolamento térmico, nos três tipos de construção, quente, híbrida e fria, foi modelado um elemento representativo de uma parede em LSF para cada um destes três tipos. Depois de definida a constituição do elemento, foi feita uma análise através do *software* “*THERM*” (ver Capítulo 3) e foi ainda calculado o valor do coeficiente de transmissão térmica pelos métodos sugeridos na EN ISO 6946 (ver Secção 2.6.1) e na *Bre Digest 645* (ver Secção 2.6.2). Para além do cálculo de U, foram analisadas as percentagens de erro de cada metodologia tendo como referência o valor obtido

através do *software*. Apesar de se saber previamente que o método de cálculo indicado na EN ISO 6946 não é correto para estruturas em que o isolamento térmico seja interrompido pelo perfil metálico, caso das estruturas híbridas e frias, foi calculado o valor de U pela norma para os três tipos de estrutura e analisado o erro obtido.

4.2.1. Estrutura quente

Para a análise da estrutura quente, foram estudados 4 elementos parede que diferem apenas na espessura da camada de isolamento térmico, no caso EPS, variando em camadas de 100 mm, 75 mm, 50 mm e 25 mm. A Figura 4.1 ilustra a primeira estrutura estudada com isolamento térmico EPS de 100 mm sendo que as restantes três são equivalentes, alterando-se apenas a espessura desta camada, utilizando os valores indicados anteriormente. As paredes foram modeladas com os perfis metálicos espaçados de 600 mm, modelando-se assim a parede no *software* e centrado-se o perfil a meio desta medida.

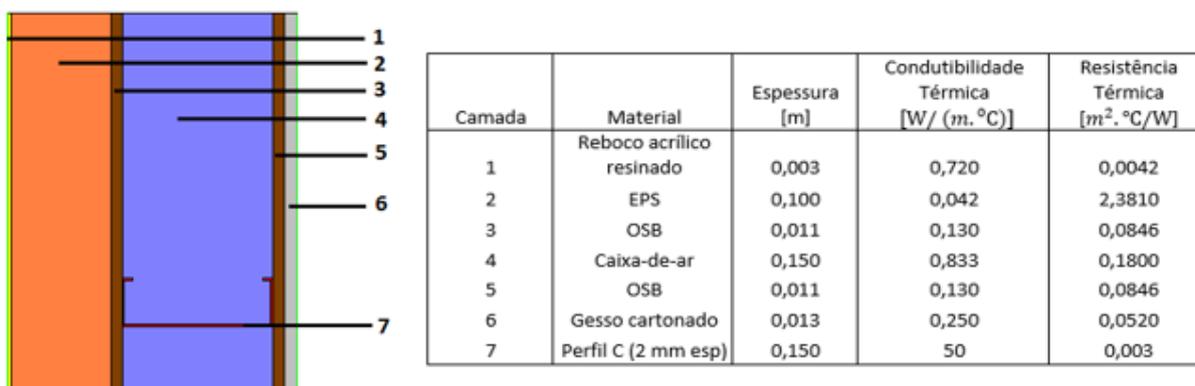


Figura 4.1 - Elemento parede com estrutura quente: 100 mm de EPS.

Numa primeira fase, foi feita uma modelação da parede ilustrada na Figura 4.1 utilizando o *software* de análise térmica “*THERM*” definindo-se todas as condições de fronteira já explicadas no Capítulo 3. Após a modelação foi possível obter o coeficiente de transmissão térmica” com o valor de 0,3404 [W/ (m².°C)].

Para o caso da estrutura quente, após a obtenção do resultado no “*THERM*”, fez-se ainda uma avaliação analítica de U através do método de cálculo simplificado sugerido na EN ISO 6946 de forma a poder comparar estes dois valores. Visto que a *BRE Digest 645* refere explicitamente que para estruturas com todo o isolamento pelo exterior, como é o caso, o valor do fator p calculado através das expressões (2.13) ou (2.14) deve ser igual a 0,5 e que

assim o valor de U será igual ao calculado pela EN ISO 6946, fez-se apenas a análise segundo esta norma e segundo o “*THERM*” para este tipo de estrutura.

Para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica segundo a EN ISO 6946 foi seguido todo o processo de cálculo explicado na secção 2.5.1. Analisou-se então a parede em LSF através de dois cortes (Figura 4.2): o corte C (1) é feito onde apenas se encontra a caixa-de-ar sem perfil metálico; o corte C (2) é feito na parte do elemento em que toda a caixa-de-ar é atravessada pelo perfil metálico.

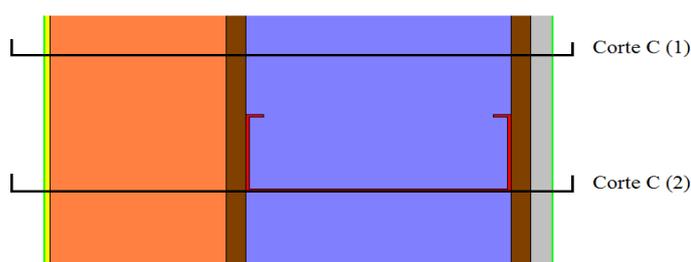


Figura 4.2 – Localização dos cortes C (1) e C (2) no módulo de parede analisado.

Foram ainda calculadas as percentagens de área que cada corte tem em 600 mm de parede. No Quadro 4.1 apresentam-se os materiais e respetivas espessuras, condutibilidades e resistências térmicas, bem como as percentagens de área de cada corte e a resistência total para cada corte, incluindo as resistências superficiais R_{si} e R_{se} retiradas do REH.

Quadro 4.1 - Resistências térmicas do elemento calculadas para os dois cortes C (1) e C (2) em estrutura quente.

| Camada | Material | Esp. [m] | Cond. Térmica [W/(m. °C)] | Área de corte [%] | R_t C (1) [m ² . °C/W] | R_t C (2) [m ² . °C/W] | |
|--------|--------------------------|----------|---------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|
| 1 | Reboco acrílico resinado | 0,003 | 0,720 | - | 0,0042 | 0,0042 | |
| 2 | EPS | 0,100 | 0,042 | - | 2,3810 | 2,3810 | |
| 3 | OSB | 0,011 | 0,130 | - | 0,0846 | 0,0846 | |
| 4 | Caixa-de-ar | 0,150 | 0,833 | 99,6667 | 0,1800 | 0,0000 | |
| 5 | OSB | 0,011 | 0,130 | - | 0,0846 | 0,0846 | |
| 6 | Gesso cartonado | 0,013 | 0,250 | - | 0,0520 | 0,0520 | |
| 7 | Perfil C (2mm esp) | 0,150 | 50,00 | 0,3333 | 0,0000 | 0,0030 | |
| | | | | | R_{si} | 0,13 | 0,13 |
| | | | | | R_{se} | 0,04 | 0,04 |
| | | | | | $\sum R_T$ [m ² . °C/W] | 2,9564 | 2,7793 |

Após o cálculo das resistências térmicas para cada corte, procedeu-se ao cálculo do limite superior da resistência térmica, que segundo a norma EN ISO 6946 é dado pela expressão (2.8):

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{0,9967}{2,9564} + \frac{0,3333}{2,7793} \Rightarrow R'_T = 2,9557 [m^2 \cdot ^\circ C/W] \quad (4.1)$$

Para o cálculo do limite inferior da resistência térmica foi necessário o cálculo da resistência térmica equivalente da camada não homogénea, R_j , através da expressão (2.9):

$$\frac{1}{R_j} = \frac{0,9967}{0,18} + \frac{0,0033}{0,0030} \Rightarrow R_j = 0,1504 [m^2 \cdot ^\circ C/W] \quad (4.2)$$

Calculada esta resistência foi possível obter o valor do limite inferior da resistência térmica, R''_T , com a expressão (2.10):

$$R''_T = 2,9268 [m^2 \cdot ^\circ C/W] \quad (4.3)$$

Com o limite inferior e superior da resistência térmica calculados, foi possível através da equação (2.7) calcular a resistência térmica total:

$$R_T = \frac{2,9557+2,9268}{2} = 2,9413 [m^2 \cdot ^\circ C/W] \quad (4.4)$$

Por fim, com a resistência térmica total calculada, através da expressão (2.6) obteve-se o coeficiente de transmissão térmica:

$$U = \frac{1}{2,9413} \Rightarrow U = 0,3400 [W/ (m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (4.5)$$

A norma sugere o cálculo da percentagem de erro máximo, através da expressão (2.11):

$$e_{\max} (\%) = \frac{2,9557-2,9268}{2 \times 2,9413} \times 100 = 0,49\% \quad (4.6)$$

No Quadro 4.2 são apresentados os valores dos limites da resistência total (R'_T e R''_T), da resistência total (R_T), do rácio entre os limites da resistência total e da estimativa do erro máximo (e_{\max}) calculados para as diferentes espessuras de isolamento analisadas.

Quadro 4.2 - Parâmetros térmicos calculados para as diferentes espessuras de isolamento térmico pelo exterior e erro máximo (e_{\max}) previsto pela EN ISO 6946: estrutura quente.

| | R'_T [m ² .°C/W] | R_j [m ² .°C/W] | R''_T [m ² .°C/W] | R_T [m ² .°C/W] | Rácio | e_{\max} [%] |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------|
| | Eq. (2.8) | Eq. (2.9) | Eq. (2.10) | Eq. (2.7) | $\frac{R'_T}{R''_T}$ | Eq. (2.11) |
| EPS 100 mm | 2,9557 | 0,1504 | 2,9268 | 2,9413 | 1,0099 | 0,49 |
| EPS 75 mm | 2,3605 | 0,1504 | 2,3315 | 2,3460 | 1,0124 | 0,61 |
| EPS 50 mm | 1,7652 | 0,1504 | 1,7363 | 1,7508 | 1,0167 | 0,82 |
| EPS 25 mm | 1,1699 | 0,1504 | 1,1411 | 1,1555 | 1,0253 | 1,23 |

Os resultados mostram-se assim bastante aceitáveis visto que o erro máximo calculado, que neste caso é para a menor espessura de isolamento (EPS de 25 mm), é de 1,23%. Estas reduzidas percentagens de erro eram já expectáveis visto que o rácio entre os limites superior e inferior da resistência total é muito inferior a 1,5, valor este correspondente a um erro de 20% segundo a norma EN ISO 6946.

Pela análise dos valores obtidos, podemos observar que o erro, ainda que mínimo, tem tendência para aumentar com a diminuição da resistência total do elemento e consequente aumento do coeficiente de transmissão térmica.

Todo este processo de cálculo foi seguido para os restantes elementos constituídos por camadas de isolamento térmico de diferentes espessuras, calculando-se ainda o erro real obtido através da metodologia da norma tendo como referencia os valores obtidos no “*THERM*”. Os resultados desta análise são apresentados no Quadro 4.3 e na Figura 4.3.

Quadro 4.3 - Coeficientes de transmissão térmica obtidos através do “*THERM*” e através da EN ISO 6946 e a respetivo erro tendo como referência o “*THERM*”.

| | EPS 100 mm | EPS 75 mm | EPS 50 mm | EPS 25 mm |
|---|------------|-----------|-----------|-----------|
| U-<i>Therm</i> [W/ (m ² .°C)] | 0,3404 | 0,4269 | 0,5724 | 0,8683 |
| U-ISO 6946 [W/ (m ² .°C)] | 0,3400 | 0,4263 | 0,5712 | 0,8654 |
| Erro real [%] | - 0,12 | - 0,15 | - 0,21 | - 0,33 |

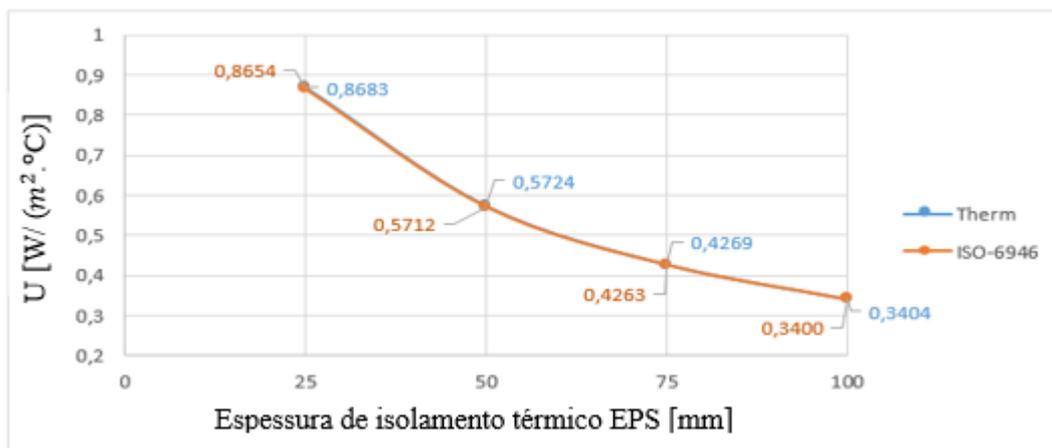


Figura 4.3 - Variação do valor de U em função da espessura do isolamento térmico pelo exterior: estrutura quente.

Pela análise dos resultados pode-se concluir que, para uma estrutura quente, o valor de U obtido quer pelo “*THERM*”, quer pelo método de cálculo simplificado da norma EN ISO 6946, é muito próximo, com a diferença de valores, ainda que mínima, a aumentar quando a espessura de isolamento diminui. Os valores calculados através da metodologia de cálculo da norma são sempre inferiores aos valores retirados do “*THERM*”, para os quatro casos analisados. Já o erro real obtido, que pode ser visto no Quadro 4.3, é sempre inferior ao erro máximo (e_{\max}) previsto pela EN ISO 6946 (Quadro 4.2) pelo que se conclui que os resultados são bastante aceitáveis. Conclui-se também, como seria de esperar, que com o aumento da espessura de isolamento o coeficiente de transmissão térmica tem tendência a diminuir e essa diminuição é mais acentuada para menores espessuras de isolamento.

4.2.2. Estrutura híbrida

Como já explicado anteriormente, uma estrutura híbrida em LSF tem geralmente um isolamento rígido pelo exterior, neste caso EPS, complementado por outra camada de isolamento térmico, geralmente constituída por um material fibroso, como a lã-de-rocha usada nesta análise, inserido na caixa-de-ar. Para a análise do coeficiente de transmissão térmica neste tipo de estrutura, fizeram-se variar as espessuras destas camadas de isolamento ainda que mantendo uma espessura total de 100 mm no somatório das duas camadas. Assim, foram analisados três casos, com as espessuras de isolamento térmico representadas no Quadro 4.4.

Nos resultados apresentados ao longo desta secção é apenas referida a espessura da camada de isolamento de EPS pelo exterior, estando implícita a espessura da camada de isolamento de lã

de rocha visto que o somatório das espessuras das duas camadas isolantes térmicas é sempre igual a 100 mm.

Quadro 4.4 – Espessuras de isolamento térmico dos três casos estudados em estrutura híbrida

| | Esp. Isolamento exterior (EPS) [mm] | Esp. Isolamento na caixa-de-ar (lã de rocha) [mm] | Σ Esp. Isolamento térmico na parede [mm] |
|---------------|-------------------------------------|---|---|
| Caso 1 | 75 | 25 | 100 |
| Caso 2 | 50 | 50 | 100 |
| Caso 3 | 25 | 75 | 100 |

A Figura 4.4 ilustra o caso 1 do Quadro 4.4, bem como a espessura, condutibilidade térmica e resistência térmica de cada material usado. De seguida será feita a análise ao coeficiente de transmissão térmica para este exemplo, sendo que para as outras espessuras o cálculo é idêntico, variando apenas o valor destas.



Figura 4.4 - Elemento parede com estrutura híbrida: 75 mm de EPS e 25 mm de lã de rocha.

Apesar de se saber à partida que o método simplificado para o cálculo de U fornecido pela norma EN ISO 6946 não é aplicável a este tipo de estruturas em que o isolamento térmico é atravessado pelo perfil metálico, para além das análises deste coeficiente pelo “*THERM*” e pela metodologia da *BRE Digest 645* (Doran e Gorgolewski, 2002), fez-se também o cálculo segundo a metodologia da norma, avaliando-se assim a variação dos valores de U segundo as três análises.

Para a modelação do elemento parede neste tipo de estruturas no *software Therm* foi necessário variar a espessura da caixa-de-ar, como consequência da variação da espessura da camada de lã de rocha. Assim, foi também necessário calcular a condutibilidade térmica equivalente destas através da expressão (2.3), sabendo à partida que a resistência térmica de

espaços de ar não ventilados com espessuras entre 25 mm – 300 mm é de $0,18 [W/ (m^2 \cdot ^\circ C)]$, valor fornecido pelo REH. Após a modelação da estrutura ilustrada na Figura 4.4, o valor obtido para o coeficiente de transmissão térmica foi de $U_{Therm} = 0,3611 [W/ (m^2 \cdot ^\circ C)]$.

Para o cálculo do valor de U através do método indicado no *BRE Digest 645*, (Doran e Gorgolewski, 2002) devem ser calculados o limite inferior e superior da resistência térmica total tal como explicado na EN ISO 6946, alterando-se apenas a forma como se combinam estes valores, através de um fator p . Assim, foi feita uma análise através de dois cortes transversais à parede modelada com 600 mm de desenvolvimento, semelhantes àqueles feitos para a estrutura quente e ilustrados na Figura 4.2: C (1) em que se encontra apenas a caixa-de-ar e a camada de lã de rocha; e C (2) no qual se dá o caso em que a caixa-de-ar está totalmente preenchida pelo perfil metálico. No Quadro 4.5 apresenta-se o elemento, considerando as percentagens de área para cada corte, bem como as resistências totais para cada caso, incluindo também as resistências superficiais fornecidas pelo REH.

Quadro 4.5 - Resistências térmicas do elemento calculadas para os dois cortes C (1) e C (2) em estrutura híbrida.

| Camada | Material | Esp. [m] | Cond. Térmica $[W/ (m \cdot ^\circ C)]$ | Área de corte [%] | Rt C (1) $[m^2 \cdot ^\circ C/W]$ | Rt C (2) $[m^2 \cdot ^\circ C/W]$ | |
|--------|--------------------------|----------|---|-------------------|---|-----------------------------------|--------|
| 1 | Reboco acrílico resinado | 0,003 | 0,720 | - | 0,0042 | 0,0042 | |
| 2 | EPS | 0,075 | 0,042 | - | 1,7857 | 1,7857 | |
| 3 | OSB | 0,011 | 0,130 | - | 0,0846 | 0,0846 | |
| 4 | Lã-de-rocha | 0,025 | 0,040 | 99,6667 | 0,6250 | 0,0000 | |
| 5 | Caixa-de-ar | 0,125 | 0,694 | 99,6667 | 0,1800 | 0,0000 | |
| 6 | OSB | 0,011 | 0,130 | - | 0,0846 | 0,0846 | |
| 7 | Gesso cartonado | 0,013 | 0,250 | - | 0,0520 | 0,0520 | |
| 8 | Perfil C (2mm esp) | 0,150 | 50,00 | 0,3333 | 0,0000 | 0,0030 | |
| | | | | | R_{si} | 0,13 | 0,13 |
| | | | | | R_{se} | 0,04 | 0,04 |
| | | | | | ΣR_T $[W/ (m^2 \cdot ^\circ C)]$ | 2,9861 | 2,1841 |

Tratando-se de uma estrutura mista, a publicação *BRE Digest 645* (Doran e Gorgolewski, 2002) indica o cálculo do fator p que vai servir para combinar os dois valores dos limites da resistência térmica através das expressões (2.13) ou (2.14). Para o caso analisado nesta

dissertação, tendo os banzos 50 mm de largura, o espaçamento entre perfis ($s = 600$ mm) e o comprimento da alma do perfil ($d = 150$ mm) usou-se a expressão (2.13) para calcular p :

$$p = 0,8 \times \frac{2,6068}{2,9825} + 0,32 - 0,2 \times \left(\frac{600}{600}\right) - 0,04 \times \left(\frac{150}{100}\right) = 0,7592 \quad (4.7)$$

Após o cálculo do fator p calcula-se a resistência total através da expressão (2.12):

$$R_T = 0,7529 \times 2,9825 + (1 - 0,7529) \times 2,6068 = 2,892 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]} \quad (4.8)$$

Como já foi dito anteriormente, calculou-se também o coeficiente de transmissão térmica através da metodologia da EN ISO 6946 já descrita para o caso da estrutura quente, apesar de se saber que não é adequada para este tipo de estruturas (híbridas). No Quadro 4.6 são apresentados os valores da resistência térmica total pela *BRE Digest 645* (Doran e Gorgolewski, 2002) e pela EN ISO 6946 para os três casos de estrutura híbrida estudados, estando os valores calculados pela última metodologia a vermelho por esta não ser correta em cálculo de estruturas híbridas. São também apresentados todos os parâmetros necessários para o cálculo das mesmas. No Quadro 4.7 apresenta-se o rácio entre os limites superior e inferior da resistência térmica total, bem como o respetivo erro máximo calculado através da expressão (2.11) quando foi assumida esta última metodologia de cálculo.

Quadro 4.6 - Parâmetros térmicos de estrutura híbrida calculados para as diferentes espessuras de isolamento térmico pela EN ISO-6946 e pela *BRE Digest 645* (Doran e Gorgolewski, 2002).

| | $R't$ [m ² .°C/W] | R_j [m ² .°C/W] | $R''t$ [m ² .°C/W] | p | $R_t^{(1)}$ [m ² .°C/W] | $R_t^{(2)}$ [m ² .°C/W] |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Eq. (2.8) | Eq. (2.9) | Eq. (2.10) | Eq. (2.13) | Eq. (2.12) | Eq. (2.7) |
| EPS 75 mm | 2,9825 | 0,4257 | 2,6068 | 0,7592 | 2,8920 | 2,7946 |
| EPS 50 mm | 3,0069 | 0,5531 | 2,1389 | 0,6291 | 2,6849 | 2,5729 |
| EPS 25 mm | 3,0248 | 0,6265 | 1,6172 | 0,4877 | 2,3037 | 2,3210 |

⁽¹⁾ BRE Digest 645; ⁽²⁾ EN ISO-6496.

Quadro 4.7 - Cociente entre os limites superior e inferior da resistência térmica total e respetivo erro máximo (e_{\max}) previsto pela EN ISO 6946: estrutura híbrida.

| | Rácio | e_{\max} [%] |
|------------------|----------------------|----------------------------------|
| | $\frac{R'_T}{R''_T}$ | Eq. (2.11) |
| EPS 75 mm | 1,1441 | 6,3 |
| EPS 50 mm | 1,4058 | 14,4 |
| EPS 25 mm | 1,8704 | 23,3 |

Apesar da metodologia descrita na EN ISO 6946 não ser correta para este tipo de estruturas, observou-se que apenas para o caso da camada exterior de 25 mm de EPS o rácio entre os limites superior e inferior da resistência térmica total ultrapassou o valor limite imposto pela norma de 1,5, estando por isso assinalado a vermelho no Quadro 4.7, sendo este de 1,87 com um erro máximo de 23,3%. Conclui-se então que o erro aumenta quando a camada de isolamento térmico que é atravessada pelo perfil metálico também aumenta. Este facto já seria de esperar visto que uma das razões pela qual esta norma não pode ser usada neste tipo de estruturas é a camada de isolamento térmico ser perfurada por perfis metálicos, o que interrompe a resistência térmica da camada de isolamento, ficando esta com um valor muito inferior devido a condutibilidade térmica do perfil metálico e fazendo com que o fluxo de calor encontre um caminho mais fácil para o exterior.

Os resultados obtidos para o valor de U, quer pelo *Therm*, quer pelas duas metodologias de cálculo, são apresentados na Figura 4.5 e no Quadro 4.8 juntamente com o erro dos valores calculados pelas duas metodologias comparativamente com os resultados obtidos através do “*THERM*”.

Quadro 4.8 - Coeficientes de transmissão térmica obtidos através do *Therm*, da EN ISO-6946 e da *BRE Digest 645* (Doran e Gorgolewski, 2002) e o respetivo erro tendo como referência o “*THERM*”: estrutura híbrida.

| | EPS 75 mm | EPS 50 mm | EPS 25 mm |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| U – Therm [W/ (m².°C)] | 0,3611 | 0,4040 | 0,4652 |
| U - BRE Digest 465 [W/ (m².°C)] | 0,3458 | 0,3724 | 0,4341 |
| Erro BRE Digest 645 [%] | -4,24 | -7,81 | -6,69 |
| U - EN ISO-6946 [W/ (m².°C)] | 0,3578 | 0,3887 | 0,4309 |
| Erro EN ISO 6496 [%] | -0,91 | -3,80 | -7,38 |

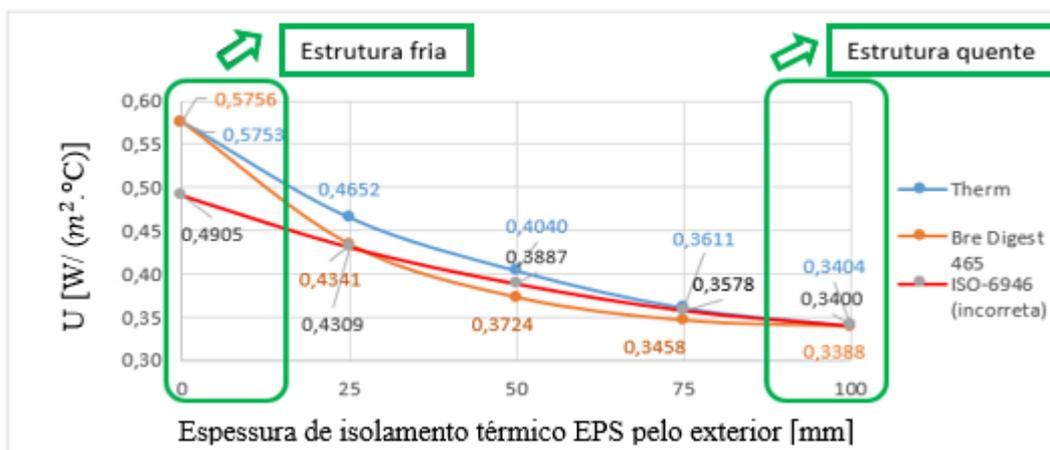


Figura 4.5 - Variação do valor de U em função da espessura das camadas de isolamento térmico: estrutura híbrida.

Após a análise dos resultados obtidos concluiu-se que o coeficiente de transmissão térmica (U) diminuiu com o aumento da espessura de isolamento pelo exterior para as três análises feitas. Analisando os valores do erro de cálculo de U por cada metodologia no Quadro 4.8, observa-se que apesar de se estar a analisar uma estrutura híbrida, com isolamento na caixa-de-ar atravessado pelo perfil metálico, nem sempre a metodologia sugerida pela *BRE Digest 465* dá os valores mais próximos dos valores obtidos através do *software*. Nos três casos analisados neste tipo de estrutura, os valores do coeficiente de transmissão térmica são inferiores aos obtidos através do “*THERM*”, mas visto que a norma EN ISO 6946 remete o método de cálculo de U para a publicação da *BRE Digest 465* quando existe uma camada de isolamento térmico perfurada por um perfil metálico, como é o caso, seria expectável que o erro obtido através da metodologia da norma fosse sempre superior ao erro obtido pela publicação, o que não se verifica. Por forma a tentar entender esta variação de erro, inseriram-se no gráfico da Figura 4.5 os valores de U para quando toda a camada de isolamento térmico se encontra na caixa-de-ar, estrutura fria (x=0 mm), e para quando apenas existe uma camada de isolamento térmico pelo exterior, estrutura quente (x=100 mm).

Ao analisar as variações dos valores de U, comparando com os valores obtidos pelas duas metodologias com o valor obtido pelo “*THERM*”, pode-se ver que quando existe apenas isolamento térmico pelo exterior, a metodologia de cálculo de U sugerida pela norma dá um valor de U muito afastado do valor de referência obtido através do *software* e à medida que se vai introduzindo isolamento térmico pelo exterior, e esta camada vai tendo mais influência no comportamento térmico da parede, os valores de U aproximam-se do valor obtido pelo “*THERM*”. Quanto à metodologia da *BRE Digest 465*, pelos valores obtidos, podemos observar que estes são bastante aceitáveis e próximos dos valores de U de referência para os

casos em que apenas existe isolamento pelo exterior ou na caixa-de-ar, mas afastam-se bastante dos valores obtidos pelo *software* para os casos específicos de estrutura híbrida. Nestes casos, comparando as duas metodologias, apenas se obtém um valor de U mais próximo do valor de referência através da *BRE Digest 465* para o caso da camada de EPS de 25 mm pelo exterior e 75 mm de lã de rocha na caixa-de-ar, sendo que para os outros dois casos a EN ISO 6946 dá valores com menor erro apesar de existir uma camada de isolamento térmico a ser perfurada pelo perfil metálico.

Assim, pode concluir-se que a abordagem sugerida pela norma, apesar de não ser aconselhada neste tipo de estruturas, comparada com a da publicação resulta em valores mais corretos de U, quando existe uma camada de isolamento pelo exterior com forte influência no comportamento térmico da parede sendo que, para pequenas espessuras de isolamento exterior, como por exemplo o caso de 25 mm de EPS pelo exterior e 75 mm de lã de rocha na caixa-de-ar, visto que a camada de isolamento perfurada pelo perfil metálico vai ter uma maior influência térmica na parede, a metodologia da *BRE Digest 465* vai ser a mais correta para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica.

4.2.3. Estrutura fria

Após a análise da estrutura quente e da estrutura híbrida, estuda-se agora a estrutura fria. Neste caso, tal como para a estrutura quente, foram analisados 4 elementos parede diferentes em que na sua constituição apenas difere a espessura de isolamento térmico, com esta a tomar valores de 100 mm, 75 mm, 50 mm, e 25 mm. Neste tipo de estrutura a caixa-de-ar é parcialmente preenchida com lã de rocha. Na Figura 4.6 é apresentada a constituição de uma das paredes analisadas (com 100 mm de lã de rocha).

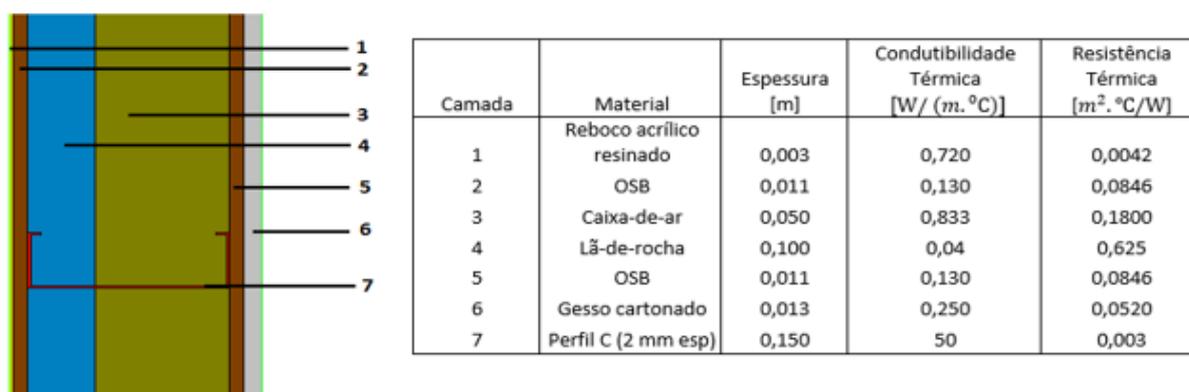


Figura 4.6 - Elemento parede com estrutura fria: 100 mm de lã de rocha.

Para a estrutura fria foram seguidos os mesmos passos e marchas de cálculo da estrutura híbrida. No Quadro 4.9 apresentam-se os valores das resistências térmicas calculadas para cada corte feito no elemento, incluindo mais uma vez as resistências superficiais retiradas do REH.

Quadro 4.9 - Resistências térmicas do elemento calculadas para os dois cortes C (1) e C (2) em estrutura fria.

| Camada | Material | Esp. [m] | Cond. Térmica [W/(m. °C)] | Área de corte [%] | R_t C (1) [m ² . °C/W] | R_t C (2) [m ² . °C/W] | |
|--------|-----------------------------|-------------|---------------------------------|----------------------|---|--|--------|
| 1 | Reboco acrílico resinado | 0,003 | 0,720 | - | 0,0042 | 0,0042 | |
| 2 | OSB | 0,011 | 0,130 | - | 0,0846 | 0,0846 | |
| 3 | Lã-de-rocha | 0,100 | 0,040 | 99,6667 | 2,5000 | 0,0000 | |
| 4 | Caixa-de-ar | 0,050 | 0,278 | 99,6667 | 0,1800 | 0,0000 | |
| 5 | OSB | 0,011 | 0,130 | - | 0,0846 | 0,0846 | |
| 6 | Gesso cartonado | 0,013 | 0,250 | - | 0,0520 | 0,0520 | |
| 7 | Perfil C (2mm esp) | 0,150 | 50,00 | 0,3333 | 0,0000 | 0,0030 | |
| | | | | | R_{si} | 0,13 | 0,13 |
| | | | | | R_{se} | 0,04 | 0,04 |
| | | | | | $\sum R_T$ [W/(m ² . °C)] | 3,0754 | 0,3984 |

Através dos processos de cálculo já descritos anteriormente, calcularam-se os valores dos parâmetros necessários para obter o valor da resistência total segundo as duas metodologias referidas. No Quadro 4.10 apresentam-se os valores desses parâmetros calculados para os elementos com diferentes espessuras analisadas. No Quadro 4.11 mostram-se os valores do rácio entre os limites da resistência térmica total e os respetivos erros máximos calculados em percentagem, onde se assinalam a vermelho os valores de rácios que ultrapassam o valor limite da norma, 1,5, e as respetivas percentagens.

Quadro 4.10 - Parâmetros térmicos de estrutura fria calculados para as diferentes espessuras de isolamento térmico pela EN ISO-6946 e pela *BRE Digest 645* (Doran e Gorgolewski, 2002).

| | R'_t [m ² .°C/W] | R_j [m ² .°C/W] | R''_t [m ² .°C/W] | p | $Rt^{(1)}$ [m ² .°C/W] | $Rt^{(2)}$ [m ² .°C/W] |
|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | Eq. (2.8) | Eq. (2.9) | Eq. (2.10) | Eq. (2.13) | Eq. (2.12) | Eq. (2.7) |
| Lã de rocha 100 mm | 3,0080 | 0,6743 | 1,0697 | 0,3445 | 1,7374 | 2,0389 |
| Lã de rocha 75 mm | 2,4090 | 0,6265 | 1,0219 | 0,3994 | 1,5759 | 1,7155 |
| Lã de rocha 50 mm | 1,8038 | 0,5531 | 0,9485 | 0,4806 | 1,3596 | 1,3762 |
| Lã de rocha 25 mm | 1,1924 | 0,4257 | 0,8211 | 0,6109 | 1,0479 | 1,0067 |

(1) BRE Digest 645; (2) EN ISO-6496.

Quadro 4.11 - Cociente entre os limites superior e inferior da resistência térmica total e respetivo erro máximo (e_{max}) previsto pela EN ISO 6946: estrutura fria.

| | Rácio | e_{max} [%] |
|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| | $\frac{R'_T}{R''_T}$ | Eq. (2.11) |
| Lã de rocha 100 mm | 2,8120 | 32,2 |
| Lã de rocha 75 mm | 2,3573 | 28,8 |
| Lã de rocha 50 mm | 1,9019 | 23,7 |
| Lã de rocha 25 mm | 1,4522 | 15,6 |

Pela análise dos valores do erro obtido através da metodologia referida na EN ISO 6496 podemos observar que o erro aumenta com o aumento da espessura da camada de isolamento térmico na caixa-de-ar. Devido à explicação já dada na secção onde é analisada a estrutura híbrida, esta variação era esperada visto que esta metodologia não é válida devido à camada de isolamento térmico ser perfurada pelo perfil metálico. Assim, quanto maior a espessura de isolamento atravessada, maior será o erro calculado através desta metodologia.

No Quadro 4.12 apresentam-se os valores obtidos das três formas e comparam-se os valores de cada uma das metodologias com o resultado obtido através do *software*, resultados estes também ilustrados no gráfico da Figura 4.7.

Quadro 4.12 - Coeficientes de transmissão térmica obtidos através do *Therm*, da EN ISO-6946 e da *BRE Digest 645* (Doran e Gorgolewski, 2002) e o respetivo erro tendo como referência o “*THERM*”: estrutura fria.

| | Lã de rocha 100mm | Lã de rocha 75mm | Lã de rocha 50mm | Lã de rocha 25mm |
|--|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| U-<i>Therm</i> [W/ (m ² .°C)] | 0,5753 | 0,6601 | 0,7826 | 1,0189 |
| U - <i>BRE Digest 465</i> [W/ (m ² .°C)] | 0,5756 | 0,6346 | 0,7355 | 0,9543 |
| Erro <i>BRE Digest 645</i> [%] | - 0,05 | 3,87 | 6,02 | 6,34 |
| U - EN ISO-6946 [W/ (m ² .°C)] | 0,4905 | 0,5829 | 0,7267 | 0,9933 |
| Erro EN ISO 6496 [%] | 14,75 | 11,69 | 7,15 | 2,51 |

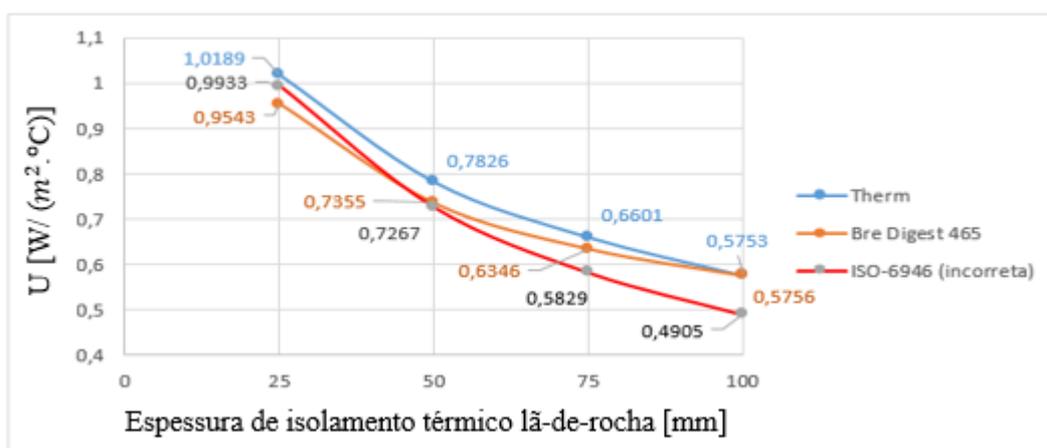


Figura 4.7 - Variação do valor de U em função da espessura das camadas de isolamento térmico: estrutura fria.

Analisando os valores do coeficiente de transmissão térmica, estes diminuíram com o aumento de espessura da camada de isolamento, tal como se esperava. Comparativamente com a estrutura quente, os valores da estrutura fria são piores termicamente para a mesma espessura de isolamento térmico. Esta menor eficiência de uma parede com estrutura fria deve-se a que em estrutura quente, para além da camada de isolamento térmico exterior, existe a caixa-de-ar que contribui positivamente com uma resistência térmica no cálculo de U para que este seja menor. Ao invés, em estrutura fria, esta caixa-de-ar vai ser preenchida com isolamento térmico e o respetivo valor da resistência térmica também diminui.

Analisando o erro obtido por cada metodologia, pode verificar-se que, apesar da metodologia da EN ISO 6946 ser incorreta, para espessuras de isolamento reduzidas como por exemplo para lã de rocha com 25 mm, o valor do coeficiente de transmissão térmica vai ter um menor erro do que o valor obtido pela *Bre Digest 465*. Com o aumento da espessura da camada de isolamento térmico, o erro da metodologia da norma aumenta até um valor de 14,75% para 100 mm de lã de rocha, sendo para os quatro casos analisados todos os valores de erro real que se apresentam no Quadro 4.12 são muito inferiores ao erro máximo previsto (e) pela metodologia desta norma, apresentados no Quadro 4.11. No sentido inverso, o erro da publicação *Bre Digest 465* diminui para valores muito baixos quando se aumenta a espessura da camada de isolamento térmico, aproximando-se U do seu valor real, obtendo-se o valor de erro de -0,05 % para a camada de 100 mm de lã de rocha, por exemplo.

4.3. Influência do comprimento de contacto e do espaçamento entre perfis metálicos

Nesta parte do trabalho, tentou-se perceber qual a influência que o comprimento do perfil metálico em contacto com os outros elementos construtivos da parede terá no valor de U desta. Assim, foram analisados quatro tipos de perfis diferentes, através do *software "THERM"*, sendo um deles o perfil padrão C, para se obter previamente um valor de referência, e os restantes perfis modificados em o comprimento da superfície do perfil em contacto com o material a ele encostado, neste caso uma placa de OSB, vai diminuindo com os seguintes valores: 16 mm, 8 mm e 4 mm.

Para que a análise ficasse mais clara, optou-se por dividi-la em três grupos consoante a posição do isolamento térmico, ou seja, estrutura quente, estrutura híbrida e estrutura fria. Dentro destes três grupos analisou-se também como estratégia de mitigação o espaçamento entre perfis metálicos e a sua influência no valor de U numa parede LSF para os quatro perfis diferentes analisando quatro espaçamentos diferentes: 300 mm, 600 mm, 900 mm e 1200 mm. Na Figura 4.8 é apresentada a constituição do modelo parede analisado em estrutura quente. Os restantes modelos em estrutura híbrida e fria são semelhantes ao exemplo apresentado, mantendo-se sempre a mesma espessura de 50 mm da camada de isolamento térmico, sendo que em estrutura fria estes 50 mm são de lã de rocha e colocados na caixa-de-ar e em estrutura híbrida os 50 mm de isolamento térmico dividem-se em 25 mm de EPS pelo exterior complementados com 25 mm de lã de rocha na caixa-de-ar. Quanto às condições de fronteira, mantiveram-se as das análises anteriores, admitindo uma superfície interior com resistência térmica $R_{si} = 0,13 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$ e uma superfície exterior com $R_{se} = 0,04 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$.

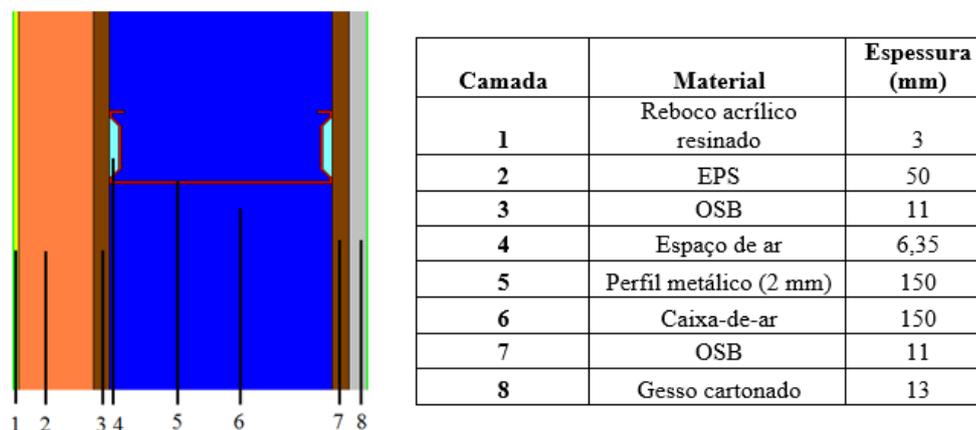


Figura 4.8 - Constituição da parede analisada no software “THERM: exemplo em estrutura quente.

Nas Figura 4.9 a), b), c) e d) ilustram-se os perfis metálicos com os diferentes comprimentos de contacto assinalados. A variação deste parâmetro dá-se nos banzos do perfil metálico, como se pode ver na Figura 4.9, sendo os valores de 16 mm, 8 mm e 4 mm o comprimento de contacto de apenas um dos banzos do perfil com a placa de OSB ligada ao perfil. De referir ainda que o espaço de ar criado com a modificação do perfil metálico foi modelado com uma espessura de $\frac{1}{4}$ de polegada.

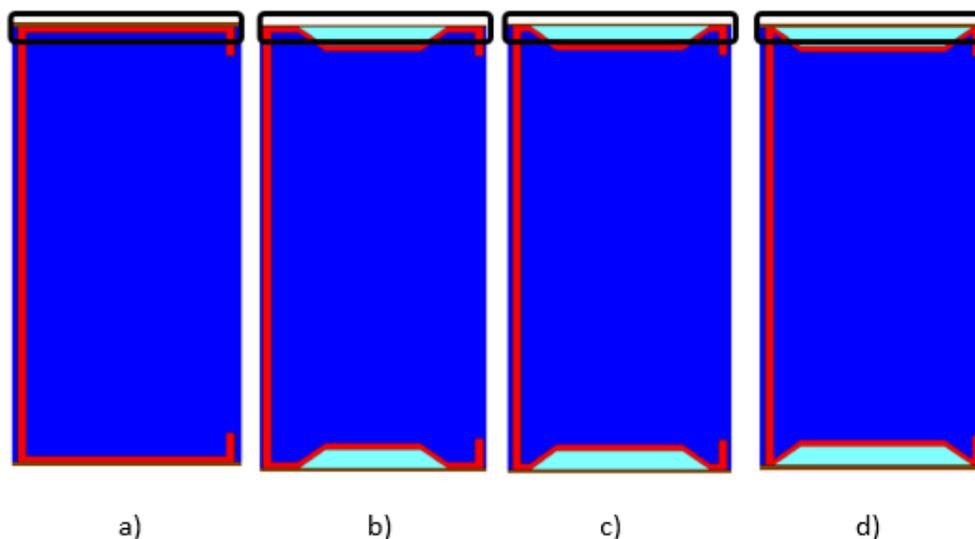


Figura 4.9 – Perfis metálicos com as diferentes áreas de contacto assinaladas: a) perfil padrão C com 50 mm de contacto; b) 16 mm de contacto; c) 8 mm de contacto; d) 4 mm de contacto.

4.3.1. Estrutura quente

Para a análise da influência do espaçamento e da área de contacto dos perfis metálicos em estrutura quente fizeram-se análises a 16 modelos diferentes, variando o espaçamento entre perfis nas medidas de 300 mm, 600 mm, 900 mm e 1200 mm e, dentro de cada uma destas medidas, analisou-se a influência do comprimento de contacto no valor do coeficiente de transmissão térmica, variando esta nos valores ilustrados na Figura 4.9.

Após a realização das análises a cada um dos casos acima referidos obtiveram-se os valores de U para cada um deles, representados de seguida no Quadro 4.13, onde se assinalam a azul os valores de U para o caso do perfil padrão C e para um espaçamento de 600 mm, por serem valores mais usuais em LSF. Os resultados estão também ilustrados no gráfico na Figura 4.10.

Quadro 4.13 – Valores de U [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] da análise do comprimento de contacto e espaçamento entre perfis metálicos: estrutura quente.

| Espaçamento [mm] | Comprimento de contacto | | | |
|------------------|-------------------------|--------|--------|--------|
| | Perfil C 50 mm | 16 mm | 8 mm | 4 mm |
| 300 | 0,5781 | 0,5747 | 0,573 | 0,5723 |
| 600 | 0,5724 | 0,5708 | 0,57 | 0,57 |
| 900 | 0,5701 | 0,5689 | 0,5684 | 0,568 |
| 1200 | 0,5692 | 0,5683 | 0,5679 | 0,5676 |

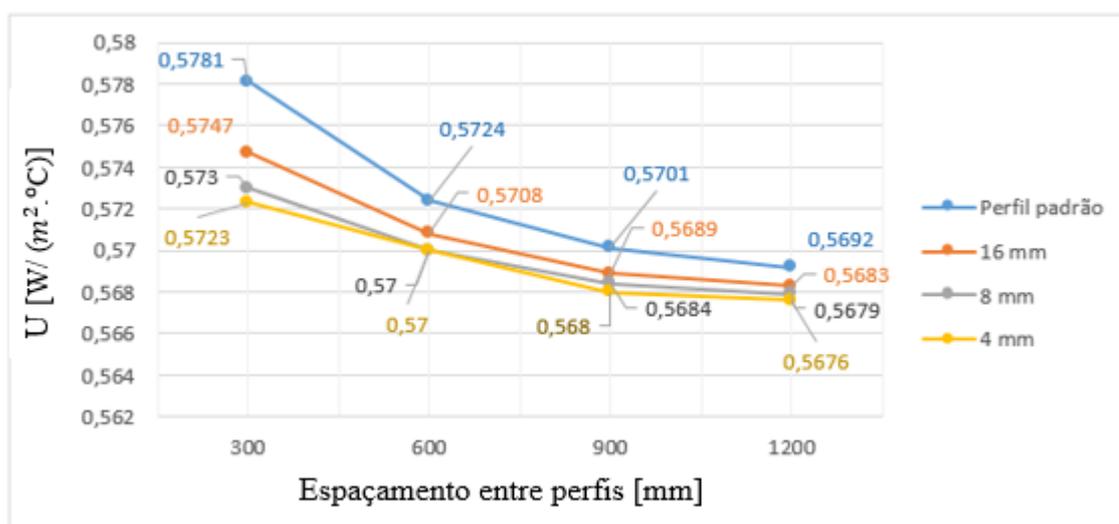


Figura 4.10 - Variação do valor de U [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] em função do comprimento de contacto e do espaçamento entre perfis metálicos: estrutura quente.

Pela análise dos resultados, podemos observar que com o aumento do espaçamento entre perfis metálicos, o valor do coeficiente de transmissão térmica diminui, o que já seria de esperar visto que se estão a diminuir o número de pontes térmicas ao longo da parede. A maior diminuição de U dá-se quando se usa o perfil padrão C sendo que a maior variação se verifica quando a distância s se altera de 300 mm para 600 mm. Apesar de se observar um decréscimo do valor de U , este não é muito significativo em construção com estrutura quente, sendo que a maior variação se dá para o perfil padrão C variando de $U_{300\text{ mm}} = 0,5781$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$] até $U_{1200\text{ mm}} = 0,5692$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$].

Quanto à influência do comprimento de contacto no valor de U , podemos observar pelos resultados obtidos que com a diminuição deste parâmetro o valor diminui. Esta diferença é maior para um espaçamento entre perfis mais pequeno, como é o caso dos 300 mm em que a maior diferença nos valores de U varia é de $U_{\text{perfil padrão}} = 0,5781$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$] a $U_{4\text{ mm}} = 0,5723$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]. Para o caso da estrutura quente, esta estratégia de mitigação de reduzir o comprimento de contacto vai ter uma influência ainda menor no valor de U do que o espaçamento entre perfis. Esta diminuição do valor de U com os menores comprimentos de contacto devem-se ao facto do fluxo de calor ter caminhos mais restritos com uma menor zona constituída por materiais de condutibilidade térmica menor, como o aço.

4.3.2. Estrutura híbrida

Na análise feita para o caso da estrutura híbrida, a única diferença, tal como referido anteriormente, foi a posição do isolamento térmico, sendo que neste caso se manteve o valor da espessura total de isolamento térmico de 50 mm divididos em 25 mm de EPS pelo exterior e 25 mm de lã de rocha na caixa-de-ar. Os resultados obtidos para a análise feita em estrutura híbrida são apresentados no Quadro 4.14 e na Figura 4.11.

Quadro 4.14 – Valores de U [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$] do comprimento de contacto e espaçamento entre perfis metálicos: estrutura híbrida.

| Espaçamento [mm] | Comprimento de contacto | | | |
|------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Perfil C 50 mm | 16 mm | 8 mm | 4 mm |
| 300 | 0,698 | 0,6858 | 0,6786 | 0,6718 |
| 600 | 0,635 | 0,6255 | 0,6213 | 0,6197 |
| 900 | 0,6071 | 0,6013 | 0,5988 | 0,5973 |
| 1200 | 0,5945 | 0,5907 | 0,5891 | 0,588 |

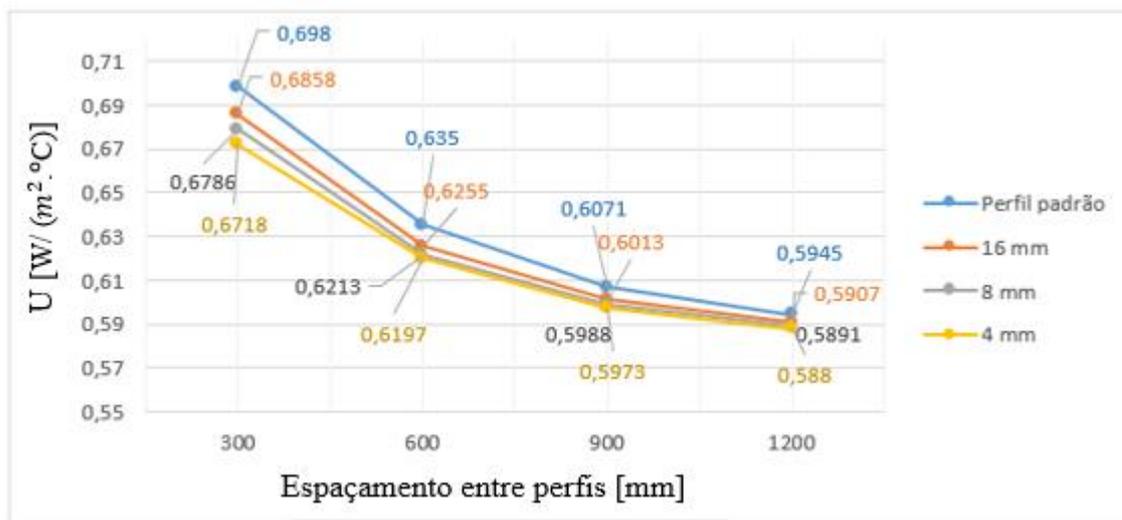


Figura 4.11 - Variação do valor de U [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] em função do comprimento de contacto e do espaçamento entre perfis metálicos: estrutura híbrida.

Analisando os resultados obtidos do valor de U , continua a verificar-se a tendência do valor do coeficiente de transmissão térmica diminuir com o aumento do espaçamento s entre os perfis metálicos e com a diminuição do comprimento de contacto. Comparando os valores obtidos com a análise anterior podemos observar que quer o espaçamento entre perfis quer o comprimento de contacto destes com os elementos e eles encostados serão estratégias de mitigação mais influentes no valor de U em estrutura híbrida, observando-se mais uma vez as maiores variações para o perfil padrão C, no que toca ao espaçamento entre perfis metálicos, com o valor de U a atingir diferenças de $U_{300\text{ mm}} = 0,698$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] até $U_{1200\text{ mm}} = 0,5945$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]. Já na análise do comprimento de contacto, continua a obter-se a maior diferença de valores para o espaçamento de 300 mm, variando o coeficiente de transmissão térmica de $U_{\text{perfil padrão}} = 0,698$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] a $U_{4\text{ mm}} = 0,5945$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$].

4.3.3. Estrutura fria

Para a análise da estrutura fria usaram-se, mais uma vez, as condições das duas últimas análises, alterando-se apenas a colocação da camada de isolamento térmico. Para este caso, toda a espessura de isolamento foi colocada na caixa-de-ar, ficando assim esta com 50 mm de lã de rocha. Os resultados desta análise apresentam-se no Quadro 4.15 e na Figura 4.12, apresentados de seguida.

Quadro 4.15 – Valores de U [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] da análise do comprimento de contacto e espaçamento entre perfis metálicos: estrutura fria.

| Espaçamento [mm] | Comprimento de contacto | | | |
|------------------|-------------------------|--------|--------|--------|
| | Perfil C 50 mm | 16 mm | 8 mm | 4 mm |
| 300 | 1,0065 | 0,9660 | 0,9428 | 0,9321 |
| 600 | 0,7826 | 0,7616 | 0,7527 | 0,7444 |
| 900 | 0,7018 | 0,6883 | 0,6821 | 0,6782 |
| 1200 | 0,6635 | 0,6535 | 0,6487 | 0,6464 |

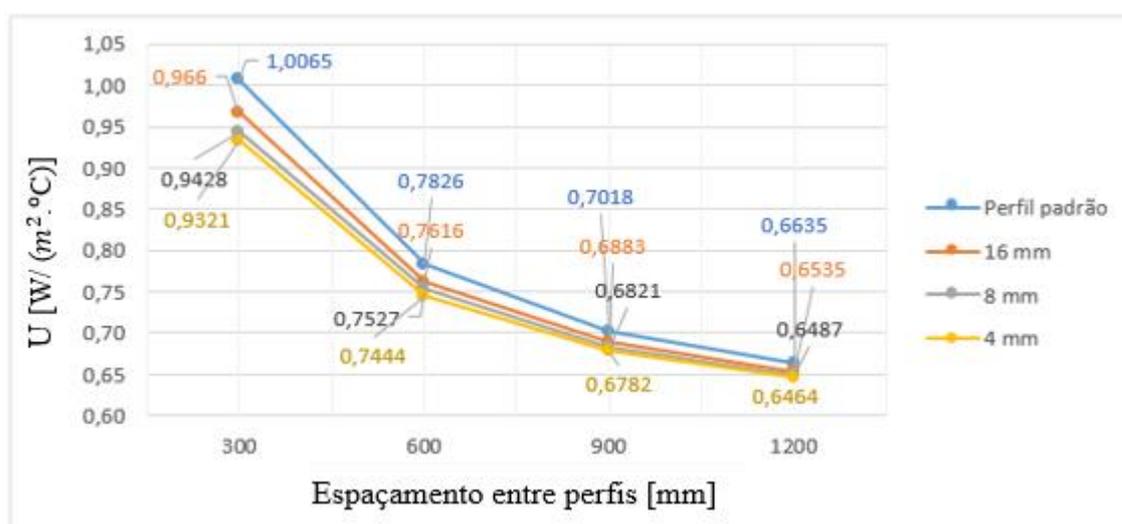


Figura 4.12 - Variação do valor de U [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] em função do comprimento de contacto e do espaçamento entre perfis metálicos: estrutura fria.

Mais uma vez neste caso, pela análise dos resultados obtidos, observa-se uma diminuição do valor do coeficiente de transmissão térmica com o aumento do espaçamento entre perfis metálicos e com a diminuição do comprimento de contacto, tal como seria de esperar.

Nesta último caso, a diferença de valores é ainda maior que nos dois casos anteriores, sendo a diferença de U muito grande quando se aumenta o espaçamento dos perfis metálicos de 300 mm para 1200 mm, obtendo-se valores para o perfil padrão C de $U_{300\text{ mm}} = 1,0065$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] até $U_{1200\text{ mm}} = 0,6635$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]. No caso do comprimento de contacto, a variação do valor de U é também maior que os dois casos analisados anteriormente, obtendo-se valores de U para um espaçamento de 300 mm de $U_{\text{perfil padrão}} = 1,0065$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] e $U_{4\text{ mm}} = 0,5945$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$].

4.4. Influência da modificação do perfil metálico

Nesta secção, com o objetivo de encontrar melhores resultados térmicos numa parede em LSF, testou-se como estratégia de mitigação a modificação do perfil metálico que faz parte do elemento construtivo parede, analisando o valor de U através do *software* “THERM”. Ao contrário das análises anteriores, neste caso específico apresenta-se apenas o estudo de uma estrutura fria porque quando foram analisados os casos da estrutura quente e estrutura híbrida, as variações do valor de U não foram significativas, não havendo ganhos térmicos significativos devido à influência da camada de isolamento térmico exterior na parede.

Por forma a testar esta estratégia de mitigação, também o modelo analisado neste caso foi diferente dos anteriores, sendo que nesta análise apenas se colocou uma placa de OSB pelo exterior e uma placa de gesso cartonado pelo interior. Esta alteração deveu-se a um modelo semelhante já ter sido testado anteriormente (Santos, 2016), servindo estes valores para comparação. Segundo (Santos, 2016) as variações obtidas foram um decréscimo de 8,2% do coeficiente de transmissão térmica quando se introduziu um espaço de ar de $\frac{1}{4}$ de polegada (6,35 mm) e de 13,9% quando se introduziu $\frac{1}{2}$ de polegada (16,7 mm), valores retirados de (ThermaChannel@, 2016).

Assim, na análise desta estratégia de mitigação, de forma a tentar reduzir o valor do coeficiente de transmissão térmica U, alterou-se o perfil metálico padrão C, como ilustrado na Figura 4.13. Com esta alteração introduziram-se, entre o perfil metálico e as camadas a ele agregadas, espaços de ar que, consoante as suas espessuras, tem resistências e condutibilidades térmicas diferentes e poderão ajudar a que o elemento parede apresente um melhor.

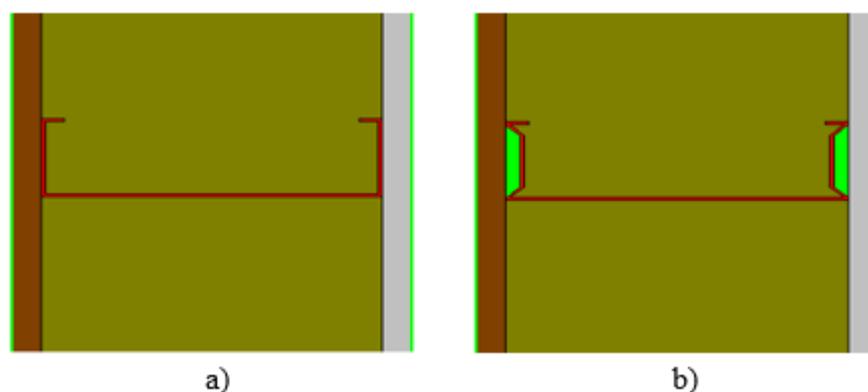


Figura 4.13 – a) Perfil padrão C; b) respetiva modificação com introdução de espaço de ar.

O modelo utilizado nesta análise consistiu num modelo simples constituído por uma placa exterior de OSB com 12,7 mm de espessura, uma caixa-de-ar com 150 mm totalmente preenchida com isolamento térmico lá-de-rocha e com perfil metálico em toda a sua largura e por uma placa de gesso cartonado, também com 12,7 mm de espessura no lado interior da parede. Foram analisados os valores de U em paredes de 600 mm com quatro perfis metálicos diferentes. Para além do perfil metálico padrão C foram ainda feitas três modificações do perfil, nas quais se introduziram espaços de ar de ¼ de polegada (6,35 mm), ½ polegada (12,7 mm) e ¾ de polegada (19,05 mm). As quatro paredes sobre as quais incidiu esta análise estão ilustradas na Figura 4.14.

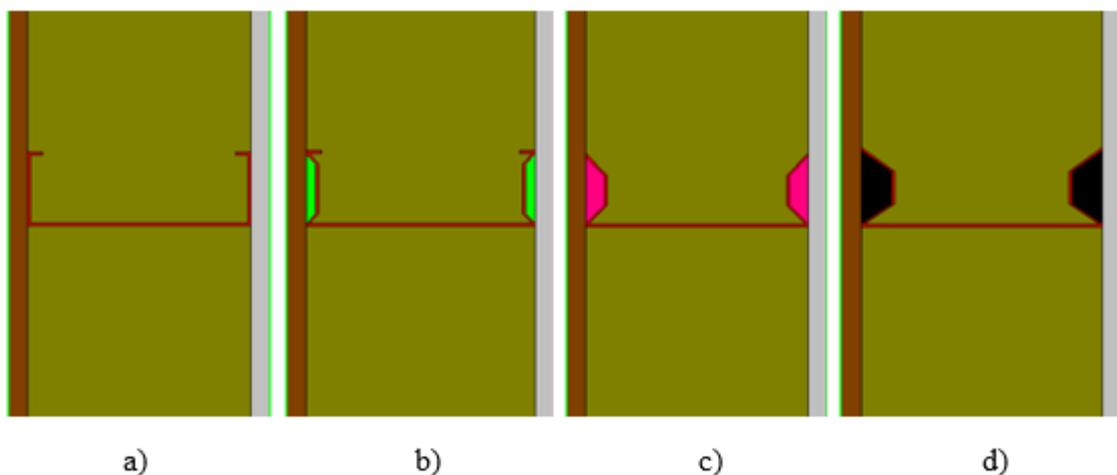


Figura 4.14 – Quatro paredes analisadas com diferentes perfis metálicos: a) perfil padrão C; b) perfil com espaço de ar de ¼ polegada; c) perfil com espaço de ar de ½ polegada; d) perfil com espaço de ar de ¾ polegada.

Para a análise através do “*THERM*” foi necessário calcular a resistência térmica de cada espaço de ar para as três diferentes espessuras de 6,35 mm, 12,7 mm e 19,05 mm. Como tal, o Anexo B.4 da EN ISO 6496 sugere um método de cálculo de resistências térmicas para pequenos espaços de ar não ventilados, usado nesta análise para as três diferentes espessuras de camada de ar.

Segundo esta norma, a resistência térmica do espaço de ar, R_g , é dada por:

$$R_g [m^2 \cdot ^\circ C/W] = \frac{1}{h_a + h_r} \quad (4.10)$$

sendo,

$$h_r = \frac{h_{r0}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 2 + \frac{2}{(1 + \sqrt{1 + \frac{d^2}{b^2} \frac{d}{b}})}} \quad (4.11)$$

onde:

- d – espessura do espaço de ar [mm];
- b – largura do espaço de ar [mm];
- ε_1 e ε_2 – emissividades das superfícies quente e fria do espaço de ar.

Para o cálculo destes parâmetros é ainda necessário encontrar valores para h_{r0} e para h_a . Como tal, a norma indica o maior valor entre $h_{r0} = 1,25$ [W/(m².°C)] e $h_{r0} = \frac{0,025}{d}$ [W/(m².°C)] para a direção de fluxo de calor horizontal e $\Delta T \leq 5K$. Para o cálculo de h_{r0} a norma indica uma tabela do qual se retira o valor de 5,7 [W/(m².°C)] para uma temperatura média no espaço de ar de 20°C, valor esse adotado para os cálculos nesta secção.

Assim, assumindo o valor de $b = 46$ mm e fazendo variar o valor da espessura do espaço de ar d consoante a constituição de cada parede, foram obtidos os valores das resistências térmicas de cada espaço de ar e respetivas condutibilidades térmicas, calculadas posteriormente através da expressão (2.3). Os valores obtidos estão representados no Quadro 4.16.

Quadro 4.16 – Resistência e condutibilidade térmica dos espaços de ar e respetivos parâmetros necessários ao seu cálculo.

| Perfil | Espessura d [mm] | Largura b [mm] | h_{r0} | h_a | h_r | ε_1 | ε_2 | R_g [m ² .°C/W] | Cond. Térmica [W/(m.°C)] |
|--------------|-----------------------|---------------------|----------|-------|-------|-----------------|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1/4 Polegada | 6,35 | 46 | 5,7 | 3,937 | 4,415 | 0,9 | 0,9 | 0,120 | 0,053 |
| 1/2 Polegada | 12,70 | 46 | 5,7 | 1,969 | 4,198 | 0,9 | 0,9 | 0,162 | 0,078 |
| 3/4 Polegada | 19,05 | 46 | 5,7 | 1,312 | 4,011 | 0,9 | 0,9 | 0,188 | 0,101 |

Depois de calculadas as resistências térmicas dos espaços de ar, introduziram-se os elementos construtivos no “THERM” e retiraram-se os valores de U para cada um dos casos. Apresentam-se de seguida no Quadro 4.17 os valores obtidos e a variação do valor de U com a modificação do perfil, comparativamente ao perfil padrão inicial.

Quadro 4.17 – Valor de U para cada parede com os diferentes perfis metálicos e respetiva variação do valor do perfil padrão C.

| | Perfil padrão C | Perfil com 1/4 " de ar (6.35 mm) | Perfil com 1/2 " de ar (12.7 mm) | Perfil com 3/4 " de ar (19,05 mm) |
|--|------------------------|---|---|--|
| U – “THERM” [W/(m ² .°C)] | 0,5153 | 0,4694 | 0,4683 | 0,4655 |
| Variação [%] para perfil padrão | - | -8,91 | -9,12 | -9,66 |

Pela análise dos resultados obtidos, podemos ver que o valor de U diminui bastante (8,91%) quando se modifica o perfil metálico formando um espaço de ar de ¼ polegada, valor próximo do modelo anteriormente referido (Santos, 2016). Com o aumento da espessura deste observa-se uma diminuição do coeficiente de transmissão térmica. Esta variação de valores era expectável na medida em que a resistência térmica calculada para cada um dos casos foi também aumentando com o aumento da espessura do espaço de ar, dando a parede uma resistência térmica adicional de caso para caso, o que se traduziu numa diminuição do coeficiente de transmissão térmica. Apesar deste decréscimo do valor de U na ordem dos 9,12% para o espaço de ar de 12,7 mm, os valores obtidos foram inferiores aos referidos por Santos (2016) que, para a mesma espessura de ar obteve um decréscimo de U na ordem dos 13,8%.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Ao longo deste trabalho estudaram-se algumas estratégias de mitigação de pontes térmicas e avaliou-se a influência de cada uma no valor do coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos em LSF analisados. Assim, foram estudadas cinco estratégias diferentes, sendo elas: (1) a posição do isolamento térmico no elemento parede; (2) a espessura das camadas de isolamento térmico; (3) a introdução de um espaço de ar entre o perfil metálico e os elementos adjacentes; (4) o espaçamento entre perfis metálicos, e (5) o comprimento de contacto entre o perfil metálico e os elementos adjacentes. Para o caso das estratégias (1) e (2) foram ainda calculados e comparados os valores de U através de duas metodologias de cálculo simplificadas, analisando qual o erro de cada uma comparativamente com o valor de referência obtido através do *software* “*THERM*”.

Na avaliação da posição da camada de isolamento térmico testaram-se modelos parede com estrutura quente, híbrida e fria. Os resultados obtidos mostraram que se consegue obter um valor de coeficiente de transmissão térmica menor quando a estrutura tem todo o seu isolamento térmico pelo exterior (estrutura quente), seguindo-se da estrutura híbrida e por último a estrutura fria. A maior diminuição deu-se para a maior espessura de isolamento estudada, 100 mm, em que se obteve uma redução de U de 29,8% do valor da estrutura fria para o valor da estrutura híbrida e de 40,8% da estrutura fria para a estrutura quente. No caso da menor espessura de isolamento térmico analisada, 25 mm, a diminuição de U não foi tão elevada, obtendo-se ainda assim uma redução de 14,8% do valor de U da estrutura quente tendo como referência o valor da estrutura fria.

Quando foram analisados os resultados obtidos através das duas metodologias de cálculo simplificadas, pela EN ISO 6946 e pela BRE *Digest* 465, concluiu-se que para o cálculo de U em estrutura quente, os valores obtidos através das duas são iguais, com um erro máximo para a menor espessura de isolamento (25 mm) de 1,2%. No caso da estrutura híbrida, concluiu-se que apesar da metodologia da EN ISO 6946 não ser aconselhável quando existe uma camada de isolamento térmico atravessada pelo perfil metálico, esta apresenta erros inferiores aos do método BRE *Digest* 465, tendo como referência os valores obtidos pelo “*THERM*”, quando a camada de isolamento pelo exterior tem forte influência térmica na parede. No caso mais evidente, com isolamento térmico pelo exterior com 75 mm e apenas 25 mm de isolamento

térmico na caixa-de-ar, o erro do valor de U pela EN ISO 6946 comparado com o valor do “*THERM*” é de 0,9%, contra os 4,2% do valor obtido pela BRE *Digest* 465. O único caso em que a metodologia BRE *Digest* 465 é mais correta é para a menor espessura de isolamento térmico pelo exterior (25 mm), obtendo-se um erro do valor de U de 6,7% contra os 7,4% obtidos através da metodologia da norma, comparando com os valores obtidos pelo “*THERM*”. Já na análise da estrutura fria, através da metodologia da publicação BRE *Digest* 465 obtêm-se sempre valores de U mais próximos daqueles obtidos através do *software*, comparativamente aos valores da norma, sendo o caso mais evidente para a maior espessura de isolamento térmico na caixa-de-ar (100 mm) em que se obteve um erro de 0,05 % através da publicação contra os 14,8% do valor obtido através da norma, quando comparados com os valores obtidos pelo “*THERM*”.

Quando foi avaliada a influência da espessura de isolamento térmico, tal como seria de esperar, houve uma redução do valor de U quando a espessura de isolamento aumentou. Este aumento de espessura resultou numa variação do coeficiente de transmissão térmica maior para o caso da estrutura quente, no qual se obteve uma diminuição de 60,8% comparando a espessura de 100 mm com a espessura de 25 mm. No caso da estrutura fria a variação de U não foi tão elevada, obtendo-se ainda assim uma redução de 43,5% para uma espessura de 100 mm, quando comparada com a espessura de 25 mm.

Para avaliar qual a influência do espaço de ar criado entre o perfil metálico e o elemento construtivo a ele associado analisaram-se três espessuras de cavidade de ar diferentes, $\frac{1}{4}$ de polegada, $\frac{1}{2}$ de polegada e $\frac{3}{4}$ de polegada, comparando-se estes valores com os do perfil original. Esta modificação no perfil metálico possibilitou a diminuição dos valores de U com o aumento da espessura da cavidade de ar, obtendo-se no caso mais favorável, para a cavidade de $\frac{3}{4}$ de polegada, uma diminuição no valor U de 9,7%.

Para a avaliação dos diferentes espaçamentos entre perfis metálicos, para além da distância mais usualmente utilizada de 600 mm, testaram-se os afastamentos de 300, 900 e 1200 mm. Quando analisados os valores obtidos de U, observou-se que para o espaçamento menor, o valor de U foi mais elevado, tal como esperado, pelo facto de a parede possuir mais aço. Analisando a variação destes valores nos três tipos de estrutura (quente híbrida e fria) verifica-se que a distância de espaçamento terá pouca influência em estrutura quente, onde se verifica uma redução de apenas 1,5% do menor para o maior espaçamento (300 para 1200 mm), aumentando esta variação para 14,8% em estrutura híbrida e aumentando ainda mais para estrutura fria, na qual se obtém uma redução do valor de U de 34,1% quando se aumenta o espaçamento de 300 mm para 1200 mm.

Por fim, na última análise, analisou-se a influência da área de contacto do perfil metálico com os elementos construtivos, variando a área de contacto em cada banzo nos valores de 4 mm, 8 mm e 16 mm. Cada um destes perfis analisados foi comparado com o perfil C de referência, usualmente utilizado em estruturas LSF. Com a aplicação desta estratégia de mitigação conseguiu-se uma redução no valor de U para os três tipos de estrutura (quente, híbrida e fria), sendo esta variação maior na estrutura fria, com uma variação de 4,9% do valor de U quando analisado o perfil com 4 mm de área de contacto, seguindo-se a estrutura híbrida com uma redução de 2,4% quando comparado o perfil padrão com a menor área de contacto analisada e por fim, a estrutura quente com uma redução de 0,4% quando se reduz a área de contacto para o valor mínimo analisado de 4 mm.

Por fim, pode-se referi como conclusões principais que as duas melhores estratégias de minimização de pontes térmicas estudadas são a posição do isolamento térmico, sendo a construção quente a melhor opção, podendo o valor de U ser fortemente influenciado pela espessura de isolamento colocada. Também o espaçamento entre perfis se mostrou um parâmetro que pode ter bastante influência térmica numa parede em LSF. Concluiu-se ainda que apesar de não ser sugerida para o cálculo de U de elementos com isolamento térmico atravessado pelo perfil metálico, a norma EN ISO 6946 fornece valores mais próximos do valor real, comparando com os valores da metodologia da publicação BRE *Digest* 465, quando esta situação acontece e exista associada a ela uma camada de isolamento térmico pelo exterior com forte influência no desempenho térmico da estrutura.

5.2. Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, o presente trabalho deixa em aberto uma análise de pontes térmica com um *software* em 3D, tentando obter valores mais rigorosos.

Com o auxílio do *software* “THERM” utilizado no presente trabalho, poderia também ser feita uma análise à zona envidraçada de um edifício, ou ser estudado o desempenho térmico de elementos da envolvente de um edifício em construção tradicional, como paredes ou pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, M. I. (2003). “Correção de pontes térmicas em intervenções de reabilitação”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP.
- Araújo, C. d. (Celso.d.A. 1981). “Transmissão de calor”. São Paulo: Livros técnicos e científicos editora.
- Dias, J. F. (2011). “Estudo de Pontes Térmicas em Elementos Construtivos Heterogéneos”. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade de Coimbra.
- Doran, S. M. e M. T. Gorgolewski (2002). "U-values for light steel-frame construction". BRE Digest 645.
- EN ISO-6946 (2007) "Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method".
- Futureng@ (2016). <http://www.futureng.pt/lstf>. Futureng, Lisboa.
- Gorgolewski, M. (2007). “Developing a simplified method of calculating U-values in light steel Framing”. Building and environment, Vol 42 (2007) pp 230-236.
- Grade, P. J. S. P. S. (2013). “Materiais de Mudança de Fase em Revestimentos”. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- ISO@ (2016). <http://www.iso.org/iso/home.htm>. Geneva.
- ITeCons@ (2016). <http://www.itecons.uc.pt/> . Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade, Coimbra.
- LBNL@ (2016). <https://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html>. Lawrence Berkeley National Laboratory. University of California, USA.
- Lupan, M. L., Manea, D. L. e Moga, L. M. (2015). “Improving thermal performance of the wall panels using slotted steel stud framing”. Procedia Technology, Vol 22 (2016), pp 351 – 357.
- Martins, C., Santos, P. e Silva, L. S. (2016). “Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: A parametric study”. Journal of building physics, Vol 39(4), pp 342-372.
- Moreira, M. C. D. M. M. (2012). “Utilização de Perfis Enformados a Frio em Obras de Reabilitação”. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa.

- Pessoa, J. H. (2011). “Análise da influencia das pontes térmicas nos edificios residenciais”. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciencias e Tecnologias da Universidade Nova Lisboa.
- Pina dos Santos, C. A. e Matias, L (2006). “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente de edificios”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) Lisboa.
- REH (2013). “Regulamento de desempenho energético dos edificios de habitação (REH)”. DL 118/2013 de 20 de Agosto. Síntese de regulamentação aplicável (Decretos de lei, portarias e despachos).
- Rodrigues, A. M. e Piedade, A. C. (1998). “Térmica de Edifícios - Elementos sobre a transmissão de calor”.
- Santos, P, Silva, L.S. e Ungureanu, V. (2012) “Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings”. 1st ed. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Technical Committee 14 - Sustainability & Eco-Efficiency of Steel Construction, ISBN 978-92-9147-105-8, N. 129; 2012.
- Santos, P. (2015). “Buildings energy consumption – key factors”. Apontamentos da disciplina “Sustentabilidade e análise ciclo de vida de estruturas”. Part D – Thermal Behaviour and Energy Efficiency in Buildings. Mestrado e Doutoramento em construção metálica e mista. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade de Coimbra.
- Santos, P., Martins, C. e Silva, L.S. (2014). "Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems". Metallurgical Research and Technology, Vol 111, pp 329-338.
- Silva, P. C. (2006). “Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VISUALDOE”. Tese de Mestrado, Universidade do Minho.
- Simões, N. (2016). “Comportamento térmico e energético de edificios”. Apontamentos da disciplina de Comportamento Térmico e Energético de Edifícios. Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade de Coimbra.
- Therm’s Tutorial – Version 7.4.3 (2015). Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), USA.
- ThermaChannel@, (2016). <http://www.thermachannel.com/>. ThermaChannel LLC. USA.
- Valério, J. G. (2007). “Avaliação do impacte das pontes térmicas no desempenho térmico e energético de edificios residenciais correntes”. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa.