



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

José Eduardo Rodrigues de Oliveira

INFLUÊNCIA DE CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS  
DE CAIXILHARIAS NO SEU DESEMPENHO TÉRMICO

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de  
Especialização em Construções, orientada pela Professora Doutora Andreia  
Sofia Carvalho Pereira e pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus

Julho de 2019

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

José Eduardo Rodrigues de Oliveira

# Influência de Características Construtivas de Caixilharias no seu Desempenho Térmico

## Influence of Constructive Characteristics of Window Frames on their Thermal Performance

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,  
orientada pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus

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

Julho de 2019

1 2  9 0

UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação assinala o fim de uma etapa muito importante da minha vida, o meu percurso académico. Foram muitos os momentos bons, mas também foram muitos os menos bons e os obstáculos que tive de superar para chegar aqui, sendo que, não o teria conseguido sem a ajuda dos que me rodeiam e por isso, resta-me agradecer a todas essas pessoas.

Começo por agradecer à Professora Andreia Pereira e ao Professor Diogo Mateus, por toda a disponibilidade que demonstraram para me orientar e ajudar na realização deste trabalho, de modo a que consiga obter o melhor resultado possível.

Agradeço a todos os amigos que fiz na faculdade pelos anos de companheirismo e ajuda para que conseguisse superar as dificuldades que este curso nos apresentou. Aos meus amigos de longa data e à minha namorada, um obrigado por estarem sempre presentes na minha vida e por continuarem a partilhar comigo os bons e os maus momentos.

Finalmente, agradeço à minha família por todo o apoio, carinho e ajuda que me deram para que eu conseguisse chegar aqui. Dedico assim esta dissertação aos meus avós, Agripino e Bertina, à minha tia Marília, ao meu irmão João, e a minha Mãe, pois foram eles que permitiram que eu pudesse tirar este curso e sem eles não teria sido possível alcançar este objetivo.

## RESUMO

Devido aos avanços tecnológicos que se fazem sentir de ano para ano, o setor da construção encontra-se em constante mudança, surgindo novas técnicas de construir, novos materiais, novas soluções construtivas e acima de tudo, novas ideias. Tudo isto faz com que a população tenha cada vez mais apreço pela qualidade e conforto das suas habitações e outras infraestruturas que utilizem. Aliado a estes fatores, surge o conceito de eficiência energética, que tem ganho cada vez mais importância, não só por questões de conforto e económicas, como principalmente por razões relacionadas com sustentabilidade e a preservação dos recursos naturais.

Os vãos envidraçados têm uma grande influência no balanço energético, uma vez que, na maioria dos casos, ganhos e perdas de calor ocorrem com maior facilidade nestes elementos relativamente ao resto da envolvente do edifício.

Todos estes fatores refletem o propósito desta dissertação, onde se pretende analisar e tentar compreender os fenómenos relacionados com a transmissão térmica existente num vão envidraçado, nomeadamente na zona da caixilharia e tentar compreender quais os principais fatores que influenciam estes fenómenos e de que maneira alteram o comportamento de uma dada solução. Os elementos envidraçados constituem também pontos de grande debilidade em termos térmicos e podem mesmo comprometer o desempenho energético de uma determinada habitação ou edifício, sendo, a influência destes elementos também aqui analisada.

Neste trabalho pretende-se avaliar o comportamento térmico de caixilharias e vãos envidraçados, tentando compreender quais os fatores que contribuem para um bom desempenho de elementos deste tipo e quais as modificações mais benéficas para que se consiga atingir um desempenho térmico elevado, do ponto de vista das perdas de calor. Para o efeito, selecionou-se um conjunto de caixilharias, com base nas soluções que a norma ISO 10077-2:(2012) propõe. Deste modo, estudou-se o efeito que determinadas alterações construtivas têm no valor do coeficiente de transmissão térmica deste tipo de elementos, utilizando para isso a metodologia que a referida norma apresenta.

**Palavras chave:** Caixilharia; Eficiência Energética; Fluxo de Calor; Janela; Ponte Térmica; *THERM*; Transmissão Térmica; Vidro.

## ABSTRACT

Due to the technological advances that are felt more and more, the construction sector is constantly changing, bringing new building techniques, new materials, new constructive solutions and, above all, new ideas. This means that the population has more and more appreciation for the quality and comfort of their dwellings and other spaces that they use. Allied to these factors, the concept of energy efficiency arises, which has gained increasing importance, not only for economic reasons, but mainly for reasons related to sustainability and the conservation of natural resources.

Glazed windows have a great influence on the energy balance, since in most cases, gains and losses of heat occur more easily in these types of elements, when compared to the rest of the building surrounding.

All these factors reflect the purpose of this dissertation, where it is intended to analyze and try to understand the phenomenon related to the thermal transmission that exists in a glazed window, more precisely, in the window frame section and try to understand what are the main factors that influence these phenomenon's and how they contribute to a change of performance of a solution. Glazed elements are often points of great thermal weakness and may even compromise the energy performance of a particular house or building, being the influence of these elements also analyzed here.

This work intends to evaluate the thermal behavior of glazed window frames, trying to understand which factors contribute the most to a good performance of elements of this type and which are the most beneficial modifications to achieve a high thermal performance from the point of view of heat losses. For this purpose, a set of window frames were selected, based on the solutions proposed by ISO 10077-2: (2012). In this way, the effect that certain constructive changes have on the thermal transmission coefficient of this type of elements was studied, using the methodology that the referred standard presents.

**Key words:** Energy Efficiency; Frame; Glass; Glazed; Heat Flow; *THERM*; Thermal Bridge; Thermal Transmission; Window.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE QUADROS .....	viii
SIMBOLOGIA .....	x
ABREVIATURAS .....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Âmbito e objetivos.....	3
1.3 Organização da Dissertação e metodologia utilizada .....	3
2 REVISÃO DE CONCEITOS .....	4
2.1 Fenómenos de transferência de calor .....	4
2.1.1 Convecção .....	4
2.1.2 Radiação .....	5
2.1.3 Condução .....	7
2.1.4 Transferência de calor de um vão envidraçado .....	8
2.2 Coeficiente de Transmissão Térmica, U.....	9
2.2.1 Coeficiente de Transmissão Térmica de uma Janela, $U_w$ .....	10
2.3 Constituição de um vão envidraçado .....	11
2.3.1 Terminologia .....	11
2.3.2 Caixilharia .....	12
2.3.3 Vidro.....	18
2.4 Requisitos Térmicos – REH e RECS.....	20
2.5 Requisitos Térmicos - Passive House.....	21
2.6 Marcação CE para Caixilharias .....	22
2.7 Etiquetas Energéticas SEEP e Classe + – Eficiência Energética de Janelas .....	24
3 METODOLOGIA DE CÁLCULO .....	25
3.1 Modelação <i>THERM</i> .....	25
3.2 Fator de Perdas Térmicas (Bidimensional).....	26
3.3 Coeficiente de Transmissão Térmica.....	26
3.4 Coeficiente de Transmissão Térmica Linear .....	27
3.5 Validação do Modelo de Cálculo.....	28

---

4	CASOS DE ESTUDO E RESULTADOS.....	32
4.1	Caixilharia em Alumínio – D1.....	33
4.1.1	Influência da Espessura Total do Caixilho.....	34
4.1.2	Influência da Variação da Espessura dos Elementos de Alumínio.....	35
4.1.3	Influência do Aumento da Espessura de Corte-Térmico para o dobro.....	36
4.1.4	Influência da Utilização de Isolamento Térmico nos Espaços de Ar.....	37
4.2	Caso hipotético a) – D1.....	38
4.2.1	Influência da Espessura Total do Caixilho.....	38
4.2.2	Influência da Variação da Espessura dos Elementos de “PVC”.....	39
4.2.3	Influência da Utilização de Isolamento Térmico nos Espaços de Ar.....	40
4.3	Caso hipotético b) – D1.....	41
4.3.1	Influência da Espessura Total do Caixilho.....	41
4.3.2	Influência da Variação da Espessura dos Elementos de “Madeira”.....	42
4.3.3	Influência da Utilização de Isolamento Térmico nos Espaços de Ar.....	43
4.4	Caixilharia em PVC – D3.....	44
4.4.1	Influência da Espessura Total do Caixilho.....	44
4.4.2	Influência da Utilização de Isolamento Térmico nos Espaços de Ar.....	46
4.4.3	Influência do tipo de reforço utilizado.....	46
4.5	Caixilharia em Madeira – D4.....	47
4.5.1	Influência da Espessura Total do Caixilho.....	48
4.5.2	Influência da Utilização de Isolamento Térmico nos Espaços de Ar.....	49
4.5.3	Comparação de todas as soluções.....	50
4.6	Análise do Coeficiente de Transmissão Térmica Linear.....	52
4.6.1	Caixilharia de Madeira – D4.....	53
4.6.2	Caixilharia de PVC – D3.....	55
4.6.3	Caixilharia em Alumínio – D1.....	57
4.7	Coeficiente de Transmissão Térmica de Janelas.....	58
4.7.1	Uw para caixilharia de Alumínio.....	59
4.7.2	Uw para caixilharia de PVC.....	60
4.7.3	Uw para caixilharia de Madeira.....	61
5	CONCLUSÕES.....	63
5.1	Aspetos Gerais.....	63
5.2	Resultados obtidos.....	63
5.3	Considerações finais e trabalhos futuros.....	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Mecanismos de transferência de calor. ....	4
Figura 2.2: Mecanismo de transferência de calor por Convecção.....	5
Figura 2.3: Mecanismo de transferência de calor por Radiação.....	6
Figura 2.4: Mecanismo de transferência de calor por Condução .....	8
Figura 2.5: Mecanismo de transferência de calor de um vão envidraçado.....	8
Figura 2.6: Parâmetros de cálculo do $U_w$ .....	10
Figura 2.7: Componentes de um vão .....	11
Figura 2.8: Elementos constituintes de um vão envidraçado .....	12
Figura 2.9: Caixilharias em Alumínio .....	14
Figura 2.10: Caixilharias em PVC.....	15
Figura 2.11: Caixilharia em Madeira.....	16
Figura 2.12: Exemplo de etiqueta de marcação CE para uma caixilharia .....	23
Figura 2.13: Exemplo de etiquetas energéticas SEEP e Classe + .....	24
Figura 3.1: Modelação geométrica de uma caixilharia e do painel isolante .....	27
Figura 3.2: Caixilharia D4 – Validação do modelo de cálculo. (ISO 10077-2).....	28
Figura 3.3: Limites para aplicação da resistência superficial interna aumentada .....	29
Figura 4.1: Caixilharia em Alumínio - solução inicial. ....	34
Figura 4.2: Variação do $U_f$ para um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Alumínio). ....	35
Figura 4.3: Variação do $U_f$ para um aumento de espessura dos elementos de alumínio. ....	36
Figura 4.4: Variação do $U_f$ para um aumento de espessura de corte-térmico para o dobro (Alumínio). ....	36
Figura 4.5: Variação do $U_f$ relativa à utilização de isolamento nos espaços de ar (Alumínio). ....	37
Figura 4.6: Variação do $U_f$ para um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Caso hipotético a)). ....	39
Figura 4.7: Variação do $U_f$ para um aumento de espessura dos elementos de “PVC”... ..	40
Figura 4.8: Variação do $U_f$ relativa à utilização de isolamento nos espaços de ar (Caso hipotético a)). ....	40
Figura 4.9: Variação do $U_f$ para um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Caso hipotético b)). ....	42
Figura 4.10: Variação do $U_f$ para um aumento de espessura dos elementos de “Madeira”.....	42
Figura 4.11: Variação do $U_f$ relativa à utilização de isolamento nos espaços de ar (Caso hipotético b)). ....	43

Figura 4.12: Caixilharia em PVC - solução inicial.....	44
Figura 4.13: Variação do $U_f$ para um aumento de espessura do caixilho de 66 mm para 99 mm (PVC).....	45
Figura 4.14: Variação do $U_f$ relativa à utilização de isolamento nos espaços de ar (PVC) .....	46
Figura 4.15: Variação do $U_f$ relativa ao tipo de reforço utilizado.....	47
Figura 4.16: Caixilharia em Madeira - solução inicial.....	48
Figura 4.17: Variação do $U_f$ para um aumento de espessura do caixilho de 66 mm para 99 mm (Madeira).....	49
Figura 4.18: Variação do $U_f$ relativa à utilização de isolamento nos espaços de ar (Madeira). .....	49
Figura 4.19: $U_f$ de todas as soluções estudadas.....	51
Figura 4.20: Gradiente de temperaturas para as soluções em Madeira (D4).....	54
Figura 4.21: Gradiente de temperaturas para as soluções em PVC (D3).....	56
Figura 4.22: Gradiente de temperaturas para as soluções em Alumínio (D1).....	58
Figura 4.23: Janelas tipo utilizadas para análise do $U_w$ .....	59

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1: Exemplos de caixilharias mistas.....	17
Quadro 2.2: Desempenho de diferentes tipos de vidro .....	18
Quadro 2.3: Condutibilidade térmica dos gases usados em vidros duplos e triplos a 10°C.....	18
Quadro 2.4: U <sub>max</sub> de vãos envidraçados, desde 31 de Dezembro de 2015, segundo o REH.. .....	21
Quadro 2.5: U <sub>max</sub> de vãos envidraçados, desde 31 de Dezembro de 2015, segundo o RECS .....	21
Quadro 4.1: Condutividade térmica dos materiais considerados .....	33
Quadro 4.2: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ com um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Alumínio). .....	35
Quadro 4.3: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ com um aumento de espessura dos elementos em alumínio. ....	36
Quadro 4.4: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ com um aumento de espessura de corte-térmico para o dobro (Alumínio). ....	37
Quadro 4.5: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ para a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar (Alumínio). ....	38
Quadro 4.6: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ com um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Caso hipotético a)). ....	39
Quadro 4.7: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ com um aumento de espessura dos elementos em “PVC”. ....	40
Quadro 4.8: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ para a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar (Caso hipotético a)). ....	41
Quadro 4.9: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ com um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Caso hipotético b)). ....	42
Quadro 4.10: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ com um aumento de espessura dos elementos em “Madeira”. ....	43
Quadro 4.11: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ para a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar (Caso hipotético b)). ....	43
Quadro 4.12: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ com um aumento de espessura do caixilho de 66 mm para 99 mm (PVC). ....	45
Quadro 4.13: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ para a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar (PVC). ....	46
Quadro 4.14: Ganhos e perdas para o valor $U_f$ para a alteração do reforço utilizado... ..	47

---

Quadro 4.15: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ com um aumento de espessura do caixilho de 66 mm para 99 mm (Madeira). .....	49
Quadro 4.16: Ganhos e perdas para o valor de $U_f$ para a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar (Madeira). .....	50
Quadro 4.17: Tipos de vidro utilizados para o cálculo de $\Psi$ .....	52
Quadro 4.18: Valores de $\Psi$ para soluções em Madeira (D4). .....	55
Quadro 4.19: Valores de $\Psi$ para soluções em PVC (D3). .....	56
Quadro 4.20: Valores de $\Psi$ para soluções em Alumínio (D1). .....	57
Quadro 4.21: Características das janelas utilizadas para o cálculo de $U_w$ .....	59
Quadro 4.22: Valores de $U_w$ para janelas com caixilharia de alumínio. ....	60
Quadro 4.23: Valores de $U_w$ para janelas com caixilharia de PVC.....	61
Quadro 4.24: Valores de $U_w$ para janelas com caixilharia de Madeira. ....	62

## SIMBOLOGIA

$\lambda$  – condutibilidade térmica de um material (W/m.K)

$\Psi$  – coeficiente de transmissão térmica linear (W/mK)

$A_g$  – área da envolvente envidraçada de uma janela (m<sup>2</sup>)

$A_f$  – área da envolvente opaca de uma janela (m<sup>2</sup>)

$b_f$  – largura da caixilharia perpendicular ao fluxo de calor (mm)

$b_g$  – largura do painel isolante/vidro perpendicular ao fluxo de calor (mm)

$L_f^{2D}$  – Fator de perdas térmicas (bidimensional) (W/mK)

$R_{si}$  – resistência superficial térmica interior (m<sup>2</sup>K/W)

$R_{se}$  – resistência superficial térmica exterior (m<sup>2</sup>K/W)

$U_g$  – coeficiente de transmissão térmica do vidro (W/m<sup>2</sup>K)

$U_f$  – coeficiente de transmissão térmica da caixilharia (W/m<sup>2</sup>K)

$U_w$  – coeficiente de transmissão térmica da janela (W/m<sup>2</sup>K)

## **ABREVIATURAS**

DGEG – Direção-Geral da Energia e Geologia

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

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

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE – Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

PH – Passive House

PHI – Passive House Institute

CE – Comissão Europeia

A63 – alumínio com 63 mm de espessura

A96 – alumínio com 96 mm de espessura

1.5EA – aumento de 1,5 vezes da espessura dos elementos em aço

P63 – PVC com 63 mm de espessura

P96 – PVC com 96 mm de espessura

1.5EP – aumento de 1,5 vezes da espessura dos elementos em PVC

M63 – madeira com 63 mm de espessura

M96 – madeira com 96 mm de espessura

1.5EM – aumento de 1,5 vezes da espessura dos elementos em madeira

CT – com corte térmico

SCT – sem corte térmico

2CT – com o dobro da espessura de corte térmico

CIEA – com isolamento nos espaços de ar

SIEA – sem isolamento nos espaços de ar

RA – reforço de caixilho em aço

RP – reforço do caixilho em PVC

V1 – Vidro com espaço de ar de 12 mm e  $U_g$  de 2,8 W/m<sup>2</sup>K

V2 – Vidro com espaço de ar de 12 mm e  $U_g$  de 1,1 W/m<sup>2</sup>K

V3 – Vidro com espaço de ar de 15 mm e  $U_g$  de 2,8 W/m<sup>2</sup>K

V4 - Vidro com espaço de ar de 15 mm e  $U_g$  de 1,1 W/m<sup>2</sup>K

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

O desenvolvimento sustentável define-se como a capacidade de satisfazer as necessidades atuais do ser humano, explorando os recursos naturais de uma forma responsável, garantindo que os mesmos sejam capazes de se renovar, para que gerações futuras possam satisfazer as suas próprias necessidades (Tadeu, 2015). O grande desenvolvimento tecnológico, industrial e social que se fez sentir sobretudo ao longo do último século, principalmente no setor da construção, possibilitou que nos dias de hoje uma grande parte da população usufrua de um elevado nível de qualidade de vida. Porém, este aumento de conforto está dependente de um consumo excessivo de energia, que sendo maioritariamente de origens fósseis, constitui um grande agente para a deterioração do meio ambiente, que se faz sentir, acima de tudo, através do aumento de emissão de gases de efeito de estufa e consequente aumento das temperaturas globais (Henriques, 2015). O IPCC estima que entre 1880 e 2012, a temperatura média global dos oceanos e dos continentes aumentou 0,85 °C. Esta mesma organização, prevê ainda que até ao ano de 2100 a temperatura média global deverá ficar 1,5 °C acima dos valores pré-industriais, podendo este valor ser de 4°C (IPCC, 2019). Por estas razões, a aplicação do conceito de desenvolvimento sustentável na nossa sociedade exige grandes mudanças de comportamento a nível ambiental, económico, estratégico, ético e social (Rodrigues, 2011).

Face à decadência visível das condições ambientais do planeta, tornou-se imperativo investir em novos meios de obtenção e produção de energia, uma vez que as necessidades energéticas são cada vez maiores. A energia solar e a energia eólica são as fontes de energia renováveis mais utilizadas, conseguindo inclusive começar a competir com energias de origem fóssil e nuclear em alguns países. Para além destas fontes de energias limpas, existem ainda as energias geotérmicas, hídrica e bioenergia, que estão a ser cada vez mais utilizadas, quer por questões económicas quer por questões da sua própria eficiência (REN21, 2018).

Os dados mais recentes para Portugal apontam que no ano de 2017, relativamente a consumos de energia primária, as energias renováveis são a 3ª forma de energia mais requisitada, sendo o petróleo e o gás natural os mais utilizados. Se compararmos com o ano de 2008, o consumo de petróleo (para energia primária) sofreu uma redução de 51% para 39,8%. Relativamente ao consumo final bruto de energia no ano de 2017, cerca de 28,1% corresponde a fontes de energia renováveis (DGEGa, 2019).

As políticas energéticas conheceram um novo rumo após a assinatura do tratado internacional, designado protocolo de Quioto, onde basicamente foram estabelecidas metas para a redução

das emissões de gases contribuintes para o efeito de estufa (Godoy, S., 2013). No ano de 2002, a Comissão Europeia publica a Diretiva 2002/91/CE, onde eram estabelecidas medidas para a construção de edifícios, nomeadamente para questões de eficiência energética. Posteriormente, cada estado membro adaptou estes requisitos para a sua legislação nacional, mediante o tipo de clima que possuíssem (Agrela, 2011). Em Portugal, esta nova diretiva deu origem a três Decretos-Leis, o SCE, o RSECE e o RCCTE, publicados em 2006. Finalmente surge em 2012 a Diretiva 2012/27/UE, que em Portugal foi adaptada através DL 118/2013, que por sua vez deu origem aos novos regulamentos SCE, REH e RECS (Mateus, 2013). O regulamento atualmente em vigor é o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), tendo sido atualizado pela última vez através do DL 28/2016 (Gomes, 2017). Nesta diretiva europeia, referida anteriormente, enquadra-se a estratégia denominada Horizonte 2020, a qual estabelece um conjunto de metas a serem cumpridas até ao ano 2020, nomeadamente:

- redução das emissões de gases de efeito de estufa em 20% (comparativamente aos níveis que foram medidos em 1990);
- aumentar o consumo de energias renováveis em 20%;
- aumentar a eficiência energética em 20%.

O Diário da República nº93/2010, de 26 de Novembro, proveniente da mesma diretiva, estabelece ainda que em Portugal, até ao ano de 2050, as emissões de gases de efeito de estufa apresentem reduções entre 50 a 60% (Henriques, 2015).

Relativamente aos consumos de energia final, em Portugal os edifícios são responsáveis por 30% dos mesmos, enquanto que a nível europeu, este mesmo consumo atinge os 40% (DGEGb, 2019). Destes 40%, cerca de 56% dessa energia é utilizada para aquecimento e arrefecimento de espaços interiores e, por sua vez, entre 1/4 a 1/3 da mesma acaba por ser desperdiçada devido a um desempenho insuficiente das janelas (Ariosto et al., 2019). Assim, podemos realçar a grande importância que os vãos envidraçados têm no desempenho térmico e conseqüentemente energético, dos edifícios e ainda, a influência direta que podem ter no conforto dos utilizadores, como por exemplo, todos os fatores associados às infiltrações de ar não desejáveis por parte deste tipo de elemento (Marcos, 2013).

Deste modo, estamos na presença de uma análise a um elemento construtivo que tem um grande peso na performance energética e no nível de conforto que um edifício pode apresentar aos seus utilizadores. Fatores como o tipo de caixilharia e o tipo de vidro utilizados, as dimensões do vão envidraçado e todos os materiais a serem aplicados serão, em última análise, determinantes para a sustentabilidade e eficiência da infraestrutura, minorando os impactes ambientais e os custos associados a consumos energéticos.

## **1.2 Âmbito e objetivos**

Este trabalho possui como grande objetivo, compreender quais os principais fatores que podem influenciar o desempenho térmico de uma caixilharia e de uma janela, do ponto de vista das perdas de calor, através da avaliação dos coeficientes de transmissão térmica de diferentes caixilharias, utilizando a metodologia na norma ISO 10077-2 (2012), que é também sugerida na versão actualizada de 2017. Deste modo, esta dissertação poderá auxiliar projetos futuros, relacionados com o desenvolvimento de soluções de janelas e principalmente caixilharias, de modo a beneficiar a eficiência térmica e energética de um determinado edifício.

## **1.3 Organização da Dissertação e metodologia utilizada**

A presente dissertação será dividida em 5 capítulos. O 1º Capítulo corresponde à introdução deste trabalho, onde se procura enquadrar o tema, fazendo uma breve exposição do panorama atual, acabando por justificar a importância do mesmo.

De seguida, surge o 2º Capítulo, onde será feita uma revisão bibliográfica onde se pretende, entre outros aspetos, abordar alguns conceitos base de térmica e fenómenos de transferência de calor, elementos constituintes de uma janela, soluções mais usuais nos dias de hoje e comparar os requisitos existentes em Portugal e com requisitos mais exigentes, nomeadamente os Passive House.

Deste modo, são fornecidas as bases para se prosseguir para o 3º Capítulo, onde será apresentada e explicada a metodologia de cálculo utilizada, presente na norma ISO 10077-2, para que posteriormente, no Capítulo 4, se apresentem os resultados obtidos das diversas análises efetuadas.

Finalmente, o Capítulo 5 irá conter as conclusões, onde irão ser discutidos os resultados obtidos no capítulo anterior e realçar os aspetos mais importantes a retirar dos mesmos.

## 2 REVISÃO DE CONCEITOS

O presente capítulo tem como propósito compreender os fenómenos e características térmicas de um vão envidraçado, analisando com algum detalhe os seus principais constituintes e que influência têm no desempenho global de um sistema deste género. Será também feita uma breve análise à legislação portuguesa aplicável a este tipo de elementos, nomeadamente aos requisitos que lhes são impostos do ponto de vista do desempenho térmico e compreender de que maneira é que o mercado e as soluções utilizadas no nosso país são afetadas pelos mesmos.

Por último, espera-se que este capítulo providencie as bases necessárias para a compreensão da componente prática desta dissertação, que será desenvolvida nos Capítulos 3 e 4.

### 2.1 Fenómenos de transferência de calor

A energia térmica define-se como a parcela de energia que pode ser transferida de um corpo para outro, sempre que se verifique uma diferença de temperaturas entre ambos (Faustino, 2012). Esta transferência de calor é sempre efetuada no sentido do corpo com uma temperatura superior para o que apresenta uma temperatura inferior, sendo que, com base no princípio da conservação de energia, a quantidade de calor cedida pelo elemento mais quente é igual à quantidade de calor recebida pelo respetivo elemento mais frio (Simões, 2017).

A referida troca de calor entre elementos pode ocorrer através de três processos distintos: convecção, radiação e condução. Apesar de na grande maioria das situações, estes processos ocorrerem em simultâneo, podem ser estudados individualmente por forma a serem tratados analiticamente, sendo depois possível adicionar os seus efeitos caso se verifique a ocorrência de dois ou três mecanismos em simultâneo (Simões, 2017).

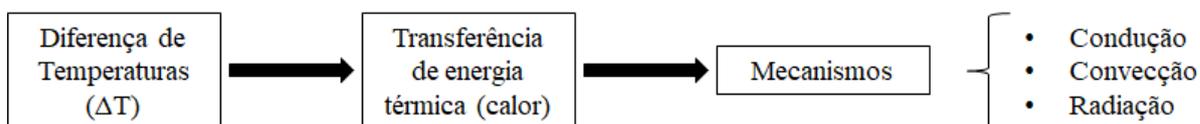


Figura 2.1: Mecanismos de transferência de calor (Adaptado de Pinho, 2013).

#### 2.1.1 Convecção

Quando existe transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluido, ou simplesmente no interior de um fluido em movimento (no estado líquido ou gasoso), estamos na presença do

mecanismo de convecção. Este é um processo de transporte de massa originado pelo movimento de um fluido, causado por uma diferença de densidade. Assim, como existem inúmeras moléculas em movimento, a presença de uma diferença de temperaturas faz com que o processo de transmissão de calor ocorra (Incropera et al, 2006).

Em 1701, Newton estabeleceu a seguinte equação geral utilizada para descrever este tipo de fenómeno:

$$Q_{conv} = h_c A (\theta_s - \theta_f) \quad (2.1)$$

A equação anterior descreve o fluxo de calor transmitido por convecção entre uma superfície e um fluido como sendo proporcional à condutância de calor por convecção  $h_c$  ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ), à área considerada,  $A$  ( $m^2$ ) e ao gradiente de temperaturas ( $\theta_s$ , temperatura superficial e  $\theta_f$ , temperatura do fluido, em  $^\circ C$ ) (Mateus, 2013).

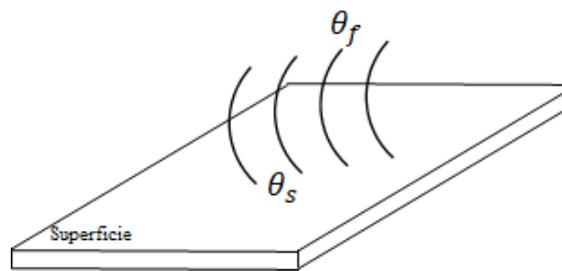


Figura 2.2: Mecanismo de transferência de calor por Convecção (Adaptado de Mateus, 2013).

O fenómeno de convecção pode ainda ser classificado em dois tipos distintos. O primeiro denomina-se por convecção natural, em que a alteração de densidades é causada por um gradiente térmico, conforme foi mencionado anteriormente. O segundo tipo é designado por convecção forçada e ocorre quando a diferença de densidades é forçada por agentes externos, como bombas para o caso de fluidos ou ventiladores para os gases (Pinho, 2013).

No âmbito desta dissertação, é importante referir que para vãos envidraçados, as transferências térmicas que acontecem por convecção dão-se entre os panos de vidro, para situações com vidros duplo ou triplo e também junto às superfícies do vidro (Pinho, 2013).

### 2.1.2 Radiação

A transferência de calor por radiação consiste na emissão de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas por parte de superfícies sólidas, líquidas e gasosas. Devido ao tema deste trabalho, é de particular interesse a emissão de radiação por parte de superfícies sólidas.

A radiação surge devido à mudança de configuração de elétrons com oscilação e vibração dos mesmos, tendo assim influência na constituição das moléculas.

A energia produzida por radiação é transportada por ondas eletromagnéticas e a sua quantidade dependerá do comprimento de onda das mesmas. Será transmitida uma maior quantidade de energia quanto menor forem os comprimentos de onda, que por sua vez ocorre quando as temperaturas aumentam. Deste modo, contrariamente ao que se verifica para os restantes mecanismos de transferência de calor, a radiação não necessita de um meio de propagação para transferir energia, conseguindo inclusive fazê-lo de forma eficiente no vácuo. ( Incropera et al, 2006).

A Figura 2.3 transmite de uma forma concreta o que acontece no caso dos vãos envidraçados. Este mecanismo ocorre devido à radiação proveniente do Sol, que poderá incidir de uma forma direta ou difusa. Devido à transparência do envidraçado, parte da radiação incidente será transmitida para o interior do edifício. A radiação absorvida acaba por ser convertida em calor no interior do edifício, sendo posteriormente transformada em radiação de onda longa. Por sua vez, a radiação refletida irá depender do ângulo com que incide no vidro.

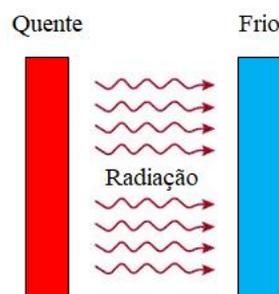


Figura 2.3: Mecanismo de transferência de calor por Radiação (Adaptado de Pinho, 2013).

Este fenómeno de transferência de calor rege-se pela Lei de Stefan-Boltzmann. Esta lei implica considerar as superfícies como ideais, ou seja, como corpos negros (corpos que absorvem toda a radiação incidente). Assim, o fluxo de calor por radiação depende da temperatura absoluta,  $T_s$  (K) e da constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ) e é determinado pela seguinte equação:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.2)$$

Para uma mesma temperatura, o fluxo de calor emitido por um corpo real através de radiação é inferior ao de um corpo negro. Para estas situações, é necessário considerar a propriedade

radiativa de uma superfície em termos de emissividade, através do parâmetro  $\epsilon$ , que varia entre 0 e 1. Nestes casos, a expressão do fluxo de calor por radiação toma a forma ( Incropera et al, 2006):

$$E_b = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.3)$$

Considerando a área de transmissão,  $A$  ( $m^2$ ) e para além da temperatura do corpo radiante,  $T_s$  (K), a temperatura do corpo recetor,  $T_{viz}$  (K), a quantidade de calor transmitido por radiação,  $Q_{rad}$  (W) pode ainda ser determinado através da expressão (Simões, 2017):

$$Q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2.4)$$

### 2.1.3 Condução

O mecanismo de transmissão de calor por condução consiste na transferência de energia térmica entre dois pontos de um determinado corpo ou de um conjunto de corpos, desde que estes se encontrem em contacto, existindo uma diferença de temperaturas entre esses dois pontos, através da vibração dos átomos e das moléculas constituintes. O aumento de temperatura de átomos e moléculas de um determinado corpo, faz com que entrem num estado de excitação e por conseguinte, colidam com os átomos e as moléculas adjacentes. Assim, a energia propaga-se para as zonas onde os níveis de energia sejam inferiores, isto é, onde as temperaturas sejam mais baixas. Este fenómeno pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases. (Faustino, 2012)

A transferência de calor unidirecional por condução é baseada na Lei de Fourier. Deste modo, a quantidade de calor transferido através de um determinado elemento,  $Q_{cond}$  (W), é calculada utilizando a seguinte expressão:

$$Q_{cond} = -\lambda A \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.5)$$

Em que  $\lambda$  (W/mK) corresponde à condutibilidade térmica do elemento,  $A$  ( $m^2$ ) é a área do elemento, perpendicular ao fluxo de calor,  $L$  (m) é a espessura do elemento e  $T_2$  e  $T_1$  (K) são as temperaturas superficiais exterior e interior, respetivamente (Simões, 2017).

A capacidade de conduzir calor de um determinado material, é determinada pela condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) do mesmo. Quanto menor for o valor da condutibilidade térmica, maior será a capacidade de resistência à transmissão de calor por condução por parte do material correspondente. Ou seja, materiais que apresentem uma boa capacidade de

isolamento à transmissão de calor irão apresentar valores de condutibilidade térmica reduzidos.

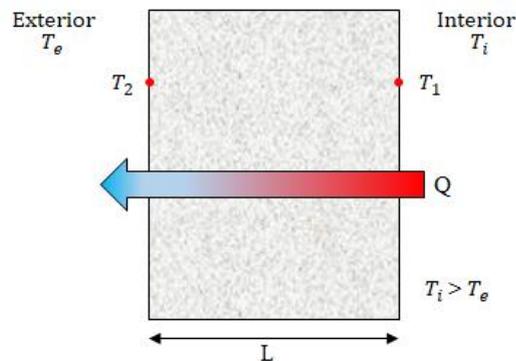


Figura 2.4: Mecanismo de transferência de calor por Condução (Adaptado de Simões, 2017).

#### 2.1.4 Transferência de calor de um vão envidraçado

O comportamento térmico global de um vão envidraçado irá assim depender da combinação dos mecanismos de transferência de calor, apresentados anteriormente. Conforme se pode verificar na Figura 2.5, o principal mecanismo responsável pela transmissão de calor na caixilharia é a condução. Já no vidro, para situações onde se utilize vidro duplo ou triplo, a permuta de energia térmica irá ocorrer devido aos 3 mecanismos.

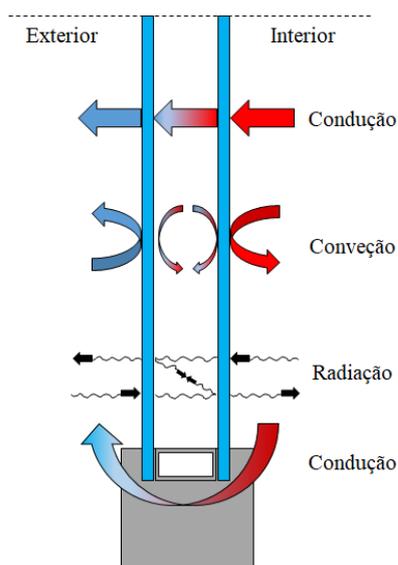


Figura 2.5: Mecanismo de transferência de calor de um vão envidraçado (Adaptado de Mohelníková e Altan, 2009)

Aplicar estes conceitos para um vidro duplo, o vidro mais comum nos dias de hoje, permite-nos compreender o seu funcionamento do ponto de vista térmico. Um vidro duplo é obtido colocando dois panos de vidro separados por um espaço fechado, preenchido por ar ou um gás seco imóvel, por forma a limitar as transferências de calor por convecção e aproveitar a baixa condutibilidade térmica do ar ou gás utilizado. Muitas vezes são utilizados gases pesados, como o Árgon ou o Xénon, em vez de ar, para diminuir ainda mais as trocas de calor por condução e por convecção, uma vez que os seus coeficientes de condutibilidade térmica são ainda mais baixos (Pinho, 2013).

## 2.2 Coeficiente de Transmissão Térmica, $U$

“O coeficiente de transmissão térmica de um elemento da envolvente é a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente, por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ele separa”. (RCCTE).

Por outras palavras, este coeficiente usualmente designado por  $U$ , representa as transferências térmicas que ocorrem num elemento, através dos fenómenos de condução, convecção e radiação. Em termos físicos, este parâmetro define-se como o fluxo de calor que atravessa 1 m<sup>2</sup> de superfície de um determinado elemento, para um diferença de 1 grau entre o ambiente interior e o exterior (Agrela, 2011). Este parâmetro é calculado com base na expressão (2.6) e como se pode verificar, depende das resistências térmicas,  $R_i$ , das várias camadas constituintes de um determinado elemento em análise e das resistências térmicas superficiais interior e exterior,  $R_{si}$  e  $R_{se}$  respetivamente.

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum R_i + R_{si}} \quad (W/m^2K) \quad (2.6)$$

Quanto menor for o valor de  $U$ , menor irão ser as perdas térmicas de um determinado elemento e conseqüentemente, maior será a sua capacidade de isolamento.

Quer a norma ISO 10077-2, quer o RCCTE, estabelecem que os valores para os coeficientes de superficiais de transmissão de calor interior e exterior, de elementos verticais, são respetivamente:  $h_i = 7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $h_e = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Assim, as resistências térmicas superficiais interior e exterior são determinadas do seguinte modo:  $R_{si} = \frac{1}{h_i} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ;  $R_{se} = \frac{1}{h_e} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ . (Simões, 2017).

### 2.2.1 Coeficiente de Transmissão Térmica de uma Janela, $U_w$

O coeficiente de transmissão térmica de uma janela pode ser calculado, de uma maneira simplificada, através da média ponderada dos coeficientes de transmissão térmica do vidro,  $U_g$  e da caixilharia,  $U_f$  e considerando também o coeficiente de transmissão linear,  $\Psi$ , por forma a contabilizar o efeito da perda na ponte térmica formada pela ligação dos vidros com os perfis da janela (LNEC, 2002).

Deste modo, metodologia referida, para a determinação do coeficiente de transmissão térmica de janelas e que se traduz na seguinte expressão:

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + l_g \Psi}{A_g + A_f} \quad (2.7)$$

Em que:

$U_g$  – coeficiente de transmissão térmica do envidraçado (W/m<sup>2</sup>K);

$A_g$  – área envidraçada da caixilharia, sendo as sobreposições dos vedantes ignoradas (m<sup>2</sup>);

$U_f$  – coeficiente de transmissão térmica dos perfis (W/m<sup>2</sup>K);

$A_f$  – área dos perfis, sendo a maior das áreas projetadas dos perfis no plano da caixilharia, vistas do lado interior ou do lado exterior (m<sup>2</sup>);

$l_g$  – perímetro visível do envidraçado (m);

$\Psi$  – coeficiente de transmissão térmica linear (W/mK).

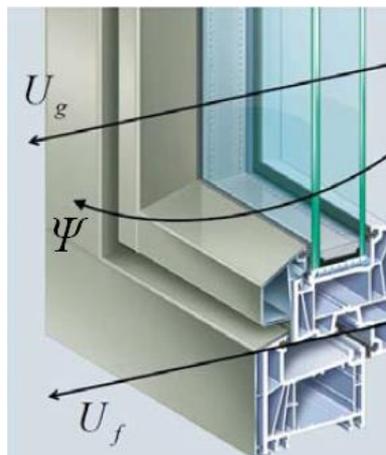


Figura 2.6: Parâmetros de cálculo do  $U_w$  (Consultado em Mateus, 2017).

## 2.3 Constituição de um vão envidraçado

A janela ideal é aquela cuja soma dos custos de construção, operação e manutenção, ao longo de um período de tempo, seja a menor (Borowska and Jezierski, 2018).

Como foi referido anteriormente, as janelas são o elemento construtivo que mais influência tem na eficiência energética de um edifício. Estas resultam da junção de elementos opacos e transparentes (perfis / caixilharia e vidro), que devem cumprir um determinado conjunto de requisitos, de modo a cumprir as suas funções. (Kalinović et al. 2017). Possibilitar a visão para o exterior, permitir a ventilação e iluminação do espaço em que se insere, permitir ganhos solares, assegurar proteção contra intempéries e até proporcionar uma saída de emergência em casos extremos, são as principais funções que uma janela possui. (Cuce, 2018). Este elemento tem ainda um grande peso nas questões estéticas de um edifício, quer a nível exterior quer interior e são sem dúvida um aspeto de particular interesse para os arquitetos.

Para além de todos estes fatores, os critérios de funcionalidade e qualidade de uma janela são ainda mais complexos, uma vez que, devem garantir determinados níveis de isolamento térmico, acústico e de estanquidade do ar. Os projetistas devem assim ter um vasto conhecimento dos elementos e dos materiais que constituem uma janela e as suas características técnicas, como manuseamento, estanquidade, permeabilidade, resistência e capacidade isolante (Mendes, 2011).

### 2.3.1 Terminologia

As aberturas existentes numa determinada envolvente opaca denominam-se por vãos, sendo nestas aberturas que serão implementados os caixilhos que depois receberão os envidraçados, constituindo assim o elemento janela. Um vão é constituído essencialmente pelas ombreiras, pela verga, o peitoril e o parapeito (Agrela, 2011).

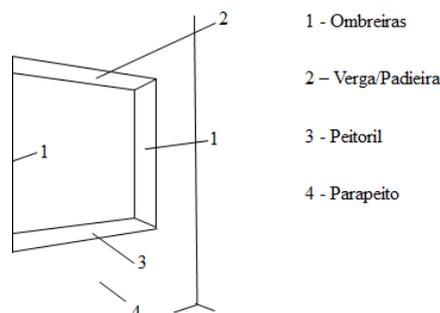


Figura 2.7: Componentes de um vão (Agrela, 2011).

Um vão envidraçado é constituído essencialmente por duas partes: o aro e as folhas. O aro define-se como uma peça que envolve o vão, possuindo as mesmas dimensões que este e tem nos lados exteriores um ressalto (mocheta) adaptado ao tipo de encaixe pretendido. Por sua vez, as folhas são os elementos que se inserem no aro e são elas que possibilitam os movimentos de abrir e fechar (total ou parcialmente).

Definindo os elementos constituintes de um vão envidraçado, para um exemplo genérico, temos que:

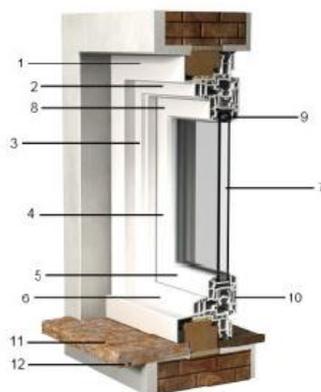


Figura 2.8: Elementos constituintes de um vão envidraçado (Consultado em Mendes, 2011).

- |                               |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 1- Pré-aro                    | 7- Sistema envidraçado           |
| 2- Aro (fixo)                 | 8- Folha (“caixilho”)            |
| 3- Couceira                   | 9- Perfil intercalar (espaçador) |
| 4- Couceira da folha          | 10- Septos                       |
| 5- Travessa inferior da folha | 11- Parapeito                    |
| 6- Tábua de peito             | 12- Goteira                      |

Usualmente as folhas são constituídas por um caixilho e pelo sistema envidraçado. O caixilho tem como função dar rigidez e manter fixo o sistema envidraçado por forma a cumprir as suas funções para o utilizador, enquanto que o sistema envidraçado tem como função o isolamento do local, permitindo ou não a passagem de ar através da sua abertura (Mendes, 2011).

### 2.3.2 Caixilharia

Sendo o grande foco desta dissertação, a caixilharia define-se como o elemento que efetua a ligação entre a envolvente opaca e a envolvente envidraçada num edifício. Como foi mencionado na secção anterior, este elemento deve assegurar não só a operacionalidade dos

vãos, como também contribuir para o comportamento térmico do edifício. São várias as funções que este elemento tem de desempenhar, das quais se destacam a admissão de ar, a estanquidade à água, segurança contra intrusos e a moderação das transferências térmicas entre o interior e o exterior. Estes fatores, ajudam-nos a constatar a importância que a escolha de uma caixilharia através da possível diminuição dos consumos energéticos devido à diminuição das perdas de calor pelos vãos, contribuindo para o aumento do conforto higrotérmico.

Apesar das caixilharias estanques permitirem um melhor controlo das trocas de calor entre ambientes interior e exterior, é necessário que se definam caudais mínimos de ventilação entre os espaços, por forma a que se garanta a qualidade do ar interior.

Existem vários modos de classificação de caixilharias. Estas podem ser classificadas consoante a sua função, ou seja, se se trata de caixilharia para uma janela, uma porta ou outro elemento. Também podem ser classificadas com base no material de que são feitas, em que os mais comuns são o alumínio (anodizado ou lacado), a madeira (pintada ou natural), o PVC e mista (combinações entre estes materiais ou outros). Por último, também a forma de abertura da folha constitui o modo de classificação de caixilharias, onde podemos ter as de batente, basculantes, pivotantes, entre outras. (Pinho, 2013).

Deste modo, podemos verificar que existem diversos fatores que podem influenciar a escolha da caixilharia. Fatores económicos ou estéticos, desempenho térmico e acústico, boa durabilidade, fácil manutenção ou ainda se se trata de um projeto novo ou uma obra de reabilitação, são alguns critérios que influenciarão a escolha, sendo que todos eles dependem do desempenho exigido.

### **2.3.2.1 Caixilharia Metálica**

As caixilharias metálicas são constituídas essencialmente por ferro ou por alumínio. O ferro acabou por nunca ser um material muito utilizado para a produção de caixilharias devido ao seu preço, à sua escassa maleabilidade, elevado peso, dificuldade em arranjar mão de obra especializada, difícil manutenção e ao conjunto de soluções alternativas mais vantajosas existentes. Sendo o alumínio um material mais leve, fácil de trabalhar e muito resistente, é bastante utilizado no setor da construção, nomeadamente em caixilharias (Mendes, 2011).

O processo de extrusão permite que exista uma grande variedade de seções e perfis em alumínio, para a produção de caixilhos. Este processo consiste em fazer passar alumínio, aquecido a 450 °C, por um molde e deixá-lo arrefecer. O alumínio é um material que se degrada com relativa facilidade quando exposto ao ar ambiente e a humidade. Por este

motivo, os perfis de alumínio necessitam de ser submetidos a processos de tratamento, para prolongar a sua vida útil. Dois desses processos são a anodização e a lacagem. O primeiro corresponde a um tratamento eletroquímico do material, criando uma capa de óxido de alumínio, que por sua vez é impermeável a agentes químicos, ao ar e à água. O segundo processo referido, consiste na aplicação de uma tinta em pó (polímero à base de poliéster), através de projeção eletrostática, formando uma película contínua. Assim, os perfis podem ter diversas cores, texturas e outros efeitos. (Mendes, 2011).

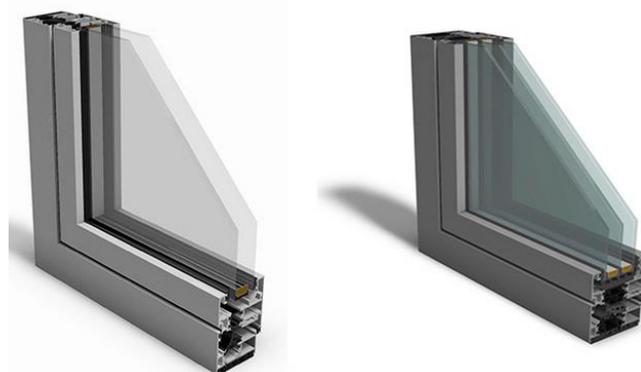


Figura 2.9: Caixilharias em Alumínio (ROCAEa).

Graças a estes tratamentos, este tipo de caixilharias é resistente à corrosão e aos agentes atmosféricos e, por isso, não necessita de manutenções frequentes. Para além disso, a grande capacidade resistente do alumínio permite que as caixilharias constituídas por este material tenham a capacidade de sustentar vidros mais pesados, tendo espessuras mais reduzidas. Por outro lado, os caixilhos apresentam uma baixa resistência ao choque e uma vez que o alumínio é um bom condutor térmico e, por isso, as caixilharias deste tipo apresentam alguns problemas relacionados com este aspeto, como é o caso de fenómenos de condensação. Para estas situações é necessário efetuar melhorias no desempenho da caixilharia e a maneira mais comum consiste na implementação de corte térmico, um material com uma condutibilidade térmica muito reduzida (usualmente poliamida), diminuindo assim as perdas de calor por parte do sistema (Mendes, 2011).

### 2.3.2.2 Caixilharia em PVC

O policloreto de vinilo (PVC) é um material que resulta da combinação química de carbono, hidrogénio e cloro, que derivam do cloreto de sódio e do etileno. É um termoplástico, o que significa que se torna moldável sob o efeito do calor e recupera a consistência, assumindo ou não uma nova forma, na presença de temperaturas inferiores (Mendes, 2011).

Os perfis deste tipo de caixilharia são produzidos da mesma forma que os de alumínio, ou seja, através de um processo de extrusão. A sua utilização tem crescido muito nos últimos anos e muito se deve ao vasto número de vantagens que apresenta, tais como (Pinho, 2013):

- Material leve e maleável;
- Elevado isolamento térmico e acústico;
- Elevada resistência ao choque;
- Resistência às intempéries;
- Resistência a agentes químicos;
- Estabilidade dimensional;
- Auto extingüível relativamente ao comportamento ao fogo;
- Reciclável.



Figura 2.10: Caixilharias em PVC (ROCAEb).

Comparando diretamente o PVC com outros materiais, permite-nos perceber o quão benéfico é utilizá-lo neste tipo de elementos. Tendo uma condutibilidade térmica de  $0,17 \text{ W/mK}$ , o PVC é melhor isolante, quando comparado com o alumínio por exemplo, que possui um  $\lambda$  de  $160 \text{ W/mK}$ . O PVC possui um tempo útil de vida superior ao alumínio e à madeira, e por ser um termoplástico, é um material totalmente reciclável e as caixilharias constituídas por este material apresentam ainda facilidade de limpeza, não necessitando de grande manutenção (Mendes, 2011).

### 2.3.2.3 Caixilharia em Madeira

O outrora o principal tipo de caixilharias utilizado em Portugal, devido à sua vasta disponibilidade na natureza e versatilidade de formas, as caixilharias de madeira são, hoje em dia, cada vez menos utilizadas, perdendo espaço face às de alumínio e PVC. A madeira caiu em desuso relativamente a este tipo de elementos devido à sua facilidade de degradação,

reduzida durabilidade e elevada necessidade de manutenção. Este tipo de sistemas são muito suscetíveis a agentes atmosféricos, nomeadamente humidade, provocando a expansão e retração da madeira, impulsionando assim a sua deterioração. É possível aumentar o tempo de vida útil de um caixilho de madeira através de processos de manutenção regular e principalmente, revestindo a superfície dos mesmos com alumínio ou PVC, perdendo-se assim a componente estética que a madeira confere à janela (Sirgado, 2010).

Em oposição às suas várias desvantagens, as caixilharias de madeiras possuem também diversas vantagens, que lhes permitiu serem uma primeira escolha durante muito tempo. Entre essas vantagens, podemos destacar (Pinho, 2013):

- Reservas renováveis;
- Diversidade das dimensões das peças constituintes;
- Não requer o uso de ferramentas demasiado sofisticadas;
- Reutilizável;
- Resiste a esforços de tração e compressão;
- Boa resistência mecânica;
- Elevado isolamento térmico e acústico;
- Permite grande variedade de padrões e formas.

Mediante o tipo de madeira considerado, a condutibilidade térmica deste material pode variar entre 0,13 e 0,18 W/mK, o que o torna um ótimo isolante térmico. Assim, concluímos que do ponto de vista do desempenho térmico, as caixilharias de madeira são uma excelente solução. Porém, as diversas questões que comprometem a sua longevidade e eficácia, fizeram com que estes sistemas caíssem e desuso, abrindo espaço para as caixilharias de alumínio e PVC (Mendes, 2011).



Figura 2.11: Caixilharia em Madeira (SCHUSS).

#### 2.3.2.4 Caixilharia mista e novos materiais

Em alternativa às caixilharias convencionais, existe também a possibilidade de utilização de caixilharias mistas, compostas por combinações de dois ou três materiais, dos referidos anteriormente, sendo ocasionalmente referidos como caixilhos híbridos. Este tipo de soluções permite, deste modo, tirar partido das vantagens de cada material e anular ou reduzir as desvantagens que possam ter (Sirgado, 2010).

Quadro 2.1: Exemplos de caixilharias mistas (Agrela, 2011).

PVC - Alumínio	Revestimento exterior em alumínio e o interior em PVC, aproveitando o seu desempenho térmico	
Madeira - Alumínio	Parte interior em madeira e parte exterior em alumínio, material resistente que não necessita de manutenção	
Madeira - PVC	Madeira no interior e PVC no exterior, garantindo elevada proteção	

De um modo generalizado, neste tipo de soluções pretende-se utilizar materiais no exterior que resistam melhor aos agentes atmosféricos e que necessitem de menor manutenção e do lado interior materiais esteticamente mais apelativos e mais eficazes a nível do isolamento, sendo o objetivo principal obter soluções resistentes, com períodos longos de vida útil e com perdas de calor reduzidas.

Com a procura de novas formas e técnicas de melhorar o desempenho das caixilharias ao longo dos anos, é natural surgir a opção de novos materiais para serem aplicados a este tipo de elementos. Um desses materiais é a fibra de vidro, que apresenta um comportamento semelhante ao alumínio, na medida em que podem ser produzidos perfis muito estreitos, permitindo ampliar a área de envidraçado. Para além disso, a fibra de vidro resiste às intempéries, tem um longo período de vida útil e necessita de pouca manutenção.

Apesar de algumas vantagens, existem ainda algumas dificuldades para que este tipo de sistemas com novos materiais, como é o caso da fibra de vidro, se consigam impor no mercado, devido à necessidade de componentes adicionais para obter um bom desempenho térmico e ao elevado custo que todos os processos relativos a estas soluções requerem (Mendes, 2011).

### 2.3.3 Vidro

O vidro é o material transparente que resulta da fusão de areia de sílica e óxidos metálicos secos pulverizados ou granulados (usualmente). Durante este processo ocorre a formação de uma massa viscosa, que ao arrefecer proporciona uma certa rigidez, permitindo ainda assim que seja manuseada para obtenção de diversas formas, colmatando com esse mesmo material num estado sólido duro, conhecido como vidro ( Saint-Gobain, 2008).

Atualmente, os vidros utilizados em vãos envidraçados, evoluíram de vidros simples para vidros duplos ou triplos, com introdução de ar ou gases pesados entre as folhas para alcançar elevados desempenhos térmicos (Pinho, 2013). O Quadro 2.2 permite-nos ter uma ideia de como o desempenho térmico dos vidros varia, através de um conjunto de soluções atualmente comercializadas pela empresa Saint-Gobain.

Quadro 2.2: Desempenho de diferentes tipos de vidro (Saint-Gobain, 2015).

Vidro	U (W/m <sup>2</sup> K)		
	Simples	Duplo	Triplo
SGG CLIMALIT	5,7	3,3 a 2,7	2,9 a 1,6
SGG CLIMALIT PLUS - Isolamento Reforçado	-	2,5 a 1,0	2,6 a 0,5

Como referido anteriormente, é possível inserir gases pesados entre painéis de vidro, elevando assim o desempenho térmico do mesmo. Nestas circunstâncias, os gases utilizados são:

Quadro 2.3: Condutibilidade térmica dos gases usados em vidros duplos e triplos, a 10 °C (Mendes, 2011).

Gás	$\lambda$ (W/mK)
Argon	$1,648 \times 10^{-2}$
SF6	$1,275 \times 10^{-2}$
Krypton	$0,900 \times 10^{-2}$
Xenon	$0,529 \times 10^{-2}$

No setor da construção civil, aproximadamente 95% dos vidros produzidos apresentam a seguinte constituição (Pinho, 2013):

- **Vitrificante** (sílica), sob a forma de cálcio (70 a 72%);
- **Fundente** (soda), sob a forma de carbonato e sulfato (aproximadamente 14%);
- **Estabilizante** (óxido de cálcio), sob a forma de calcário (aproximadamente 10%);
- **Outros óxidos** (p.ex. alumínio e magnésio), permitem melhorar as propriedades físicas do vidro;
- **Óxidos metálicos**, para que se obtenham diferentes cores.

### 2.3.3.1 Tipos de Vidros

Devido às melhorias tecnológicas, são diversos os tipos de vidros que atualmente estão disponíveis no mercado. Com características específicas, cada tipo de vidro é apropriado para um determinado caso, mediante os requisitos e nível exigência necessários. Dos vários tipos utilizados hoje em dia, os vidros mais relevantes são (Agrela, 2011):

- **Vidro simples** – outrora o vidro mais utilizado, com a implementação das normas energéticas de climatização em edifícios acabou por perder espaço para as restantes soluções. Consiste numa lâmina única de vidro, com espessura variável.
- **Vidro duplo** – um dos vidros mais utilizados nos últimos anos, é constituído por duas folhas de vidro separadas por um espaço preenchido com ar ou por um gás.
- **Vidro triplo** – constituição semelhante ao vidro duplo, possuindo três folhas de vidro e dois espaços de ar/gás.
- **Vidro aramado** – vidro produzido com uma malha de arame no seu interior, garantindo maior segurança contra invasões, contra estilhaços em caso de quebra por dano mecânico ou fogo.
- **Vidro de controlo solar** – vidro que permite o controlo da incidência de luz, aquecimento interior e raios UV. Resulta da aplicação de uma capa de origem metálica num determinado vidro (normalmente vidro duplo), conferindo-lhe o mecanismo de controlo solar e um aspeto estético único.
- **Vidro de baixa emissividade** – vidro que possui a capacidade de refletir raios infravermelhos, responsáveis por aumento de calor. É um vidro incolor, ao qual se aplica uma capa fina e transparente composta por materiais de origem metálica. Usualmente utilizado em vidros duplos.

- **Vidro com películas seletivo** – vidro que possui a capacidade de controlo solar e de baixa emissividade.
- **Vidro temperado** – vidro ao qual se aplica um processo térmico que lhe confere elevada resistência ao choque térmico, à compressão, flexão, torção e impacto. É 4 vezes mais resistente que um vidro comum da mesma espessura. Muitas vezes é utilizado como vidro de segurança uma vez que, em caso de quebra, os estilhaços produzidos são de pequena dimensão e reduzida capacidade de corte.
- **Vidro de auto-limpeza** – vidro incolor ao qual se aplica um revestimento constituído por materiais de origem mineral, foto catalítica, hidrófila e transparente. O revestimento fica totalmente integrado na superfície do vidro, apresentando uma elevada resistência e utiliza a ação conjunta dos raios UV da luz solar e da água para eliminar a sujidade existente na superfície externa do vidro.
- **Vidro laminado** – vidro composto por duas ou mais placas de vidro, intercaladas com lâminas de polivinil butiral (PVB). Deste modo, o vidro adquire grande capacidade elástica e de resistência ao choque, proteção acústica e UV, mantendo a transparência de um vidro comum. Muito utilizado como vidro de segurança, devido à capacidade de, em caso de quebra, os estilhaços se manterem colados à película de PVB.

## 2.4 Requisitos Térmicos – REH e RECS

Em Portugal, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) estabelece a legislação e os requisitos relativamente ao desempenho e às necessidades energéticas dos edifícios de habitação, enquanto que o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) estabelece os mesmos requisitos, mas para os edifícios de comércio e serviços. Estes regulamentos encontram-se em vigor, através do Decreto-Lei nº 58/2018, juntamente com diversas Portarias e Despachos que indicam a metodologia de cálculo a utilizar na análise de desempenho térmico e energético (DRE).

A metodologia de cálculo adotada pelo REH consiste num método sazonal em regime permanente, onde se faz uma avaliação das necessidades de aquecimento e arrefecimento, considerando o edifício como uma única zona e que apresenta as mesmas condições interiores de referência (Romeiro, 2019).

De acordo com a Portaria nº 379-A/2015, os coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de vãos envidraçados,  $U_{max}$  (W/m<sup>2</sup>C), para edifícios de habitação são:

Quadro 2.4:  $U_{max}$  de vãos envidraçados, desde 31 de Dezembro de 2015, segundo o REH (Adaptado de Portaria nº 379-A/2015).

Zona corrente da envolvente	Portugal Continental e Regiões Autónomas		
	I1	I2	I3
Vãos envidraçados (portas e janelas) ( $U_{wmax}$ )	2,80	2,40	2,20

Sendo que I1, I2 e I3 correspondem às três zonas climáticas do território Nacional.

Por outro lado, o mesmo tipo de requisitos, mas estabelecidos pelo RECS, são menos exigentes que os do REH. De acordo com a Portaria nº 17-A/2016, os coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de vãos envidraçados,  $U_{max}$  (W/m<sup>2</sup>C), para edifícios de comércio e serviços são:

Quadro 2.5:  $U_{max}$  de vãos envidraçados, desde 31 de Dezembro de 2015, segundo o RECS (Adaptado de Portaria nº 17-A/2016).

Zona corrente da envolvente	Portugal Continental e Regiões Autónomas		
	I1	I2	I3
Vãos envidraçados (portas e janelas) ( $U_{wmax}$ )	4,30	3,30	3,30

## 2.5 Requisitos Térmicos - Passive House

“Um edifício no qual o conforto térmico pode ser alcançado apenas através do aquecimento ou arrefecimento posterior da massa de ar novo que é exigida para alcançar as condições suficientes da qualidade do ar interior, sem ser necessária uma recirculação de ar”. É assim que o PHI define oficialmente este conceito (Alves, 2014).

Por outras palavras, Passive House consiste num padrão energético caracterizado por consumos energéticos reduzidos, mantendo um nível de conforto elevado. Este padrão pode ser separado em três partes. A primeira está relacionada com o limite das necessidades energéticas, nomeadamente aquecimento, arrefecimento, produção de água quente e

eletricidade. A segunda parte é referente ao conforto térmico dos utilizadores. Por sua vez, a terceira parte corresponde ao conjunto de sistemas passivos que permitem satisfazer as exigências energéticas e a garantia de conforto a um custo acessível (Oliveira, 2013).

Para garantir os seus objetivos, os edifícios PH devem possuir um ótimo isolamento térmico na envolvente exterior, anular a existência de pontes térmicas, possuir uma envolvente externa estanque e ventilação mecânica com recuperação de calor. Alguns destes edifícios possuem ainda massas térmicas para impedir o sobreaquecimento durante o Verão e manter as temperaturas no Inverno. Por último, a norma PH sugere ainda a utilização de mecanismos de produção de energia renováveis para o aquecimento de água e para obter eletricidade (Alves, 2014).

É fácil compreender o importante papel que os vãos envidraçados desempenham na concretização do conceito Passive House. Para uma grande parte dos países Europeus, o valor máximo para o coeficiente de transmissão térmica de janelas,  $U_w$ , é de  $0,80 \text{ W/m}^2$ . Para além disso, as caixilharias devem ainda minimizar ao máximo as pontes térmicas e as perdas de calor por infiltração. No entanto, Portugal não é um dos países referenciados nesta base de dados, não havendo assim um valor específico para o nosso país. Ainda assim, é possível obter valores através do tipo de clima. Considerando neste caso um clima Quente / Temperado, o PHI sugere o valor de  $1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Passive House Database, 2019).

Em termos gerais, para que alcancem o desempenho requerido numa abordagem PH, as caixilharias devem ser preferencialmente de madeira ou PVC, com os espaços de ar preenchidos com isolamento térmico. No caso de serem de alumínio, deve-se utilizar sempre corte térmico, porém, como a madeira e o PVC são materiais com o comportamento mais sustentável, não se justifica para estes casos a utilização de alumínio (Ferreira, 2017).

Certos estudos indicam que para o território português, mediante o clima e os ganhos e perdas através dos vãos envidraçados, um bom caixilho com um vidro duplo são suficientes para garantir os requisitos PH. Um dos exemplos existentes, são as três primeiras PH no distrito de Aveiro, que possuem janelas com valores de  $0,91 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $1,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ , para vidro triplo e duplo respetivamente (Ferreira, 2017).

## 2.6 Marcação CE para Caixilharias

A marcação CE consiste na aplicação de um símbolo a um determinado produto que circule no mercado comunitário, que por sua vez demonstra que o mesmo cumpre os requisitos impostos pelas diretivas em vigor e que lhe são aplicáveis. Apesar de ter entrado em vigor a 1

de Fevereiro de 2007, a marcação CE para janelas apenas passou a ser obrigatória a partir de 1 de Fevereiro de 2010, em conformidade com a norma EN 14351-1:2006+A1:2010 (IPQ).

No que diz respeito aos produtos de construções, a marcação CE efetuada em Portugal é também válida para qualquer país do Espaço Económico Europeu, da mesma forma que a dos restantes países membros também é válida no nosso país, visto que se pressupõe que o produto cumpre os critérios da respetiva diretiva e norma europeia ou que é alvo de uma aprovação técnica europeia. Ainda assim, os valores que constam na marcação CE devem estar de acordo com as exigências presentes nas regulamentações de cada Estado Membro onde esse mesmo produto será comercializado (IPQ).

Para o caso específico de caixilharias, o fabricante deverá fornecer informação suficiente para garantir que o seu produto garante todos os requisitos necessários. Esta informação estará presente na etiqueta de marcação CE, a qual deverá conter a norma europeia aplicável, nome ou marca do produtor, últimos dois dígitos do ano em que a marca foi afixada, classificação do produto e destino de aplicação e ainda, indicações das características do produto determinadas com base na especificação técnica aplicável (Barbosa, 2010).

	
CAIXIAVE – Indústria de Caixilharia, S.A. Lugar do Senhor dos Perdões Ribeirão – V.N.de Famalicão	
14	
NP EN 14351-1: 2008 + A1: 2011	
Tipo XYZ – Janela destinada a ser usada em lugares domésticos e públicos	
Resistência às acções do vento:	Classe 5
Estanquidade à água:	Classe 8 A
Substâncias perigosas:	Sem amianto
Resistência ao impacto:	450 mm
Capacidade dos dispositivos de segurança: Aprovada	
Atenuação acústica:	33 (-1; -5) dB
Isolamento térmico:	1,7 W/m <sup>2</sup> ·K
Propriedades de radiação:	
Factor solar:	0,55
Transmissão luminosa:	0,75
Permeabilidade ao ar:	Classe 4

Figura 2.12: Exemplo de etiqueta de marcação CE para uma caixilharia (CAIXIAVE, 2014).

As normas de classificação e de ensaio ou cálculo para o coeficiente de transmissão térmica de janelas, portas pedonais e janelas de cobertura, para um uso previsto em locais domésticos e comerciais, são a EN ISO 10077-1 e a EN ISO 10077-2 (Agrela, 2011).

## 2.7 Etiquetas Energéticas SEEP e Classe + – Eficiência Energética de Janelas

As etiquetas energéticas são uma iniciativa da ADENE e têm como função transmitir informação sobre o desempenho energético de um determinado produto, neste caso janelas, para que o consumidor possa comparar as diversas soluções disponíveis. Inicialmente surgiram as etiquetas SEEP, que apresentavam uma escala energética de G (menos eficiente) até A (mais eficiente). Atualmente, estas etiquetas foram substituídas pelas Classe +, que apresenta uma escala diferente, sendo F a classificação menos eficiente e A+ a mais eficiente (ADENE, 2019).

Para além da escala energética, estas etiquetas devem ainda possuir alguma informação técnica detalhada, relativa aos parâmetros de cálculo considerados para atribuição da respetiva classe, tais como o coeficiente de transmissão térmica, fator solar do vidro, percentagem de transmissão acústica, classe de permeabilidade ao ar e nível de atenuação acústica. São também indicados níveis de conforto para as estações de Verão e Inverno.



Figura 2.13: Exemplo de etiquetas energéticas SEEP e Classe+ (Adene)

### 3 METODOLOGIA DE CÁLCULO

“A norma EN ISO 10077-2 providência a metodologia para avaliar o comportamento térmico da caixilharia e propõe os critérios para validar o modelo numérico”. (Malvoni et al. 2016). Com base nesta asserção, inicia-se este capítulo que tem por objetivo, demonstrar os procedimentos efetuados para a obtenção dos resultados pretendidos.

A segunda parte da ISO 10077 apresenta, de forma detalhada, não só o procedimento para calcular o coeficiente de transmissão térmica de caixilhos ( $U_f$ ), como também os cálculos a efetuar para a obtenção do coeficiente de transmissão térmica linear, na junção das caixilharias com os vidros ( $\Psi$ ). Esta norma também providencia os critérios para a validação do método numérico que foi usado nos cálculos efetuados neste trabalho, conforme se encontra demonstrado posteriormente. (ISO 10077-2, 2003). Este conjunto de procedimentos constituem o **método numérico bidimensional**, que se baseia no método dos elementos finitos ou no das diferenças finitas. (Pereira Mendes, 2011).

#### 3.1 Modelação *THERM*

A aplicação do **método numérico bidimensional** só é possível com recurso a um software que tenha a capacidade de efetuar uma análise térmica bidimensional. No presente trabalho, esse software foi o *THERM*, que baseando-se no método dos elementos finitos, nos permite quantificar a condução de calor através de um determinado elemento geométrico. (Pereira Mendes, 2011).

Para se utilizar esta ferramenta, é necessário definir geometricamente, de forma clara, todos os elementos constituintes da solução que se pretende avaliar. Esta definição envolve dimensões, tipos de material utilizados e condições de fronteira.

Uma das características que necessitam um tratamento especializado, são as cavidades de ar da caixilharia. Estas devem ser inseridas no programa como sendo um material sólido, para que o fluxo de calor que as atravessa possa ser caracterizado por um coeficiente de condutividade térmica equivalente,  $\lambda_{eq}$ , no qual são considerados os mecanismos de transferência de calor por condução, radiação e convecção. (Malvoni et al, 2016). A norma ISO 10077-2 impõe ainda algumas restrições relativamente à classificação dos espaços de ar, atendendo às suas dimensões. Para cavidades de ar totalmente fechadas ou com uma abertura inferior a 2 mm, estas devem ser tratadas como espaços de ar não ventilados. Quando temos cavidades de ar com uma abertura superior a 2 mm e inferior a 10 mm, devem ser tratadas como espaços de ar ligeiramente ventilados, onde a sua condutividade térmica é o dobro da

que uma cavidade de ar não ventilada com as mesmas dimensões teria. Por fim, numa situação em que a reentrância tenha uma abertura superior a 10 mm, toda a sua superfície estará exposta a condições internas ou externas, conforme a situação.

Os valores de  $\lambda$  dos diversos materiais considerados foram inseridos na biblioteca de materiais do *THERM* recorrendo aos valores propostos no Anexo A da ISO 10077-2. Por sua vez, do Anexo B da mesma norma foram retirados os valores para as resistências térmicas superficiais, interna e externa e as suas condições de aplicação.

### 3.2 Fator de Perdas Térmicas (Bidimensional)

Este fator de perdas térmicas bidimensional,  $L_f^{2D}$  (W/mK), pode ser definido como a razão entre o fluxo total de calor,  $\phi$ , que atravessa a secção e a variação da temperatura entre ambientes adjacentes,  $\Delta T$  (ISO 10211). No entanto, por forma a calcular este parâmetro utilizando a norma ISO 10077 e o *THERM*, recorreu-se à expressão seguinte:

$$L_f^{2D} = U_{total} \times l \quad (3.1)$$

em que:

$U_{total}$  (W/m<sup>2</sup>K) – coeficiente de transmissão térmica do grupo caixilho e painel, retirado do *THERM*

$l$  (m) – comprimento do contorno da secção perpendicular ao fluxo de calor.

### 3.3 Coeficiente de Transmissão Térmica

O cálculo do coeficiente de transmissão térmica da secção de um caixilho, que constitui o principal objetivo desta dissertação, é determinado pela expressão (3.2) definida na norma ISO 10077. É assim necessário modelar a geometria definida na Figura 3.1, em que o vidro é substituído por um painel isolante, que apresenta um  $\lambda$  de 0,035 (W/mK), uma espessura ( $e$ ) de 28 mm e ainda o comprimento  $b_p$ , que corresponde à distância do painel, perpendicular ao fluxo de calor, medida a partir da parte mais saliente do caixilho, por outras palavras, o lado visível do painel. Nas análises efetuadas, esta considerou-se ser de 190 mm, valor mínimo sugerido pela norma em uso. Para além do  $L_f^{2D}$ , referido na secção anterior, é ainda necessário considerar a distância  $b_f$ , que corresponde à largura projetada do caixilho, que para as soluções analisadas neste trabalho, tomou sempre o valor de 110 mm. Deste modo obtém-se o valor do coeficiente de transmissão térmica do caixilho,  $U_f$ :

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p b_p}{b_f} \quad (3.2)$$

Em que:

$L_f^{2D}$  (W/mK) – fator de perdas térmicas (bidimensional)

$U_p$  (W/m<sup>2</sup>K) – coeficiente de transmissão térmica do painel isolante

$b_p$  (m) – largura visível do painel isolante

$b_f$  (m) – largura visível da secção do caixilho.

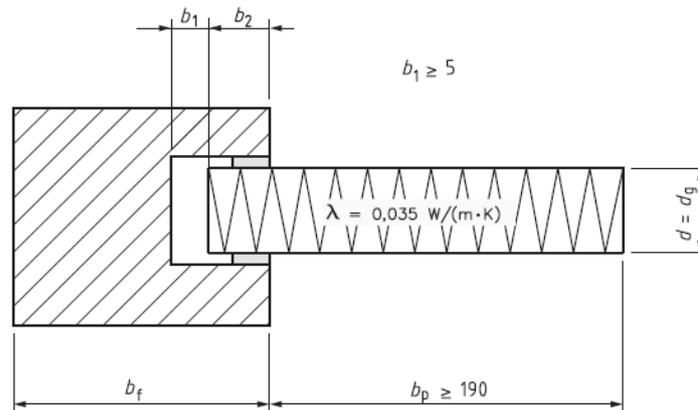


Figura 3.1: Modelação geométrica de uma caixilharia e do painel isolante (ISO 10077-2):

### 3.4 Coeficiente de Transmissão Térmica Linear

Na análise do grupo caixilho + vidro, o parâmetro em estudo foi o coeficiente de transmissão térmica linear,  $\Psi$ . Como sabemos, o coeficiente de transmissão térmica da caixilharia é determinado na ausência do vidro. Por sua vez, o mesmo coeficiente aplicado ao vidro, é determinado na zona central do mesmo, onde o espaçador situado na extremidade junto à caixilharia não tem influência. Na situação em que temos caixilho com vidro inserido, surge um fluxo de calor adicional na zona de ligação destes dois elementos, onde já é considerado o efeito do espaçador.

Para determinar este parâmetro, utilizou-se a expressão (3.3), da qual já são conhecidos os parâmetros  $b_f$ ,  $b_g$  e  $U_f$ , determinados previamente para a análise do caixilho isolado. Determina-se então o  $U_g$  na zona central do vidro e finalmente o  $L_\Psi^{2D}$ , que é calculado multiplicando o valor de  $U_{total}$ , obtido para o conjunto vidro e caixilho, que é retirado do THERM, pelo comprimento do contorno perpendicular ao fluxo de calor.

$$\Psi = L_\Psi^{2D} - U_f b_f - U_g b_g \quad (3.3)$$

em que:

$L_\Psi^{2D}$  (W/mK) – fator de perdas térmicas (caixilho + vidro)

$U_g$  (W/m<sup>2</sup>K) – coeficiente de transmissão térmica na zona central do vidro

$U_f$  (W/m<sup>2</sup>K) – coeficiente de transmissão térmica do caixilho

$b_g$  (m) – largura visível do vidro

$b_f$  (m) – largura visível da secção do caixilho.

### 3.5 Validação do Modelo de Cálculo

Previamente à componente prática desta dissertação, foi feita a validação do modelo de cálculo a utilizar nos processos de análise que se pretendiam efetuar. Assim, esta secção apresenta esta mesma validação aplicada a uma das caixilharias presentes na norma ISO 10077-2, que neste caso, foi a caixilharia de madeira, designada por D4 (Figura 3.2). Para modelar esta solução no *THERM*, foi necessário definir quais os materiais constituintes e quais as condições de fronteira a considerar, sendo estes:

- a – painel isolante - ( $\lambda = 0,035$  W/mK);
- b – madeira (“soft wood”) - ( $\lambda = 0,13$  W/mK);
- d – vedante (EPDM) – ( $\lambda = 0,25$  W/mK);
- A – superfície adiabática;
- B – superfície externa – ( $R_{se} = 0,04$  m<sup>2</sup>K/W);
- C – superfície interna – ( $R_{si} = 0,13$  m<sup>2</sup>K/W).

Existe ainda uma resistência térmica superficial aumentada (Figura 3.3), aplicada no lado interno, em zonas onde se formam saliências (côncavas) e que possui um valor de  $R_{si}$  de 0,20 m<sup>2</sup>K/W.

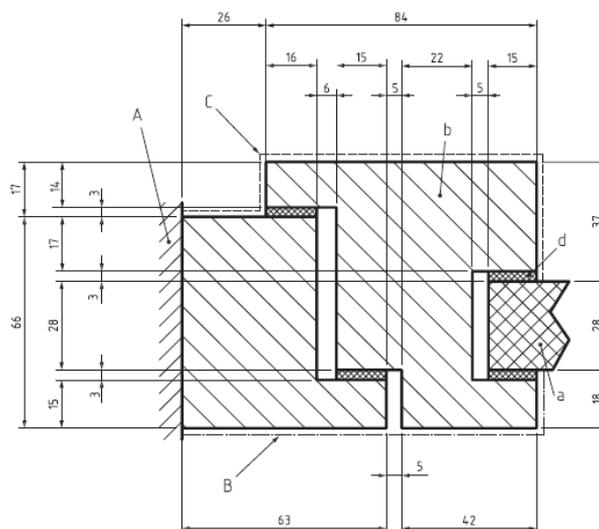


Figura 3.2: Caixilharia D4 – Validação do modelo de cálculo. (ISO 10077-2).

Para a validação da metodologia de cálculo é necessário determinar o  $U_{total}$ , ou seja, o coeficiente de transmissão térmica total da solução obtido através do software de cálculo

utilizado. Resta então determinar os valores de condutividade térmica para os espaços de ar, que irão ser caracterizados por um  $\lambda_{eq}$ , a ser determinado mediante um conjunto de passos propostos pela norma.

Relativamente à reentrância existente no lado exterior do caixilho, como a sua abertura é de 5 mm (inferior a 10 mm e superior a 2 mm), o seu  $\lambda_{eq}$  será o dobro do que seria se este fosse um espaço de ar não ventilado.

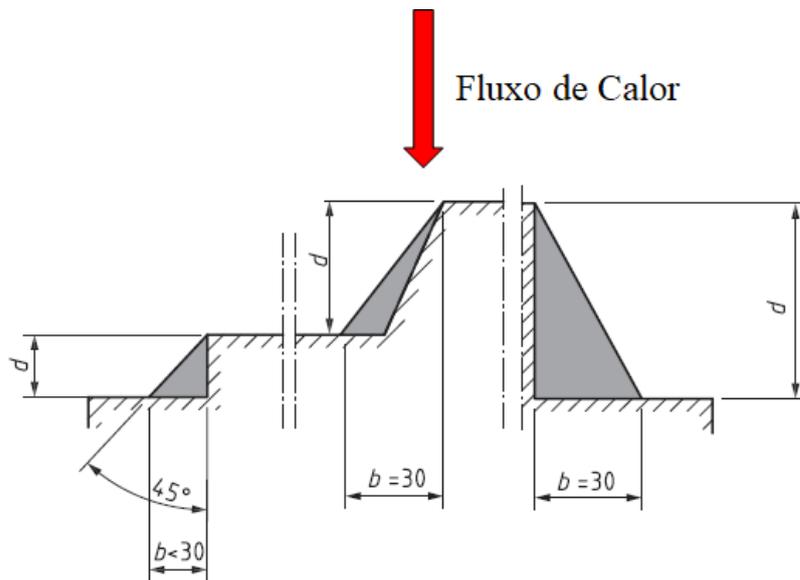


Figura 3.3: Limites para aplicação da resistência superficial interna aumentada. (Adaptado de ISO 10077-2).

Uma vez que o procedimento é o mesmo, apresenta-se de seguida apenas os cálculos para a determinação da condutividade térmica equivalente de um dos espaços de ar, tendo-se escolhido para este efeito o maior deles. A expressão para calcular este parâmetro é então:

$$\lambda_{eq} = \frac{d}{R_s} \quad (3.4)$$

Em que:

$d$  – dimensão do espaço de ar com a mesma direção que o fluxo de calor. (54 mm);

$b$  – dimensão do espaço de ar perpendicular à direção do fluxo de calor. (6 mm);

$R_s$  – resistência térmica do espaço de ar ( $m^2K/W$ ).

Sabendo logo à partida o valor de  $d$ , é necessário determinar o valor da resistência térmica do espaço de ar, sendo que todas as expressões e valores de constantes utilizadas, estão pré-estabelecidos na norma considerada.

$$R_s = \frac{1}{h_a + h_r} \quad (3.5)$$

Onde,

$h_a$  – coeficiente de transferência de calor por convecção;

$h_r$  – coeficiente de transferência de calor por radiação.

Considerando  $\Delta T = 10$  K, tem-se que:

$$h_a = \max \left\{ \frac{C_1}{d}; C_3 \right\} = \max \left\{ \frac{0,025}{0,054}; 1,57 \right\} \quad (3.6)$$

$$h_a = 1,57 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Sendo  $C_1 = 0,025 \text{ W}/(\text{mK})$  e  $C_3 = 1,57 \text{ W}/(\text{mK})$ .

Considerando  $T_m = 283$ K:

$$h_r = C_4 \left( 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2} - \frac{d}{b} \right) \quad (3.7)$$

$$h_r = 2,11 \left( 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{0,054}{0,006}\right)^2} - \frac{0,054}{0,006} \right) = 2,23 \text{ W}/(\text{mK})$$

Sendo  $C_4 = 2,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  e assim, conseguimos calcular a resistência térmica do espaço de ar e conseqüentemente, a condutividade térmica do mesmo.

$$R_s = \frac{1}{1,57 + 2,23} = 0,263 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

$$\lambda_{eq} = \frac{0,054}{0,263} = 0,205 \text{ W}/\text{mK}$$

Aplicando o mesmo procedimento para o espaço de ar na ligação com o painel isolante e para a reentrância obtiveram-se, respetivamente, 0,130 W/ mK e 0,143 W/ mK. Inserindo estes valores na modelação do caixilho no *THERM*, obteve-se para esta solução um  $U_{total}$  de 1,154 W/ m<sup>2</sup>K. Utilizando a expressão (3.1), podemos assim determinar o valor do fator de perdas térmicas (bidimensional).

$$L_f^{2D} = 1,154 \times (0,110 + 0,130) = 0,346 \text{ W/mK}$$

Considerando que o painel tem uma espessura de 28 mm, o último parâmetro necessário, é o seu  $U_p$ :

$$U_p = \frac{1}{0,04 + \frac{0,028}{0,035} + 0,13} = 1,03 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Por último, resta aplicar a expressão (3.2) e determinar o  $U_f$  para este caixilho:

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p b_p}{b_f} = \frac{0,346 - 1,03 \times 0,190}{0,110} = 1,37 \text{ W/m}^2\text{K}$$

A validação do cálculo é então feita comparando os valores obtidos com os que a norma nos fornece. Começando pelo valor de  $L_f^{2D}$ , é indicado o valor de 0,346 W/ mK, como uma margem de erro de 0,01, tendo sido também este o valor alcançado através dos cálculos efetuados. Finalmente, para o  $U_f$ , a norma apresenta o valor de 1,36 W/ m<sup>2</sup>K, com uma margem de erro de 0,01. Como o valor obtido para o coeficiente de transmissão térmica do caixilho foi de 1,37 W/m<sup>2</sup>K, respeitando assim a margem de erro considerada, conclui-se assim a validação da metodologia para o cálculo de coeficientes de transmissão térmica de caixilharias estabelecida na ISO 10077-2.

O mesmo procedimento foi aplicado para as caixilharias D1 e D3. Para a caixilharia em Alumínio (D1) obteve-se um valor de  $U_f$  de 3,20 W/ m<sup>2</sup>K que comparando com o valor proposto pela norma, 3,22 W/ m<sup>2</sup>K, comprova-se que respeita a margem de erro de 0,06. Para a caixilharia D3, alcançou-se um  $U_f$  de 2,03 W/ m<sup>2</sup>K, que respeita a margem de erro de 0,06 para o valor proposto pela norma, que é de 2,07 W/ m<sup>2</sup>K.

## 4 CASOS DE ESTUDO E RESULTADOS

No presente capítulo são apresentadas as análises efetuadas às diversas soluções de caixilhos escolhidas e ainda os respetivos resultados que se obtiveram. Alcançamos assim o objetivo desta dissertação, que consiste em compreender a influência que as dimensões e o tipo de materiais utilizados nos diversos elementos de uma caixilharia têm no desempenho térmico da mesma, quer isoladamente e quer de forma global, quando se trata do conjunto caixilho e vidro. Deste modo, podemos dividir este capítulo em três partes. A primeira onde se estudou o comportamento dos diversos caixilhos avaliando simplesmente os  $U_f$  e a sua variação, considerando um painel de isolamento térmico no lugar destinado ao vidro. Na segunda parte efetuaram-se as análises considerando diferentes tipos de vidro para os vários caixilhos, em que neste caso se estudou os valores de  $\Psi$  e a forma como variam. Por último, como forma de complemento para as avaliações dos conjuntos caixilharia + vidro, avaliou-se ainda a variação dos  $U_w$  para os três tipos de caixilho (alumínio, PVC e madeira) e para três tipos de janelas com dimensões distintas entre si.

Foram então selecionadas três caixilharias base, referenciadas na norma ISO 10077-2, sendo uma de alumínio, uma de PVC e uma de madeira. Estas mesmas caixilharias são denominadas na norma por D1, D3 e D4 respetivamente e por questões de simplicidade, esta designação foi também adotada neste trabalho. A adicionar a estes três tipos de caixilharias, criaram-se dois casos hipotéticos (a e b) a partir da solução D1 alterando-se o material constituinte deste caixilho, que é alumínio.

Em suma, as cinco soluções escolhidas para serem analisadas através do *software THERM* são:

- D1 em alumínio;
- caso hipotético a), que corresponde ao caixilho D1 constituído por PVC com um  $\lambda$  de 0,17 W/mK;
- caso hipotético b), que corresponde ao caixilho D1 constituído por Madeira com um  $\lambda$  de 0,13 W/mK;
- D3 em PVC;
- D4 em madeira.

Na modelação das soluções no *THERM* foram considerados diversos materiais, não só para a caixilharia em si, como também para os restantes elementos constituintes, como o vedante, o corte térmico, reforços, entre outros. No Quadro 4.1 apresentam-se os materiais utilizados na elaboração das soluções e os respetivos valores de condutividade térmica ( $\lambda$ ) propostos pela norma EN ISO 10077-2.

Quadro 4.1: Condutividade térmica dos materiais considerados. (Adaptado, EN ISO 10077-2)

Material	$\lambda$ (W/m.K)
Alumínio	160
PVC	0,17
Madeira	0,13
Poliamida	0,25
EPDM	0,25
Painel Isolante	0,035
Aço	50

#### 4.1 Caixilharia em Alumínio – D1

Das soluções escolhidas para analisar neste trabalho, a caixilharia em alumínio é possivelmente a mais complexa no que diz respeito à sua modelação no *software*, tendo em conta os elementos constituintes e a sua geometria, isto porque, para além de inúmeros espaços de ar não ventilados e de uma reentrância levemente ventilada, possui quatro zonas de corte-térmico, como se pode verificar na Figura 4.1.

De todos os caixilhos analisados, é neste de alumínio que faz sentido estudar a importância da presença corte térmico no desempenho destes elementos. Deste modo, em todas as análises efetuadas são modeladas soluções com e sem corte-térmico.

Assim, para este caixilho começou por estudar-se a influência do aumento da sua espessura global, aumentando a espessura de todos os seus elementos em 1,5 vezes (espaços de ar, elementos em alumínio, vedantes, corte-térmico, etc.), aumentando-se este parâmetro de 63 mm para 96 mm. É importante mencionar que este aumento de espessura do caixilho e dos seus elementos se refere à distância no sentido do fluxo de calor, ou seja, à espessura na direção perpendicular ao painel isolante ou ao vidro. De seguida estudou-se a influência da espessura de corte-térmico, aumentando-a para o dobro. A última análise relativa a questões de espessura consistiu em aumentar apenas a espessura em 1,5 vezes dos elementos em alumínio, tentando manter a espessura global perto dos 63 mm. Finalmente, para todas as combinações de soluções referidas anteriormente, avaliou-se a importância da colocação de isolamento térmico nos espaços de ar. Por exemplo, comparar a solução com 63 mm, sem corte térmico e sem isolamento nos espaços de ar, com a mesma solução, mas com isolamento nos espaços de ar.

De seguida apresentam-se separadamente os resultados obtidos para cada análise, demonstrando não só as variações dos valores  $U_f$ , como também os respetivos benefícios ou prejuízos em termos percentuais.

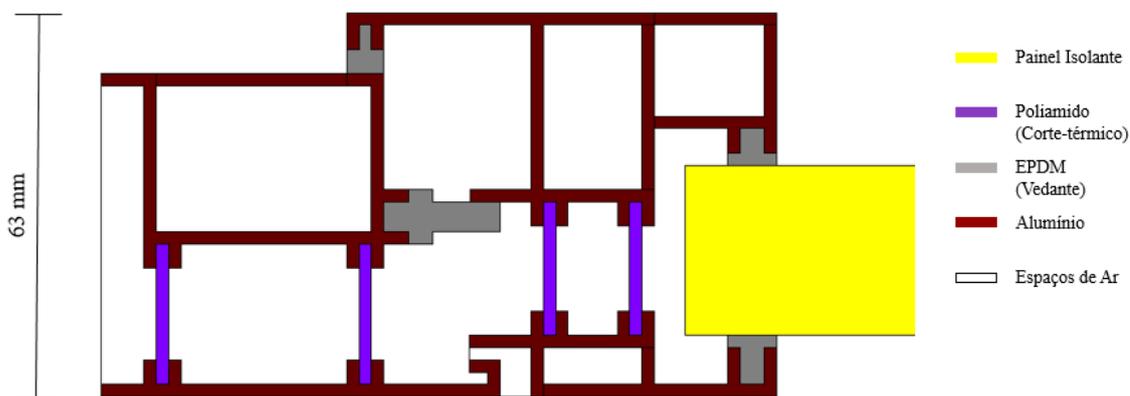


Figura 4.1: Caixilharia em Alumínio - solução inicial.

#### 4.1.1 Influência da Espessura Total do Caixilho

Como foi explicado na secção anterior, o aumento de espessura total consiste no aumento de 1,5 vezes da espessura transversal ao painel isolante de todos os elementos constituintes do caixilho. Na Figura 4.2 e no Quadro 4.2 apresentam-se os resultados obtidos. As siglas aqui utilizadas referem-se a: CT – Com corte térmico; STC – Sem corte térmico; SIEA – Sem isolamento nos espaços de ar; CIEA – Com isolamento nos espaços de ar.

Numa observação inicial da Figura 4.2 e do Quadro 4.2, vemos que a solução que apresenta um valor de  $U_f$  mais favorável é o caixilho com 96 mm de espessura, com corte-térmico e com isolamento no interior dos espaços de ar (1,63 W/m<sup>2</sup>K). Por outro lado, a solução com o  $U_f$  mais elevado e por sua vez menos favorável, é a solução com 96 mm de espessura, sem corte-térmico e sem isolamento nos espaços de ar (6,66 W/m<sup>2</sup>K).

Para este caixilho, vemos assim que o aumento global de espessura nem sempre beneficia o desempenho da solução. Tudo depende da constituição das restantes componentes. É possível ver que para as soluções com corte-térmico o aumento global de espessura é benéfico, pelo menos quando também existe isolamento no interior dos espaços de ar, onde se verificou uma melhoria de 22,12 %. Nas situações em que não existe corte-térmico, o aumento global de espessura piora sempre os valores de  $U_f$ , mesmo que se coloque isolamento térmico nos vazios do caixilho.

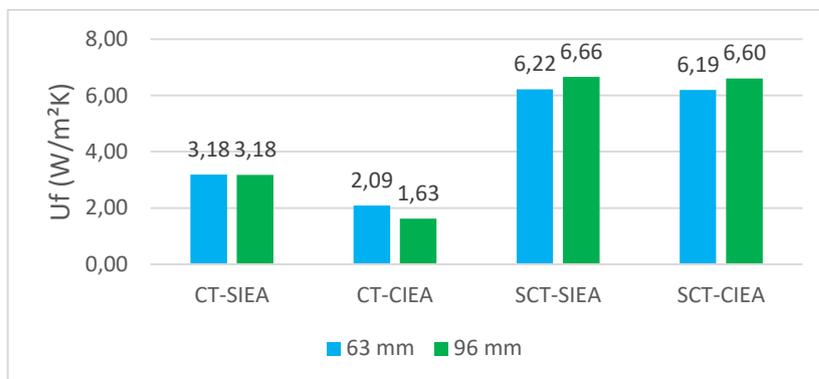


Figura 4.2: Variação do  $U_f$  para um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Alumínio).

Quadro 4.2: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  com um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Alumínio).

Caso	Uf (W/m²K)		Ganhos/ Perdas (%)
	A63	A96	
CT-SIEA	3,18	3,18	0,21
CT-CIEA	2,09	1,63	22,12
SCT-SIEA	6,22	6,66	-7,04
SCT-CIEA	6,19	6,60	-6,65

#### 4.1.2 Influência da Variação da Espessura dos Elementos de Alumínio

Outro estudo importante a fazer consiste no aumento de espessura em 1,5 vezes dos elementos em alumínio, por outras palavras, ampliar a parte de alumínio tentando manter as restantes dimensões o mais iguais possível. Aplicando estas alterações, a espessura do caixilho passou de 63 mm para 67 mm, uma diferença bastante pequena para este tipo de análise.

Observando a Figura 4.3 e o Quadro 4.3 verificamos que esta variação é sempre prejudicial para este tipo de caixilho, havendo perdas entre os 1,52 % e os 2,84% que podem ser consideradas pouco significativas. Ainda podemos constatar que a melhor solução que encontramos tem um valor de  $U_f$  de 2,09 W/m²K e que corresponde ao caixilho com 63 mm, com corte-térmico e com isolamento nos espaços de ar. Relativamente à solução com pior desempenho nesta análise, esta corresponde a um caixilho com aumento dos elementos em

alumínio, sem corte-térmico e sem isolamento nos vazios, com um valor de 6,31 W/m<sup>2</sup>K para o  $U_f$ .

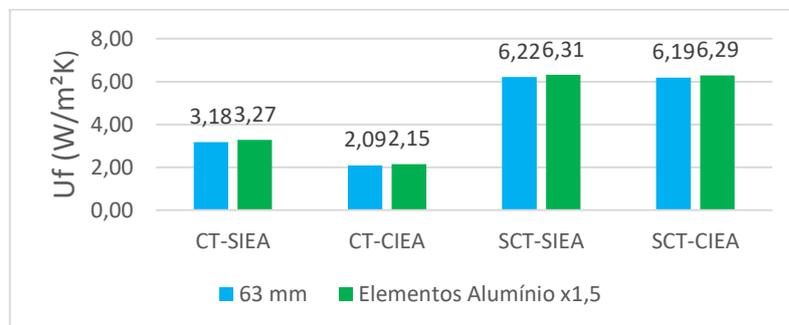


Figura 4.3: Variação do  $U_f$  para um aumento de espessura dos elementos de alumínio.

Quadro 4.3: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  com um aumento de espessura dos elementos em alumínio.

Caso	Uf (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/ Perdas (%)
	A63	1,5 EA	
CT-SIEA	3,18	3,27	-2,84
CT-CIEA	2,09	2,15	-2,69
SCT-SIEA	6,22	6,31	-1,55
SCT-CIEA	6,19	6,29	-1,52

#### 4.1.3 Influência do Aumento da Espessura de Corte-Térmico para o dobro

Antes de se analisar os resultados obtidos para esta secção é expectável que o aumento de corte-térmico seja sempre benéfico, tendo em conta a sua função e também o valor da sua condutibilidade térmica ( $\lambda = 0,25$  W/mK) comparativamente à do alumínio ( $\lambda = 160$  W/mK).

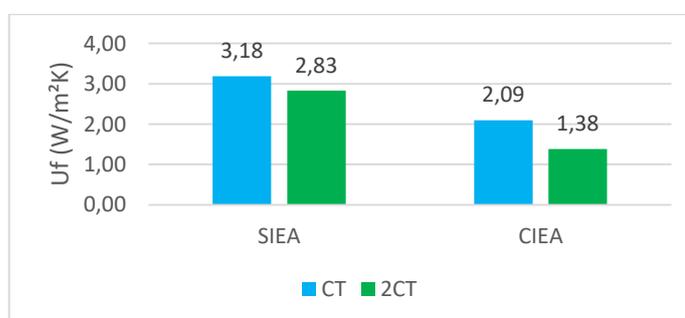


Figura 4.4: Variação do  $U_f$  para um aumento de espessura de corte-térmico para o dobro (Alumínio).

Quadro 4.4: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  com um aumento de espessura de corte-térmico para o dobro (Alumínio).

Caso	$U_f$ (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/Perdas (%)
	CT	2CT	
SIEA	3,18	2,83	11,08
CIEA	2,09	1,38	34,04

Como se pode constatar na Figura 4.4 e no Quadro 4.4, o aumento de corte-térmico para o dobro é benéfico em ambas as situações, com e sem isolamento nos espaços de ar. No primeiro caso, chega-se mesmo a verificar uma melhoria na solução de 34,04%, atingindo-se um valor de 1,38 W/m<sup>2</sup>K.

#### 4.1.4 Influência da Utilização de Isolamento Térmico nos Espaços de Ar

Finalmente efetuou-se a última análise para a caixilharia D1 em alumínio, que como já foi referido consiste na implementação de isolamento nos espaços de ar. Os resultados encontram-se na Figura 4.5 e do Quadro 4.5, onde as siglas referem-se a A63 – Caixilho em alumínio com espessura total de 63mm; A96 - alumínio com espessura total de 96mm e 1.5EA - Caixilho em alumínio com aumento de espessura em 1,5 vezes dos elementos em alumínio. Da análise da Figura 4.5 e do Quadro 4.5, verifica-se que a implementação de isolamento nos vazios é sempre benéfica, tendo-se obtido ganhos que rondam os 50% em algumas situações. No entanto, para este tipo de caixilho, nos casos em que não existe corte-térmico, os benefícios são muito baixos, praticamente nulos. Isto significa que para estes casos, o comportamento do material alumínio é dominante perante os restantes materiais, aquando do preenchimento dos vazios. Ainda podemos observar que o uso de isolamento nos espaços de ar permite obter soluções muito boas, como é o caso da solução A96-CT-CIEA ( $U_f = 1,63$  W/m<sup>2</sup>K) e A63-2CT-CIEA ( $U_f = 1,38$  W/m<sup>2</sup>K), que de resto já o tínhamos observado nas secções 4.1.1 e 4.1.3.

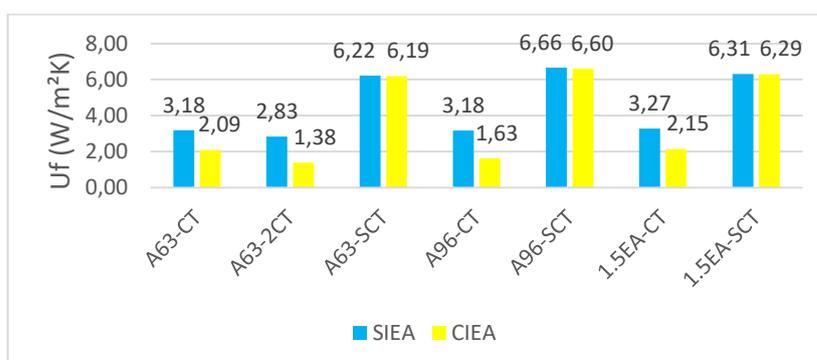


Figura 4.5: Variação do  $U_f$  relativa à utilização de isolamento nos espaços de ar (Alumínio).

Quadro 4.5: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  para a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar (Alumínio).

Caso	Uf (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/ Perdas (%)
	SIEA	CIEA	
A63-CT	3,18	2,09	34,30
A63-2CT	2,83	1,38	51,26
A63-SCT	6,22	6,19	0,41
A96-CT	3,18	1,63	48,73
A96-SCT	6,66	6,60	0,76
1.5EA-CT	3,27	2,15	34,40
1.5EA-SCT	6,31	6,29	0,44

## 4.2 Caso hipotético a) – D1

Esta solução é considerada um caso hipotético tendo em conta que, devido à geometria da caixilharia, não seria possível que esta fosse de PVC ou madeira. No entanto, por motivos de análise, seria interessante avaliar este caixilho alterando o seu material. Assim, para este caso, assumimos que estamos na presença de um caixilho constituído por um material com um  $\lambda$  de 0,17 W/mK. Uma vez que este também é o valor da condutibilidade térmica do PVC, por questões de simplicidade, assumimos que se trata de um caixilho de PVC, na enumeração das soluções a analisar.

Os elementos de corte-térmico não se utilizam em caixilharias de PVC ou de madeira, o que faz sentido tendo em conta que um material com um coeficiente de condutibilidade térmica inferior ao corte-térmico terá um melhor desempenho que o mesmo. Deste modo, na presença de um caixilho com um  $\lambda$  de 0,17 W/mK, efetuaram-se análises ao efeito do aumento de espessura global, do aumento de espessura dos elementos em PVC e por último à implementação de isolamento térmico nos vazios.

### 4.2.1 Influência da Espessura Total do Caixilho

Antes de ser feito o estudo deste caixilho, podemos esperar que o aumento de espessura seja sempre benéfico para esta solução, tendo em conta que se está a aumentar a quantidade de material que possui um  $\lambda$  bastante reduzido. Esta hipótese é comprovada com a Figura 4.6 e com o Quadro 4.6, quando observamos que temos melhorias na solução de 1,90% e 22,14%, para os casos sem e com isolamento nos espaços de ar respetivamente. Podemos ainda verificar que, para os dois casos que possuem isolamento nos vazios, temos valores de  $U_f$  de 0,85 e 0,66 W/m<sup>2</sup>K, para 63 mm e 96 mm respetivamente, valores que correspondem a um desempenho térmico muito elevado.

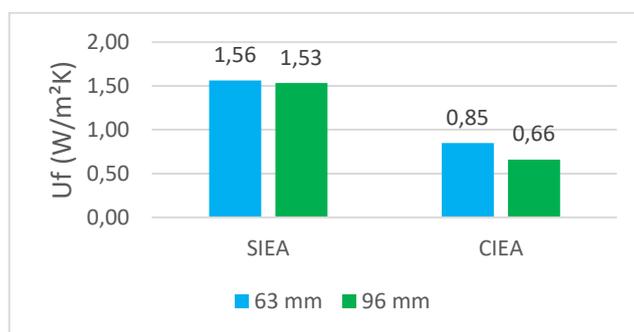


Figura 4.6: Variação do  $U_f$  para um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Caso hipotético a)).

Quadro 4.6: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  com um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Caso hipotético a)).

Caso	$U_f$ (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/ Perdas (%)
	P63	P96	
SIEA	1,56	1,53	1,90
CIEA	0,85	0,66	22,14

#### 4.2.2 Influência da Variação da Espessura dos Elementos de “PVC”

Pelas mesmas razões mencionadas no ponto 4.2.1 deste trabalho, é expectável que esta variação de espessura também provoque melhorias no desempenho das soluções. Porém, o aumento de espessura dos elementos de “PVC” é feito tentando manter a espessura global do caixilho, o que significa que a quantidade de material com um  $\lambda$  reduzido não aumenta tanto como na situação anterior. De facto, o aumento não foi o suficiente para promover benefícios significativos na solução, como se verifica pelas percentagens de ganhos apresentadas no Quadro 4.7, que são de 1,26% e de 1,00%, valores pouco significativos.

Um dado curioso que também podemos observar no Quadro 4.7 é que ao contrário do que se tinha verificado nos casos anteriores, quando efetuamos a variação de espessura, mencionada nesta secção, nas soluções sem isolamento nos espaços de ar, obtemos ganhos superiores comparativamente às soluções com isolamento nos espaços de ar. Ainda assim, independentemente dos benefícios reduzidos para o aumento de espessura dos elementos em “PVC”, obtiveram-se valores muito bons para qualquer uma das soluções, principalmente as que são complementadas com isolamento térmico nos vazios.

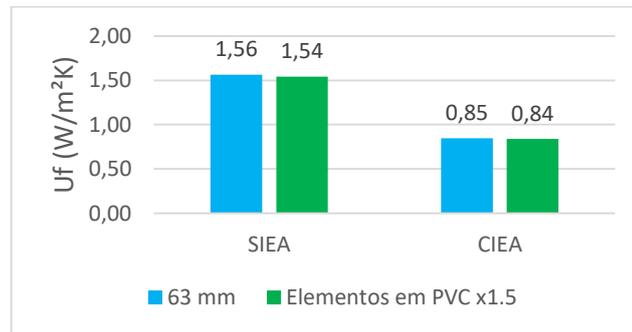


Figura 4.7: Variação do  $U_f$  para um aumento de espessura dos elementos de “PVC”.

Quadro 4.7: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  com um aumento de espessura dos elementos em “PVC”.

Caso	$U_f$ ( $W/m^2K$ )		Ganhos/ Perdas (%)
	P63	1.5EP	
SIEA	1,56	1,54	1,26
CIEA	0,85	0,84	1,00

#### 4.2.3 Influência da Utilização de Isolamento Térmico nos Espaços de Ar

À semelhança do que se tinha verificado no caixilho de alumínio, a implementação de isolamento nos espaços de ar é a alteração que promove as maiores alterações em termos de melhoramentos das soluções. Para este caso em particular, vemos que para o caixilho com 96 mm de espessura total temos uma melhoria de 56,95 %, obtendo-se um valor de  $U_f$  de 0,66  $W/m^2K$ , que é um valor excelente em termos de desempenho térmico. Ainda podemos ver na Figura 4.8, que a solução de 63 mm e a solução com aumento de espessura de 1,5 dos elementos em “PVC”, apresentam valores muito próximos, quer nos valores de  $U_f$  quer nos ganhos.

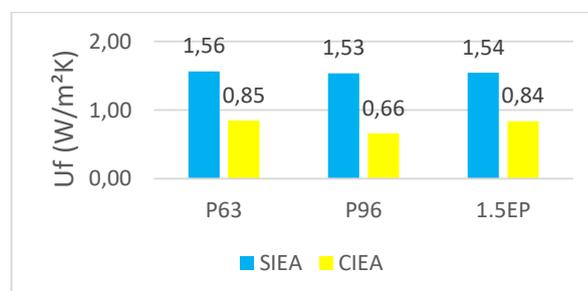


Figura 4.8: Variação do  $U_f$  relativa à utilização de isolamento nos espaços de ar (Caso hipotético a)).

Quadro 4.8: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  para a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar (Caso hipotético a)).

Caso	Uf (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/ Perdas (%)
	SIEA	CIEA	
P63	1,56	0,85	45,76
P96	1,53	0,66	56,95
1.5EP	1,54	0,84	45,62

### 4.3 Caso hipotético b) – D1

Devido a questões de conceção, à semelhança da solução 4.2, não é muito correto considerar o caixilho D1 de madeira. Porém para fins de análise, adota-se para o caixilho cujo material apresenta um  $\lambda$  de 0,13 W/mK, igual ao da madeira (*soft wood*), de modo semelhante ao que foi feito no caso hipotético a). Também na designação das soluções de considera que estas são de madeira (M).

As análises que foram feitas para esta caixilharia foram exatamente as mesmas que para o caso hipotético a), ou seja, aumento de espessura global, aumento de espessura apenas dos elementos de “madeira” e, por último, influência da implementação de isolamento térmico nos espaços de ar.

#### 4.3.1 Influência da Espessura Total do Caixilho

Considerando que o  $\lambda$  da madeira é bastante próximo do PVC, sabemos ambos os materiais apresentam um desempenho térmico semelhante, quando comparados com outros materiais como o alumínio, por exemplo. Assim, espera-se que os resultados obtidos para esta solução serão bastante semelhantes aos do caso hipotético a), simplesmente iremos ter valores de  $U_f$  mais reduzidos. A Figura 4.9 e o Quadro 4.9 confirmam isso mesmo, com valores de  $U_f$  ligeiramente inferiores e as percentagens para os benefícios do aumento de espessura praticamente iguais: 1,94% para a situação sem isolamento nos vazios e 22,35% para a situação oposta, quando para o caso hipotético a) se tinha obtido 1,90% e 22,14% respetivamente.

Também mais uma vez, se verifica que a variação analisada é sempre benéfica, porém, para um aumento de espessura global apresentar benefícios consideráveis, é necessário que haja preenchimento dos espaços de ar não ventilados. É importante realçar ainda que para a

solução M96-CIEA se obteve um  $U_f$  de 0,62 W/m<sup>2</sup>K, valor este que demonstra o elevado desempenho térmico deste caixilho.

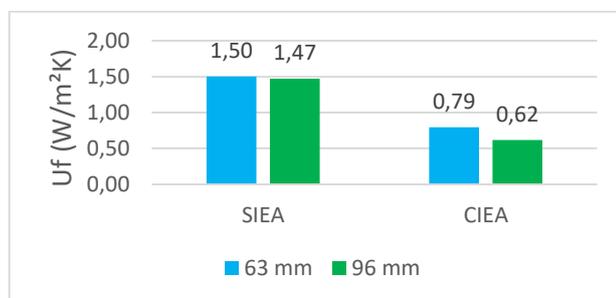


Figura 4.9: Variação do  $U_f$  para um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Caso hipotético b)).

Quadro 4.9: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  com um aumento de espessura do caixilho de 63 mm para 96 mm (Caso hipotético b)).

Caso	$U_f$ (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/ Perdas (%)
	M63	M96	
SIEA	1,50	1,47	1,94
CIEA	0,79	0,62	22,35

#### 4.3.2 Influência da Variação da Espessura dos Elementos de “Madeira”

Como aconteceu para a análise anterior, podemos prever os resultados obtidos para o aumento de espessura dos elementos em “madeira” com base na mesma análise para o caso hipotético a). Mais uma vez, temos resultados muito semelhantes à solução de 4.2.2, ligeiramente inferiores e com os benefícios também muito reduzidos (1,96% e 1,51%), comprovando-se assim o desempenho térmico semelhante entre o caso hipotético a) e o b).

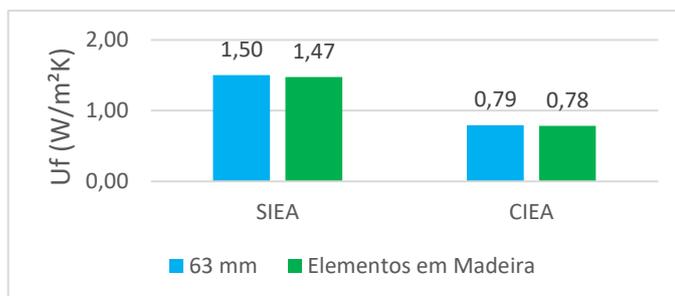


Figura 4.10: Variação do  $U_f$  para um aumento de espessura dos elementos de “Madeira”.

Quadro 4.10: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  com um aumento de espessura dos elementos em “Madeira”.

Caso	Uf (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/ Perdas (%)
	M63	1.5EM	
SIEA	1,50	1,47	1,96
CIEA	0,79	0,78	1,51

### 4.3.3 Influência da Utilização de Isolamento Térmico nos Espaços de Ar

Com esta análise comprovou-se mais uma vez o peso que a presença de isolamento térmico nos espaços de ar tem no desempenho térmico de um caixilho. Se olharmos para os valores de  $U_f$  para as soluções SIEA vemos que os valores obtidos são muito bons, pois um caixilho que apresente um valor de 1,50 W/m<sup>2</sup>K para este parâmetro, é considerado muito bom, do ponto de vista do seu desempenho. Ainda assim, para estes valores que já são reduzidos, a colocação de isolamento térmico nos espaços de ar consegue provocar grandes melhorias, como se observa no Quadro 4.11, onde se chega a alcançar uma melhoria de 58,14% para a solução com 96 mm de espessura.



Figura 4.11: Variação do  $U_f$  relativa à utilização de isolamento nos espaços de ar (Caso hipotético b)).

Quadro 4.11: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  para a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar (Caso hipotético b)).

Caso	Uf (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/ Perdas (%)
	SIEA	CIEA	
M63	1,50	0,79	47,14
M96	1,47	0,62	58,14
1.5EM	1,47	0,78	46,90

#### 4.4 Caixilharia em PVC – D3

O segundo modelo estudado foi aquele que é referido como D3 na norma ISO 10077-2, tendo 66 mm de espessura e cujo material é PVC, como se pode verificar na Figura 4.12. Esta solução apresenta também alguma complexidade, possuindo vários espaços de ar não ventilados, onde em dois destes mesmos espaços estão inseridos reforços em aço, fixados por uma cola à parte de PVC do caixilho. Esta particularidade é bastante interessante para o tipo de estudos efetuados neste trabalho, permitindo analisar não só a sua influência no desempenho térmico da solução, através da maneira como interfere na condução do fluxo de calor, como também verificar a importância do tipo de material de que são feitos estes mesmos reforços.

Para este caixilho analisou-se novamente a influência do aumento da sua espessura em 1,5 vezes, passando de 66 mm a 99 mm, analisou-se também a questão da implementação de isolamento nos vazios e por último, efetuou-se uma análise à influência do reforço interno do caixilho em aço, colocando no seu lugar uma peça com as mesmas dimensões, mas em PVC.

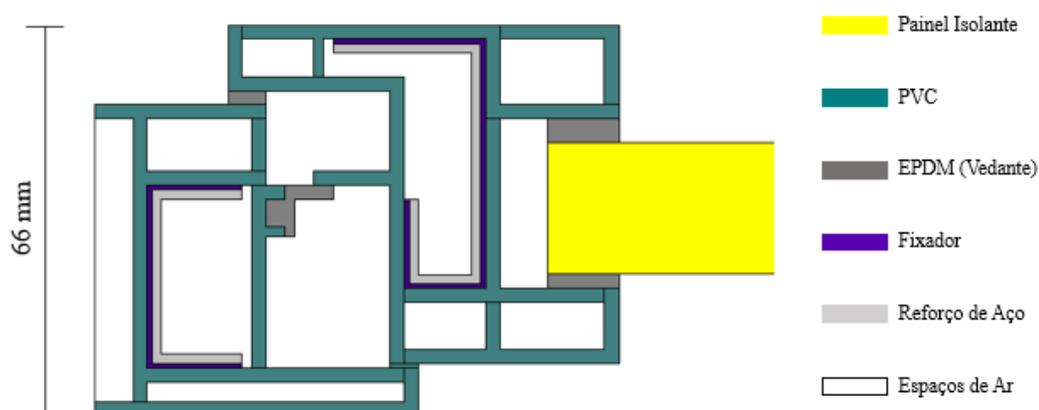


Figura 4.12: Caixilharia em PVC - solução inicial.

##### 4.4.1 Influência da Espessura Total do Caixilho

Das análises feitas até este ponto, relativas ao aumento de espessura do caixilho, já sabemos que, quando este é constituído por um material com um  $\lambda$  reduzido, a alteração considerada neste ponto irá melhorar a solução, uma vez que estamos a aumentar a quantidade de material com uma condutibilidade térmica baixa. Este conceito volta a ser verificado para esta modificação na caixilharia de PVC (D3). Como esta solução apresenta um elemento que as anteriores não possuíam, o reforço em aço, começemos por analisar a influência do mesmo.

Na Figura 4.13 e Quadro 4.12 são apresentados os resultados obtidos sendo o significado das siglas utilizadas o seguinte: RA – Reforço em aço; RP - Reforço em PVC.

Considerando os resultados do Quadro 4.12, é notória a diferença de benefícios entre o reforço de aço e a mesma peça em PVC. Numa solução em que não existe isolamento de espaços de ar e em que o reforço é em aço, constatamos que o aumento total da espessura piora ligeiramente a solução (0,03 %), contrariamente ao que se verifica para o mesmo caso, mas com reforço em PVC, onde a mesma alteração provoca uma melhoria no valor de  $U_f$  de 5,61 %. Se colocarmos isolamento nos vazios, a diferença nos benefícios é semelhante, mas desta vez, com o reforço de aço, já se obtém uma melhoria de 14,31 % e com o reforço de PVC uma melhoria de 20,29 %. De qualquer modo, todas as soluções analisadas apresentam valores de  $U_f$  muito bons, sobretudo quando temos o reforço em PVC.

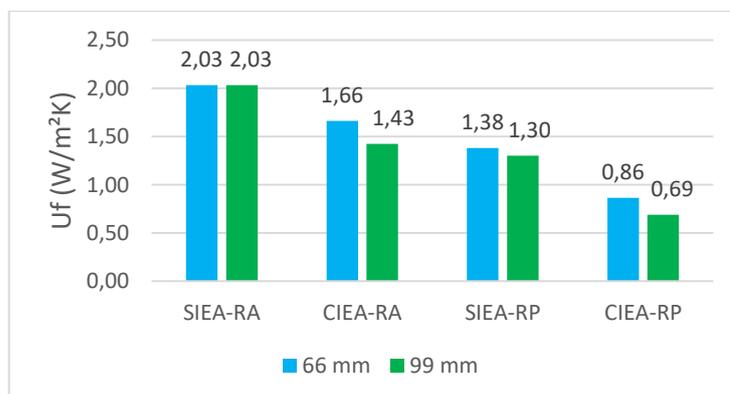


Figura 4.13: Variação do  $U_f$  para um aumento de espessura do caixilho de 66 mm para 99 mm (PVC).

Quadro 4.12: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  com um aumento de espessura do caixilho de 66 mm para 99 mm (PVC).

Caso	$U_f$ ( $W/m^2K$ )		Ganhos/ Perdas (%)
	P66	P99	
SIEA-RA	2,03	2,03	-0,03
CIEA-RA	1,66	1,43	14,31
SIEA-RP	1,38	1,30	5,61
CIEA-RP	0,86	0,69	20,29

#### 4.4.2 Influência da Utilização de Isolamento Térmico nos Espaços de Ar

Como foi averiguado nos pontos 4.1.4, 4.2.3 e 4.3.3, o preenchimento dos espaços de ar não ventilados com isolamento, induz sempre uma melhoria nas caixilharias. Como podemos verificar na Figura 4.14 e no Quadro 4.13, o mesmo se verificou para este caso. Para a solução com 99 mm de espessura e reforço em PVC, a implementação do isolante permite uma melhoria de 47,13 %, atingindo-se um  $U_f$  de 0,69 W/m<sup>2</sup>K. Novamente, podemos verificar no Quadro 4.13, que a percentagens de ganhos é maior para as soluções que não possuem o reforço em aço, mostrando assim o seu grande peso no desempenho global de um caixilho em PVC.

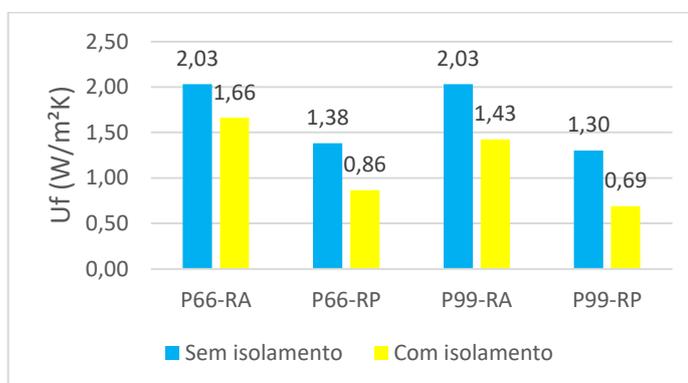


Figura 4.14: Variação do  $U_f$  relativa à utilização de isolamento nos espaços de ar (PVC).

Quadro 4.13: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  para a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar (PVC).

Caso	$U_f$ (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/ Perdas (%)
	SIEA	CIEA	
P66-RA	2,03	1,66	18,12
P66-RP	1,38	0,86	37,40
P99-RA	2,03	1,43	29,86
P99-RP	1,30	0,69	47,13

#### 4.4.3 Influência do tipo de reforço utilizado

Como foi mencionado anteriormente, também é importante perceber a influência direta que o tipo de reforço tem para esta caixilharia. Rapidamente percebemos que os valores de  $U_f$  se reduzem bastante na presença de um reforço de PVC, como já se tinha verificado nas análises

4.4.1 e 4.4.2. Porém, esta análise permite-nos constatar que as melhorias, que a alteração do aço por PVC promove, são bastante elevadas. No caso de termos isolamento nos espaços de ar, atingem-se melhorias do desempenho térmico de 48,05 % e 51,68 %, para as soluções de 66 mm e 99 mm respetivamente. Nos casos de espaços de ar sem preenchimento as melhorias são de 32,05 % e 35,88 %, para as mesmas espessuras. Deste modo, podemos verificar que a simples alteração do material constituinte do elemento de reforço do caixilho promoveu melhorias no desempenho do caixilho muito significativas.

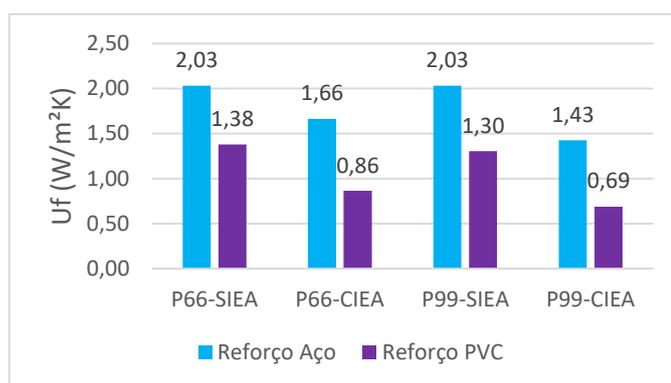


Figura 4.15: Variação do  $U_f$  relativa ao tipo de reforço utilizado.

Quadro 4.14: Ganhos e perdas para o valor  $U_f$  para a alteração do reforço utilizado.

Caso	$U_f$ (W/m²K)		Ganhos/ Perdas (%)
	RA	RP	
P66-SIEA	2,03	1,38	32,05
P66-CIEA	1,66	0,86	48,05
P99-SIEA	2,03	1,30	35,88
P99-CIEA	1,43	0,69	51,68

#### 4.5 Caixilharia em Madeira – D4

A última caixilharia a ser analisada, foi a caixilharia em madeira, representada na Figura 4.16 e que na norma ISO 10077-2 é designada como D4. Sendo esta é uma solução em madeira, é normal que seja bastante homogénea, devido ao número reduzido de espaços de ar e reentrâncias, acabando por ser uma caixilharia “maciça”, comparativamente às analisadas anteriormente.

Este é um caixilho mais simples, do ponto de vista geométrico. Por esta razão, as análises efetuadas foram o aumento de espessura global de 66 mm para 99 mm e a influência do preenchimento dos vazios com isolamento térmico.

Considerando que o  $\lambda$  da madeira utilizada (*soft wood*) é de 0,13 W/mK e atendendo à grande quantidade deste material que constitui o caixilho, podemos esperar valores de  $U_f$  reduzidos, mesmo para a solução inicial, sem qualquer tipo de alterações.

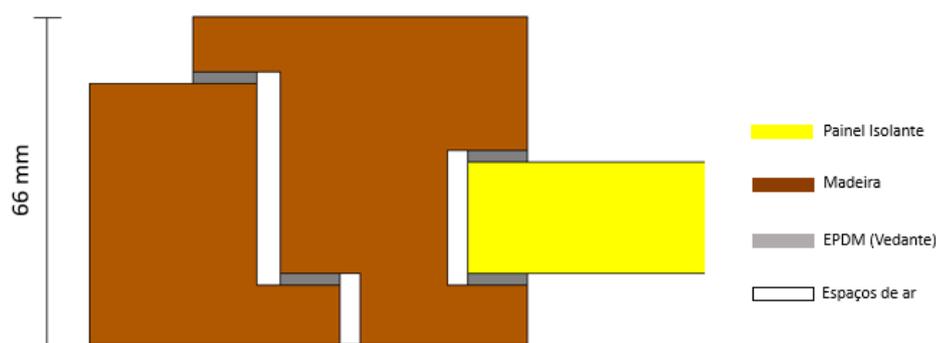


Figura 4.16: Caixilharia em Madeira - solução inicial.

#### 4.5.1 Influência da Espessura Total do Caixilho

Como seria expectável, o aumento de espessura desta solução constitui uma alteração benéfica para o desempenho térmico da mesma. Os valores de  $U_f$  das soluções com 66 mm (com e sem isolamento) são por si muito reduzidos. No entanto, com o aumento de espessura foi possível melhorar ambas as soluções, obtendo-se os valores de 1,14 W/m<sup>2</sup>K e 1,08 W/m<sup>2</sup>K, para SIEA e CIEA respetivamente.

Em termos percentuais, vemos que os benefícios desta alteração acabam por ser mais relevantes quando comparados com outras soluções analisadas anteriormente. Por exemplo, se compararmos a solução de madeira, de 66 mm e SIEA com a solução de PVC, de 66mm, SIEA e com reforço em PVC, temos que para o primeiro caso a melhoria foi de 16,63 %, enquanto que no segundo a melhoria foi de 5,61 %. Esta diferença certamente se deve ao reduzido número de vazios deste modelo D4.

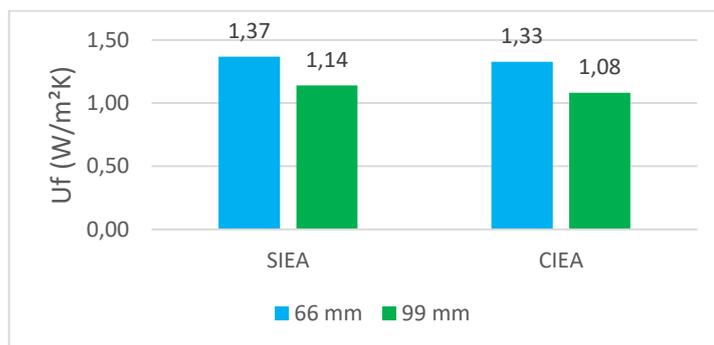


Figura 4.17: Variação do  $U_f$  para um aumento de espessura do caixilho de 66 mm para 99 mm (Madeira).

Quadro 4.15: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  com um aumento de espessura do caixilho de 66 mm para 99 mm (Madeira).

Caso	$U_f$ (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/ Perdas (%)
	M66	M99	
SIEA	1,37	1,14	16,63
CIEA	1,33	1,08	18,35

#### 4.5.2 Influência da Utilização de Isolamento Térmico nos Espaços de Ar

Para esta caixilharia, o preenchimento dos vazios com isolamento é uma alteração que terá pouco influência, uma vez que estes são de número reduzido. Dos três espaços de ar existentes, apenas se colocou isolamento no vazio junto ao painel isolante, uma vez que dos dois restantes, um é uma reentrância de ar e no outro o preenchimento comprometeria o funcionamento da janela.

Ainda assim, apesar de se colocar isolamento apenas num dos espaços de ar, obtiveram-se melhorias de 3,03 % e 5,02 % para as espessuras de 66 mm e 99 mm respetivamente.

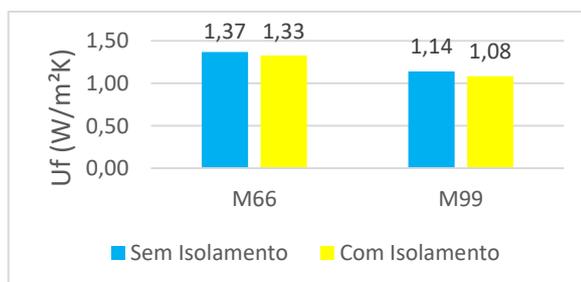


Figura 4.18: Variação do  $U_f$  relativa à utilização de isolamento nos espaços de ar (Madeira).

Quadro 4.16: Ganhos e perdas para o valor de  $U_f$  para a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar (Madeira).

Caso	$U_f$ (W/m <sup>2</sup> K)		Ganhos/ Perdas (%)
	SIEA	CIEA	
M66	1,37	1,33	3,03
M99	1,14	1,08	5,02

#### 4.5.3 Comparação de todas as soluções

Após serem efetuadas as análises pretendidas a todas as caixilharias selecionadas, decidiu-se fazer uma comparação generalizada entre todos os valores de  $U_f$  obtidos previamente. Assim, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 4.19, onde podemos ver os coeficientes de transmissão térmica obtidos para cada uma das soluções estudadas.

Os primeiros aspetos que claramente se evidenciam neste gráfico, é a diferença de desempenho dos caixilhos de alumínio comparativamente aos restantes e as melhorias significativas que o preenchimento dos espaços de ar com isolamento térmico origina.

Das soluções de alumínio, apenas aquelas que possuem corte-térmico e isolamento nos espaços de ar conseguem apresentar bons valores de  $U_f$  e minimamente próximos das soluções constituídas por um material diferente, nomeadamente as soluções A63-2CT-CIEA e A96-CT-CIEA (1,38 e 1,63 W/m<sup>2</sup>K respetivamente). Também conseguimos perceber a grande importância que o corte-térmico tem num caixilho deste tipo de material, uma vez que para os casos em que este não é utilizado, são atingidos valores máximos de  $U_f$ , todos eles superiores a 6 W/m<sup>2</sup>K.

Olhando de seguida para os casos hipotéticos a) e b), conseguimos verificar que o comportamento do PVC e da madeira, em termos de desempenho térmico, são muito semelhantes, sendo que as diferenças existentes devem-se precisamente à diferença de  $\lambda$  dos materiais. Nestes dois casos, qualquer uma das soluções apresenta um desempenho muito bom, sendo que quando os espaços de ar são preenchidos com isolamento térmico, os valores obtidos correspondem a um desempenho térmico excelente. O aumento global de espessura e a implementação de isolamento nos espaços de ar, são as alterações que permitem atingir os valores de desempenho máximo, sendo estes 0,66 W/m<sup>2</sup>K no caso a) e 0,62 W/m<sup>2</sup>K para o caso b).

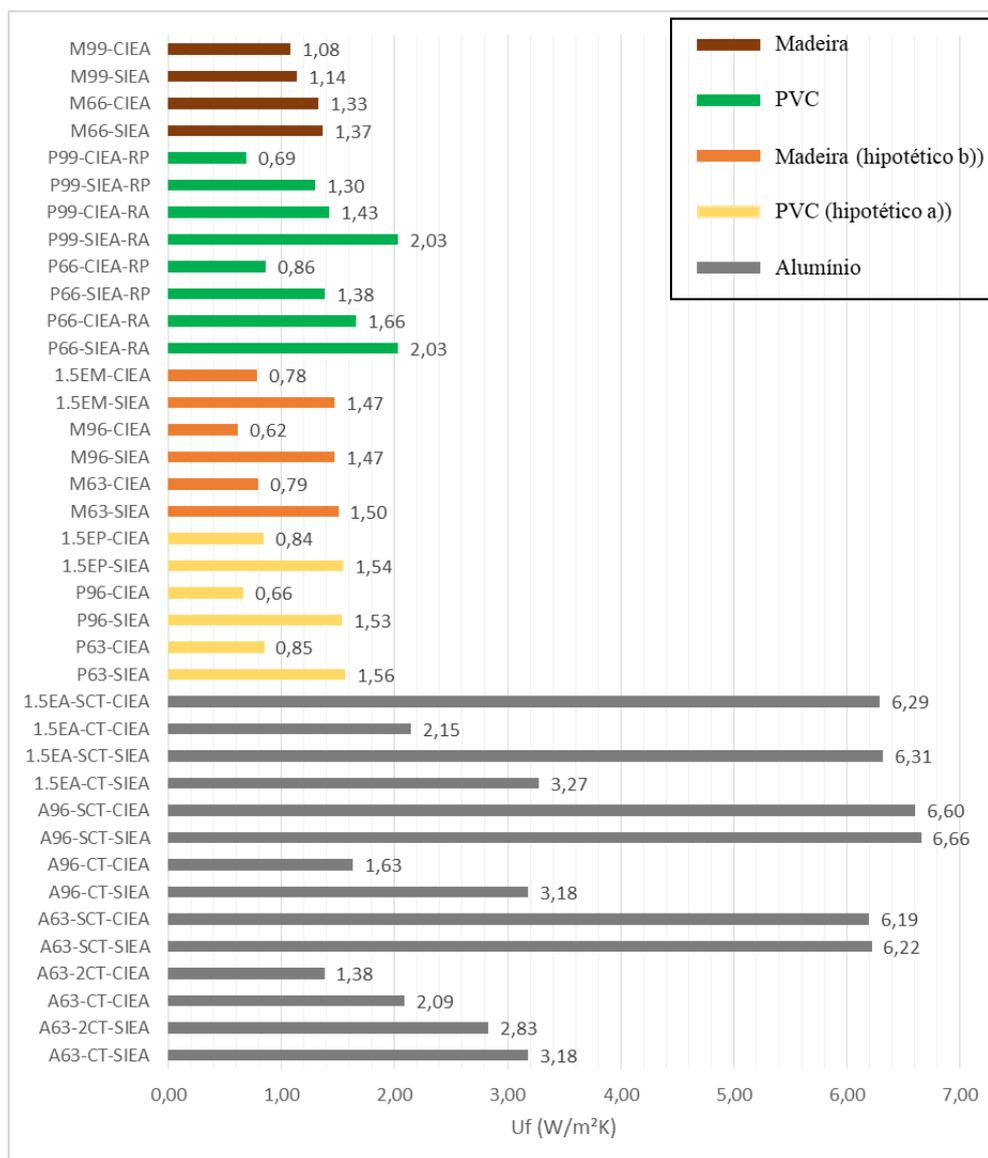


Figura 4.19:  $U_f$  de todas as soluções estudadas.

Para a caixilharia em PVC, podemos começar por constatar nos resultados obtidos para as situações em que o reforço interior é de aço, onde se verificam os resultados mais elevados, para este tipo de caixilho. Ainda assim, estes mesmos valores variam de 1,43 a 2,03 W/m²K, que quando comparados com os valores da caixilharia de alumínio nos permite concluir que o desempenho destas soluções é bastante satisfatório. Considerando as restantes soluções para este caixilho, ou seja, as que possuem a peça com as mesmas dimensões que o reforço em PVC, vemos que os resultados obtidos traduzem-se num ótimo desempenho térmico, sobretudo na presença de isolamento nos vazios, (P66-CIEA-RP e P99-CIEA-RP).

Por último, resta-nos avaliar o desempenho do caixilho de madeira. Devido à simplicidade desta solução, vemos que as alterações avaliadas não promoveram alterações muito significativas ao desempenho da mesma, sendo M66-SIEA (com 1,37 W/m<sup>2</sup>K) o “pior” alcançado e M99-CIEA (com 1,08 W/m<sup>2</sup>K) o melhor. Assim, podemos verificar que para este caso, qualquer uma das soluções estudadas apresenta um desempenho térmico muito bom. Conclui-se assim a primeira parte da análise de resultados desta dissertação, onde foi possível comprovar a grande importância que pequenas alterações na constituição de uma caixilharia, não só a nível dos materiais constituintes, mas também a nível de questões geométricas, sobretudo espessuras, acabam por ter no desempenho térmico global de um elemento deste tipo.

#### 4.6 Análise do Coeficiente de Transmissão Térmica Linear

Contrariamente ao que acontecia nos casos estudados anteriormente, quando se coloca um vidro numa determinada caixilharia, é gerado um fluxo de calor adicional, que atravessa a solução envidraçada na zona de ligação entre os dois elementos. Este fluxo é quantificado através do coeficiente de transmissão térmica linear, que por sua vez é calculado através de expressão (3.3).

Esta análise tem como finalidade obter o valor de  $\Psi$  para um conjunto de soluções, tentando entender como este varia mediante determinadas alterações, tais como o tipo de vidro utilizado ou aumento de espessura da caixilharia e ainda, qual a sua influência no desempenho global de uma janela.

A seleção dos vidros foi feita tendo em conta dois fatores. O primeiro foi o valor do  $U_g$ , onde de definiu os valores de 2,8 W/m<sup>2</sup>K e 1,1 W/m<sup>2</sup>K, correspondendo o primeiro a um vidro duplo comum e o segundo, a um vidro duplo de alto desempenho. O segundo fator foi a espessura do vidro, alterando-se a largura do espaço de ar e o  $\lambda$  do mesmo, para que se mantivessem os valores de  $U_g$ . Deste modo, escolheram-se quatro vidros duplos, cujas características e designações se encontram no Quadro 4.17.

Quadro 4.17: Tipos de vidro utilizados para o cálculo de  $\Psi$ .

Vidro	Espessuras (mm)	$U_g$ (W/m <sup>2</sup> K)
V1	4(12)4	2,8
V2	4(12)4	1,1
V3	4(15)4	2,8
V4	4(15)4	1,1

Relativamente às caixilharias utilizadas, considerou-se uma de madeira, baseada na D4, apresentada na ISO 10077-2, considerando as espessuras 66 e 99 mm e os quatro vidros, V1, V2, V3 e V4 para cada uma delas. De seguida, analisou-se um caixilho em PVC, igual ao D3 utilizado previamente e mencionado na norma em uso, considerando-se as mesmas duas espessuras, os dois tipos de reforços do caixilho (aço e PVC), mas desta vez apenas os vidros V1 e V2. Por último, uma secção em alumínio, igual à D1 da norma referida anteriormente, analisando-se uma solução com corte térmico e uma sem corte térmico, ambas com 66 mm de espessura, colocando-se os vidros V1, V2, V3 e V4 em cada uma delas. Todas estas soluções, bem como as análises a que foram sujeitas, irão ser expostas de forma mais detalhada seguidamente.

#### 4.6.1 Caixilharia de Madeira – D4

Conforme foi mencionado, começou por estudar-se o caixilho em madeira. Com o conjunto de soluções geradas, pretende-se averiguar qual o efeito da utilização de um vidro com um bom desempenho e um vidro corrente, que diferenças existem quando se aumenta a espessura do caixilho e ainda, o que o aumento de espessura do espaço de ar do vidro, mantendo o  $U_g$  do mesmo, provoca no valor de  $\Psi$ .

Aplicando o procedimento enunciado em 3.4, alcançaram-se os resultados para os vários caixilhos analisados. A Figura 4.20 exhibe todas as soluções modeladas no *THERM*, com as suas designações e os respetivos gradientes de temperaturas obtidos. O aspeto mais perceptível analisando os gradientes, é sem dúvida a diferença de desempenho entre os vidros V2 e V4 ( $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), quando comparados com os vidros V1 e V3 ( $U_g = 2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), em que, nos vidros com melhor performance, as suas temperaturas a nível interior chegam a ser sensivelmente  $18^\circ \text{ C}$ . Como seria de esperar, como todos os caixilhos são modelos semelhantes e do mesmo material, o seu desempenho térmico é muito semelhante.

Apesar de ser possível constatar algumas alterações térmicas na zona de ligação entre o vidro e a caixilharia, é difícil perceber como realmente varia o valor de  $\Psi$ , observando simplesmente os gradientes de temperatura. Para tal, é necessário analisar e comparar os valores obtidos para cada solução, que se encontram ilustrados no quadro seguinte.

Como se pode verificar, para V1 temos valores de  $\Psi$  nulos. Na realidade, assumiu-se que são zero, apesar de os valores obtidos não o serem, mas sim valores negativos muito próximos disso. A razão pela qual se obtiveram estes valores, poderá estar relacionada com a diferença de desempenho entre o caixilho e o vidro. Para além disso, também a espessura do vidro

poderá contribuir para que isto se verifique, já que para a mesma diferença de  $U$  entre caixilhos e vidro V3 (vidro com mesmo  $U$  que V1, mas mais espesso) obtiveram-se valores positivos para  $\Psi$ .

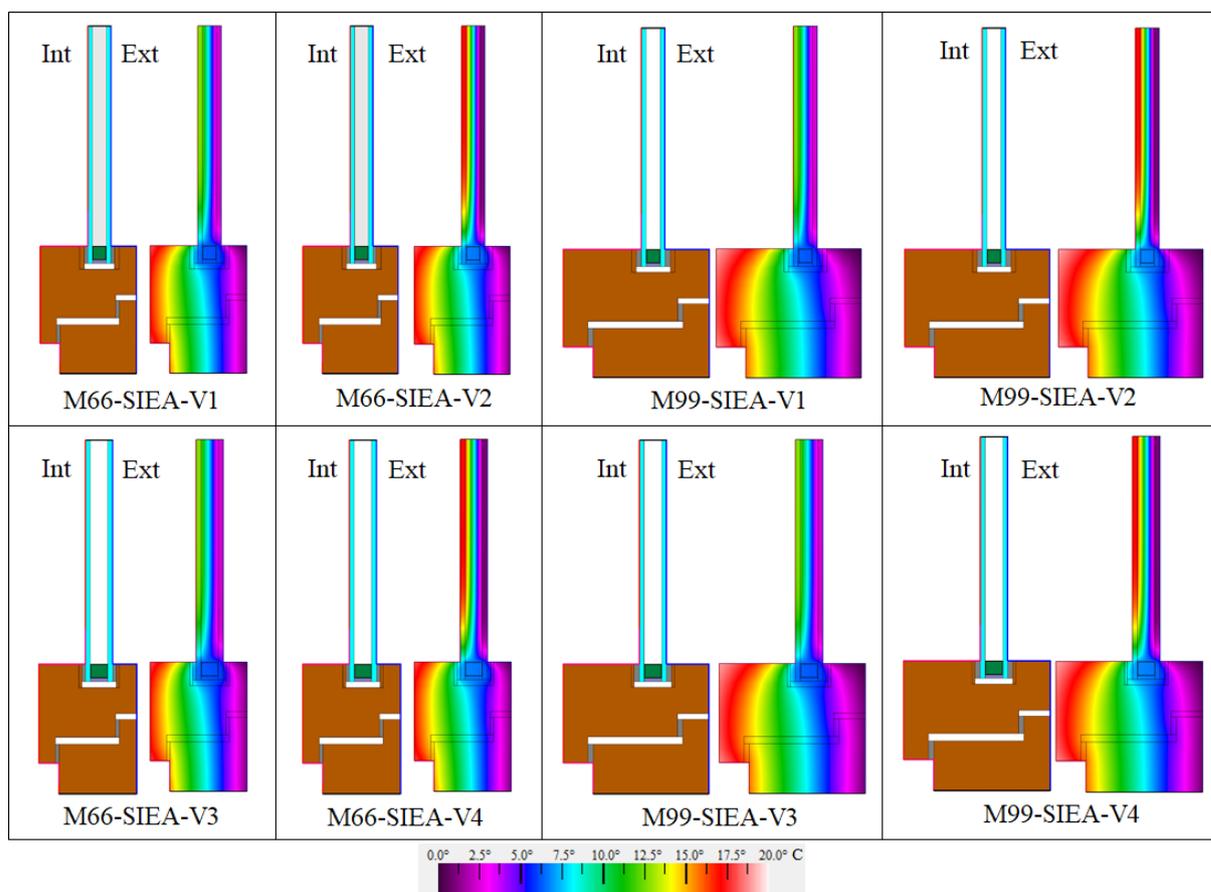


Figura 4.20: Gradiente de temperaturas para as soluções em Madeira (D4).

É também notório que os vidros com um coeficiente de transmissão térmica de  $2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ou seja, com um desempenho inferior, apresentam coeficientes de transmissão térmica linear inferiores. Em oposição, soluções com vidros com um melhor desempenho térmico,  $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , (próximo do obtido para a caixilharia) apresentam valores mais elevados para o coeficiente em análise. Também é visível que o aumento de espessura (M66 para M99), qualquer que seja o tipo de vidro, promove sempre uma ligeira redução dos valores de  $\Psi$ . O último aspeto observável, é o efeito do aumento da espessura do espaço de ar (trocando o V1 por um V3 e um V2 por um V4), que provoca o aumento do fluxo de calor na ligação caixilho com vidro.

Quadro 4.18: Valores de  $\Psi$  para soluções em Madeira (D4).

Solução	$\Psi$ (W/mK)			
	V1	V2	V3	V4
M66-SIEA	0,000	0,037	0,025	0,067
M99-SIEA	0,000	0,034	0,022	0,064

#### 4.6.2 Caixilharia de PVC – D3

Para as soluções consideradas em PVC, analisou-se novamente o aumento de espessura do caixilho, o efeito da qualidade do vidro, tendo-se utilizado apenas os vidros V1 e V2 e para este caso em particular, ainda se analisou a diferença do material utilizado no reforço da caixilharia e qual o seu efeito no valor do coeficiente de transmissão térmica linear. Utilizando um procedimento análogo ao que foi adotado para o caixilho de madeira, obtiveram-se os gradientes de temperatura para as respetivas soluções estudadas, conforme se pode observar na Figura 4.20 e os seus valores de  $\Psi$ , que por sua vez estão presentes no Quadro 4.19.

Tal como se verificou em 4.6.1, um dos aspetos mais perceptíveis é a diferença de desempenho entre os dois tipos de vidro. Também mais uma vez conseguimos constatar a grande influência que o tipo de reforço tem no desempenho global de uma solução. Se observarmos com atenção a zona de ligação entre o vidro e o caixilho de todas as soluções, vemos que para os casos em que o reforço é de aço, as temperaturas neste local tendem a ser sempre ligeiramente inferiores, comparativamente às respetivas soluções com o reforço em PVC.

Avaliando concretamente os valores de  $\Psi$ , presentes no Quadro 4.19, deparamo-nos novamente com valores nulos para as situações que possuem o vidro V1. Como foi referido para o caso D4, os valores obtidos para estes casos eram negativos, mas como o coeficiente de transmissão térmica linear não o pode ser, os mesmos assumem-se como 0. Para estes casos, os valores de  $U_{total}$  determinados no *THERM*, que nos permite determinar o parâmetro  $L_{\Psi}^{2D}$ , são inferiores a 2,8 W/m<sup>2</sup>K, sendo assim aceitável que se possam obter valores inferiores a zero nestas situações.

Quadro 4.19: Valores de  $\Psi$  para soluções em PVC (D3).

Solução	$\Psi$ (W/mK)	
	V1	V2
P66-SIEA-RA	0,000	0,025
P99-SIEA-RA	0,000	0,023
P66-SIEA-RP	0,000	0,043
P99-SIEA-RP	0,000	0,042

A mudança da qualidade do vidro é, mais uma vez, um fator que tende a influenciar os valores de  $\Psi$ , aumentando-os sempre que o desempenho do vidro aumenta. Também como já se tinha verificado para a situação de madeira, o aumento de espessura do caixilho promove uma ligeira redução do coeficiente em estudo. A alteração direta do material do reforço também tem uma grande influência nos valores obtidos, sendo que, como se pode verificar, o uso de um reforço em PVC, para este tipo de caixilharia, induz um aumento do valor de  $\Psi$  em quase o dobro.

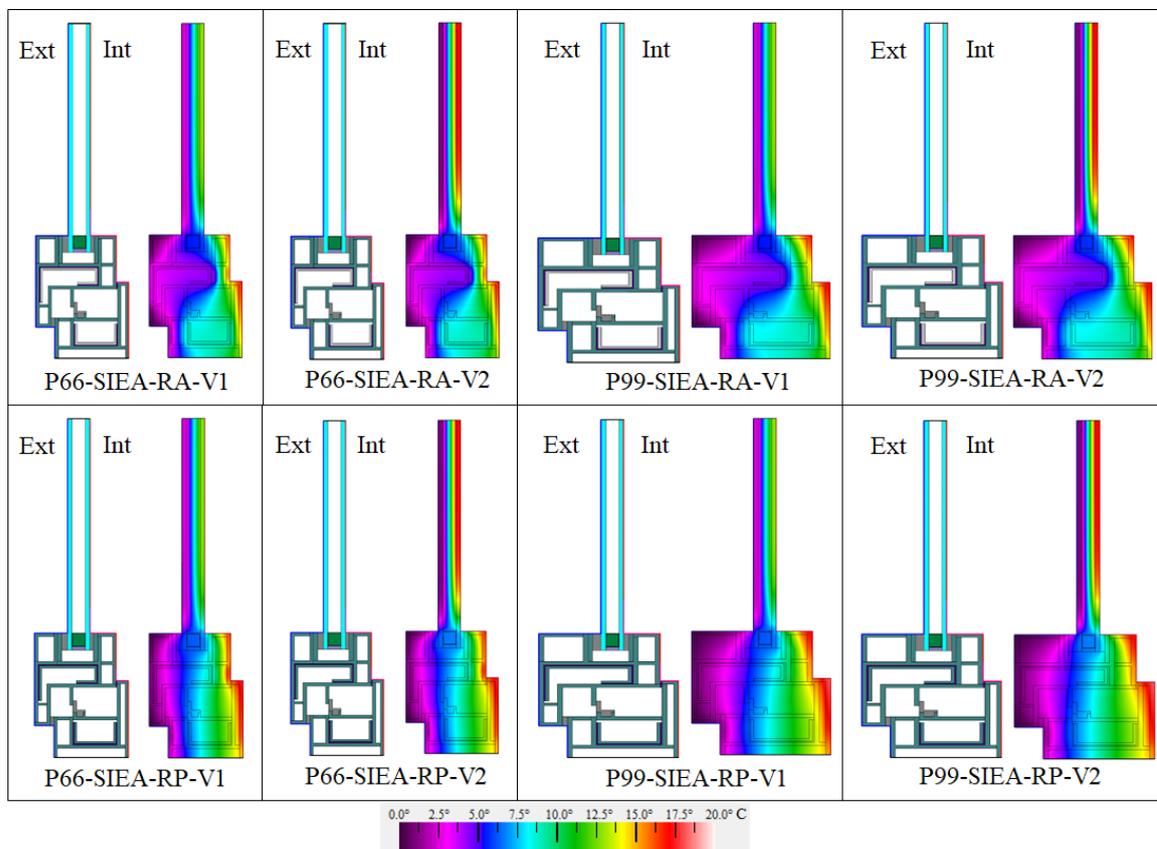


Figura 4.21: Gradiente de temperaturas para as soluções em PVC (D3).

### 4.6.3 Caixilharia em Alumínio – D1

Para terminar o estudo do coeficiente de transmissão térmica linear, analisaram-se várias soluções em alumínio. Devido à possibilidade de utilizar corte-térmico neste modelo, é de grande interesse perceber de que maneira é que este elemento influencia os valores de  $\Psi$ . Assim, as soluções geradas consistem na presença ou ausência de corte térmico, combinando-se estas duas situações com os quatro tipos de vidro, estudando-se assim não só a influência da qualidade do vidro, como também a sua espessura.

Analisando os gradientes de temperaturas presentes na Figura 4.22, verificamos que para além da grande diferença existente entre os vidros V1 e V3, comparativamente com os vidros V2 e V4, a utilização, ou não, de corte-térmico tem um peso muito elevado nas temperaturas da ligação entre o vidro e a caixilharia. Para as situações em que foi utilizado corte-térmico, as temperaturas, para a referida ligação, encontram-se algures entre os 5°C e os 6,25°C, enquanto que para a situação oposta, as temperaturas variam entre os 2,5°C e os 5°C, aproximadamente. Também é importante realçar no peso que um caixilho com um  $U$  elevado tem no desempenho global de uma solução, sendo que, como se pode observar, mesmo utilizando-se um ótimo vidro, este não tem qualquer influência na zona da caixilharia e na ligação entre os dois elementos, como se pode verificar em todos os casos sem corte-térmico.

Analisando agora o Quadro 4.20, podemos observar de imediato que a ausência de corte térmico induz uma redução dos valores de  $\Psi$ , como já se vinha a verificar nas análises interiores, ou seja, um caixilho com pior desempenho corresponderá a um  $\Psi$  inferior. Também na qualidade dos vidros se volta a verificar este fenómeno, isto é, vidros com um valor de  $U_g$  menor apresentam valores de  $\Psi$  inferiores quando comparados aos vidros de melhor desempenho.

Quadro 4.20: Valores de  $\Psi$  para soluções em Alumínio (D1).

Solução	$\Psi$ (W/mK)			
	V1	V2	V3	V4
A63-CT-SIEA	0,020	0,062	0,057	0,083
A63-SCT-SIEA	0,000	0,010	0,039	0,070

Conforme aquilo que se tinha constatado para a caixilharia de madeira, o aumento de espessura do espaço de ar do vidro promove um aumento do valor de  $\Psi$ , independentemente de existir corte térmico no caixilho ou não.

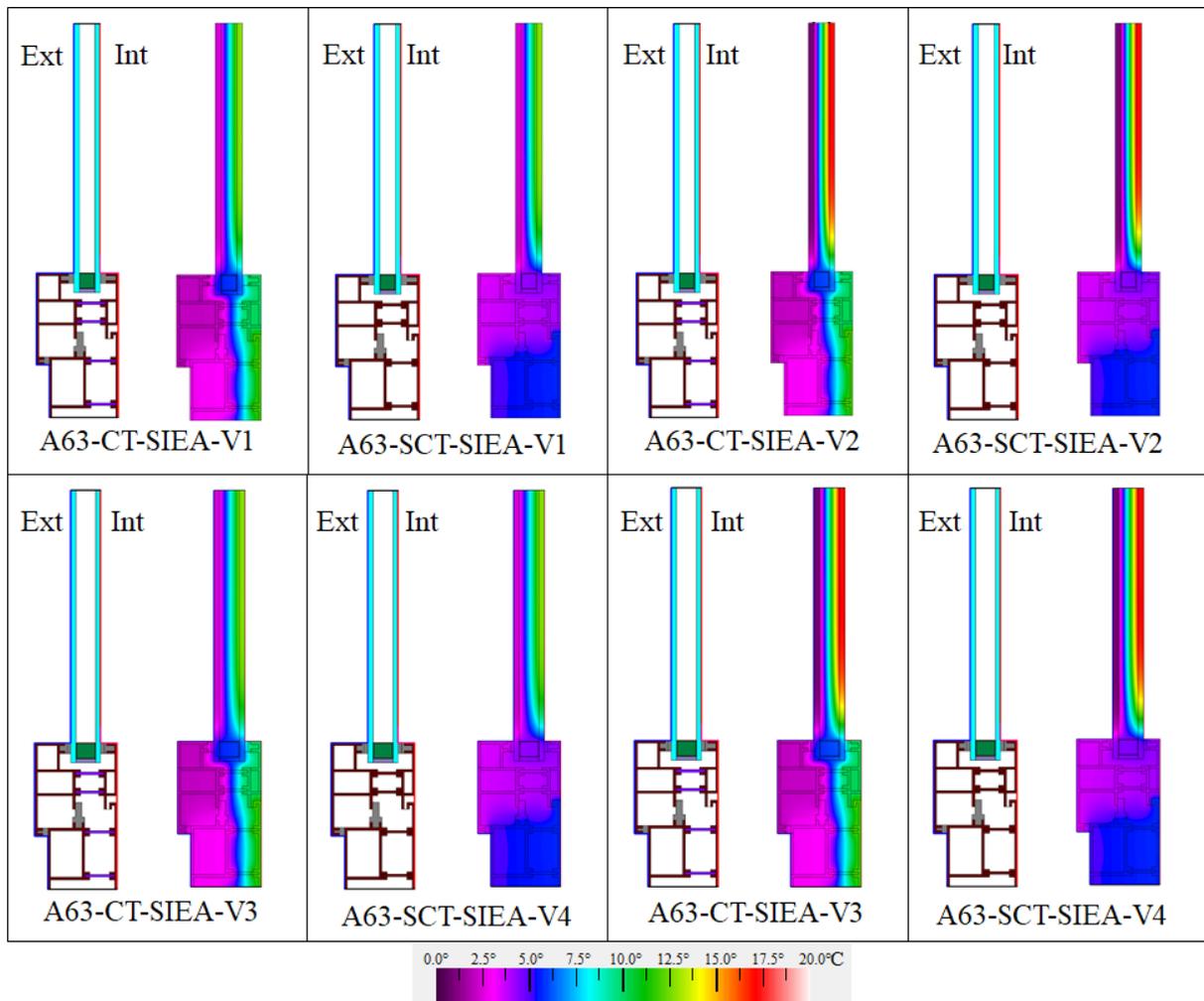


Figura 4.22: Gradiente de temperaturas para as soluções em Alumínio (D1).

#### 4.7 Coeficiente de Transmissão Térmica de Janelas

Após o cálculo e a avaliação de todos os valores de  $U_f$  e  $\Psi$ , decidiu-se ainda estudar que alterações ocorreriam ao coeficiente de transmissão térmica de uma janela,  $U_w$ , mediante determinadas alterações, utilizando para isso alguns dos casos utilizados previamente neste trabalho. Deste modo, começou-se por definir quais os tipos de janelas a serem considerados nesta análise. Numa tentativa de simplificar este procedimento, optou-se por avaliar três tipos de janelas de duas folhas que, tendo em conta as suas dimensões, se classificaram como grande, média e pequena, conforme podemos observar no Quadro 4.21. A largura definida para a caixilharia, perpendicular ao fluxo de calor e que nos permite determinar o valor de  $A_f$ , é de 90 mm, correspondendo assim a uma janela comum.

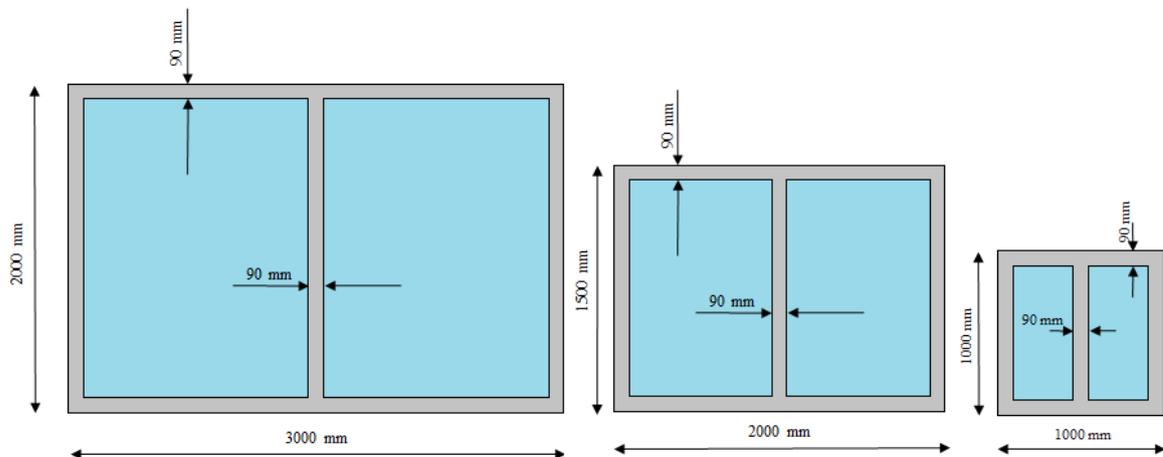


Figura 4.23: Janelas tipo utilizadas para análise do  $U_w$ .

Quadro 4.21: Características das janelas utilizadas para o cálculo de  $U_w$ .

Janela	Folhas	Largura (m)	Altura (m)	Ag (m <sup>2</sup> )	Af (m <sup>2</sup> )
Grande	2	3	2	4,97	1,03
Média	2	2	1,5	2,28	0,72
Pequena	2	1	1	0,60	0,40

#### 4.7.1 $U_w$ para caixilharia de Alumínio

Para a análise das janelas em alumínio selecionou-se o caixilho com 66 mm, com e sem corte térmico, com os vidros V1 e V2, ou seja, vidros com a mesma espessura e desempenhos diferentes. Os resultados obtidos neste processo encontram-se tabelados no Quadro 4.22. Por questões de simplicidade, as designações das janelas não irão conter a sigla referente à ausência de isolamento nos espaços de ar (SIEA).

O primeiro fator que se pode verificar e que é transversal às quatro soluções analisadas é que, quanto maior for a janela, menor é o  $U_w$ , independentemente do tipo de vidro ou da qualidade do caixilho. Também são notórias as diferenças entre a utilização do vidro V1 (2,8 W/m<sup>2</sup>K) e do vidro V2 (1,1 W/m<sup>2</sup>K), sendo que, no caso da janela possuir um vidro com um desempenho inferior, o seu  $U_w$  é superior relativamente à utilização de um vidro com um bom desempenho. O último aspeto que podemos verificar através da análise elaborada, é o efeito do corte térmico. Como é expectável, a presença de corte térmico na caixilharia implica que esta, em princípio, irá apresentar um coeficiente de transmissão térmica reduzido. Assim, se o

caixilho tiver um bom desempenho, o  $U_w$  da janela será sempre inferior ao de uma solução em que o caixilho tenha um desempenho inferior, ou seja, não possua corte térmico. É possível confirmar este comportamento, constatando que os valores obtidos para as soluções com corte térmico são inferiores aos seus respetivos que não possuem este elemento.

Quadro 4.22: Valores de  $U_w$  para janelas com caixilharia de alumínio.

Casos	$U_f$ (W/m <sup>2</sup> K)	$U_g$ (W/m <sup>2</sup> K)	Janela	$U_w$ (W/m <sup>2</sup> K)
A66-CT-V1	3,78	2,8	Grande	3,12
			Média	3,24
			Pequena	3,52
A66-CT-V2	3,78	1,1	Grande	1,74
			Média	2,00
			Pequena	2,59
A66-SCT-V1	6,86	2,8	Grande	3,57
			Média	3,86
			Pequena	4,57
A66-SCT-V2	6,86	1,1	Grande	2,19
			Média	2,62
			Pequena	3,66

Para uma janela grande, que possua um caixilho em alumínio com 66 mm de espessura, corte térmico e um vidro de boa qualidade, foi possível alcançar um  $U_w$  de 1,75 W/m<sup>2</sup>K, o que significa que esta janela poderia contribuir muito para a eficiência energética do edifício em que fosse inserida. Por outro lado, utilizar uma janela pequena, com um caixilho de alumínio com 66 mm, sem corte térmico e um vidro corrente, não seria uma boa solução, conforme indica o seu valor de  $U_w$ , 4,57 W/m<sup>2</sup>K.

#### 4.7.2 $U_w$ para caixilharia de PVC

Relativamente ao estudo de janelas com caixilharia em PVC, analisou-se novamente a influência da qualidade do vidro, considerando os vidros V1 e V2 e também a diferença de espessura no caixilho, para 66 mm e 99 mm.

Neste caso, o efeito do tamanho da janela irá depender do tipo de vidro utilizado. Quando se utiliza o vidro corrente (V1), o valor de  $U_w$  tende a diminuir com a redução do tamanho da janela, contrariamente ao que se tinha constatado para a janela com caixilho em alumínio. Por outro lado, se se considerar o vidro de alto desempenho (V2), o desempenho global da janela tende a ser maior, quanto maior for o seu tamanho.

Quadro 4.23: Valores de  $U_w$  para janelas com caixilharia de PVC.

Casos	$U_f$ (W/m <sup>2</sup> K)	$U_g$ (W/m <sup>2</sup> K)	Janela	$U_w$ (W/m <sup>2</sup> K)
P66-RP-V1	1,96	2,8	Grande	2,63
			Média	2,56
			Pequena	2,40
P66-RP-V2	1,96	1,1	Grande	1,39
			Média	1,49
			Pequena	1,72
P99-RP-V1	1,88	2,8	Grande	2,61
			Média	2,54
			Pequena	2,36
P99-RP-V2	1,88	1,1	Grande	1,37
			Média	1,47
			Pequena	1,68

Conforme se pode verificar através do Quadro 4.23, o aumento de espessura do caixilho não tem impacto significativo nos valores de  $U_w$ . É natural que, como estamos na presença de um elemento em PVC, o seu aumento de espessura irá promover benefícios relativamente ao desempenho térmico da caixilharia e consequentemente da janela. No entanto, as melhorias que esta alteração fornece são pouco significativas.

A qualidade do vidro volta a ser o fator que mais evidência ter influência no coeficiente de transmissão térmica da janela, sendo que, os valores obtidos para as soluções com vidro de menor qualidade apresentam valores de  $U_w$  que são quase o dobro aos obtidos quando se utiliza um vidro de boa qualidade. Ainda assim, podemos afirmar que todas as janelas analisadas com caixilharia de PVC apresentam um desempenho muito satisfatório. Para uma janela de grandes dimensões, com caixilho de PVC com 99 mm, vidro V2 e reforço também de PVC, obteve-se o melhor desempenho, com um  $U_w$  de 1,37 W/m<sup>2</sup>K.

#### 4.7.3 $U_w$ para caixilharia de Madeira

Concluindo esta análise do comportamento de janelas, analisaram-se casos com caixilhos em madeira. Como tem vindo a ser referido ao longo desta dissertação, as soluções de madeira estudadas tendem a apresentar comportamento muito semelhante às soluções em PVC. Estendendo este pensamento ao comportamento de janelas, podemos esperar que os resultados obtidos nos permitam tirar as mesmas conclusões que foram obtidas na secção anterior.

Quadro 4.24: Valores de  $U_w$  para janelas com caixilharia de Madeira.

Casos	$U_f$ (W/m <sup>2</sup> K)	$U_g$ (W/m <sup>2</sup> K)	Janela	$U_w$ (W/m <sup>2</sup> K)
M66-V1	1,94	2,8	Grande	2,62
			Média	2,55
			Pequena	2,39
M66-V2	1,94	1,1	Grande	1,38
			Média	1,47
			Pequena	1,68
M99-V1	1,71	2,8	Grande	2,57
			Média	2,49
			Pequena	2,28
M99-V2	1,71	1,1	Grande	1,32
			Média	1,39
			Pequena	1,56

Começando pela análise ao tamanho da janela, constatamos mais uma vez que para vidros de menor qualidade, o valor *de*  $U_w$  tendo a crescer com o aumento do tamanho da janela, contrariamente ao que acontece com um vidro de boa qualidade, ou seja, o mesmo parâmetro tende a diminuir com o aumento do tamanho da janela.

Mais uma vez, o tipo de vidro tem um grande impacto no comportamento térmico da janela, sendo esta característica a que mais influencia os resultados, contrariamente ao que se verifica através do aumento de espessura do caixilho, que mais uma vez, não induz alterações significativas nos valores de  $U_w$ , confirmando-se assim a semelhança de resultados entre este caixilho e o de PVC, analisado anteriormente.

A solução ótima para este caso, apresenta um coeficiente de transmissão térmica de 1,32 W/m<sup>2</sup>K e consiste numa janela de grandes dimensões, com 99 mm de espessura e com um vidro que possui um  $U_g$  de 1,1 W/m<sup>2</sup>K.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Aspetos Gerais

No início desta dissertação foi traçado um objetivo principal, que consistiu em estudar o comportamento térmico de caixilharias e vãos envidraçados, tentando compreender quais os fatores que contribuem para um bom desempenho de elementos deste tipo e quais as modificações mais benéficas para que se consiga atingir um desempenho térmico aproximadamente ótimo. Com este objetivo foi utilizada a metodologia de cálculo providenciada pela EN ISO 10077-2 (2012) que é também que sugerida na versão actualizada de 2017, para determinação dos coeficientes de transmissão térmica das caixilharias, com base no seu modelo de cálculo e nas análises efetuadas no Capítulo 4 deste trabalho.

A metodologia de cálculo da norma em consideração, acabou por se revelar algo exigente, apresentando uma carga de cálculo moderadamente pesada e uma necessidade de uma elevada atenção aos detalhes. A dificuldade de utilização desta norma será tanto maior quanto maior for o grau de complexidade da caixilharia, em termos de geometria. Por exemplo, um caixilho que apresente um elevado número de espaços de ar, com formas irregulares, irá dificultar muito o cálculo dos  $\lambda_{eq}$ , necessário para caracterizar os mesmos, principalmente se forem todos diferentes, o que acontece em muitos dos casos. No entanto, após várias aplicações desta metodologia e depois de me familiarizar com todos os procedimentos que a constituem, a utilização da norma ISO 10077-2 acabou por se tornar mais acessível e quase mecânica, do ponto de vista dos passos a tomar, permitindo a obtenção de valores muito semelhantes não só aos que são obtidos através de outras metodologias, mas também aquilo que poderá eventualmente corresponder a um comportamento numa situação real.

O software THERM possui claramente uma utilização acessível, muito devido à simplicidade da barra de ferramentas e à organização dos diferentes menus. O grande obstáculo deste programa está relacionado com a modelação dos objetos a analisar, nomeadamente as questões geométricas. É necessária uma grande atenção aos detalhes, como a maneira como se efetua a ligação entre diferentes peças de um determinado elemento, impedindo o THERM de correr e efetuar a análise pretendida. Quanto ao desempenho do software, este será tanto melhor quanto menor for a complexidade do elemento em estudo.

### 5.2 Resultados obtidos

De um modo geral, os resultados obtidos nesta dissertação permitiram-me compreender várias

questões relacionadas com o desempenho térmico de vãos envidraçados, particularmente em caixilharias.

Em primeiro lugar, fazendo uma observação muito superficial aos valores de  $U_f$ , conseguimos perceber o porquê das caixilharias em Alumínio serem cada vez menos utilizadas. São caixilharias que, se não estiverem equipadas com elementos que melhorem o seu desempenho térmico, não conseguem competir com os restantes caixilhos, nem cumprir com os requisitos impostos a nível europeu e no nosso país. As soluções em PVC e em Madeira apresentam ambos desempenhos térmicos muitos satisfatórios, mas se tivermos em consideração todas as desvantagens que a madeira possui, compreendemos a ascensão da utilização das caixilharias em PVC.

Das alterações analisadas, a implementar em caixilharias, a que induz melhorias mais significativas no desempenho térmico da solução é a implementação de isolamento térmico nos espaços de ar, sendo que, de um modo geral, estas melhorias correspondem a reduções do valor de  $U_f$  que variam entre os 35% e os 60%, aproximadamente. Isto verificou-se em todas as caixilharias consideradas, porém, nas caixilharias de alumínio sem corte térmico, os benefícios adquiridos são quase nulos.

Relativamente ao aumento de espessura, esta modificação poderá depender de um conjunto de fatores. Antes de mais o material da caixilharia. Para uma situação de alumínio, o aumento de espessura só aumenta a quantidade de material condutor, piorando assim o desempenho da solução. Depois, para sistemas constituídos por um material mais isolante, acaba por ser preferível um aumento geral da espessura do caixilho, ou seja, incluindo espaços de ar, do que aumentar simplesmente a espessura dos elementos constituídos por esse material. Assim, para se obter um caixilho de PVC ou Madeira de alto desempenho, uma espessura maior é sem dúvida uma modificação que permitirá alcançar esse objetivo, porém, é possível que este acréscimo possa, na maioria dos casos, estar mais relacionado com a capacidade de suporte de um vidro mais pesado.

Ficou também comprovada a enorme importância que a presença de corte térmico numa caixilharia de alumínio tem, para que esta consiga apresentar um  $U_f$  satisfatório. Para sistemas deste tipo, se não se utilizar esta quebra térmica, mesmo preenchendo os vazios com isolamento, o que prevalece é o comportamento do material condutor. Para estes casos, onde os perfis do caixilho são totalmente em alumínio, não existe praticamente diferença entre ter os vazios preenchidos com isolamento ou não.

No caso de ser necessário reforçar estruturalmente o interior da caixilharia em PVC, este reforço deverá ser de um material que não possua uma condutibilidade térmica elevada, por forma a não comprometer o desempenho global do sistema.

No que diz respeito ao coeficiente de transmissão térmica linear, ou seja, ao fluxo de calor adicional devido à ligação entre o vidro e o caixilho, constatou-se que quanto melhor for o desempenho do caixilho e do vidro, maior será este parâmetro. Ou seja, para situações em que estas duas componentes tenham elevada qualidade, o calor tenderá a passar por esta zona que constitui um ponto fraco no sistema. Por outro lado, se o vidro e o caixilho não tiverem um bom desempenho, a zona de ligação entre o caixilho e o vidro não será um ponto tão fraco como no anterior, visto que o calor tem maior facilidade em passar por outros locais do sistema e por isso, a quantidade de calor que passa por essa mesma região é inferior.

Verificou-se também que o aumento da espessura do vidro, independentemente do seu valor de  $U_g$  ou do desempenho do caixilho, provoca sempre o aumento do valor de  $\Psi$ . Por outro lado, o aumento de espessura do caixilho, para o caso analisado de madeira, induz uma ligeira redução no valor de  $\Psi$  da solução.

Finalmente, da análise feita aos valores de  $U_w$ , foi possível verificar que para as janelas com caixilharia de alumínio, este parâmetro tende a aumentar quanto menor forem as suas dimensões, ou seja, para caixilhos de alumínio é possível obter um melhor desempenho global do vão envidraçado para situações com uma área de vidro maior. O mesmo se verificou para as janelas com caixilharia em PVC ou madeira, que utilizam um vidro de grande qualidade, ou seja, como o valor de  $U$  do vidro é mais baixo que o do caixilho, ter uma maior área de vidro irá beneficiar o desempenho do sistema. Como é lógico, nas situações em que o vidro apresentava um desempenho inferior ao caixilho, ter uma janela de menores dimensões permite obter melhores resultados.

Quanto à influência de alterações específicas no valor de  $U_w$ , constatou-se a grande diferença entre usar um vidro de boa qualidade e um vidro comum. Mais uma vez, comprovou-se que o desempenho da caixilharia tem um grande impacto no comportamento global da janela, através das diferenças entre as soluções em alumínio e as de madeira ou PVC. Este impacto também ficou provado tendo em conta os valores inferiores que as janelas com caixilho em alumínio e corte térmico apresentam, comparativamente às que não possuem este elemento. O aumento de espessura do caixilho acabou por induzir melhorias muito reduzidas no desempenho global das janelas.

Em suma, para que sejam alcançados bons níveis de eficiência energética, é fundamental evitar perdas de calor por parte dos vãos envidraçados. Para isso, é necessário ter uma caixilharia e um vidro com um desempenho térmico suficientemente bom para que se consigam minimizar essas mesmas perdas tanto quanto seja necessário. Nesta dissertação, conseguiu-se demonstrar o grande impacto que pequenas alterações podem ter no nível de isolamento de uma caixilharia e conseqüentemente, no de uma janela. Assim, é fundamental conhecer os elementos constituintes de um vão envidraçado, as diversas soluções e materiais disponíveis no mercado e as várias técnicas construtivas correntes para que, mediante as questões técnicas e económicas, seja possível tomar decisões que proporcionem aos utilizadores de um edifício o máximo nível de conforto e eficiência energética possível.

### **5.3 Considerações finais e trabalhos futuros**

No seguimento desta dissertação seria de grande interesse aplicar esta mesma metodologia, para efetuar o mesmo tipo de análises, em caixilharias mistas e também tentar avaliar novos materiais que pudessem ser utilizados na produção de caixilharias ou outro elemento constituinte do vão envidraçado.

Ainda neste âmbito, seria útil efetuar-se um balanço dos vários softwares, semelhantes ao THERM, utilizados para este tipo de estudo, por forma a determinar-se qual o mais eficaz e completo para este tipo de cálculo.

Acima de tudo, acredito que esta é uma área de grande importância no mundo da construção civil e tendo em conta toda a evolução tecnológica e a quantidade de informação disponível, é fundamental continuar à procura de formas de melhorar e evoluir para que se continue a proporcionar uma vida confortável à população sem colocar em causa a saúde do planeta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADENE@ (2019). <https://www.classemais.pt/classemais/conhecer/> - Consultado a 04/07/2019.

Agrela, A.F. (2011). “Quantificação Do Coeficiente de Transmissão Térmica de Vãos Envidraçados”. Tese de Mestrado em Construções Da Faculdade de Engenharia Da Universidade Do Porto, Porto.

Alves, Inês. (2014). “Requisitos de Casas Passivas Para o Clima Português: Estudo Comparativo entre a Regulamentação Nacional e os Requisitos Passive House.”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, na Especialidade de Construções, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Ariosto, Tim, Ali M. Memari, and Ryan L. Solnosky. (2019). “Development of Designer Aids for Energy Efficient Residential Window Retrofit Solutions.” *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 33, pp.1–13.

Barbosa, Luís. (2010). “Controlo de Qualidade Em Caixilharias de Alumínio”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro.

Borowska, Joanna, and Walery Jezierski. (2018). “Heat Parameters of Multi-Sash Windows in Residential Buildings.” *Construction and Building Materials*, Vol. 176, pp. 112–117.

CAIXIAVE – Catálogo Marcação CE (NP EN 14351:2008 + A1:2011), Informação Técnica – 17/11/2014

Cuce, Erdem. (2018). “Accurate and Reliable U-Value Assessment of Argon-Filled Double Glazed Windows: A Numerical and Experimental Investigation.” *Energy and Buildings*, Vol 171, pp. 100–106.

DGEGa@ (2019). <http://www.dgeg.gov.pt/>. Direção-Geral de Energia e Geologia - Estatísticas e Preços-Balanços Energéticos - Março de 2019. - Consultado a 21/05/2019

DGEGb@ (2019). <http://www.dgeg.gov.pt/>. Direção-Geral de Energia e Geologia - Áreas Setoriais - Edifícios. - Consultado a 21/05/2019

DRE@ <https://dre.pt/pesquisa/-/search/499237/details/maximized> - Consultado a 21/05/2019

Faustino, Cláudio. (2012). “Influência Dos Vãos Envidraçados No Desempenho Energético de Edifícios: Aplicação ao edifício do DECivil-IST”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Intituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

- 
- Ferreira, Christian. (2017). “O Conceito Passivhaus No Projecto de Arquitectura”. Tese de Mestrado em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, Porto.
- Godoy, Sara. (2013). “Projetos de Redução de Emissões de Gases Estufa: Desempenho e Custos de Transação.” *Revista de Administração* 48(2): pp. 310–26.
- Gomes, Bruno. (2017). “Avaliação Das Pontes Térmicas Lineares Em Edifícios de Habitação – Resultados Numéricos versus Experimentais”. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Especialidade de Construções, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Henriques, Sara. (2015). “Soluções de Elevada Eficiência Energética na Reabilitação de um Edifício de Habitação”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T. e Lavine, A. (2006). "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". 6ª Edição.
- IPCC@ (2019). <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/summary-for-policy-makers/>. Intergovernmental Panel on Climate Change: "Special Report: Global Warming of 1,5 °C" - Consultado a 04/07/2019.
- IPQ@ <http://www1.ipq.pt/pt/assuntoseuropeus/marcacaoce/Pages/MarcacaoCE.aspx> - Consultado a 20/06/2019
- ISO 10077-2. (2012): "Thermal Performance of Windows, Doors and Shutters--Calculation of Thermal Transmittance-Part 2: Numerical Method for Frames". 1<sup>st</sup> Edition.
- Pereira, José. (2006). “Desenvolvimento de Novos Produtos Em Vidro Utilizando Tecnologias de Prototipagem Rápida”. Tese de Mestrado em Design Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Kalinović, Saša M., Djoković, Jelena M. and Ružica R. Nikolić. (2017). “Influence of Windows Geometrical Parameters on Calculations of the Heat Conduction Coefficient.” *Procedia Engineering*, Vol 192: pp. 404–409.
- LNEC. (2002). "Comportamento Térmico De Caixilharia Exterior: Coeficientes de transmissão térmica referentes ao mercado nacional". Relatório 41/2002
- Malvoni, Maria, Baglivo, Cristina, Congedo, Paolo and Laforgia, Domenico. (2016). “CFD Modeling to Evaluate the Thermal Performances of Window Frames in Accordance with the ISO 10077.” *Energy* Vol 111: pp. 430–438.
- Marcos, Ademar. (2013). “Vãos Envidraçados Em Edifícios de Habitação: Otimização,

- 
- Eficiência Energética e Análise Económica.” Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Fernando Pessoa, Porto.
- Marques, Rui. (2014). “Estudo Do Comportamento Térmico de Estores Metálicos Sob a Ação de Fluxos de Calor Radiativos.” Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, na Especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Mateus, Diogo. (2013). “Pontes Térmicas Lineares Cálculo e Catálogo.” Apontamentos da disciplina de Física das Construções, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, do ano letivo 2013/2014.
- Mateus, Diogo (2017). "Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)" - Apontamentos da disciplina de Comportamento Térmico e Energético de Edifícios, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, do ano letivo 2017/2018.
- Mohelníková, Jitka, and Altan, Haşim. 2009. “Evaluation of Optical and Thermal Properties of Window Glazing.” WSEAS Transactions on Environment and Development Vol 5, Issue 1: pp. 86–93.
- Oliveira, Rui. (2013). “Construir Segundo Requisitos Passivhaus: Modelação de Pontes Térmicas.” Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveira, Aveiro.
- Mendes, Vitor. (2011). “Quantificação Do Coeficiente de Transmissão Térmica de Vãos Envidraçados - Modelo de Cálculo”, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Especialidade em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto
- RCCTE. 2006. “Regulamento Das Características de Comportamento Térmico Dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei n.o 80/2006.” *DL, N°80/2006*: 46(2468-2513).
- REN21. 2018. "Renewable 2018: Global Status Report". A comprehensive annual overview of the state of renewable energy.
- Rodrigues, Maria. (2011). “Eficiência Energética No Setor Residencial.” Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Romeiro, Natália. (2019). “Melhoria Do Desempenho Térmico Dos Edifícios De Habitação No Brasil: Análise Comparativa Dos Requisitos Regulamentares Brasileiros e Portugueses.” Tese de Mestrado em Energia para a Sustentabilidade, Especialidade de Edifícios e Meio Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, Coimbra.

PassiveHouseDatabase@ (2019). <https://database.passivehouse.com/en/components/list/window> - Consultado a 03/04/2019

Pinho, Vítor. (2013). "Caracterização Térmica de Vãos Envidraçados e Respetivas Proteções Solares". Tese de Mestrado Em Engenharia Civil, Especialidade Em Construções, Faculdade de Engenharia Do Porto, Porto."

ROCAEa@ <http://rocae.pt/pt/produtos/caixilharia-em-aluminio/sistema-de-abrir> - Consultado a 12/03/2019.

ROCAEb@ <http://rocae.pt/pt/produtos/caixilharia-em-pvc/sistemas-de-abrir> - Consultado a 12/03/2019.

SCHUSS@[https://schusspvc.pt/janelas\\_de\\_Madeira\\_janelas\\_madeira\\_janelas\\_madeira\\_janelas\\_madeira.asp](https://schusspvc.pt/janelas_de_Madeira_janelas_madeira_janelas_madeira_janelas_madeira.asp) - Consultado a 12/03/2019.

Saint-Gobain, (2008). "Manual do Vidro" - Saint-Gobain Glass.

Saint-Gobain. (2015). Catálogo SGG CLIMALIT e SGG CLIMALIT PLUS, Saint-Gobain Glass Climate. Simões, Nuno. (2018). Apontamentos Da Disciplina de Comportamento Térmico e Energético de Edifícios, da Disciplina de Desempenho Térmico e Energético de Edifícios, /Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, ano letivo 2017/2018.

Sirgado, Jorge. (2010). "Análise Do Impacte Dos Vãos Envidraçados No Desempenho Térmico Dos Edifícios". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Tadeu, Sérgio. (2015). "Rentabilidade Da Reabilitação Energética de Edifícios". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Especialidade em Construções, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

