

Flávio Pires Rito

# OTIMIZAÇÃO TÉRMICA DE PERFIS DE CAIXILHARIA EM MADEIRA

THERMAL OPTIMIZATION OF WOOD FRAMES

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, na área de Especialização em Energia e Ambiente Interior,  
orientado pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões

Coimbra, 5 de março de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Flávio Pires Rito

# OTIMIZAÇÃO TÉRMICA DE PERFIS DE CAIXILHARIA EM MADEIRA

## THERMAL OPTIMIZATION OF WOOD FRAMES

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, na área de Especialização em Energia e Ambiente Interior,  
orientado pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões

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

Coimbra, 5 de março de 2018

## AGRADECIMENTOS

Ao meu avô, por ter sido sempre fonte de ensinamento e inspiração, para o cultivo do pensamento e partilha do conhecimento. À minha avó por todo o apoio e alento em todas as fases decisivas, encorajando-me ao longo da vida, para alcançar os objetivos que desejo.

Aos meus pais, por me proporcionarem, incondicionalmente, a possibilidade da minha formação e, uma vez mais, da realização do Mestrado.

Ao Professor Doutor Nuno Simões, orientador da dissertação, por toda a disponibilidade, dedicação e ensinamento ao longo deste projeto. Sou grato por ter a possibilidade de aprender e trabalhar com um verdadeiro professor, aquele que através do seu modo de ensinar, inspira a aprendizagem transmitindo o seu conhecimento.

Aos membros do ITeCons por todo o apoio e empenho ao longo do estudo, em especial à Doutora Joana Prata, Eng.<sup>a</sup> Eliana Silva, Eng.º David Tadeu e ao Luís Silva.

Aos membros da Fernando José Rito unipessoal, lda, sem eles não seria possível realizar o protótipo de janela, em especial ao Eng.º Túlio Esteves.

Agradece-se ainda ao suporte e generosidade da Amorim Isolamentos S. A.. Este projeto teve ainda o apoio financeiro do projeto Slimframe PV & Cork Skin Project (POCI-01-0247-FEDER-003408) para a realização da campanha laboratorial.

Por último, mas não menos importante, ao meu irmão e amigos que sempre acreditaram em mim, tornando-se uma base de apoio fundamental, presente nos bons e maus momentos.

A todos eles, que contribuíram para a criação deste trabalho. Muito obrigado.

Colaboração institucional



## RESUMO

Os vãos envidraçados são um dos componentes da fachada que mais condiciona o comportamento térmico dos edifícios. O aumento das exigências de desempenho energético dos edifícios, em particular na Europa, tem conduzido à necessidade de desenvolvimento de novas soluções. Existem, inclusive, modelos de certificação de componentes da fachada que revelam esta tendência. Destaca-se, de entre estes, a possibilidade de certificação pelo *instituto Passive House*. Devido às propriedades térmicas da madeira, a utilização deste material no fabrico dos caixilhos revela-se uma opção com elevado potencial.

A presente dissertação tem como objetivo principal desenvolver novas geometrias de perfis, criando uma solução que cumpra os requisitos térmicos estabelecidos pelo *instituto Passive House* para os climas temperados. Para este efeito, levou-se a cabo um estudo que consistiu na alteração da geometria de um perfil misto madeira/alumínio, com incorporação de material isolante, tendo havido a preocupação em não se comprometer o comportamento mecânico e as restantes propriedades funcionais. Por uma questão de sustentabilidade, o material de isolamento térmico selecionado foi o aglomerado de cortiça expandido (ICB – *insulation cork board*). Este estudo suportou-se no cálculo do coeficiente de transmissão térmico preconizado na norma ISO 10077-1:2006 e ISO 10077-2:2012, tendo-se implementado o modelo numérico bidimensional estabelecido na norma ISO 10211:2007.

Numa primeira fase desenvolveu-se uma geometria de perfil misto madeira/ICB/alumínio que cumprisse os requisitos de certificação *Passive House* estabelecidos para as janelas. De seguida, procedeu-se à avaliação da importância da configuração de instalação das janelas, suportada no cálculo dos coeficientes de transmissão térmica linear das ligações entre a janela e a padieira, ombreira e peitoril. Numa última fase submeteu-se o protótipo da janela otimizada a ensaios laboratoriais de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento, com o objetivo de verificar as características funcionais da janela. O protótipo de janela foi ainda submetido a ensaios acústicos tendo-se avaliado o isolamento aos sons aéreos apresentado pelo sistema.

**Palavras-chave:** janela eficiente; perfil misto madeira/ICB/alumínio; simulação do comportamento térmico; critérios *Passive House*; ligação janela/parede; caracterização experimental.

## ABSTRACT

The glazed openings are one of the elements of the façade which condition the thermal performance of buildings. The raise on the demanding of buildings performance in thermal conditions, especially in Europe is leading to the necessity of developing new solutions. There are certificated models of the façade elements that reveal this trend. Among them, it highlights the possibility of certification by the Passive House Institute.

Due to the thermal properties of wood, the use of this material in the manufacture of frames is an option with an elevated potential.

This work has the aim of developing new profile geometries, creating a solution that accomplishes the thermal requisites of the Passive House Institute to temperate climates. To the effect, it was made a study that consists in the changing of profile geometries in a mixed aluminum /wood with the incorporation of an isolating material without changing the mechanical performance and the other properties. As a question of sustainability, the isolating material used was ICB – insulation cork board. This study was made according to the standard ISO 10077-1:2006 and ISO 10077-2:2012, implementing the numerical model established by the standard ISO 10211:2007.

In the beginning, it was developed a mixed profile geometry wood/ICB/ aluminum which accomplishes the requirements of Passive House certification to windows. After, it was made an evaluation of the importance of configuration in window installations made with the calculation of thermal transmission, in the link of the window and the lintel, door jamb and window sill.

At last, it was submitted the prototype of optimized window to laboratorial tests of air permeability, water leak and wind resistance to see the functionality of the window. The window was also submitted to sound insulation having evaluated the insulation of airborne presented by the system.

**Key words:** efficient window; mixed profile wood/ICB/aluminium; simulation of the thermal performance; Passive House requirements; connection window/wall; experimental characterization.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento e motivação.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Estrutura do trabalho.....	3
2	CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO PERFIL DE CAIXILHARIA INICIAL .....	5
2.1	Descrição do perfil inicial de caixilharia em madeira/alumínio .....	5
2.2	Método de cálculo do coeficiente de transmissão térmica .....	6
2.3	Resultados e verificação da caracterização térmica.....	7
2.3.1	Verificação do cálculo das resistências térmicas das cavidades-de-ar .....	7
2.3.2	Verificação do cálculo numérico através de um caso proposto na norma ISO 10077-2:2012 .....	7
2.3.3	Validação experimental do cálculo do perfil em madeira .....	8
3	OTIMIZAÇÃO DO PERFIL DE CAIXILHARIA .....	13
3.1	Descrição do desenvolvimento de novas geometrias.....	13
3.2	Resultados do cálculo bidimensional.....	19
3.3	Verificação do critério de componente Passive House.....	21
3.4	Verificação do critério de higiene Passive House.....	21
4	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE LIGAÇÕES ENTRE O PERFIL OTIMIZADO E DIFERENTES TIPOS DE PAREDES .....	23
4.1	Descrição do problema .....	23
4.2	Resultados de cálculo bidimensional da ligação janela/parede .....	25
4.3	Verificação do critério de instalação Passive House .....	26
5	CAMPANHA EXPERIMENTAL DA JANELA DESENVOLVIDA.....	29
5.1	Descrição dos métodos de ensaio AEV em câmara de caixilhos.....	29
5.1.1	Resultados dos ensaios AEV .....	30
5.2	Descrição do método de ensaio em câmara acústica .....	34
5.2.1	Resultados dos ensaios acústicos.....	35
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
6.1	Conclusões .....	37
6.2	Trabalhos futuros .....	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39

ANEXO A .....	A.1
ANEXO B .....	B.1
ANEXO C .....	C.1
ANEXO D .....	D.1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perfil inicial madeira/alumínio. ....	5
Figura 2.2 - Perfil D2, para verificação das ferramentas de cálculo preconizado na norma ISO 10077-2:2012. ....	8
Figura 2.3 - Perfil de caixilharia em madeira utilizado na validação experimental: a) Desenho de pormenor de secção de corte de perfil de madeira; b) Provete real de perfil de madeira. ....	9
Figura 2.4 - Provetes em espuma de poliuretano com perfil de madeira embebido no seu interior.(Provete 1: Espuma PUR; Provete 2: Perfil com 150 mm; Provete 3: Perfil com 500 mm): a) Desenho esquemático com as dimensões dos provetes; b) Foto dos provetes reais.....	10
Figura 2.5 - $\lambda$ -Meter EP500e: equipamento utilizado na determinação de condutibilidade térmica de provetes. ....	10
Figura 2.6 - Modelo geométrico do perfil de madeira embebido em espuma de poliuretano utilizado no Bisco. ....	12
Figura 3.1 - Distribuição bidimensional de temperaturas respeitante ao cálculo do $U_f$ : a) Perfil inicial; b) Perfil E; c) Perfil F. ....	20
Figura 4.1 - Perda térmica linear $\Psi_{Perfil/Parede}$ (W/m) em função do posição da janela para os dois sistemas de parede.....	25
Figura 4.2 - Distribuição bidimensional de temperaturas dos pormenores de ligação janela/parede para a situação de sistema ETICS: a) janela posicionada à face interior da parede; b) janela posicionada na zona central; c) janela posicionada à face exterior da parede. ....	26
Figura 5.1 - Janela com Perfil E instalada em câmara de caixilhos. ....	30
Figura 5.2 - Valores de permeabilidade ao ar em função da área, VA ( $m^3/h.m^2$ ), e do comprimento da junta de abertura, VL ( $m^3/h.m$ ): a) Para pressões positivas; b) Para pressões negativas.....	31
Figura 5.3 - Pontos onde se identificaram as fugas de ar mais significativas. ....	31
Figura 5.4 - Identificação do ponto onde se verificou a perda de estanquidade à água da janela.....	32
Figura 5.5 - Localização dos pontos de medição de deformações relativas ao ensaio de resistência ao vento.....	33
Figura 5.6 - Janela com Perfil E instalada em câmara acústica.....	35



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre resultados obtidos e os resultados fornecidos na norma ISO 10077-2:2012. ....	8
Tabela 2.2 - Resultados laboratoriais de condutibilidade de provetes com perfil de madeira.	11
Tabela 2.3 - Valores de transmissão térmica obtidos através do Bisco e método experimental. ....	12
Tabela 3.1 - Condutibilidade térmica de materiais utilizados no cálculo.....	14
Tabela 3.2 - Geometria e características de perfis otimizados. ....	15
Tabela 3.3 - Resumo de resultados da caracterização térmica de perfis de caixilharia.....	19
Tabela 3.4 - Verificação do critério de componente <i>Passive House</i> para os diferentes perfis desenvolvidos. ....	21
Tabela 3.5 - Verificação de critério de higiene <i>Passive House</i> . ....	22
Tabela 4.1 - Instalação de perfil de caixilharia.....	24
Tabela 4.2 - Fluxo de calor dos diferentes sistemas, paredes, perfil e parede/perfil. ....	25
Tabela 4.3 - Verificação de critério de instalação de janela <i>Passive House</i> . ....	27
Tabela 4.4 - Classificação <i>Passive House</i> para janela com Perfil E.....	27
Tabela 4.5 - Classificação <i>Passive House</i> para janela com Perfil F.....	27
Tabela 5.1 - Resultados de ensaio de estanquidade à água. ....	32
Tabela 5.2 - Medição de deformações nos vários pontos durante o ensaio de resistência ao vento. ....	33
Tabela 5.3 - Síntese das classificações relativas aos ensaios AEV em câmara de caixilhos...	34
Tabela 5.4 - Resultados de índice de isolamento sonoro aos sons aéreos. ....	36
Tabela A.1 - Geometria de cavidades-de-ar de perfis desenvolvidos. ....	3
Tabela A.2 - Resultado de análise das resistências térmicas das cavidades-de-ar de acordo com a norma ISO 10077-2:2012. ....	4
Tabela B.1 - Comparação de valores de $U_f$ obtidos através de modelação em Bisco e Therm... ..	1
Tabela C.1 - Distribuição bidimensional de temperaturas de perfis.....	1
Tabela D.1 - Processo de fabricação de janela com perfil otimizado E. ....	1

## SIMBOLOGIA

Símbolo	Designação	Unidade
$A$	Área	$m^2$
$l$	Comprimento	$m$
$b$	Largura perpendicular à direção do fluxo de calor	$m$
$d$	Profundidade paralela à direção do fluxo de calor	$m$
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$W/(m^2 \cdot ^\circ C^4)$
$\varepsilon$	Emissividade	-
$\lambda$	Condutibilidade térmica	$W/(m \cdot ^\circ C)$
$F$	Factor de secção retangular	-
$h_a$	Condutância térmica de calor por convecção	$W/(m \cdot ^\circ C)$
$h_r$	Condutância térmica de calor por radiação	$W/(m \cdot ^\circ C)$
$L_f^{2D}$	Coefficiente de acoplamento térmico relativo ao cálculo bidimensional	$W/(m \cdot ^\circ C)$
$Q$	Fluxo de calor	$W/m$
$U$	Coefficiente de transmissão térmica	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
$U_g$	Coefficiente de transmissão térmica de vidro	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
$U_f$	Coefficiente de transmissão térmica de caixilho	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
$U_w$	Coefficiente de transmissão térmica de sistema caixilho com vidro	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
$U_{instalação}$	Coefficiente de transmissão térmica da janela instalada	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
$\Phi$	Fluxo de calor total	$W/m$
$\Delta T$	Diferença de temperatura	$^\circ C$
$\Psi_g$	Coefficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica $g$ (da ligação caixilho-vidro).	$W/(m \cdot ^\circ C)$
$\Psi_i$	Coefficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica $i$ (da ligação de instalação)	$W/(m \cdot ^\circ C)$
$R_{si}$	Resistência térmica superficial interior	$(m^2 \cdot ^\circ C)/W$
$R_{se}$	Resistência térmica superficial exterior	$(m^2 \cdot ^\circ C)/W$
$f_{Rsi}$	Factor de temperatura superficial	-

## 1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é apresentado o enquadramento e motivação, os objetivos da dissertação e a sua estrutura.

Dada a importância que os vãos envidraçados representam na eficiência térmica dos edifícios, é importante levar a cabo estudos a componentes de sistemas como os caixilhos das janelas. Estudos que tenham como objetivo aumentar a eficiência de novos produtos sendo seletivos na escolha de materiais que promovam a sustentabilidade.

Atualmente estão disponíveis no mercado vários sistemas de componentes com ótimos desempenhos energéticos, sendo estes submetidos a critérios rigorosos de avaliação térmica, possibilitando a estes uma certificação por entidades como o instituto *Passive House*. Neste sentido, crendo na importância do aumentando das exigências dos critérios de certificação, o presente trabalho pretende desenvolver um estudo, para a criação de uma solução de janela que cumpra os requisitos térmicos estabelecidos pelo instituto *Passive House*.

As perdas energéticas associadas aos vãos envidraçados, são compostas pelas perdas associadas ao vidro, ao caixilho, bem como às perdas térmicas lineares associadas as ligações vidro/caixilho e caixilho/parede. Sendo relevante o estudo da instalação da janela em alvenarias, a fim de verificar qual a importância da instalação no desempenho global do sistema de componente de janela.

### 1.1 Enquadramento e motivação

Os vãos envidraçados são responsáveis por cerca de 30 % a 50 % das perdas de calor através da envolvente do edifício [1],[2], mesmo quando a sua área é muito inferior à área da envolvente opaca. À semelhança dos restantes elementos da envolvente, o desempenho térmico de um vão envidraçado pode ser caracterizado através do seu coeficiente de transmissão térmica (U) que depende não só das características do vidro mas também da geometria dos perfis de caixilharia e dos materiais que os constituem. Os valores de U dos vãos envidraçados são normalmente muito superiores aos dos restantes elementos construtivos, sendo as próprias exigências regulamentares muito diferentes. O valor máximo regulamentar de U para a envolvente opaca, nos países do centro e norte da Europa, situa-se entre 0.1 e 0.3 W/(m<sup>2</sup>. °C), sendo facilmente alcançado com os sistemas de construção mais comuns. Para vãos envidraçados, os valores máximos regulamentares de U são superiores e tipicamente variam entre 0.8 W/(m<sup>2</sup>. °C) e 2.4 W/(m<sup>2</sup>. °C)

[1]. Desta forma, existe ainda um elevado potencial de melhoria no que se refere ao comportamento térmico dos vãos envidraçados e, conseqüentemente, ao desempenho energético dos edifícios.

Ao longo das últimas décadas tem surgido uma maior preocupação quanto à redução dos consumos energéticos nos edifícios, o que conduziu à necessidade de otimização das soluções construtivas e por sua vez ao desenvolvimento de sistemas de vãos envidraçados cada vez mais eficientes. O surgimento de sistemas de vidro duplo e triplo revelou ser um grande avanço no controlo das perdas e ganhos de calor pelos vãos envidraçados, sendo que os melhores sistemas atualmente existentes já apresentam valores de  $U$  muito reduzidos, entre  $0.3$  e  $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , (incorporando produtos de aerogel translúcido, ou gases como o krypton e o Argon) [3] [4].

O componente mais fraco dos sistemas de vãos envidraçados, tipicamente usado, é o caixilho. No entanto, tem-se assistido à procura de solução para o aumento do desempenho térmico destes elementos, tais como o uso de materiais com baixos coeficientes de condutibilidade térmica, introdução de elementos de rotura térmica ou uma alteração da geometria que promova a inserção de caixas-de-ar no seu interior [5]. A evolução nos perfis de caixilharia nos últimos anos conduziu a que existam atualmente sistemas com valores de coeficiente de transmissão entre  $0.6$  e  $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  [6]. No entanto, estes avanços traduzem-se em produtos com custos superiores. Um dos materiais que potencia a melhoria do comportamento térmico dos caixilhos é a madeira, uma vez que apresenta uma condutibilidade térmica baixa, em particular quando comparada às opções convencionais em ligas metálicas.

Com a intenção de melhorar a eficiência energética de vãos envidraçados, é necessário estudar o comportamento térmico destes sistemas, percebendo assim quais são os fatores que mais influenciam o seu desempenho e de que forma este poderá ser otimizado. Atualmente, existem entidades como o *Passive House Institute* que se dedicam à certificação de edifícios com elevados padrões de eficiência energética. Para se obter uma certificação *Passive House*, é necessário cumprir vários critérios que permitam não só alcançar níveis elevados de conforto térmico e eficiência energética, mas também requisitos de higiene, evitando condensações e a conseqüente formação de bolores na superfície dos materiais. Este instituto implementou também modelos de certificação de componentes. Assim, o desempenho térmico de uma janela *Passive House* instalada deverá garantir que a superfície mais fria do espaço interior não esteja significativamente abaixo da temperatura no interior do mesmo, não devendo essa diferença ser superior a  $4,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para que este critério seja cumprido, o valor de  $U$  do vão envidraçado e o valor de  $U$  de instalação do mesmo, deverão ser os adequados, sendo os valores máximos admissíveis dependentes do clima típico de cada país (por exemplo  $0.80$  e  $0.85 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , respetivamente, em climas temperados). Por outro lado, as características do sistema de vidros deverão garantir o balanço eficiente entre perdas de calor e ganhos solares, estando este balanço dependente dos valores de  $U$  e fator solar do mesmo. Consoante os valores obtidos na caracterização térmica do vão envidraçado e tendo em conta os critérios anteriores, é atribuída uma certificação que depende da classe atingida pelo mesmo. Esta escala de certificação baseia-se nas necessidades de aquecimento e arrefecimento de cada região, estando dividida em sete certificações [6].

Tendo por motivação a criação de uma solução de vão envidraçado que cumpra os requisitos térmicos estabelecidos pelo instituto *Passive House* para climas temperados, a presente dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de um perfil misto madeira/alumínio, com incorporação de aglomerado de cortiça expandido (ICB – *insulation cork board*).

Como o comportamento global do sistema também depende da forma como é realizada a instalação, reconhece-se a importância da avaliação da transmissão térmica linear das ligações entre a janela e a padieira, ombreira e peitoril.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação tem os seguintes objetivos principais:

Desenvolver perfis de caixilharia, compostos por madeira/alumínio de modo a aumentar a eficiência energética através da redução do seu coeficiente de transmissão térmica  $U_f$ . Adicionalmente pretende-se garantir a sustentabilidade do sistema, através da preocupação na escolha dos materiais.

Analisar as perdas térmicas lineares da janela, bem como as perdas térmicas lineares associadas à instalação da janela. Pretende-se avaliar a importância da instalação no comportamento global do sistema.

Otimizar os perfis com o objetivo de verificar os critérios de certificação *Passive House*, para climas temperados.

Produzir um dos perfis desenvolvidos e sujeitá-lo a uma campanha laboratorial com o objetivo de verificar a funcionalidade da janela.

## 1.3 Estrutura do trabalho

A dissertação está organizada essencialmente em 6 capítulos. No capítulo 1 faz-se uma introdução à dissertação, onde se apresenta o enquadramento e motivação bem como os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 realiza-se a caracterização térmica dos perfis de caixilharia, como a caracterização do perfil inicial e dos perfis otimizados. É apresentado o método de cálculo do coeficiente de transmissão térmica e a sua validação e verificação de resultados.

O capítulo 3 é reservado à apresentação e análise de perfis otimizados, é realizada uma descrição das geometrias dos perfis, sendo ainda apresentados os resultados de coeficiente de transmissão térmica e verificados os critérios de componente e higiene *Passive House*.

No capítulo 4 analisa-se o comportamento da janela instalada em diferentes tipologias de parede. Esta análise é suportada no cálculo dos coeficientes de transmissão térmica linear das ligações entre a janela e a padieira, ombreira e peitoril. Na parte final do capítulo apresenta-se a verificação do critério de instalação *Passive House*.

Após a verificação dos critérios de certificação *Passive House* selecionou-se um dos perfis e produziu-se o mesmo. Realizou-se uma campanha experimental. No capítulo 5 apresentam-se os resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar, estanquidade à água, resistência ao vento e isolamento aos sons aéreos.

No capítulo 6 apresentam-se as considerações finais, tecendo-se um conjunto de conclusões e propondo-se as perspetivas de trabalhos futuros.

Em anexo encontram-se detalhes sobre o método de cálculo e caracterização térmica das cavidades-de-ar, comparação entre os resultados obtidos com recurso a dois programas (Bisco e Therm), gráficos de distribuição bidimensional de temperaturas e ilustra-se a fabricação do protótipo de janela.

## 2 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO PERFIL DE CAIXILHARIA INICIAL

Na secção que se segue apresenta-se o perfil inicial em estudo. Este perfil foi escolhido para ser otimizado, pois enquadra-se nos conceitos de promoção de sustentabilidade mencionados na secção anterior, uma vez que o perfil inicial é constituído maioritariamente por um perfil de madeira, com a incorporação de um perfil em alumínio que oferece uma proteção, pelo exterior do sistema, aos agentes de detioração da madeira.

De seguida irá ser apresentada a descrição do perfil inicial de caixilharia em madeira/alumínio bem como o método de cálculo do coeficiente de transmissão térmica, resultados e verificação da caracterização térmica, verificação do cálculo das resistências térmicas das cavidades-de-ar, verificação com a ferramenta geométrica preconizada na norma ISO 10077-2:2012 [9] e por fim a validação experimental do cálculo do perfil em madeira.

### 2.1 Descrição do perfil inicial de caixilharia em madeira/alumínio

O perfil inicial, que serve de base ao presente estudo, é em madeira revestido pelo exterior por um perfil de alumínio. A Figura 2.1 apresenta a geometria do perfil em estudo, com as respetivas dimensões.

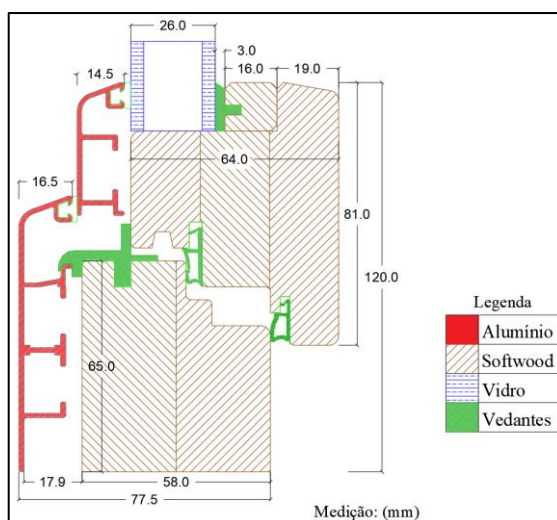


Figura 2.1 - Perfil inicial madeira/alumínio.

O sistema é composto por um perfil de aro e um perfil de folha:

- O aro possui uma espessura de 63 *mm*. Este perfil contém um vedante que também tem a funcionalidade de canal de escoamento de possíveis infiltrações de água. Os vedantes que constituem o perfil são em EPDM (terpolímero composto por três unidades de monómeros: etileno, propileno e dieno). A geometria do aro permite que este sirva de batedor do perfil de folha em dois pontos de vedação. Pelo exterior temos um perfil de alumínio, que é instalado no perfil de madeira por cliques de fixação pontuais.
- A folha é constituída por um perfil de madeira com uma espessura de 68 *mm*. A folha do sistema contém dois vedantes, sendo que o terceiro ponto de vedação é feito com o vedante do aro. Este perfil está preparado para receber sistemas de vidros simples, duplos ou triplos uma vez que a espessura de instalação de vidro poderá variar até a um máximo de 47 *mm*. Pelo exterior, temos um perfil em alumínio, que serve também de fixação e vedação do vidro pelo exterior.

## 2.2 Método de cálculo do coeficiente de transmissão térmica

Os valores do coeficiente de transmissão térmica do perfil de caixilharia  $U_f$  foi obtido através do método preconizado na norma ISO 10077-2:2012 [9], mediante a utilização de um modelo de cálculo numérico bidimensional de acordo com a norma ISO 10211:2007 [7]. Para o efeito, utilizou-se o software Bisco, da Physibel, validado para todos os exemplos de validação presentes no Anexo D da norma ISO 10077-2:2012 [9], sendo por isso adequado à determinação dos valores de  $U_f$  apresentados.

No cálculo do valor de  $U_f$ , o vidro é substituído por um painel isolante com a mesma espessura e uma condutibilidade térmica de 0,035  $W/(m \cdot ^\circ C)$ . Desta forma, obtém-se:

$$U_f = \frac{\Phi / \Delta T - U_p \cdot b_p}{b_f} \text{ W}/(m^2 \cdot ^\circ C) \quad (1)$$

onde,  $\Phi$  é o fluxo total de calor que atravessa o pormenor simulado, em  $W/m$ , obtido através de simulação numérica;  $\Delta T$  é a diferença entre a temperatura do ambiente interior e a do ambiente exterior, em  $^\circ C$ ;  $b_f$  é a largura do perfil, em  $m$ ;  $b_p$  é a largura visível de painel isolante, considerada na simulação ( $b_p \geq 0.190 \text{ m}$ ) utilizando-se para o efeitos de cálculo ( $b_p = 190 \text{ mm}$ ),  $U_p$  é o coeficiente de transmissão térmica do painel isolante, em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , determinado através da expressão:

$$U_p = \frac{1}{R_{si} + \frac{e}{\lambda} + R_{se}} \text{ W}/(m^2 \cdot ^\circ C) \quad (2)$$

onde  $e$  é a espessura e  $\lambda$  a condutibilidade térmica do painel e,  $R_{se}$  e  $R_{si}$  são as resistências térmicas superficiais nas superfícies exterior e interior, respetivamente.



Para o cálculo do fluxo total de calor,  $\Phi$ , e do valor de  $U_p$  consideraram-se as seguintes resistências superficiais:  $0,04 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$  e  $0,13 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ , para a superfície exterior e interior, respetivamente, indicadas na norma ISO 6946:2007 [10]. Nas zonas de ligação entre diferentes superfícies, onde o efeito da radiação/convecção é reduzido, a resistência superficial interior considerada foi  $0,20 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ , seguindo a metodologia da ISO 10077-2:2012 [9]. Os valores das condutibilidades térmicas equivalentes das caixas-de-ar que constituem o perfil foram determinados de acordo com a metodologia preconizada na norma ISO 10077-2:2012 [9]. As secções de corte do modelo geométrico são consideradas adiabáticas. As temperaturas consideradas na fronteira foram  $20^\circ\text{C}$  para o ambiente interior e  $0^\circ\text{C}$  para o ambiente exterior.

## 2.3 Resultados e verificação da caracterização térmica

De acordo com o método referido anteriormente, realizou-se a caracterização térmica do perfil inicial madeira/alumínio. Da caracterização obteve-se o valor de transmissão térmica do caixilho  $U_f=1,44 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

### 2.3.1 Verificação do cálculo das resistências térmicas das cavidades-de-ar

Da análise realizada a perfis de caixilharia, conclui-se que as cavidades-de-ar têm uma importância relevante podendo oferecer acréscimos de resistência térmica ao sistema. Desta forma entende-se que seja importante realizar uma verificação detalhada das cavidades-de-ar que constituem os caixilhos de janelas. A condutibilidade equivalente das cavidades foram calculadas de acordo com a norma ISO 10077-2:2012 [9].

Para uma melhor compreensão, apresenta-se no Anexo A o método de cálculo da condutibilidade térmica equivalente de uma das cavidade-de-ar, do perfil inicial, como exemplo. As características de cada cavidade-de-ar bem como as suas dimensões e resultados, encontram-se no Anexo A. Estas tabelas apresentam o resumo das características de cada cavidade-de-ar bem como a resistência e condutibilidade térmica equivalente associada a cada cavidade-de-ar.

### 2.3.2 Verificação do cálculo numérico através de um caso proposto na norma ISO 10077-2:2012

De maneira a verificar o procedimento de cálculo implementado, é proposto caracterizar o perfil D2 da ISO 10077-2:2012 [9]. Com este objetivo, é efetuado o cálculo do valor de coeficiente de transmissão térmica final bem como o valor de condutância térmica ou acoplamento térmico, e de seguida, comparam-se os resultados com os valores padrão indicados na norma. As condutibilidades térmicas dos materiais utilizados foram as seguintes:  $160 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  para o alumínio,  $0,13 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  para a madeira e  $0,25 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  para os vedantes, sendo que estes valores se encontram na norma ISO 10077-2:2012 [9].

A Figura 2.2 que se segue apresenta o perfil D2 da ISO 10077-2:2012 [9], com as respetivas características e dimensões.

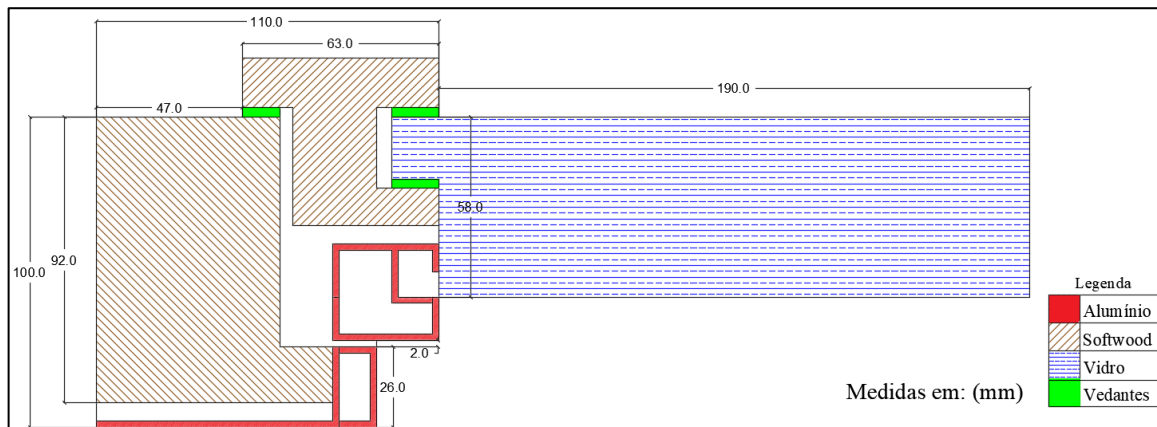


Figura 2.2 - Perfil D2, para verificação das ferramentas de cálculo preconizado na norma ISO 10077-2:2012.

Apresentam-se, na Tabela 2.1, os resultados calculados anteriormente e os valores fornecidos pela norma. Verifica-se a sua concordância, tendo por base o critério de aceitação apresentado na tabela.

Tabela 2.1 - Comparação entre resultados obtidos e os resultados fornecidos na norma ISO 10077-2:2012.

Perfil D2 ISO 10077-2:2012	$L_f^{2D}$	$U_f$
	$W/(m \cdot ^\circ C)$	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
Fornecido	0.263 (+/- 0.001)	1.44 (+/- 0.03)
Bisco	0.262	1.42

### 2.3.3 Validação experimental do cálculo do perfil em madeira

Nesta secção é descrita a validação experimental do cálculo de um perfil simples em madeira. Um dos critérios que se propõe caracterizar neste trabalho prático, é a resistência térmica dos sistemas de caixilho, sendo este coeficiente o parâmetro que tem maior peso no que respeita a influência da eficiência energética do sistema. Desta forma optou-se por realizar alguns ensaios laboratoriais que permitam caracterizar termicamente o caixilho.

De forma teórica é possível realizar uma caracterização térmica de caixilhos, utilizando a metodologia anteriormente analisada, com recurso a programas de análise bidimensional, baseado no método de elementos finitos, como o Bisco.

De forma a validar os resultados teóricos é proposto realizar um ensaio experimental utilizando o *guarded hot plate*. Este equipamento serve para determinar a condutibilidade térmica dos materiais.

Com o objetivo de caracterizar a condutibilidade térmica do caixilho, é então proposto a determinação dos fluxos de calor, em três provetes.

A Figura 2.3 apresenta o perfil de madeira em estudo.

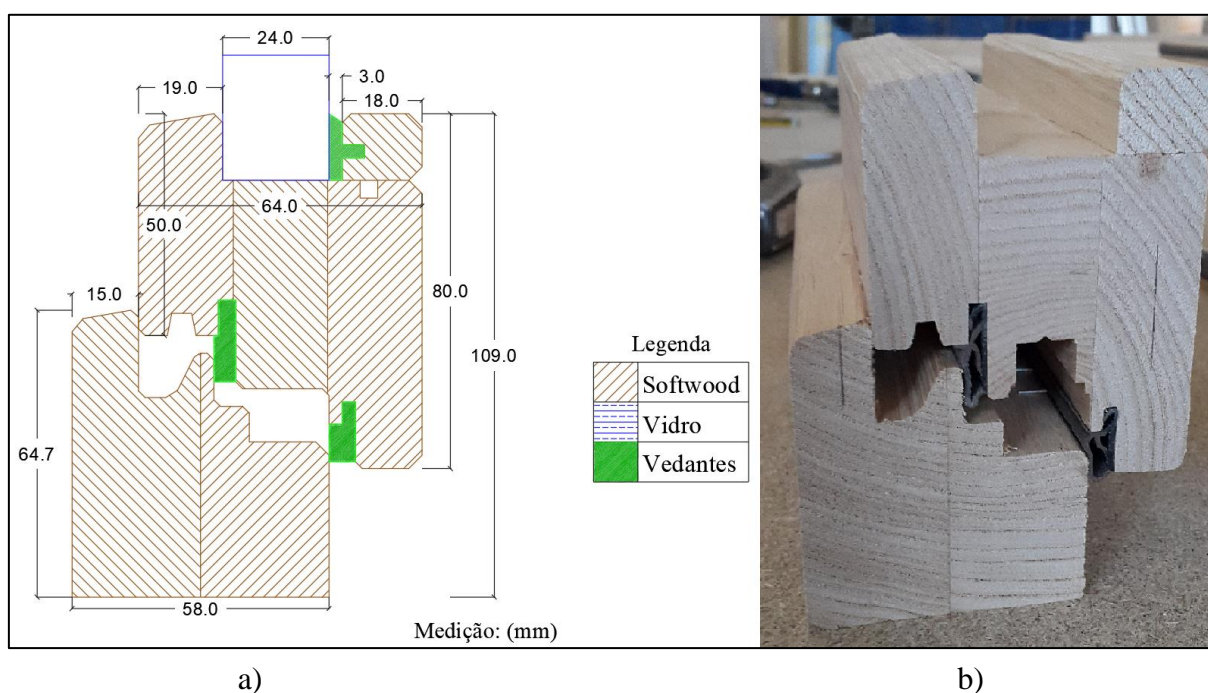


Figura 2.3 - Perfil de caixilharia em madeira utilizado na validação experimental: a) Desenho de pormenor de secção de corte de perfil de madeira; b) Provede real de perfil de madeira.

Os provetes têm as dimensões  $500 \times 500 \times 80 \text{ mm}^3$ . O primeiro provede é um provede de poliuretano; o segundo provede contém o perfil de madeira ilustrado na Figura 2.3 com  $150 \text{ mm}$  de comprimento localizado ao centro, sendo o restante volume preenchido com poliuretano; o terceiro provede contém o perfil de madeira de  $500 \text{ mm}$  de comprimento posicionado ao centro e o restante volume preenchido com poliuretano.

Na Figura 2.4 apresentam-se os desenhos esquemáticos dos provetes de ensaio bem como fotos reais dos provetes, enquanto que a Figura 2.5, ilustra o provede 3 colocado no  $\lambda$ -Meter EP500e.

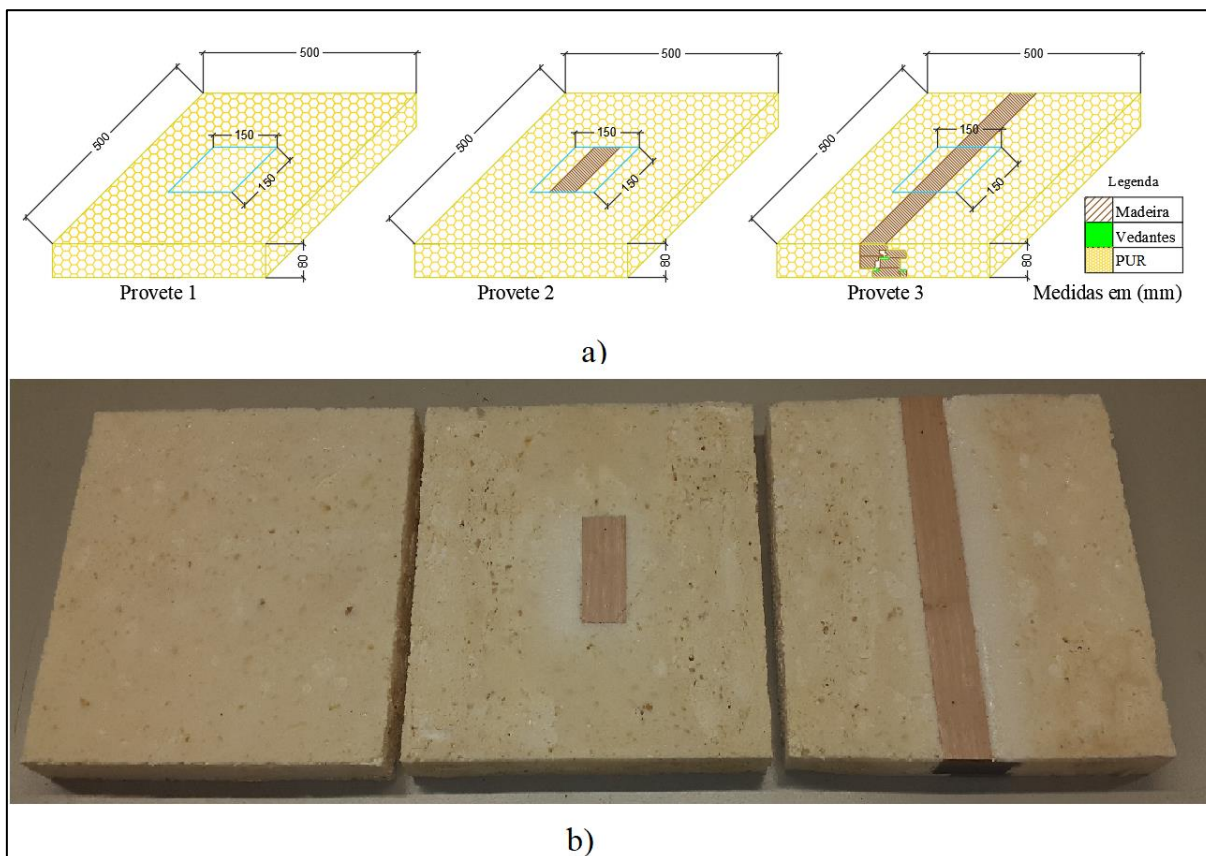


Figura 2.4 - Provetes em espuma de poliuretano com perfil de madeira embebido no seu interior. (Provete 1: Espuma PUR; Provete 2: Perfil com 150 mm; Provete 3: Perfil com 500 mm):  
a) Desenho esquemático com as dimensões dos provetes; b) Foto dos provetes reais.

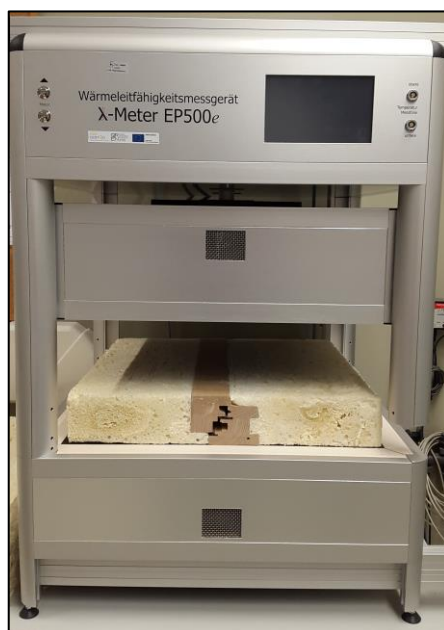


Figura 2.5 -  $\lambda$ -Meter EP500e: equipamento utilizado na determinação de condutibilidade térmica de provetes.

Os provetes foram ensaiados no equipamento  $\lambda$ -Meter EP500e de acordo com a norma EN 12664:2001 [11] e ISO 8302:1991 [12], onde se obteve o valor de condutibilidade à temperatura média de 25°C. O fluxo é determinado nos 150 x 150 mm<sup>2</sup> centrais. Também se determinou a condutibilidade térmica da madeira em placas de 150 x 150 x 21 mm<sup>3</sup>. O resultado foi de 0.13 W/(m. °C) para uma temperatura média de ensaio de 25°C. A Tabela 2.2 apresenta os resultados de condutibilidade para cada provete.

Tabela 2.2 - Resultados laboratoriais de condutibilidade de provetes com perfil de madeira.

Provetes	$\lambda$ (W/m.°C)	e (mm)
	25°C	
Provete 1	0.04545	80.89
Provete 2	0.08358	80
Provete 3	0.08351	80

Com base nestes resultados foi possível determinar o fluxo de calor para o conjunto perfil e espuma de poliuretano (para as 2 configurações: perfil de 150 mm e perfil de 500 mm) e determinaram-se as respetivas resistências térmicas. Para o perfil de 150 mm obteve-se 0.957 m<sup>2</sup>. °C/W, enquanto que o provete 3, com o perfil de 500 mm, se obteve 0.958 m<sup>2</sup>. °C/W. Procedeu-se também ao cálculo bidimensional dos fluxos de calor recorrendo ao Bisco para comparação com os resultados experimentais. O modelo geométrico utilizado no cálculo numérico encontra-se ilustrado na Figura 2.6. O resultado de resistência térmica foi igual 1.05 m<sup>2</sup>. °C/W.

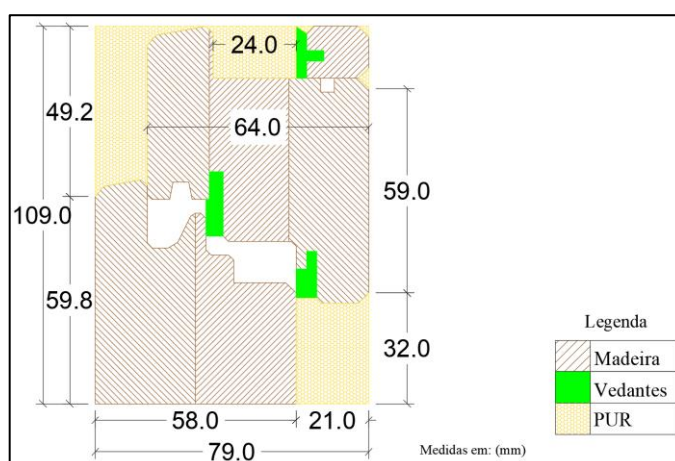


Figura 2.6 - Modelo geométrico do perfil de madeira embebido em espuma de poliuretano utilizado no Bisco.

Podemos concluir que o resultado teórico é bastante próximo dos resultados obtidos experimentalmente, o que nos garante a validação do cálculo e das propriedades térmicas dos materiais.

Para complementar os resultados anteriores, a Tabela 2.3 apresenta os resultados dos valores de coeficiente de transmissão térmica obtidos através do método experimental e do cálculo numérico (Bisco).

Tabela 2.3 - Valores de transmissão térmica obtidos através do Bisco e método experimental.

Temperatura de ensaio	$U$ ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	
	Calculado com o Bisco	Obtido do método experimental
25°C	1.06	0.95

O método experimental aqui apresentado pode constituir uma alternativa ao ensaio previsto na norma EN 12412-2 para geometrias simples de caixilhos.



### 3 OTIMIZAÇÃO DO PERFIL DE CAIXILHARIA

As otimizações que se apresentam têm como objetivo o aumento da eficiência energética mantendo a exequibilidade em termos de produção e a funcionalidade da janela, ou seja, garantir que continua a cumprir os restantes requisitos essenciais.

Numa fase inicial realizou-se uma pesquisa de vários sistemas de vãos envidraçados com certificado *Passive House*, e avaliaram-se os parâmetros térmicos alcançados.

Os valores de  $U$ , de sistemas de janelas compostos por madeira e alumínio, com certificado *Passive House* são tão baixos quanto  $0.58 - 0.8 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$  [6]. Desta pesquisa verificou-se que a utilização de materiais com condutibilidade térmica baixa, como a madeira permite a redução significativa do valor de transmissão térmica. Existem vários sistemas que incorporam uma proteção térmica na zona exterior do perfil. Destaca-se o uso de espumas poliéster.

Verificou-se também que sistemas híbridos como os perfis de madeira/alumínio desempenham um ótimo comportamento no controlo térmico.

De seguida é apresentada a descrição e desenvolvimento de novas geometrias de perfis de caixilharia bem como os seus resultados e verificação do critério de componente e de higiene *Passive House*.

#### 3.1 Descrição do desenvolvimento de novas geometrias

Para se obter uma certificação *Passive House*, é necessário cumprir vários critérios que permitam não só alcançar níveis elevados de conforto térmico e eficiência energética, mas também requisitos de higiene, evitando condensações e a consequente formação de bolores na superfície dos materiais. Este instituto implementou também modelos de certificação de componentes. Assim, o desempenho térmico de uma janela *Passive House* instalada deverá garantir que a superfície mais fria do espaço interior não está significativamente abaixo da temperatura no interior do mesmo, não devendo essa diferença ser superior a  $4,2 ^\circ C$ . Para que este critério seja cumprido, o valor de coeficiente de transmissão térmica da janela  $U_w$  e o valor de coeficiente de transmissão térmica da janela instalada  $U_{inst.}$ , deverão ser os adequados, sendo os valores máximos admissíveis dependentes do clima típico de cada país (por exemplo  $0.80$  e  $0.85 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , respetivamente, em climas temperados).

Tendo por motivação a criação de uma solução de vão envidraçado que cumpra os requisitos térmicos estabelecidos pelo instituto *Passive House* para climas temperados, a presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um perfil misto madeira/alumínio, com incor-

poração de aglomerado de cortiça expandido (ICB – *insulation cork board*). Este estudo suportou-se na utilização de um modelo numérico bidimensional estabelecido na norma ISO 10211:2007 [7], seguindo as regras de cálculo preconizadas na norma ISO 10077-1:2006 [8] e ISO 10077-2:2012 [9]. As ferramentas de modelação numérica utilizadas foram o Bisco e o Therm.

Numa fase inicial optou-se por se utilizar as duas ferramentas tendo-se efetuado algumas comparações entre elas. Estes resultados encontram-se no Anexo B. As diferenças entre os dois resultados foram consideradas aceitáveis.

Os modelos foram utilizados com o objetivo de reduzir o coeficiente de transmissão térmica da janela, favorecendo um melhor controlo de temperaturas no interior do edifício. A análise realizada foca-se no tratamento do caixilho, sendo este composto por aro e folha.

Os valores de condutibilidade térmica utilizados nos cálculos, apresentados na Tabela 3.1, foram os indicados nas normas ISO 10077-2:2012 [9].

Tabela 3.1 - Condutibilidade térmica de materiais utilizados no cálculo.

Material	Condutibilidade $\lambda$
	W/(m.°C)
Madeira	0.13
Alumínio	160
Vedantes (EPDM)	0.25
Silicon pure	0.35
ICB	0.045
PUR	0.042

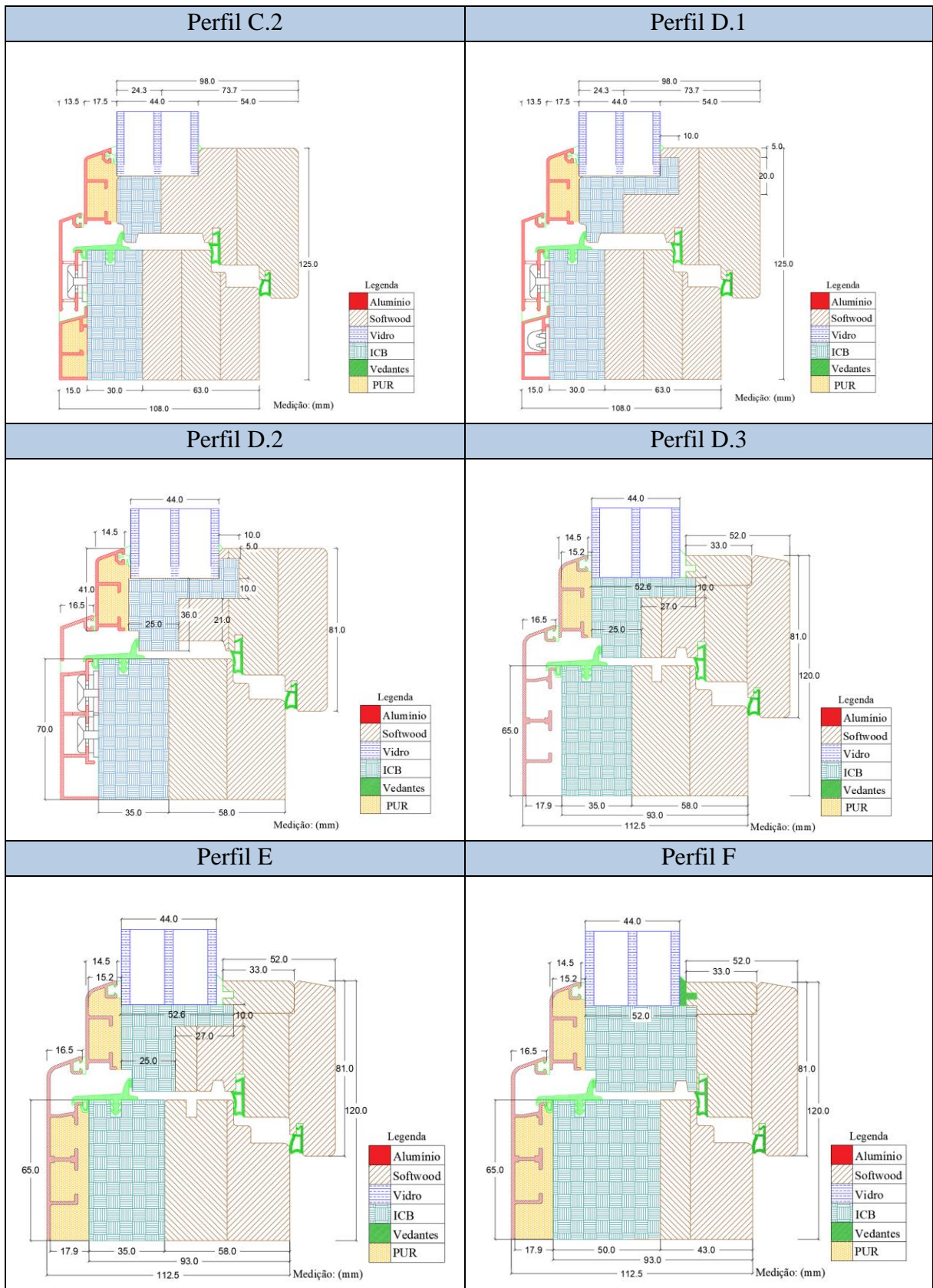
A Tabela 3.2 apresenta resumidamente os modelos de perfis desenvolvidos a partir do modelo de perfil inicial.



Tabela 3.2 - Geometria e características de perfis otimizados.

Perfil inicial	Perfil A.1
<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Alumínio</li> <li>Softwood</li> <li>Vidro</li> <li>Vedantes</li> </ul> <p>Medição: (mm)</p>	<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Alumínio</li> <li>Softwood</li> <li>Vidro</li> <li>ICB</li> <li>Vedantes</li> </ul> <p>Medição: (mm)</p>
Perfil A.2	Perfil B.1
<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Alumínio</li> <li>Softwood</li> <li>Vidro</li> <li>ICB</li> <li>Vedantes</li> </ul> <p>Medição: (mm)</p>	<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Alumínio</li> <li>Softwood</li> <li>Vidro</li> <li>ICB</li> <li>Vedantes</li> </ul> <p>Medição: (mm)</p>
Perfil B.2	Perfil C.1
<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Alumínio</li> <li>Softwood</li> <li>Vidro</li> <li>ICB</li> <li>Vedantes</li> </ul> <p>Medição: (mm)</p>	<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Alumínio</li> <li>Softwood</li> <li>Vidro</li> <li>ICB</li> <li>Vedantes</li> <li>PUR</li> </ul> <p>Medição: (mm)</p>

Tabela 3.2 (continuação) - Geometria e características de perfis otimizados.



### *Perfil A.1*

O Perfil A.1 é a primeira otimização do perfil inicial. Consistiu no aumento da largura da secção do perfil, com a introdução de 30 mm de ICB (insulation cork board) na zona exterior do aro do sistema, bem como o aumento da secção da folha. Sendo assim, temos um aro composto por madeira, ICB e alumínio. A espessura total do vidro também foi aumentada para 44 mm seguindo o padrão de outros sistemas já certificados. Optou-se por não se considerar variações no vidro uma vez que o objetivo do trabalho se centra no desenvolvimento do perfil.

É proposto introduzir o ICB, por este ser um produto mais sustentável, do que as espumas poliéster, e com ótimas características térmicas. A condutibilidade do ICB utilizado ronda os 0.045 W/(m. °C).

### *Perfil A.2*

Nesta análise é proposto introduzir ICB no interior do perfil, uma vez que a sua condutibilidade térmica é inferior à da madeira leve (*Soft wood* = 0.130 W/(m. °C)).

Este processo consiste em reduzir a área da secção de madeira aumentando a área de ICB. Neste caso, no processo de colagem de madeira laminada terá que se introduzir barras de ICB, de perfil quadrado 10x10 mm, em todo o comprimento do perfil.

### *Perfil B.1*

No Perfil B.1 é proposto introduzir 30 mm de ICB na zona exterior do aro e 24 mm de ICB na zona exterior da folha, criando assim uma barreira térmica com uma área maior, abrangendo toda a área de madeira. O intuito é proporcionar ao sistema uma maior proteção térmica.

Da análise realizada ao modelo de otimização, Perfil B.1, os resultados obtidos são motivadores, uma vez que conseguimos reduzir significativamente o valor do coeficiente de transmissão térmica para  $U_f = 0.824 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ .

### *Perfil B.2*

O Perfil B.2 consiste em reproduzir o mesmo processo de otimização que ocorreu na variante 2 do Perfil A, ou seja, introdução de ICB no interior do perfil.

Desta análise, verificamos que a influência desta otimização é proporcionalmente equivalente a influência que se registou no Perfil A.2, ou seja, não verificamos reduções significativas de coeficiente de transmissão térmica com esta intervenção.

### *Perfil C.1*

O Perfil C.1 parte da otimização do Perfil B, havendo a preocupação do tratamento da cavidade-de-ar que faz a ligação do vidro com o perfil de alumínio. Esta cavidade é dividida em duas partes. Optou-se, nesta fase, por preencher a parte da cavidade em contacto com o vidro com PUR.

Após a modelação do Perfil C.1, podemos verificar que existe uma melhoria do comportamento térmico.

### *Perfil C.2*

Após a melhoria verificada com o Perfil C.1, no Perfil C.2 além do preenchimento da cavidade 1, procedeu-se ao enchimento das cavidades 3 e 6 com (PUR). As cavidades de cada perfil são apresentadas em Anexo A.

Esta otimização não conduz a nenhuma contribuição significativa para a redução do valor do coeficiente de transmissão térmica, uma vez que as cavidades-de-ar do perfil de alumínio são de pequeno volume.

Conclui-se que há a necessidade de tratamento da folha do sistema, caso se pretenda melhorar o desempenho.

### *Perfil D.1*

Dando continuidade ao estudo da zona de ligação do vidro com o perfil, é proposto na otimização Perfil D.1, considerar a contribuição do isolamento (PUR) na cavidade 1, continuando as restantes cavidades preenchidas com ar, sendo também proposto que o vidro assente em ICB ao invés de assentar diretamente no perfil de madeira. Com esta solução podemos verificar que as temperaturas na zona de ligação do vidro com o perfil, aumentaram significativamente, este aumento pode ser verificado nos diagramas bidimensionais de temperaturas que se encontram em Anexo C, contribuindo para a redução do valor de coeficiente de transmissão térmica de caixilho, obtendo um valor de  $U_f = 0.790 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

### *Perfil D.2*

De forma a facilitar e ajustar o processo de fabrico da janela inicial para o fabrico da janela otimizada, foram realizadas algumas alterações, como por exemplo a alteração do perfil de alumínio para um design mais simples e retilíneo, com cavidades-de-ar de maior volume. Com o Perfil D.2, pretende-se averiguar se existem alterações de valores de resistência térmica com o objetivo de se passar à fase de fabricação da janela.

### *Perfil D.3*

Devido a limites de fresagens a altura do perfil do aro foi alterada, bem como o perfil da folha que sofreu alterações quanto à ligação do vidro, de modo a criar uma base sólida de suporte, permitindo um bom funcionamento mecânico. Surgiu assim a otimização Perfil D.3.

### *Perfil E*

Este perfil é uma otimização do Perfil D, onde é proposto o preenchimento das cavidades-de-ar do aro e folha com (PUR), ficando assim o sistema só com cavidades-de-ar que sejam necessárias para desempenho e correto funcionamento mecânico da janela. Deste modo surge o Perfil E.



### Perfil F

O Perfil F é a última otimização do estudo, onde foi possível verificar a considerável redução do valor de transmissão térmica do caixilho  $U_f$ . Neste perfil pretende-se averiguar o comportamento do Perfil E com um aumento da área de ICB introduzida em ambos os perfis, aro e folha. Da simulação do modelo obtemos o valor de transmissão térmica de caixilho  $U_f = 0.593 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

No âmbito do presente trabalho optou-se por selecionar o Perfil E para o teste de produção em âmbito fabril, o qual foi depois usado na campanha experimental (Capítulo 5).

## 3.2 Resultados do cálculo bidimensional

A Tabela 3.3 que se segue, apresenta o resumo dos resultados obtidos das modelações e análises realizadas com recurso ao programa Bisco e de acordo com o método de cálculo da normativa ISO 10077-2:2012 [9].

Tabela 3.3 - Resumo de resultados da caracterização térmica de perfis de caixilharia.

Perfil	$L_f^{2D}$	$Q$	$U_f$
	$W/m \cdot ^\circ C$	$W/m$	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
Perfil inicial	0.382	7.636	1.447
Perfil A.1	0.251	5.017	0.942
Perfil A.2	0.248	4.967	0.922
Perfil B.1	0.236	4.723	0.824
Perfil B.2	0.234	4.680	0.807
Perfil C.1	0.235	4.696	0.813
Perfil C.2	0.235	4.694	0.813
Perfil D.1	0.232	4.637	0.790
Perfil D.2	0.227	4.534	0.749
Perfil D.3	0.224	4.473	0.754
Perfil E	0.223	4.450	0.745
Perfil F	0.204	4.086	0.593
Perfil Madeira	0.404	8.077	1.515
Perfil D2 ISO 10077-2:2012	0.260	5.205	1.421

Em resumo da análise realizada, verificamos que todas as soluções de modelos de otimização propostos, contribuem para a redução do coeficiente de transmissão térmica do caixilho de janela, sendo este um dos principais parâmetros a que o presente trabalho se propõem tratar. Numa comparação do valor de  $U_f$  correspondente ao Perfil inicial com o valor do perfil que obteve melhor desempenho, o Perfil F, verificamos que foi possível reduzir o valor para metade, anteriormente o perfil possuía um valor de  $U_f = 1.44 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , com a otimização Perfil E

o valor baixa para  $U_f = 0.75 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , sendo esta uma redução de grande importância com efeitos notáveis no que respeita ao comportamento térmico do sistema. Da última otimização do sistema, o Perfil F, verificamos que é o perfil que apresenta maior redução de coeficiente de transmissão térmica através do caixilho, atingindo um valor notável de  $U_f = 0.59 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

Podemos concluir que a introdução de ICB em sistemas de caixilhos de janelas, tem um desempenho relevante no que respeita ao controlo de temperaturas.

Verificou-se que perfis de alumínio isolados termicamente, como no caso de introdução de PUR, têm melhor desempenho térmico quando comparados aos perfis de alumínio simples.

Do desenvolvimento de perfis otimizados, podemos ainda verificar a importância da ligação do vidro com o perfil de madeira, sendo esta, a zona de maior preocupação do que respeita ao controlo de temperaturas.

Para uma melhor perceção do aumento do desempenho térmico dos perfis otimizados, apresenta-se na figura que se segue os gráficos de distribuição bidimensional de temperaturas correspondentes ao Perfil inicial e aos perfis otimizados, Perfil E e Perfil F.

Os resultados da distribuição bidimensional de temperaturas dos restantes perfis encontra-se no Anexo C.

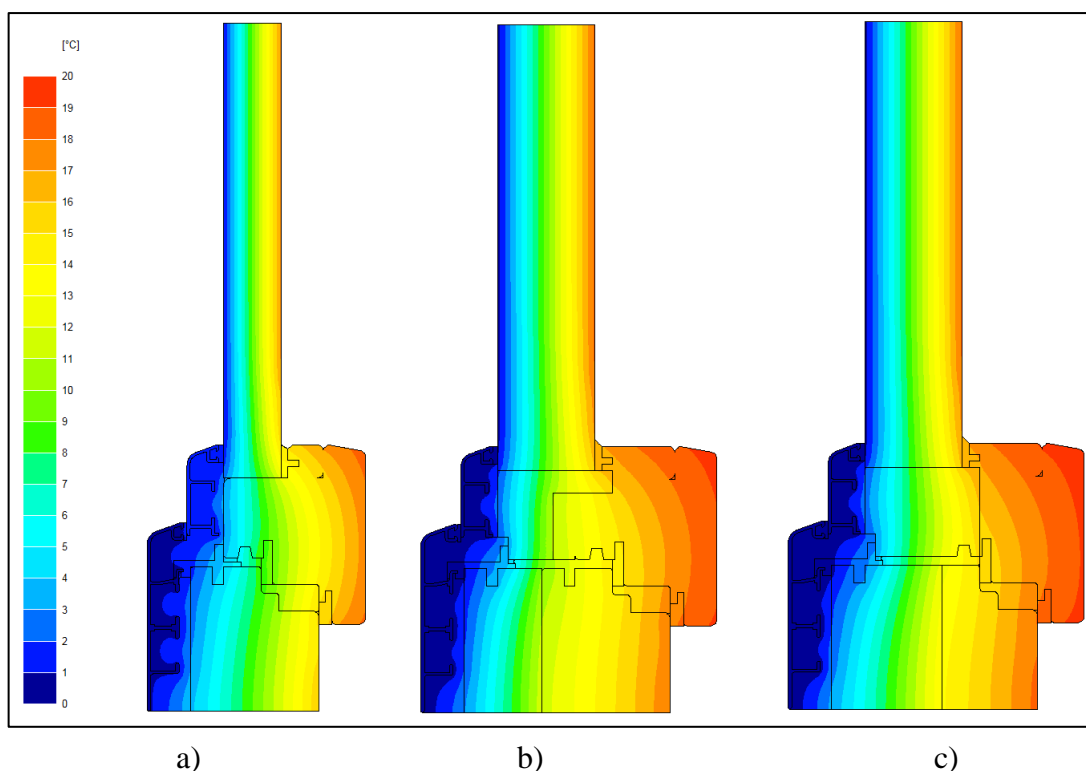


Figura 3.1 - Distribuição bidimensional de temperaturas respeitante ao cálculo do  $U_f$ : a) Perfil inicial; b) Perfil E; c) Perfil F.

### 3.3 Verificação do critério de componente Passive House

A certificação no âmbito da *Passive House* propõe uma classificação das janelas em função das diferentes regiões climáticas, apresentado sete classificações possíveis. Para o clima frio-temperado, correspondente à zona climática 3, é necessário que o valor de transmissão térmica da janela,  $U_w$ , obedeça à seguinte condição:  $U_w \leq 0.80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Apresenta-se, na Tabela 3.4, a verificação dos requisitos de comportamento térmico das janelas para os diferentes perfis. O cálculo de  $U_w$ , foi efetuado através da seguinte expressão, para um coeficiente de transmissão térmica de referência do vidro,  $U_g$  igual a  $0.70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ :

$$U_w = \frac{U_g \cdot A_g + U_f \cdot A_f + \Psi_g \cdot l_g}{A_g + A_f} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (3)$$

onde,

$A_g$  é a área visível de vidro em  $\text{m}^2$ ,  $A_f$  é a área do perfil,  $\Psi_g$  é o coeficiente de transmissão térmica linear da ligação caixilho-vidro e  $l_g$  é o perímetro da ligação caixilho-vidro.

A tabela que se segue apresenta a verificação do critério de componente *Passive House*.

Tabela 3.4 - Verificação do critério de componente *Passive House* para os diferentes perfis desenvolvidos.

	$U_f$	$U_g$	$A_g$	$A_f$	$\Psi_g$	$l_g$	$U_w$
	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\text{m}^2$	$\text{m}^2$	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	$\text{m}$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
Perfil B.2	0.807	0.7	1.227	0.593	0.06	4.46	0.882
Perfil D.2	0.754	0.7	1.227	0.593	0.06	4.46	0.865
Perfil E	0.745	0.7	1.227	0.593	0.052	4.46	0.842
Perfil F	0.593	0.7	1.227	0.593	0.052	4.46	0.793

Dos resultados obtidos podemos concluir que o Perfil F é o único que cumpre o requisito de comportamento *Passive House* para a zona climática 3 (*Cool-Temperate*) ( $U_w = 0.793 \leq 0.80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ), enquanto que o perfil E não verifica por  $0.04 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Verificamos também que o Perfil E cumpre os requisitos de certificação *Passive House* para a zona climática 4 (*Warm-temperate*).

### 3.4 Verificação do critério de higiene Passive House

Ao longo da análise de perfis otimizados, bem como a interpretação dos gráficos de distribuição bidimensional de temperaturas, foi possível verificar a importância do tratamento da zona de ligação de vidro e caixilho de janelas. De forma a tratar esta zona, foi proposto que o sistema de vidro fosse produzido utilizando espaçadores compostos por: Butileno, Polipropileno, Silica, Polissulfeto, e por último um perfil em aço inox, de forma a garantir a resistência mecânica do espaçador.

O desempenho térmico de uma janela *Passive House*, tendo como coeficiente de referência do vidro igual a  $0.70 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , e realizando a simulação do perfil com o perímetro do vidro  $R_{si} = 0.25 \text{ m}^2\text{C/W}$ , o sistema para a certificação correspondente para a zona climática 3 deverá garantir que  $f_{R_{si}=0.25 \text{ m}^2\text{C/W}} \geq 0.70$ , garantindo assim que a superfície mais fria do espaço interior não esteja significativamente abaixo da temperatura no interior do mesmo, não devendo essa diferença ser superior a  $4,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

O valor de  $f_{R_{si}}$  foi calculado segundo a norma EN ISO 10211 [7].

A Tabela 3.5 apresenta os resultados da verificação deste critério.

Tabela 3.5 - Verificação de critério de higiene *Passive House*.

	$f_{R_{si}}$ ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ )
Perfil E	0.64
Perfil F	0.65

Dos resultados anteriores verificamos que ambos os perfis cumprem o requisito de higiene para a zona climática 4 *Warm-temperate*, ficando estes valores próximos de cumprir o requisito de higiene para a zona climática 3 *Cool-temperate*.



## 4 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE LIGAÇÕES ENTRE O PERFIL OTIMIZADO E DIFERENTES TIPOS DE PAREDES

A ligação entre os perfis de caixilharia de vãos envidraçados e as paredes dos edifícios constituem pontes térmicas lineares (PTL). Este tipo de PTL é normalmente caracterizado por fluxos de calor elevados que por sua vez têm grande influência nas temperaturas superficiais, revelando-se de extrema importância a análise do posicionamento da janela no pano de parede. O objetivo é identificar detalhes construtivos ótimos em termos de minimização dos efeitos da PTL [14][15].

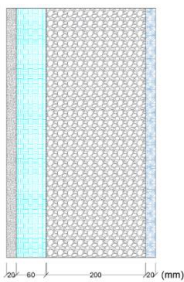
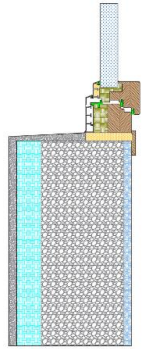
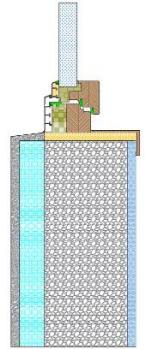
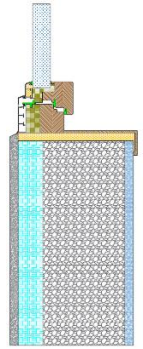
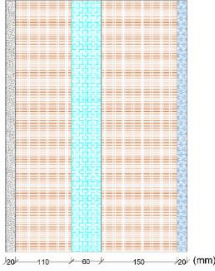
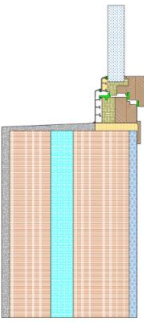
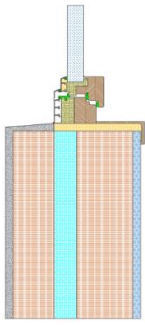
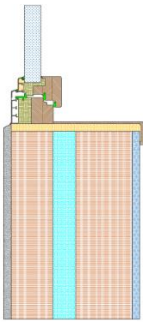
Como as paredes podem apresentar soluções de isolamento pelo interior, exterior, repartido na sua espessura ou no interior da caixa-de-ar em soluções de pano duplo, a posição da janela e os remates de instalação terão grande impacto no desempenho global do sistema [15].

O capítulo 4 destina-se a avaliar a importância da instalação da janela. Desta forma é apresentada a descrição do problema bem como os resultados obtidos da análise e no final do capítulo realiza-se a verificação do critério de instalação *Passive House*.

### 4.1 Descrição do problema

Neste capítulo pretende-se analisar o efeito da instalação da janela. Utilizou-se para esse efeito o perfil de caixilharia com a referência Perfil E. O principal objetivo é perceber qual a importância do posicionamento da janela numa parede, variando o alinhamento da janela e da distância de instalação ao isolamento da parede. Para isso serão quantificadas as perdas de calor através dos diferentes detalhes de ligação, dadas pelos respetivos coeficientes de transmissão térmica linear  $\Psi$  [13]. De forma a aproximar o estudo das práticas de construção que se verificam atualmente, analisou-se a instalação do perfil de caixilharia em 2 sistemas construtivos correntes de paredes: (A) Sistema de parede ETICS; (B) Parede dupla de alvenaria de tijolo. Para cada sistema de parede foram analisadas 3 soluções diferentes para a instalação do perfil, de acordo com os esquemas apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Instalação de perfil de caixilharia.

Sistemas de Parede		Posição de Instalação do Perfil de Caixilharia.		
		1	2	3
A				
				

A parede (A) é uma parede simples constituída por (do interior para o exterior) por 2 cm de reboco, 20 cm de betão no qual foi aplicado o ETICS com 6 cm de EPS. A parede (B) é uma parede dupla de alvenaria de tijolo constituída (do interior para o exterior) por 2 cm de reboco, tijolo de 15 cm, 6 cm de EPS, tijolo de 11 cm e 2 cm de reboco, do interior para o exterior.

Na zona de ligação entre o caixilho e parede usou-se uma camada de 2 cm de PUR com condutibilidade térmica igual a 0.042 W/(m.°C).

De forma a calcularmos a perda linear  $\Psi$  existente na ligação do perfil com a parede, é necessário caracterizar o sistema separadamente. Para isso determinou-se o fluxo de calor que atravessa o perfil de caixilharia em estudo ( $L_f^{2D}$  em W/(m.°C)), o fluxo de calor através das paredes,  $U_{wall} \cdot l_{wall}$ , em W/(m.°C) onde  $l_{wall}$  é o comprimento, em (m), da parede simulada e o fluxo total de calor que atravessa todo o pormenor construtivo (Parede + Perfil)  $L_{total}^{2D}$ , em W/(m.°C). Desta forma podemos contabilizar o valor de  $\Psi$  através da seguinte expressão:

$$\Psi = L_{total}^{2D} - L_f^{2D} - U_{wall} \cdot l_{wall} \text{ W/(m}^\circ\text{C)} \quad (4)$$

O fluxo total de calor,  $L_{total}^{2D}$ , foi determinado através de cálculo numérico, de acordo com a metodologia da norma ISO 10211:2007 [7], com recurso ao software Bisco da Physibel.

## 4.2 Resultados de cálculo bidimensional da ligação janela/parede

De seguida são apresentados os resultados obtidos da análise realizada. A Tabela 4.2 apresenta o fluxo de calor, em  $W/m$ , através dos diferentes elementos construtivos. A Figura 4.1 apresenta as perdas térmicas lineares em  $W/m$  obtidas nos diferentes pormenores de ligação caixilho-parede analisados.

Tabela 4.2 - Fluxo de calor dos diferentes sistemas, paredes, perfil e parede/perfil.

	Fluxo de calor (Q)
Paredes	(W/m)
ETICS	5.287
Parede dupla	4.112
Sistemas Parde+Perfil	
ETICS Posição de instalação 1	26.377
ETICS Posição de instalação 2	13.387
ETICS Posição de instalação 3	9.828
Parede dupla Posição de instalação 1	11.836
Parede dupla Posição de instalação 2	8.687
Parede dupla Posição de instalação 3	9.357
Perfil	
Perfil E	4.473

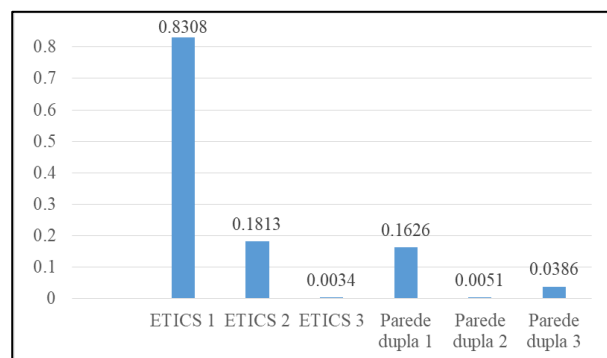


Figura 4.1 - Perda térmica linear  $\Psi_{Perfil/Parede}$  ( $W/m$ ) em função do posição da janela para os dois sistemas de parede.

Os resultados anteriores permitem confirmar a grande influência do posicionamento da instalação da janela no comportamento térmico de todo o pormenor construtivo, evidenciando a importância do tratamento das PTL através da escolha de soluções construtivas otimizadas. Da análise dos valores obtidos podemos também verificar a importância da continuidade de isolamento, uma vez que nesta solução construtiva a perda térmica linear apresenta valores baixos. De forma a facilitar a compreensão dos resultados, a Figura 4.2 ilustra a distribuição bidimensional de temperaturas correspondentes para as 3 posições de instalação no sistema de parede ETICS, sendo visível a perturbação na distribuição de temperaturas quando a janela não está alinhada com o isolamento.

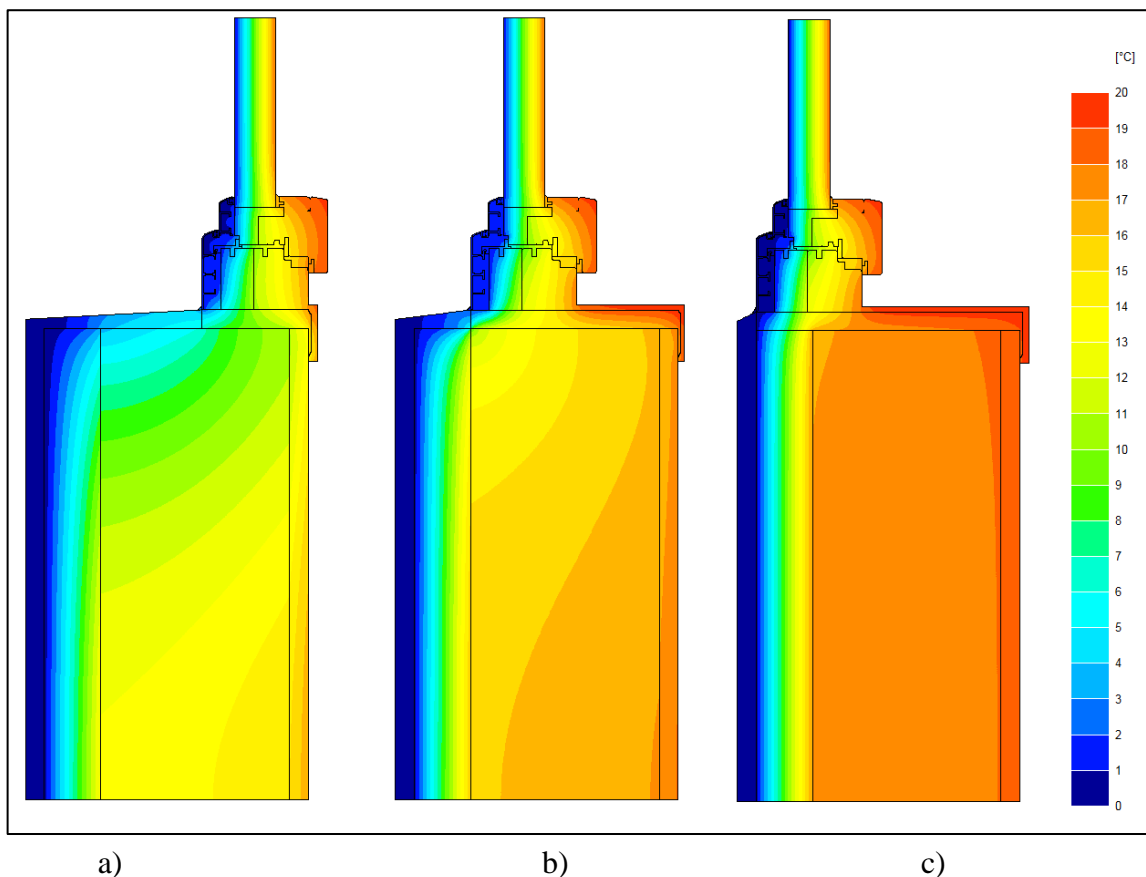


Figura 4.2 - Distribuição bidimensional de temperaturas dos pormenores de ligação janela/parede para a situação de sistema ETICS: a) janela posicionada à face interior da parede; b) janela posicionada na zona central; c) janela posicionada à face exterior da parede.

### 4.3 Verificação do critério de instalação Passive House

A certificação no âmbito da *Passive House* propõe uma classificação da instalação de janelas em função das diferentes regiões climáticas. Para o clima frio-temperado, correspondente à zona climática 3, é necessário que o valor de transmissão térmica da instalação da janela,  $U_{\text{instalação}}$ , obedeça à seguinte condição: ( $U_{\text{instalação}} \leq 0.85 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ). A Tabela 4.3 apresenta a verificação dos requisitos de comportamento térmico das janelas instaladas. O cálculo de  $U_{\text{instalação}}$ , foi obtido através da seguinte expressão:

$$U_{\text{instalação}} = \frac{U \cdot A_w + \sum l_i \cdot \Psi_i}{A_w} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (5)$$

Tabela 4.3 - Verificação de critério de instalação de janela *Passive House*.

	$U_w$	$A_w$	$l_i$	$\Psi_i$	$U_{instalação}$
	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	$m^2$	$m$	$W/(m \cdot ^\circ C)$	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
Perfil E	0.842	1.82	5.42	0.0034	0.85
Perfil F	0.793	1.82	5.42	0.0034	0.80

Dos resultados obtidos e apresentados na Tabela 4.3, podemos verificar que ambos os perfis, E e F, cumprem o critério de instalação de janela para a zona climática 3, correspondente ao clima (*Cool-Temperate*), onde o critério de instalação da janela,  $U_{instalação}$ , obedece à seguinte condição:  $U_{instalação} \leq 0.85 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

Em resumo as tabelas que se seguem apresentam os resultados da verificação dos critérios *Passive House* para os perfis E e F.

Tabela 4.4 - Classificação *Passive House* para janela com Perfil E.

Zona Climática	Higiene	Componente	Instalação	Vidro de referência	Classificação Final
	$F_{Rsi=0.25 m^2 \cdot ^\circ C W} \geq$	$U_w [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$	$U_{inst.} [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$	$U_g [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$	
<i>Arctic</i>	0,80	0,40	0,45	0,35	Classificação Final
<i>Cold</i>	0,75	0,60	0,65	0,52	
<i>Cool-Temperate</i>	0,70	0,80	0,85	0,70	
<i>Warm-Temperate</i>	0,65	1,00	1,05	0,90	
<i>Warm</i>	0,55	1,20	1,25	1,10	
<i>Hot</i>	-	1,20	1,25	1,10	
<i>Very Hot</i>	-	1,00	1,05	0,90	
Perfil E	0,64	0,84	0,85	0,70	<b>Warm</b>

Tabela 4.5 - Classificação *Passive House* para janela com Perfil F.

Zona Climática	Higiene	Componente	Instalação	Vidro de referência	Classificação Final
	$F_{Rsi=0.25 m^2 \cdot ^\circ C W} \geq$	$U_w [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$	$U_{inst.} [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$	$U_g [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$	
<i>Arctic</i>	0,80	0,40	0,45	0,35	Classificação Final
<i>Cold</i>	0,75	0,60	0,65	0,52	
<i>Cool-Temperate</i>	0,70	0,80	0,85	0,70	
<i>Warm-Temperate</i>	0,65	1,00	1,05	0,90	
<i>Warm</i>	0,55	1,20	1,25	1,10	
<i>Hot</i>	-	1,20	1,25	1,10	
<i>Very Hot</i>	-	1,00	1,05	0,90	
Perfil F	0,65	0,79	0,80	0,70	<b>Warm-Temperate</b>

Da Tabela 4.4 podemos verificar que o Perfil E cumpre os requisitos de certificação para as zonas climáticas (*Very Hot, Hot e Warm*), sendo que os resultados obtidos estão próximos de cumprir os requisitos de certificação para o clima (*Warm-Temperate*).

Da Tabela 4.5 verificamos que o Perfil F cumpre os requisitos de certificação *Passive House* para as zonas climáticas (*Very Hot, Hot, Warm e Warm-Temperate*).

Em geral podemos concluir que é importante a continuidade deste estudo, uma vez que em ambas as soluções otimizadas dos perfis ficam próximo de atingir uma melhor classificação.

## 5 CAMPANHA EXPERIMENTAL DA JANELA DESENVOLVIDA

Após a caracterização dos perfis otimizados bem como a verificação dos critérios *Passive House* considerou-se relevante a exequibilidade da produção da janela assim como determinar o seu desempenho funcional.

Optou-se por produzir o perfil com a referência E utilizando-o no fabrico de janela com uma folha.

Desta forma a Fernando José Rito unipessoal, lda, disponibilizou-se a fabricar o protótipo de janela com o Perfil E. Esta empresa produz correntemente o perfil inicial que serviu de base a este estudo.

No Anexo D, apresenta-se um conjunto de imagens ilustrativas da fabricação do protótipo em análise.

A campanha experimental foi realizada no ITeCons, tendo-se submetido a janela a ensaios de (AEV- permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento) em câmara de caixilhos e ensaios de determinação do isolamento a sons aéreos em câmara acústica, de modo a verificar as funcionalidades da janela.

Neste capítulo são apresentados os métodos de ensaio em câmara de caixilhos e em câmara acústica bem como os respetivos resultados.

### 5.1 Descrição dos métodos de ensaio AEV em câmara de caixilhos

Os ensaios conhecidos por AEV correspondem ao ensaio de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento.

No ensaio de permeabilidade ao ar, de acordo com as normas EN 1026:2016 [26] e EN 12207:1999 [16], a janela foi instalada na câmara de caixilhos do ITeCons, sendo que a janela tem abertura para dentro, onde foi sujeita a incrementos de pressões positivas de 50 Pa de 5 em 5 minutos, registando-se a permeabilidade ao ar em função da área total e em função do comprimento de junta de abertura. O processo repete-se para as pressões negativas. Dos resultados obtidos atribui-se uma classe de permeabilidade ao ar.

No ensaio de determinação da estanquidade à água, de acordo com as normativas EN 1027:2016 [17] e EN 12208:1999 [18], o provete é submetido a uma pulverização de água contínua durante 15 min e a uma pressão de ensaio de 0 Pa. Posteriormente, foram efetuados incrementos de pressão de 50 Pa, de 5 em 5 minutos mantendo-se a pulverização contínua, realizando-se o registo da pressão quando a janela deixou de garantir estanquidade.

No ensaio de determinação da resistência ao vento, de acordo com as normativas EN 12211:2016 [19] e EN 12210:2016 [20], realizaram-se 3 testes:

- Teste de flecha: pressões positivas e negativas até P1;
- Teste de pressões repetidas: pressões positivas e negativas até P2;
- Teste de segurança: pressões positivas e negativas até P3.

Sendo que os valores das pressões de teste são:  $P1 = 1600 Pa$ ,  $P2 = 800 Pa$  e  $P3 = 2400 Pa$ .



Figura 5.1 - Janela com Perfil E instalada em câmara de caixilhos.

### 5.1.1 Resultados dos ensaios AEV

No ensaio de permeabilidade ao ar, com incrementos de pressões positivas e negativas, a janela apresentou valores baixos de fugas de ar. A Figura 5.2 apresenta os valores de permeabilidade ao ar quando se estabelecem pressões positivas e negativas.



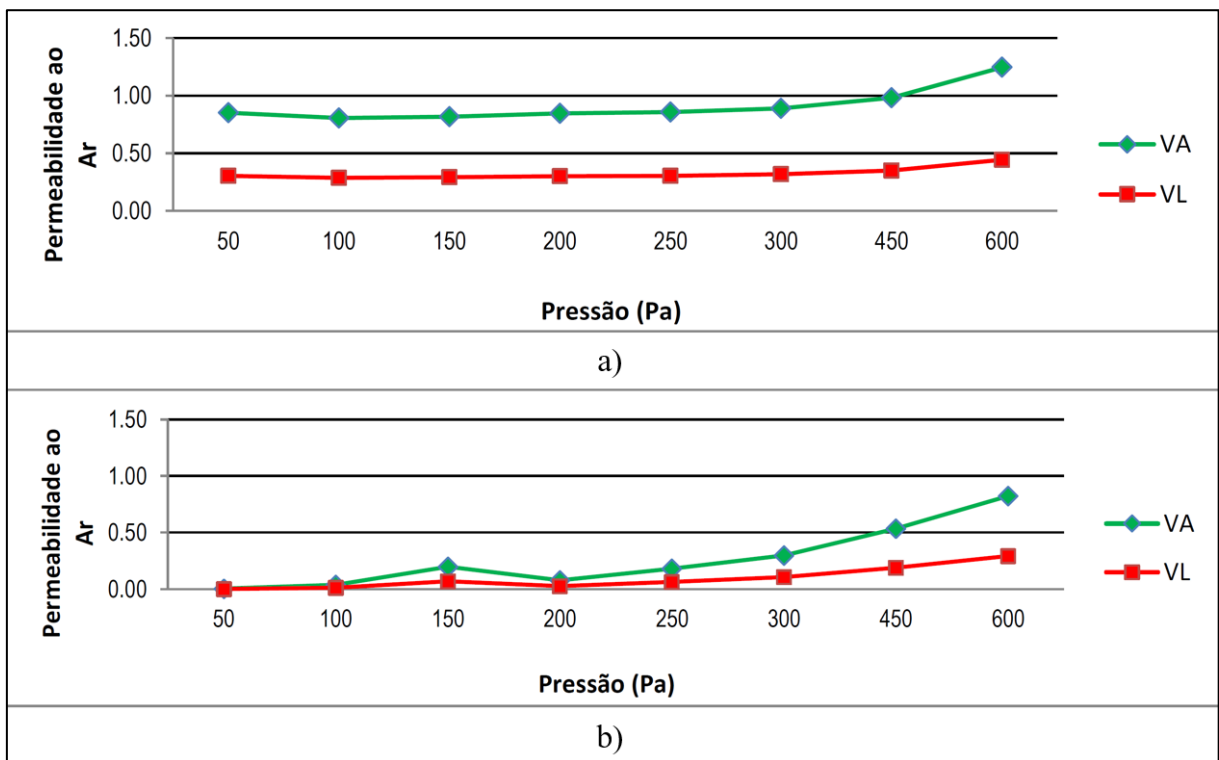


Figura 5.2 - Valores de permeabilidade ao ar em função da área, VA ( $m^3/h.m^2$ ), e do comprimento da junta de abertura, VL ( $m^3/h.m$ ): a) Para pressões positivas; b) Para pressões negativas.

Durante o ensaio registaram-se os valores de permeabilidade e verificaram-se os pontos das fugas de ar significativas.



Figura 5.3 - Pontos onde se identificaram as fugas de ar mais significativas.

Recorrendo à norma EN 12207:1999 [16], a janela obteve uma classe 4 em termos de permeabilidade ao ar.

Quanto ao ensaio de estanquidade a água, a janela foi submetida a uma pulverização de água com incrementos de elevadas pressões. A Tabela 5.1, apresenta os resultados de estanquidade à água.

Tabela 5.1 - Resultados de ensaio de estanquidade à água.

Método de pulverização usado		Método A
Nº de aspersores utilizados		3
Caudal total de água		6 l/min
Pressão (Pa)	Duração (min)	Estado da janela
0	15	Totalmente Estanque
50	5	Totalmente Estanque
100	5	Totalmente Estanque
150	5	Totalmente Estanque
200	5	Totalmente Estanque
250	5	Totalmente Estanque
300	5	Totalmente Estanque
450	5	Totalmente Estanque
600	5	Totalmente Estanque
750	5	Perda de estanquidade ao fim de 3min



Figura 5.4 - Identificação do ponto onde se verificou a perda de estanquidade à água da janela.

Recorrendo à norma EN 12208:1999 [18], a janela obteve a classificação final 9A, revelando ser uma janela com uma elevada capacidade de estanquidade.

No ensaio de resistência ao vento foram instalados comparadores na janela em 5 posições ao longo do perfil, de modo a registar as deformações. A Figura 5.5 identifica os pontos de medição.



Figura 5.5 - Localização dos pontos de medição de deformações relativas ao ensaio de resistência ao vento.

As medições foram registadas e apresentam-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Medição de deformações nos vários pontos durante o ensaio de resistência ao vento.

Pressão (Pa)	Deformação (mm)				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
320	0.00	0.03	0.09	0.10	-0.58
640	0.00	0.19	0.12	0.21	-0.70
960	0.19	0.35	0.17	0.28	-0.68
1280	0.45	0.58	0.14	0.42	-0.50
1600	0.68	0.80	0.20	0.57	-0.56
0	0.00	-0.05	0.00	0.00	0.00
-320	-0.21	-0.24	0.08	0.03	-0.50
-640	-0.42	-0.46	0.09	0.04	-0.61
-960	-0.61	-0.67	0.14	-0.09	-0.65
-1280	-0.82	-0.88	0.08	-0.12	-0.81
-1600	-1.03	-0.11	0.09	-0.32	-0.90
0	-0.47	-0.32	-0.08	-0.24	-0.23

Recorrendo à norma EN 12210:2016 [20], relativamente à classificação de resistência ao vento, a janela atinge a classe C4.

A Tabela 5.3, apresenta o resumo das classificações obtidas na janela.

Tabela 5.3 - Síntese das classificações relativas aos ensaios AEV em câmara de caixilhos.

Ensaio	Classificação Final
Permeabilidade ao Ar	Classe 4
Estanquidade à Água	Classe 9A
Resistência ao Vento	Classe C4

Com base nestes resultados, regista-se que a janela obteve a classificação máxima para os ensaios de permeabilidade ao ar e resistência ao vento, obtendo uma excelente classe quanto a estanquidade à água. Note-se que neste último ensaio não se define um limite máximo de classificação. Podemos concluir que a janela ensaiada revela ser funcional, apresentando um bom desempenho AEV.

## 5.2 Descrição do método de ensaio em câmara acústica

Para realização do ensaio de determinação do isolamento sonoro, a janela foi instalada num aro, antes de ser introduzida na câmara acústica. De acordo com as normas ISO 10140-1 [21], ISO 10140-2 [22] e ISO 10140-4 [23] o isolamento sonoro é determinado pela seguinte expressão para duas posições de fonte:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \text{ (dB)} \quad (5)$$

em que  $R$  é a redução sonora entre a câmara emissora e recetora,  $L_1$  é o nível médio sonoro na sala emissora em  $dB$ ,  $L_2$  é o nível médio sonoro na sala recetora em  $dB$  corrigido com o ruído de fundo da câmara recetora,  $S$  é a área do provete da divisória que foi ensaiada em laboratório em  $m^2$ ,  $A$  é a área de absorção equivalente em  $m^2$  da câmara recetora, de volume  $V$  em  $m^3$ , obtida através da seguinte expressão:

$$A = \frac{0.16V}{T_r} \text{ (m}^2\text{)} \quad (6)$$

onde  $T_r$  é o tempo de reverberação na câmara recetora em segundos, determinado em laboratório de acordo com a norma EN ISO 3382-2 [24]. O índice de isolamento sonoro aos sons aéreos  $R_w$ , é obtido por comparação com a descrição convencional de referência constante na norma EN ISO 717-1 [25]. De seguida é realizado o ajuste pela soma dos desvios desfavoráveis, ou seja, o mais elevado possível  $\leq 32dB$  (medições em 16 bandas de 1/3 de oitava). Após o ajuste, o índice de isolamento correspondente ao valor da ordenada da curva convencional na banda de frequência de 500 Hz.

A Figura 5.6 apresenta a janela em estudo instalada na câmara acústica, onde foram efetuados os ensaios de determinação de índice de isolamento sonoro aos sons aéreos.



Figura 5.6 - Janela com Perfil E instalada em câmara acústica.

### 5.2.1 Resultados dos ensaios acústicos

Do ensaio realizado em câmara acústica, às várias frequências, a Tabela 5.4, apresenta os resultados obtidos pela janela com Perfil E.

Tabela 5.4 - Resultados de índice de isolamento sonoro aos sons aéreos.

Frequência (Hz)	Janela (dB)
100	27.8
125	27.9
160	26.0
200	29.1
250	34.5
315	35.4
400	37.8
500	39.1
630	40.5
800	38.2
1000	40.2
1250	43.2
1600	43.7
2000	42.9
2500	44.2
3150	49.7
4000	53.5
5000	53.4
$R_W (C_{100-3150}; C_{tr 100-3150}; C_{100-5000}; C_{tr 100-5000})$	41 (-1; -4; 0; -4) dB

Dos resultados apresentados na Tabela 5.4, podemos constatar que a janela obteve uma redução sonora aos sons aéreos de 41 dB, revelando um bom desempenho.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresentado teve como principal objetivo desenvolver uma solução otimizada de um perfil de caixilharia em madeira/alumínio ambicionando-se o cumprimento dos requisitos de comportamento térmico estabelecidos pelo instituto *Passive House* para os climas temperados. Para isso avaliou-se o efeito da alteração da geometria e da incorporação no caixilho de um material de isolamento térmico (ICB – insulation cork board). Para cada uma das diferentes soluções analisadas calculou-se o coeficiente de transmissão térmico de acordo com o método preconizado na norma ISO 10077-2:2012, com recurso a um modelo de simulação numérica bidimensional, de acordo com a norma ISO 10211:2007.

Neste estudo foi realizada ainda uma avaliação da importância da instalação da janela, determinando-se para esse efeito as perdas térmicas lineares. Verificou-se a influência do posicionamento de instalação ideal, num pano de parede.

O desenvolvimento do trabalho conduziu á produção de um protótipo real de janela, de modo a ser possível verificar as características funcionais da janela com um dos perfis desenvolvidos. Foi selecionado o Perfil E, e procedeu-se a ensaios da janela em câmara de caixilhos e em câmara acústica.

Dos ensaios realizados em câmara de caixilhos, a janela foi submetida aos ensaios de AEV, permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento. Em câmara acústica determinou-se o índice de isolamento aos sons aéreos.

### 6.1 Conclusões

Os resultados obtidos permitem verificar que as medidas de melhoria aplicadas ao caixilho permitem melhorar significativamente o desempenho térmico do mesmo, podendo o valor de  $U_f$  ser reduzido em cerca de 50% relativamente à solução inicial.

Deste estudo conclui-se que o caixilho de Perfil F, é o caixilho que apresenta melhores resultados térmicos, permitindo verificar os critérios *Passive House* para o clima quente-temperado, verificando os critérios de  $U$  de componente de sistema de janela e de instalação de janela. Fica em falta a verificação do critério de higiene para o clima frio-temperado.

Como foi possível verificar da análise da instalação do sistema de janela, o posicionamento de instalação é relevante para o comportamento global do sistema. Verificou-se que a localização do caixilho na parede vai condicionar as perdas térmicas lineares que ocorrem nessa ligação. Os resultados permitiram concluir que a continuidade do isolamento entre a parede e o caixilho favorece o desempenho global do sistema instalado.

Da campanha experimental ao protótipo de janela desenvolvido, com o Perfil E, verificamos que a janela se revelou funcional. A permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento, obtiveram-se as seguintes classificações (classe 4, classe 9A e classe C4) respetivamente, e uma redução sonora de 41 *dB* aos sons aéreos, provando-se que a janela eficiente apresenta excelentes classificações em termos de desempenho acústico.

## 6.2 Trabalhos futuros

O trabalho realizado no âmbito desta dissertação permite-nos verificar que as tarefas que seriam úteis considerar nas fases seguintes são:

- Melhoria pontual do caixilho E para verificação do critério higiene para o clima *Warm-temperate* e melhoria pontual do caixilho F para verificação do critério higiene para o clima *Cool-temperate*.
- Avaliação do comportamento térmico da janela em Hotbox para validação do resultado de cálculo bidimensional.
- Avaliação do comportamento global da janela não só em regime permanente, mas também em regime variável.
- Avaliação experimental nas câmara AEV e em Hotbox da janela instalada em parede.
- Realização de ensaios mecânicos à janela: Forças de manobra, torção, etc.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Nathan Van Den Bossche, Lisa Buffel, Arnold Janssens, Thermal Optimization of Window Frames, In Energy Procedia, Volume 78, 2015, Pages 2500-2505, ISSN 1876-6102.
- [2] Maria Malvoni, Cristina Baglivo, Paolo Maria Congedo, Domenico Laforgia, CFD modeling to evaluate the thermal performances of window frames in accordance with the ISO 10077, Energy, Volume 111, 2016, Pages 430-438, ISSN 0360-5442.
- [3] Arild Gustavsen, A.; Grynninga, S.; Arastehb, D.; Jelle, B.P. and Goudeyb, H. - Key elements of and material performance targets for highly insulating window frames, Energy and Buildings, Vol. 43, 2011, Pages 2583– 2594.
- [4] Erdem Cuce, Saffa B. Riffat, A state-of-the-art review on innovative glazing technologies, In Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 41, 2015, Pages 695-714.
- [5] Agnieszka A. Lechowska, Jacek A. Schnotale, Giorgio Baldinelli, Window frame thermal transmittance improvements without frame geometry variations: An experimentally validated CFD analysis, Energy and Buildings, Volume 145, 2017, Pages 188-199.
- [6] <https://database.passivehouse.com/en/components/list/window>. Passive House institute.
- [7] ISO 10211:2007, Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations, International Organization for Standardization) (2007).
- [8] ISO 10077-1:2006, Thermal performance of windows, doors and shutters Part 1 Calculation of thermal transmittance, International Organization for Standardization (2009).
- [9] ISO 10077-2:2012, Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance Part 2: Numerical method for frames, International Organization for Standardization (2012).
- [10] ISO 6946:2007, Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method, International Organization for Standardization (2007).

- [11] EN 12664:2001, Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods, CEN-European Committee for Standardization, (2001).
- [12] ISO 8302:1991, Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded plate apparatus, International Organization for Standardization (1991).
- [13] Cezary Misiópecki, Marine Bouquin, Arild Gustavsen, Bjørn Petter Jelle Thermal modeling and investigation of the most energy-efficient window position, In Energy and Buildings, Volume 158, 2018, Pages 1079-1086.
- [14] Francesca Cappelletti, Andrea Gasparella, Piercarlo Romagnoni, Paolo Baggio, Analysis of the influence of installation thermal bridges on windows performance: The case of clay block walls, In Energy and Buildings, Volume 43, Issue 6, 2011, Pages 1435-1442.
- [15] A. Gustavsen, (2013). Practical Methods for ensuring energy-efficient window-to-wall connections. ASHRAE.
- [16] EN 12207:1999, Windows and doors. Air permeability. Classification, CEN-European Committee for Standardization (1999).
- [17] EN 1027:2016, Windows and doors. Water tightness. Test method, CEN-European Committee for Standardization (2016).
- [18] EN 12208:1999, Windows and doors - Watertightness – Classification, CEN-European Committee for Standardization (1999).
- [19] EN 12211:2016, Windows and doors. Resistance to wind load. Test method, CEN-European Committee for Standardization (2016).
- [20] EN 12210:2016, Windows and doors - Resistance to wind load – Classification, CEN-European Committee for Standardization (2016).
- [21] EN ISO 10140-2:2010, Acoustics -- Laboratory measurement of sound insulation of building elements -- Part 1: Application rules for specific products, CEN-European Committee for Standardization, (2010)

- [22] EN ISO 10140-2:2010, Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 1 and 2: Measurement of airborne sound insulation, CEN-European Committee for Standardization (2010).
- [23] EN ISO 10140-4:2010, Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 4: Measurement procedures and requirements, CEN-European Committee for Standardization (2010).
- [24] EN ISO 3382-2:2008, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms, CEN-European Committee for Standardization (2008).
- [25] EN ISO 717-1, Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation, CEN-European Committee for Standardization (2013).
- [26] EN 1026:2016, Windows and doors - Air permability - Test method, (2016)

## ANEXO A

### Análise de cavidades-de-ar

#### *Cálculo da condutividade térmica da cavidade-de-ar 1 do Perfil inicial*

A cavidade-de-ar 1 é uma cavidade não ventilada não retangular, para tal devemos transformar a área real da cavidade para uma área retangular equivalente.

Temos então:

- $b = \sqrt{A' \frac{b'}{a'}} \leftrightarrow b = \sqrt{0.000961 * \frac{0.033}{0.058}} = 0.0234 \text{ m}$
- $d = \sqrt{A' \frac{d'}{b'}} \leftrightarrow d = \sqrt{0.000961 * \frac{0.058}{0.033}} = 0.0411 \text{ m}$

A transferência de calor por convecção ( $h_a$ ), é conhecida pela seguinte expressão:

- $h_a \begin{cases} \frac{c_1}{d} & \text{se } b < 5\text{mm} \\ \text{máx}(\frac{c_1}{d}, C_3) \end{cases}$

onde:

- $c_1 = 0.025 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;
- $c_3 = 1.57 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;
- $h_a = 1.57 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

A transferência de calor por radiação ( $h_r$ ), é conhecida pela seguinte expressão:

- $h_r = 4\sigma T_m^3 E F$

onde:

- $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^4)$  *Constante de Stefan – Boltzmann*
- $E = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)^{-1}$  – *Emitância da superfície interior* ( $\varepsilon_1 = 0.90$  e  $\varepsilon_2 = 0.90$ )
- $F = \frac{1}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{d^2}{b} - \frac{d}{b}} \right]$  – *Fator da secção retangular*

Para a cavidade 1 obtive os seguintes valores:

- $F = 0.632$
- $E = 0.818$
- $T_m^3 = 283 \text{ °C}$
- $h_r = 2.659 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{°C)}$

Conhecendo os valores das duas componentes de transferência de calor, por convecção e radiação, podemos calcular a resistência térmica e condutibilidade térmica da cavidade de ar.

A resistência térmica é dada pela seguinte expressão:

- $R_s = \frac{1}{h_a + h_r} \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$
- $R_{s \text{ cavidade } 1} = \frac{1}{1.57 + 2.659} = 0.236 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$

Com o valor da resistência térmica, podemos calcular o valor da condutância térmica pela seguinte expressão:

- $\lambda_{equ} = \frac{d}{R_s} \text{ (W/m} \cdot \text{°C)}$
- $\lambda_{equ. \text{ cavidade } 1} = \frac{0.041}{0.236} = 0.174 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$

A Tabela A.2 apresenta a geometria das cavidades-de-ar correspondentes a cada perfil de janela, analisadas ao longo do trabalho.

Tabela A.1 - Geometria das cavidades-de-ar dos perfis desenvolvidos.

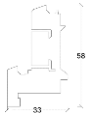

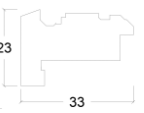
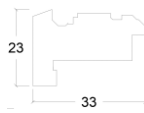
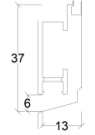
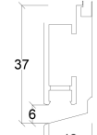
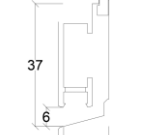
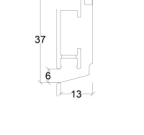


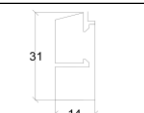
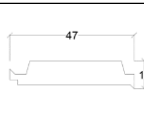



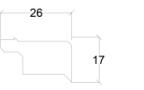







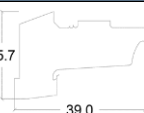
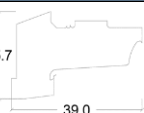
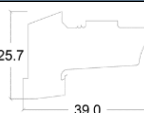
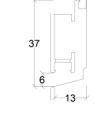
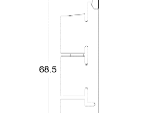
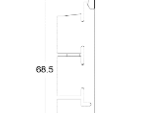


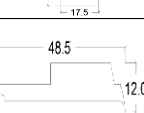

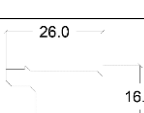

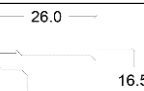
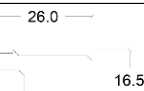


Perfil Inicial		Perfil A.1/A.2/B.1/B.2		Perfil C.1		Perfil C.2	
Cavidades	Medidas em (mm)	Cavidades	Medidas em (mm)	Cavidades	Medidas em (mm)	Cavidades	Medidas em (mm)
1		1		1.1		1.1	
2		2		2		2	
3		3		3		4	
4		4		4		5	
5		5		5			
6		6		6			
Perfil D.1		Perfil D.2		Perfil D.3		Perfil E/F	
Cavidades	Medidas em (mm)	Cavidades	Medidas em (mm)	Cavidades	Medidas em (mm)	Cavidades	Medidas em (mm)
1.1		1		1		1	
2		2		2		2	
3		3		3		3	
4		4		4			
5							
6							

Tabela A.2 - Resultados da análise das resistências térmicas das cavidades-de-ar de acordo com a norma ISO 10077-2:2012.

Perfil de madeira		b'	d'	A	b	d	$h_a$	E	F	$h_r$	R	$\lambda_{eq}$
		m	m	m <sup>2</sup>	m	m	W/m <sup>2</sup> °C	W/m <sup>2</sup> °C	-	W/m <sup>2</sup> °C	m <sup>2</sup> °C/W	W/m <sup>2</sup> °C
Cavidade	1	0,017	0,019	0,0002	0,0134	0,0150	<b>1,672</b>	0,8182	0,6910	<b>2,906</b>	0,2184	<b>0,068</b>
Cavidade	2	0,026	0,017	0,00026	0,0199	0,0130	<b>1,917</b>	0,8182	0,7705	<b>3,240</b>	0,1939	<b>0,067</b>
Perfil inicial		b'	d'	A	b	d	$h_a$	E	F	$h_r$	R	$\lambda_{eq}$
		m	m	m <sup>2</sup>	m	m	W/m <sup>2</sup> °C	W/m <sup>2</sup> °C	-	W/m <sup>2</sup> °C	m <sup>2</sup> °C/W	W/m <sup>2</sup> °C
Cavidade	1	0,033	0,058	0,000961	0,0234	0,0411	<b>1,570</b>	0,8182	0,6323	<b>2,659</b>	0,2364	<b>0,174</b>
Cavidade	2	0,013	0,037	0,000382	0,0116	0,0330	<b>1,570</b>	0,8182	0,5853	<b>2,462</b>	0,2480	<b>0,133</b>
Cavidade	3	0,014	0,031	0,000375	0,0130	0,0288	<b>1,570</b>	0,8182	0,6077	<b>2,556</b>	0,2424	<b>0,119</b>
Cavidade	4	0,017	0,011	0,000095	0,0121	0,0078	<b>3,189</b>	0,8182	0,7720	<b>3,247</b>	0,1554	<b>0,050</b>
Cavidade	5	0,026	0,017	0,000255	0,0197	0,0129	<b>1,936</b>	0,8182	0,7705	<b>3,240</b>	0,1932	<b>0,067</b>
Cavidade	6	0,003	0,004	9,4E-06	0,0027	0,0035	<b>7,062</b>	0,8182	0,6667	<b>2,804</b>	0,1014	<b>0,035</b>
Perfil A.1 / A.2 / B.1 / B.2		b'	d'	A	b	d	$h_a$	E	F	$h_r$	R	$\lambda_{eq}$
		m	m	m <sup>2</sup>	m	m	W/m <sup>2</sup> °C	W/m <sup>2</sup> °C	-	W/m <sup>2</sup> °C	m <sup>2</sup> °C/W	W/m <sup>2</sup> °C
Cavidade	1	0,033	0,058	0,000961	0,0234	0,0411	<b>1,570</b>	0,8182	0,6323	<b>2,659</b>	0,2364	<b>0,174</b>
Cavidade	2	0,013	0,037	0,000382	0,0116	0,0330	<b>1,570</b>	0,8182	0,5853	<b>2,462</b>	0,2480	<b>0,133</b>
Cavidade	3	0,014	0,031	0,000375	0,0130	0,0288	<b>1,570</b>	0,8182	0,6077	<b>2,556</b>	0,2424	<b>0,119</b>
Cavidade	4	0,047	0,011	0,000365	0,0395	0,0092	<b>2,705</b>	0,8182	0,8965	<b>3,770</b>	0,1544	<b>0,060</b>
Cavidade	5	0,026	0,017	0,000255	0,0197	0,0129	<b>1,936</b>	0,8182	0,7705	<b>3,240</b>	0,1932	<b>0,067</b>
Cavidade	6	0,003	0,004	9,4E-06	0,0027	0,0035	<b>7,062</b>	0,8182	0,6667	<b>2,804</b>	0,1014	<b>0,035</b>
Perfil C.1		b'	d'	A	b	d	$h_a$	E	F	$h_r$	R	$\lambda_{eq}$
		m	m	m <sup>2</sup>	m	m	W/m <sup>2</sup> °C	W/m <sup>2</sup> °C	-	W/m <sup>2</sup> °C	m <sup>2</sup> °C/W	W/m <sup>2</sup> °C
Cavidade	1	0,033	0,011	0,000462	0,0372	0,0124	<b>2,015</b>	0,8182	0,8604	<b>3,619</b>	0,1775	<b>0,070</b>
Cavidade	2	0,013	0,037	0,000382	0,0116	0,0330	<b>1,570</b>	0,8182	0,5853	<b>2,462</b>	0,2480	<b>0,133</b>
Cavidade	3	0,014	0,031	0,000375	0,0130	0,0288	<b>1,570</b>	0,8182	0,6077	<b>2,556</b>	0,2424	<b>0,119</b>
Cavidade	4	0,047	0,011	0,000365	0,0395	0,0092	<b>2,705</b>	0,8182	0,8965	<b>3,770</b>	0,1544	<b>0,060</b>
Cavidade	5	0,026	0,017	0,000255	0,0197	0,0129	<b>1,936</b>	0,8182	0,7705	<b>3,240</b>	0,1932	<b>0,067</b>
Cavidade	6	0,003	0,004	9,4E-06	0,0027	0,0035	<b>7,062</b>	0,8182	0,6667	<b>2,804</b>	0,1014	<b>0,035</b>
Perfil C.2		b'	d'	A	b	d	$h_a$	E	F	$h_r$	R	$\lambda_{eq}$
		m	m	m <sup>2</sup>	m	m	W/m <sup>2</sup> °C	W/m <sup>2</sup> °C	-	W/m <sup>2</sup> °C	m <sup>2</sup> °C/W	W/m <sup>2</sup> °C
Cavidade	1	0,033	0,011	0,000462	0,0372	0,0124	<b>2,015</b>	0,8182	0,8604	<b>3,619</b>	0,1775	<b>0,070</b>
Cavidade	2	0,013	0,037	0,000382	0,0116	0,0330	<b>1,570</b>	0,8182	0,5853	<b>2,462</b>	0,2480	<b>0,133</b>
Cavidade	4	0,047	0,011	0,000365	0,0395	0,0092	<b>2,705</b>	0,8182	0,8965	<b>3,770</b>	0,1544	<b>0,060</b>
Cavidade	5	0,026	0,017	0,000255	0,0197	0,0129	<b>1,936</b>	0,8182	0,7705	<b>3,240</b>	0,1932	<b>0,067</b>
Perfil D.1		b'	d'	A	b	d	$h_a$	E	F	$h_r$	R	$\lambda_{eq}$
		m	m	m <sup>2</sup>	m	m	W/m <sup>2</sup> °C	W/m <sup>2</sup> °C	-	W/m <sup>2</sup> °C	m <sup>2</sup> °C/W	W/m <sup>2</sup> °C
Cavidade	1	0,033	0,011	0,000462	0,03723	0,01241	<b>2,015</b>	0,8182	0,86038	<b>3,619</b>	0,17752	<b>0,070</b>
Cavidade	2	0,013	0,037	0,000382	0,01159	0,03297	<b>1,570</b>	0,8182	0,585282	<b>2,462</b>	0,24804	<b>0,133</b>
Cavidade	3	0,014	0,031	0,000375	0,01301	0,02882	<b>1,570</b>	0,8182	0,607668	<b>2,556</b>	0,24238	<b>0,119</b>
Cavidade	4	0,047	0,011	0,000365	0,03949	0,00924	<b>2,705</b>	0,8182	0,89649	<b>3,770</b>	0,154432	<b>0,060</b>
Cavidade	5	0,026	0,017	0,000255	0,01975	0,01291	<b>1,936</b>	0,8182	0,77047	<b>3,240</b>	0,193177	<b>0,067</b>
Cavidade	6	0,003	0,004	9,4E-06	0,00266	0,00354	<b>7,062</b>	0,8182	0,666667	<b>2,804</b>	0,101363	<b>0,035</b>
Perfil D.2		b'	d'	A	b	d	$h_a$	E	F	$h_r$	R	$\lambda_{eq}$
		m	m	m <sup>2</sup>	m	m	W/m <sup>2</sup> °C	W/m <sup>2</sup> °C	-	W/m <sup>2</sup> °C	m <sup>2</sup> °C/W	W/m <sup>2</sup> °C
Cavidade	1	0,039	0,026	0,00057	0,02924	0,01949	<b>1,570</b>	0,8182	0,767592	<b>3,228</b>	0,208404	<b>0,094</b>
Cavidade	2	0,018	0,069	0,001021	0,01632	0,06256	<b>1,570</b>	0,8182	0,564144	<b>2,373</b>	0,253634	<b>0,247</b>
Cavidade	3	0,049	0,012	0,000302	0,03512	0,0086	<b>2,907</b>	0,8182	0,892326	<b>3,753</b>	0,150151	<b>0,057</b>
Cavidade	4	0,026	0,017	0,000255	0,01975	0,01291	<b>1,936</b>	0,8182	0,77047	<b>3,240</b>	0,193177	<b>0,067</b>
Perfil D.3		b'	d'	A	b	d	$h_a$	E	F	$h_r$	R	$\lambda_{eq}$
		m	m	m <sup>2</sup>	m	m	W/m <sup>2</sup> °C	W/m <sup>2</sup> °C	-	W/m <sup>2</sup> °C	m <sup>2</sup> °C/W	W/m <sup>2</sup> °C
Cavidade	1	0,038	0,024	0,000521	0,02872	0,01814	<b>1,570</b>	0,8182	0,775584	<b>3,262</b>	0,206955	<b>0,088</b>
Cavidade	2	0,018	0,063	0,00098	0,01673	0,05857	<b>1,570</b>	0,8182	0,570027	<b>2,397</b>	0,252052	<b>0,232</b>
Cavidade	3	0,047	0,017	0,000253	0,02645	0,00957	<b>2,613</b>	0,8182	0,850851	<b>3,579</b>	0,161501	<b>0,059</b>
Cavidade	4	0,026	0,015	0,00008	0,01178	0,00679	<b>3,680</b>	0,8182	0,788782	<b>3,317</b>	0,14291	<b>0,048</b>
Perfil E/F		b'	d'	A	b	d	$h_a$	E	F	$h_r$	R	$\lambda_{eq}$
		m	m	m <sup>2</sup>	m	m	W/m <sup>2</sup> °C	W/m <sup>2</sup> °C	-	W/m <sup>2</sup> °C	m <sup>2</sup> °C/W	W/m <sup>2</sup> °C
Cavidade	1	0,038	0,024	0,000521	0,02872	0,01814	<b>1,570</b>	0,8182	0,775584	<b>3,262</b>	0,206955	<b>0,088</b>
Cavidade	3	0,047	0,017	0,000253	0,02645	0,00957	<b>2,613</b>	0,8182	0,850851	<b>3,579</b>	0,161501	<b>0,059</b>
Cavidade	4	0,026	0,015	0,00008	0,01178	0,00679	<b>3,680</b>	0,8182	0,788782	<b>3,317</b>	0,14291	<b>0,048</b>
Perfil D.2 ISO 10077		b'	d'	A	b	d	$h_a$	E	F	$h_r$	R	$\lambda_{eq}$
		m	m	m <sup>2</sup>	m	m	W/m <sup>2</sup> °C	W/m <sup>2</sup> °C	-	W/m <sup>2</sup> °C	m <sup>2</sup> °C/W	W/m <sup>2</sup> °C
Cavidade	1	0,051	0,077	0,001047	0,02633	0,03976	<b>1,570</b>	0,8182	0,650569	<b>2,736</b>	0,232224	<b>0,171</b>
Cavidade	2	0,03	0,027	0,000589	0,02558	0,02302	<b>1,570</b>	0,8182	0,722681	<b>3,039</b>	0,216944	<b>0,106</b>
Cavidade	3	0,013	0,015	0,000181	0,01252	0,01445	<b>1,730</b>	0,8182	0,686517	<b>2,887</b>	0,216577	<b>0,067</b>
Cavidade	4	0,005	0,026	0,000062	0,00345	0,01796	<b>1,392</b>	0,8182	0,54764	<b>2,303</b>	0,270591	<b>0,066</b>
Cavidade	5	0,01	0,022	0,00022	0,01	0,022	<b>1,570</b>	0,8182	0,608305	<b>2,558</b>	0,242223	<b>0,091</b>
Cavidade	6	0,076	0,006	0,000456	0,076	0,006	<b>4,167</b>	0,8182	0,962082	<b>4,046</b>	0,121758	<b>0,049</b>

**ANEXO B****Comparação de resultados  $U_f$ , de modelação Bisco VS Therm**Tabela B.1 - Comparação de valores de  $U_f$  obtidos através de modelação em Bisco e Therm.

Perfil	Therm	Bisco
	$U_f$	$U_f$
	( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
Perfil A.1	0.869	0.942
Perfil A.2	0.851	0.922
Perfil B.1	0.740	0.824
Perfil B.2	0.725	0.807
Perfil C.1	0.710	0.813
Perfil C.2	0.708	0.813
Perfil D.1	0.686	0.790
Perfil D.2	0.668	0.749
Perfil D.3	0.708	0.754
Perfil E	0.690	0.745
Perfil inicial	1.345	1.447
Perfil Madeira	1.567	1.515
Perfil D2 ISO 10077-2:2012	1.510	1.420

Da comparação de resultados através da utilização de diferentes programas de modelação bidimensional, verificamos que existe uma discrepância de valores, e quando estes comparados com valores de referência, verificamos que os resultados obtidos da modelação realizada com o programa Bisco se aproximam, podendo verificar-se o método de cálculo.

Os valores do programa Therm afastam-se dos valores de referência. Esta discrepância de valores deve-se ao facto que é necessário efetuar simplificações das geometrias do objeto que se pretende estudar através da modelação no programa Therm, considerando-se um dos pontos negativos no desempenho do programa.

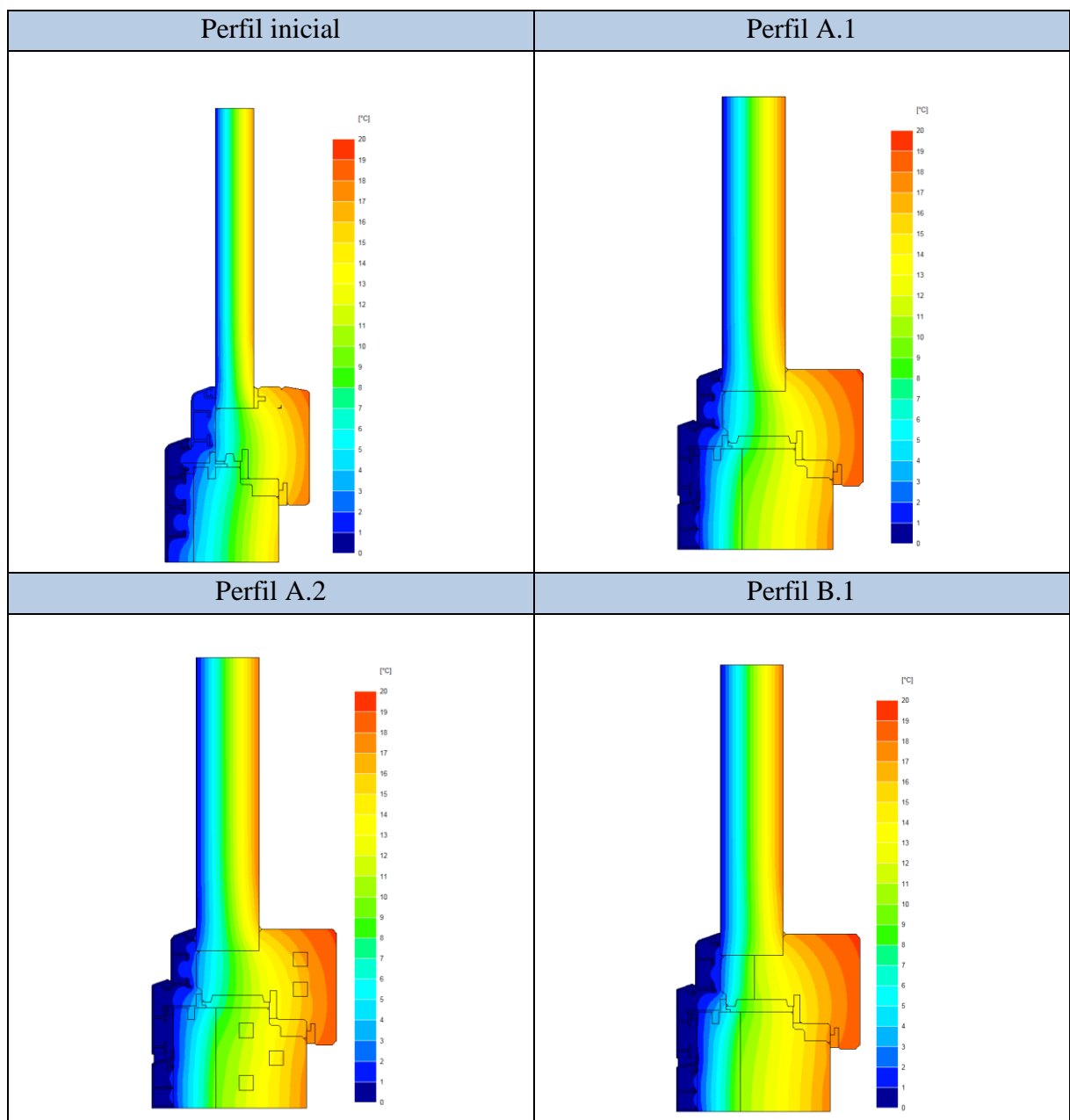
A utilização do programa Bisco revelou ser uma ótima ferramenta de análise bidimensional. No caso de estudo de caixilhos, com o programa Bisco, foi possível pormenorizar todo o caixilho, bem como elementos de dimensões reduzidas como os espaçadores e vedantes, onde foi possível caracterizar cada componente, aproximando a modelação com o produto real.

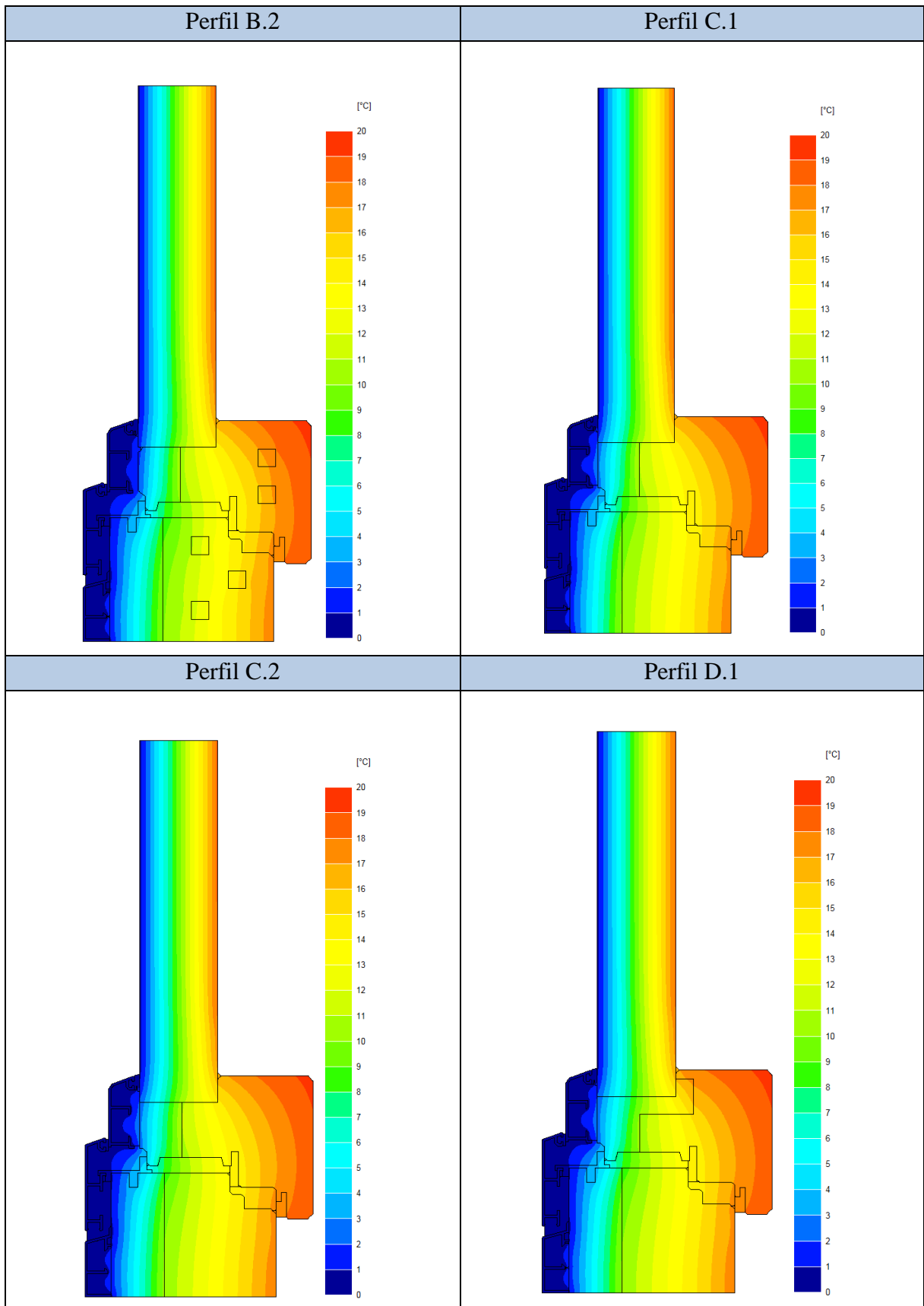


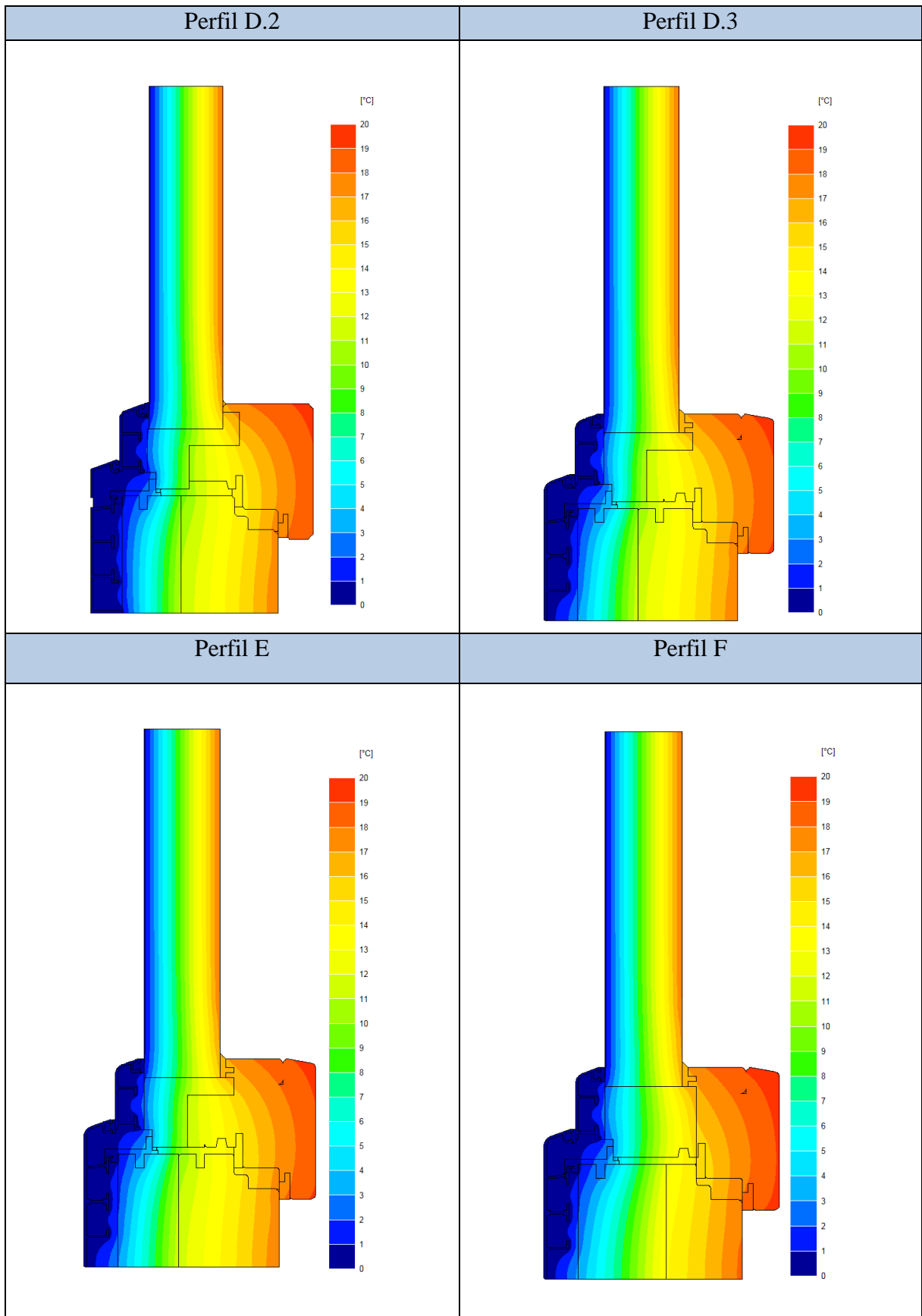
**ANEXO C**

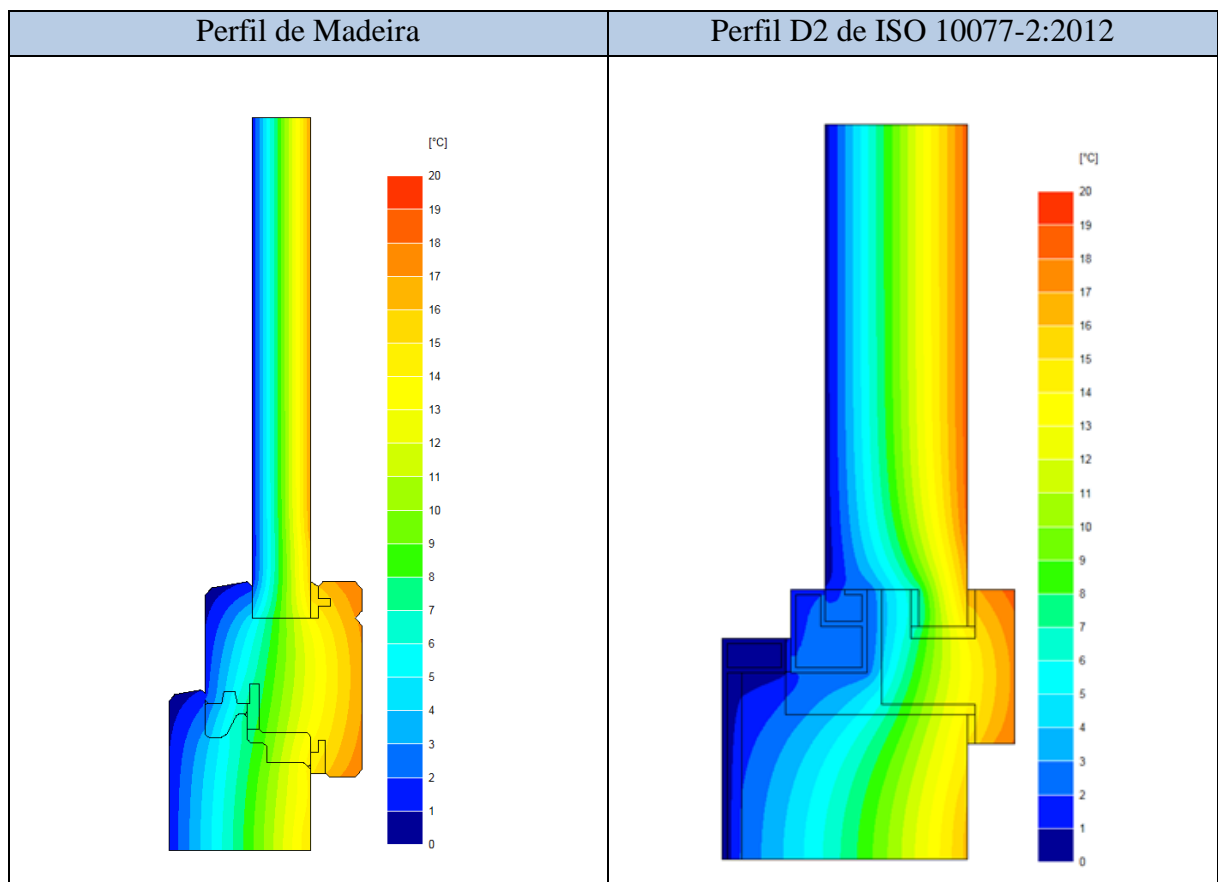
**Distribuição bidimensional de temperaturas de perfis desenvolvidos**

Tabela C.1 - Distribuição bidimensional de temperaturas de perfis.









## ANEXO D

### Produção de protótipo de janela otimizada com Perfil E.

Tabela D.1 - Processo de fabrico de janela com perfil otimizado E.

<p>Produção de perfis de aro e folha em madeira.</p>		
<p>Colagem e fresagem de perfil em ICB para folha e aro.</p>		
<p>Instalação de clips de fixação de alumínio.</p>		

Tabela D.1 (continuação) - Processo de fabricação de janela com perfil otimizado E.


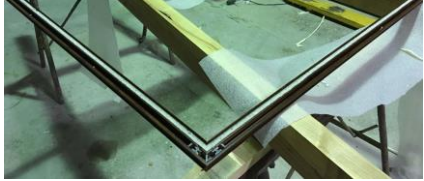






<p>Preenchimento de perfil de alumínio com PUR.</p>		
<p>Colocação de ferragem e vedantes.</p>		
<p>Colocação de vidro e aplicação de perfil de alumínio.</p>		
<p>Preenchimento de cavidades exteriores de perfil de alumínio com PUR.</p>		

Tabela D.1 (continuação) - Processo de fabricação de janela com perfil otimizado E.

<p>Produto Final da Janela.</p>		
---------------------------------	---	---