



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo do comportamento térmico de estores metálicos sob a ação de fluxos de calor radiativos**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

**Autor**

**Rui Daniel Lima Marques**

**Orientadores**

**António Manuel Gameiro Lopes**

**José Joaquim da Costa**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Fevereiro, 2014**

Torna-te aquilo que és.

Friedrich Wilhelm Nietzsche

Aos meus pais e irmão

## Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta marca o fim de um ciclo, ao mesmo tempo que, deixa entreaberto os sonhos projetados ao longo destes últimos anos. Gostaria de agradecer a algumas pessoas que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes e Professor Doutor José Joaquim da Costa por terem estado disponíveis para o esclarecimento de dúvidas, pelas sugestões dadas que permitiram a melhoria da qualidade deste trabalho.

Uma referência especial ao aluno José Costa por toda a ajuda e companheirismo aquando da realização da parte experimental.

Aos meus companheiros de viagem, Carlos Pereira, Norberto Ramos, Marco Melo e João Mendes, pela amizade e cumplicidade.

Ao Gui, ao Ricardo, à Mariana e à Ana Maria por todos estes anos.

Aos meus colegas de equipa, Afonso, Tone, Boss, Machado, Raquel, Joana e em especial ao meu grande amigo e treinador António Ramos por todo o apoio e compreensão.

Agradecer de uma forma muito especial ao Avelar e à Natália, os meus pais, por todo o amor, sacrifício e pelas palavras certas nos devidos momentos.

Por fim agradecer ao meu irmão, por estes 23 anos de paciência, mas sobretudo por ser o irmão incrível que é.

Agradeço o apoio da empresa Estores J. Costa Unip. Lda., que patrocinou o estudo experimental, fornecendo as caixas de estores ensaiadas.

## Resumo

Este trabalho apresenta um estudo numérico sobre uma lâmina de estore de alumínio recorrendo-se ao programa de *CFX ANSYS versão 13.0*.

Numa primeira fase, o estudo numérico incidiu sobre uma lâmina de estore de alumínio, na sua versão comercial. Construiu-se o modelo em CAD (*SolidWorks2013*) e importou-se para o programa de simulação numérica. Posteriormente introduziram-se alterações estruturais no modelo numérico para potencializar a melhoria do seu comportamento térmico.

Para validar os resultados obtidos no estudo numérico, numa segunda fase, foi feita uma validação experimental. Construiu-se um modelo de modo a simular o que ocorre entre um estore e um envidraçado de uma habitação. Após a construção do modelo e termopares, e instrumentar o modelo, os ensaios realizaram-se no terraço do LAI durante o mês de Julho de 2013.

Os principais objetivos neste trabalho são o estudo do comportamento térmico das lâminas dos estores metálicos, estudar soluções alternativas que permitam uma melhoria no desempenho térmico dos estores e posteriormente validar experimentalmente os resultados obtidos por simulação numérica.

As principais conclusões a retirar deste trabalho são que o modelo em estudo, em termos térmicos, não é tão eficiente como se esperava. O material que constitui o núcleo da lâmina não atua como isolante térmico, visto que a transferência de calor ocorre pelo perfil contínuo de alumínio.

Das alternativas consideradas, a que apresenta melhor desempenho térmico, foi a solução onde foi introduzido um corte térmico nos topos da lâmina. Desta forma conseguiu-se uma diferença de temperatura entre a face exterior e interior da lâmina de cerca de 23,7 [°C].

**Palavras-chave:** Lâmina de estore, CFX ANSYS, CAD, SolidWorks, Comportamento térmico, Simulação numérica

## Abstract

This essay presents a numerical investigation on a roller blind aluminum , using the *CFX ANSYS version 13.0* program.

Initially, the investigation focused on the item above described, in its commercial version. The model was built in CAD (*SolidWorks2013*), and it was imported onto the numeral simulation program. Afterwards, structural changes were introduced in the numeric model to increase the performance of its thermal behavior.

To authenticate the obtained results, on a second stage, an experimental validation was made. A model was built, so that it would be possible to simulate what occurs in between a roller blind and the glass window of a house. After the model and thermocouples were built, and the model being instrumentalized, tests were made at the terrace of LAI, during the month of July 2013.

The main goals of this work are the study of the thermal behaviour of the blades from the metallic blinds, finding alternative solutions that would allow an improvement in the thermal behaviour of the blinds and afterwards validate the obtained results experimentally by numeral simulation.

The main conclusions to withdraw from this work are that the model which was studied, in thermal terms, isn't as efficient as it was expected. The material which constitutes the blade's core doesn't act like a thermic insulante, because the heat transfer occurs through the aluminum's continuous profile.

Out of all the alternatives considered, the one who presents a better thermic performance, was the solution where it was introduced a thermal cut on the top of the blades. Because of it, it was achieved a temperature difference between the inner and outer face of the blade around 23,7 [°C].

**Keywords** Roller blind, CFX ANSYS, CAD, SolidWorks, thermal behaviour, numerical simulation

## Índice

Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas .....	viii
Simbologia e Siglas .....	ix
Simbologia.....	ix
Siglas .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Legislação .....	3
2.1.1. RCCTE .....	5
2.2. Envidraçados.....	11
2.2.1. Influência dos envidraçados no RCCTE .....	12
2.2.2. Dispositivos de proteção solar .....	14
2.3. Transferência de calor.....	16
2.3.1. Modos de transferência de calor.....	16
3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	22
3.1. Construção do modelo .....	23
3.2. Geração da malha.....	24
3.3. Pré-processamento .....	25
3.4. Obtenção dos resultados .....	26
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	27
4.1. Lâmina Simples .....	27
4.2. Estore com múltiplas lâminas .....	28
4.3. Estore com corte térmico .....	29
4.3.1. Corte térmico nos topos da lâmina .....	29
4.4. Alteração da estrutura de alumínio .....	31
4.5. Comparação de resultados .....	33
5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	34
5.1. Enquadramento .....	34
5.2. Instalação experimental .....	34
5.3. Modelo e nomenclatura .....	35
5.4. Ensaios experimentais.....	36
5.5. Resultados e discussão.....	36
5.5.1. Estore Verde – Temperatura e fluxo.....	37
5.5.2. Estore branco – Temperatura e fluxo .....	39
5.5.3. Estore verde e estore branco.....	41
6. CONCLUSÕES .....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45
ANEXO A .....	46

---

ANEXO B .....	48
ANEXO C .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Gráfico do padrão de utilização (ocupação) RCCTE.....	7
Figura 2.2 – a) Zonas climáticas de inverno b) Zonas climáticas de verão (RCCTE).....	10
Figura 2.3 – Modos de transferência de calor num vão envidraçados .[2].....	21
Figura 3.1 – a) Lâmina de estore <i>Alugix45</i> b) Modelo em CAD da lâmina de estore.....	23
Figura 3.2 – Perfil da lâmina de estore <i>Alugix45</i> . ....	23
Figura 3.3 – Malhagem utilizada no modelo.....	24
Figura 3.4 – Condições de fronteira impostas. ....	25
Figura 4.1 – Variação da temperatura numa lâmina simples. ....	27
Figura 4.2 – Lâmina de estore com corte térmico. ....	30
Figura 4.3 – Variação da temperatura no estore com corte térmico.....	30
Figura 4.4 – Lâmina de estore com alteração na estrutura de alumínio. ....	31
Figura 4.5 – Variação da temperatura na lâmina de estore com alteração da estrutura de alumínio.....	32
Figura 4.6 – Comparação dos resultados obtidos por simulação numérica adaptados a uma escala comum a) lâmina simples; b) lâmina com furos no perfil de alumínio; c) lâmina com corte térmico nos topos.....	33
Figura 5.1 – Disposição da instrumentação no modelo experimental.....	35
Figura 5.2 - Evolução da temperatura nos diferentes pontos do estore verde durante o ensaio.....	38
Figura 5.3 – Evolução da temperatura na face exterior e interior de uma lâmina de estore. ....	38
Figura 5.4 – Evolução da temperatura e d fluxo do calor durante o ensaio. ....	39
Figura 5.5 – Evolução da temperatura nos diferentes pontos do estore branco durante o ensaio.....	40
Figura 5.6 – Evolução da temperatura na face exterior e interior de uma lâmina de estore. ....	40
Figura 5.7 – Evolução da temperatura e do fluxo do calor durante o ensaio. ....	41
Figura 5.8 – Comparação das temperaturas do estore verde e do estore branco.....	42
Figura A.1 – Desempenho energético de Portugal entre 2000 e 2010 (DGEG). ....	46
Figura A.2 – Distribuição do consumo energético por setor no ano 2010 (DGEG). ....	47
Figura A.3 – Distribuição do consumo de energia no alojamento por unidade de uso (ICESD-2010) INE.....	47
Figura B.1 – Variação da temperatura no estore formado por 5 lâminas simples.....	48

---

Figura B.2 – Estore com corte térmico na face exterior [0,3x50x0,27]. .....	49
Figura B.3 – Variação da temperatura no estore com corte térmico. ....	49
Figura C.1 – Fluxo de radiação solar do dia 23/07/2013 registado pelo solarímetro.....	51
Figura C.2 – Disposição da instrumentação na instalação experimental. ....	51
Figura C.3 – Disposição da instrumentação na instalação experimental. ....	52
Figura C.4 – Solarímetro. ....	52
Figura C.5 – Disposição dos modelos experimentais e do solarímetro no terraço da LAI. ....	52
Figura C.6 – Alteração na face posterior do modelo para reduzir a carga térmica no seu interior. ....	52

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classe energética dos edifícios segundo o RCCTE.....	11
Tabela 2.2 – Valores do coef. de transmissão térmica $U_w$ de um vão envidraçado IT50 LNEC.....	17
Tabela 3.1 – Características geométricas do modelo. ....	23
Tabela 4.1 – Temperaturas obtidas para uma lâmina simples. ....	28
Tabela 4.2 – Temperaturas obtidas para um estore formado por 5 lâminas.....	28
Tabela 4.3 – Temperaturas obtidas para um estore formado por 3 lâminas.....	28
Tabela 4.4 – Características termofísicas da Poliamida 6.6. ....	29
Tabela 4.5 – Temperaturas obtidas para um estore com corte térmico. ....	29
Tabela 4.6 – Temperaturas obtidas para um estore com alteração na estrutura de alumínio. .....	31
Tabela 5.1 – Nomenclatura utilizada na validação experimental.....	35
Tabela B.1 – Temperaturas obtidas para um estore com corte térmico. ....	49

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A_S$  – Área efetiva efetiva equivalente coletora da radiação solar do vão envidraçado

$A_p$  – Área útil de pavimento do espaço

$E$  – Fluxo de calor radiativo para corpos reais

$E_b$  – Fluxo de calor radiativo para o corpo negro

$F_g$  – Fração envidraçada

$F_s$  – Fator de obstrução

$F_w$  – Fator de correção da seletividade angular

$G_{sul}$  – Energia solar média mensal incidente numa superfície vertical orientada a sul na estação de aquecimento, em função da zona climática de inverno

$g_{\perp}$  – Fator solar do vidro

$h$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção

$I_r$  – Valor médio da intensidade da radiação solar para a estação de arrefecimento

$M$  – Duração média da estação convencional e aquecimento

$Na$  – Necessidades nominais de energia útil para produção de AQS

$Nac$  – Necessidades nominais anuais de energia para a produção de AQS

$Ni$  – Necessidades nominais de energia útil para aquecimento

$Nic$  – Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento

$Nt$  – Necessidades globais de energia primária máximas

$Ntc$  – Necessidades globais de energia primária

$Nv$  – Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento

$Nv$  – Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento

$Nvc$  – Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento

$Q_i$  – Ganhos de calor associados à dissipação de calor pela iluminação, equipamentos e pelo metabolismo dos ocupantes

$Q_{opaco}$  – Ganhos solares pela envolvente opaca

$Q_s$  – Ganhos solares pelos vãos envidraçados

$Q_t$  – Perdas de calor através da envolvente do edifício

$Q_v$  – Perdas de calor através da envolvente do edifício

$Q$  – Energia em forma de calor

$q^n$  – Fluxo de calor convectivo

$q_x^n$  – Fluxo de calor na direção  $x$

$T_\infty$  – Temperatura do fluido

$T_s$  – Temperatura de superfície

$U_w$  – Coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado

$W$  – Energia em forma de trabalho

$X$  – Fator de orientação do envidraçado

$\frac{dT}{dx}$  – Gradiente de temperatura

$\Delta U$  – Variação da energia interna

$\alpha$  – Coeficiente de absorção

$\varepsilon$  – Emissividade da superfície

$\eta_{arref}$  – Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento

$k$  – Condutividade térmica

$\rho$  – Coeficiente de reflexão

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann

$\tau$  – Coeficiente de transmissão

## **Siglas**

AQS – Águas Quentes Sanitárias

AVAC – Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

DGEG – Direção Geral da Energia e Geologia

ICESD – Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico

LAI – Laboratório de Aerodinâmica Industrial

QAI – Qualidade do Ar Interior

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos

Edifícios

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em

Edifícios

SCE – Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior

UE – União Europeia

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo energético caminhou sempre a par da evolução da Humanidade. O uso da energia tem sido crucial para o desenvolvimento da sociedade. A sobrevivência a ambientes adversos criou a necessidade de obter formas e mecanismos que permitissem uma “melhor qualidade de vida”.

Desde o aparecimento e conseqüente utilização do fogo há 150 000 A.C., há revolução industrial, passando pelos dias de hoje, o consumo e produção de energia sofreu uma forte evolução. O aumento exponencial do consumo energético provocado pelo surgimento da revolução industrial e conseqüente melhoria da qualidade de vida acarretou custos a nível ambiental, devido ao aumento da procura e exploração dos recursos naturais.

Acompanhando a tendência global, em Portugal, o consumo energético tem vindo a aumentar ao longo dos anos. Sendo um País extremamente dependente da energia exterior (76,6% em 2010), visto existir uma escassez de recursos como o petróleo, carvão ou gás natural, leva a que a economia do País seja diretamente influenciada pelo consumo de energia. No entanto, devido à crescente implementação de políticas para a produção de energias renováveis, nomeadamente na produção de energia hídrica, solar, geotérmica, biomassa; tem vindo a diminuir, ainda que de forma pouco vincada a importação de energia.

Segundo dados da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), entre 2000 e 2010 a dependência energética de Portugal tem sofrido variações pouco significativas, destacando-se o ano de 2005 com um pico de dependência energética (88,3%) e o ano de 2010 onde ocorreu uma diminuição significativa. Em 2010 a taxa de dependência energética de Portugal era de 76,7% (Figura A.1).

No que respeita ao consumo energético por setor, dados de 2010 revelam que os setores da indústria e dos transportes continuam a ser dos setores que consomem mais energia (29% e 37% respetivamente, dados DGEG (Figura A.2)).

Nos últimos 15 anos assistiu-se a uma alteração dos hábitos de consumo energético nas habitações, segundo os resultados preliminares do Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico (ICESD – 2010).

No setor doméstico, o consumo de energia elétrica por alojamento tem vindo a aumentar, bem como a utilização de gás natural. Contrariamente verifica-se uma diminuição da energia proveniente do petróleo.

O aumento do consumo de energia elétrica está associado ao aumento do parque habitacional, ao aumento do conforto térmico nas habitações devido não só ao avanço tecnológico, mas também devido à constante procura de melhoria do bem-estar.

No entanto, dados da DGEG, afirmam que Portugal ainda é um dos países da União Europeia (UE) com menor consumo de energia elétrica *per capita*.

Segundo os resultados preliminares do ICESD, o maior consumo de energia nas habitações pertence ao setor da cozinha e aquecimento de águas sanitárias (Figura A.3).

Na tentativa de limitar os consumos energéticos no setor habitacional, o Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações publicou o Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril (RCCTE) baseado em normas europeias e à realidade do nosso País.

Este trabalho pretende estudar o comportamento térmico de um dispositivo de oclusão comum na maioria dos edifícios de habitação. O dispositivo em estudo será uma lâmina de estore com perfil em alumínio e o interior em poliestireno expandido. Com recurso a processos de simulação numérica, utilizando um programa comercial *CFX ANSYS versão 13.0*, será possível prever o comportamento térmico deste dispositivo. Em primeira análise o estudo incidirá numa vulgar lâmina de estore, tipo *Alugix45*. Uma segunda análise consistirá em implementar na lâmina pequenas alterações estruturais de forma a otimizar o comportamento térmico. As condições impostas nas duas situações em análise serão as mesmas de forma a possibilitar a comparação dos resultados.

Os resultados da simulação numérica serão posteriormente validados através da parte experimental, que consistirá na comparação de dois estores, onde o único parâmetro diferenciador é a cor (branca/verde), através de um modelo construído em placas de *Wallmate* a simular o que se passa entre o estore e o envidraçado.

Por fim, apresentar-se-ão as principais conclusões a retirar deste trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo pretende enquadrar o tema desta tese na atual legislação em vigor e os mecanismos de transferência de calor associados ao dispositivo em estudo.

### 2.1. Legislação

De forma a travar o aumento descontrolado do consumo energético nos alojamentos, a União Europeia, promulgou duas diretivas que visam o desempenho energético dos edifícios.

A Diretiva 2002/91/CE impõe um método de cálculo do desempenho energético dos edifícios, a aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos novos edifícios e dos grandes edifícios já existentes que sejam submetidos a obras de requalificação significativas, a certificação energética dos edifícios e inspeção regular das instalações de caldeiras e ar condicionado dos edifícios.

Os Estados-Membros ficam obrigados a aplicar um método para o cálculo do desempenho energético do edifício, a nível nacional ou regional, conforme estipulado na Diretiva. No entanto, cabe a cada Estado-Membro a decisão de não aplicar os requisitos impostos pela Diretiva nas seguintes situações:

- Monumentos, edifícios de culto, edifícios temporários, com um período de utilização previsto de 2 anos
- Instalações industriais, oficinas e edifícios agrícolas não residenciais
- Edifícios residenciais destinados a uma ocupação sazonal (menos de quatro meses por ano) e edifícios autónomos com uma área total inferior a  $50m^2$ .

O método imposto pela Diretiva para o cálculo do desempenho energético dos edifícios assenta nos seguintes aspetos:

- Condições climáticas exteriores e condições interiores
- Posição e orientação dos edifícios
- Características térmicas do edifício
- Sistemas solares passivos e proteção solar
- Ventilação natural

- Instalação de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC)

- Instalação de AQS

- Instalação fixa de iluminação

Neste mesmo cálculo considera-se de forma positiva os seguintes aspetos:

- Sistemas solares ativos e outros sistemas de aquecimento e produção de eletricidade baseados em fontes de energia renováveis

- Eletricidade produzida por sistemas de cogeração

- Sistemas urbanos ou coletivos de aquecimento e arrefecimento

- Iluminação natural.

Os Estados-Membros deverão realizar estudos adicionais no que respeita a edifícios novos com área útil superior a 1000m<sup>2</sup>. Assim, os novos aspetos a considerar deverão ser analisados e tomados em conta antes mesmo do início de obra. Deverá fazer-se o estudo da viabilidade técnica, ambiental e económica de sistemas alternativos (sistemas descentralizados de fornecimento energético baseados em energias renováveis, sistemas de cogeração, sistemas urbanos ou coletivos de aquecimento e arrefecimento, bombas de calor). Aquando da requalificação de edifícios com áreas superiores a 1000m<sup>2</sup> deverá garantir-se uma melhoria no seu desempenho térmico, de forma a cumprir os requisitos mínimos impostos pela Diretiva, tendo sempre em consideração a sua viabilidade em termos técnicos, funcionais e económicos.

A Diretiva impõe que seja emitido por parte das entidades competentes um certificado energético a edifícios para venda ou arrendamento. Desta forma, será fornecido aos compradores ou arrendatários um certificado do desempenho energético do edifício com uma validade nunca superior a 10 anos.

A segunda diretiva comunitária (Diretiva 2010/31/EU) veio reformular a diretiva comunitária de 2002. O principal objetivo foi o reforço das medidas para aumentar a eficiência energética dos edifícios novos e existentes juntamente com a utilização de energia proveniente de fontes renováveis.

A regulamentação nacional sobre esta temática entrou em vigor através do SCE (Certificação Energética e do Qualidade do Ar Interior – Decreto-Lei 78/2006 de 4 de abril, com base na Diretiva Comunitária 2002/91/CE), RSECE (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios – Decreto-Lei 79/2006 de 4 de abril) e o RCCTE

(Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios – Decreto-Lei 80/2006 de 4 de abril).

Ao abrigo do RCCTE estão todos os edifícios de habitação e os edifícios de serviço com área útil inferior a 1000 m<sup>2</sup>, sem sistemas mecânicos de climatização ou com sistemas de climatização de potência inferior a 25 kW . [1]

### **2.1.1. RCCTE**

O sector doméstico em Portugal é responsável por o consumo de 30% da energia final. No entanto, esta quantidade de energia consumida pode ser reduzida em cerca de 50% com a aplicação de medidas que viabilizem a eficiência energética dos edifícios domésticos.

Apesar de Portugal ter sido um dos últimos Países da Europa Comunitária a dispor de um regulamento sobre a Térmica de Edifícios, a primeira versão do RCCTE (Regulamento da Características de Comportamento Térmico de Edifícios) foi inovadora no que diz respeito aos aspetos ligados ao conforto térmico no Verão. Aprovado pelo Decreto-Lei nº 40/90 de 6 de fevereiro, o RCCTE foi o primeiro instrumento legal que em Portugal definiu requisitos a projetos de novos edifícios, bem como a edifícios que sofram grandes remodelações, de forma a garantir a satisfação das condições de conforto térmico sem necessidades excessivas de energia, tanto no Inverno como no Verão. O RCCTE analisa de forma separada as estações de aquecimento e arrefecimento, com requisitos e exigências adequadas a cada zona climática. Associado a estas medidas, o RCCTE visava garantir a diminuição dos efeitos patológicos na construção, devido à falta de isolamento, o que propicia infiltrações de água e ar, originando o aparecimento de condensações superficiais no interior dos elementos da envolvente. Desta forma, assistiu-se a uma melhoria gradual da qualidade de construção em Portugal, com a adoção de práticas de aplicação de isolamento térmico nos edifícios.

No entanto, a crescente utilização de equipamentos de climatização com a introdução de equipamentos de aquecimento e de ar condicionado para pequenas frações, traduziu-se num crescente aumento do consumo energético nos edifícios.

Para combater o aumento dos consumos reais dos edifícios, que induz maiores exigências de qualidade térmica da envolvente dos edifícios, foi aprovada a nova versão do

RCCTE através do Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de abril. O novo Decreto-Lei revoga o anterior e assenta na metodologia imposta pela Diretiva 2002/91/CE. Além das imposições da Diretiva Comunitária, a nova versão do RCCTE baseia-se no princípio de que uma grande parte dos edifícios vá possuir capacidade para garantir e produzir condições ambientais nos espaços interiores durante os períodos de Inverno e Verão. A nova versão veio igualmente limitar o consumo energético das habitações, tanto no Inverno como no Verão, e fixou as condições ambientais de referência para o cálculo dos consumos energéticos nominais segundo padrões de utilização (Figura 2.1), quer em termos de temperatura ambiente quer em termos de ventilação para a renovação do ar interior. Cada vez mais, a qualidade do ar interior (QAI) ocupa um lugar de destaque devido ao aumento do isolamento nos edifícios, nomeadamente, na estanqueidade dos caixilhos de portas e janelas e também devido à produção e acumulação de poluentes resultantes do uso de novos materiais e tecnologias no edifício. A nova versão do RCCTE considera novos parâmetros, como os fatores de forma, permeabilidade ao ar das caixilharias e contabiliza de uma forma mais detalhada os efeitos das pontes térmicas lineares e planas. Com o aumento dos requisitos de isolamento, bem com o aumento da estanqueidade das envolventes e o uso de novos materiais e tecnologias na construção que libertam poluentes, esta nova versão do RCCTE definiu taxas de renovação de ar adequadas para cada fração.

Como consequência da limitação do consumo energético, espera-se uma diminuição da emissão de gases poluentes que contribuem para o aquecimento global ou efeito de estufa, pretendendo assim, o cumprimento das metas do Protocolo de Quioto.

A energia consumida na preparação de águas quentes sanitárias (AQS) passou a ser contabilizada no cálculo das necessidades de energia primária, com o objetivo de aumentar e favorecer a utilização de sistemas de coletores solares ou outras alternativas renováveis nos edifícios. A implementação da instalação de painéis solar para a produção de AQS (1 [m<sup>2</sup>coletor/ocupante] até 50% da área de cobertura disponível para uma área útil superior ou igual a 50 [m<sup>2</sup>]) permite que se reúna condições para o desenvolvimento do mercado deste setor.

A utilização de energia proveniente de fontes renováveis é contabilizada de forma positiva, influenciando de uma forma direta o desempenho do edifício bem como a sua classificação energética.

O RCCTE também define os procedimentos de licenciamento ou de autorização de ações urbanísticas em edifícios.

O RCCTE pode ser atualizado de forma a obter um ajuste adequado aos atuais contextos social, económico e energético, permitindo um aumento gradual da qualidade térmica dos edifícios num futuro próximo. Os valores dos requisitos específicos são atualizados e fixados de forma periódica pelos ministérios que tutelam o setor.

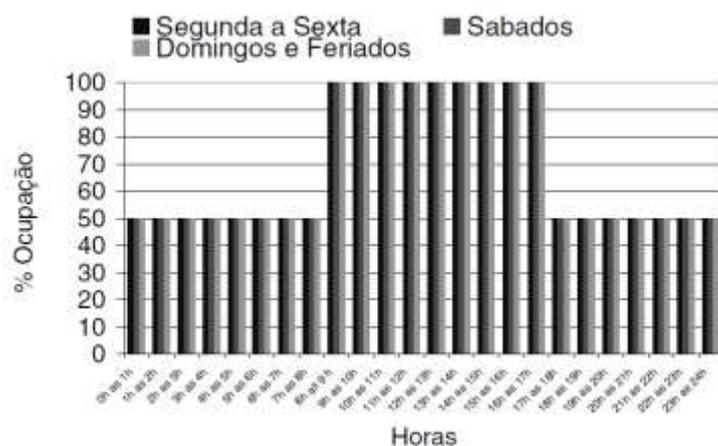


Figura 2.1 – Gráfico do padrão de utilização (ocupação) RCCTE.

#### 2.1.1.1. Objetivos e edifícios abrangentes

O RCCTE visa estabelecer regras de projeto para os edifícios abrangidos por este regulamento, de forma a garantir as exigências de conforto térmico (aquecimento e arrefecimento), de ventilação, garantir QAI dos edifícios, assim com as necessidades de AQS sem o gasto excessivo de energia.

Outro objetivo é a diminuição das situações patológicas nos edifícios, de modo a evitar a ocorrência de condensações superficiais ou internas. O uso de isolamento e novas técnicas de construção permitem o cumprimento deste segundo objetivo.

São abrangidos pelo RCCTE todas as frações autónomas de todos os edifícios de habitação, edifícios de serviço com área útil inferior a 1000 [m<sup>2</sup>] com ou sem sistema de climatização, sem nunca exceder 25 [kW] de potência total dos equipamentos. Os edifícios já existentes sujeitos a grandes intervenções (custo seja superior a 25% do valor do edifício) são também abrangidos. Em edifícios com contador individual de consumo de energia, todas as partes separadas do resto do edifício por uma *barreira física contínua, e cujo direito de propriedade ou fruição seja transmissível autonomamente* são abrangidas

pelo RCCTE. Em situações que se verifiquem grupos de edifícios com um contador individual, cada edifício é abrangido separadamente. [1]

Com tudo, existem tipologias de edifícios que não são abrangidos por este regulamento, nomeadamente edifícios ou frações autónomas destinadas a serviços (novas ou para renovar) que pelas suas características de utilização, se destinem a permanecer frequentemente abertos ao contacto com o exterior e não sejam aquecidos nem climatizados; locais de culto, edifícios industriais, garagens, armazéns, oficinas e edifícios agrícolas não residenciais; zonas históricas e edifícios classificados aquando da sua remodelação, recuperação e ampliação; infraestruturas militares e os imóveis afetos ao sistema de informações ou a forças de segurança que se encontrem sujeitos a regras de controlo e confidencialidade.

#### **2.1.1.2. Índices e parâmetros de caracterização**

A caracterização do comportamento térmico de edifícios segundo o RCCTE é só possível através da quantificação de determinados índices e parâmetros.

Os índices térmicos a determinar são os que correspondem aos valores das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento ( $N_{ic}$ ), das necessidades nominais anuais de energia útil para o arrefecimento ( $N_{vc}$ ) e das necessidades nominais anuais de energia para a produção de AQS ( $N_{ac}$ ), bem como as necessidades globais de energia primária ( $N_{tc}$ ). Os valores das necessidades nominais são obtidos com base no método normalizado de cálculo imposta pelo regulamento e tendo em referência a contribuição das energias renováveis.

Os consumos nominais calculados são diferentes dos consumos reais obtidos. Em termos regulamentares as imposições são referentes aos consumos nominais. O consumo nominal corresponde à situação onde se registem as condições nominais impostas, o que não é verificado num edifício real durante todo o ano.

Os parâmetros complementares envolvidos na caracterização do comportamento térmico de edifícios são: os coeficientes de transmissão térmica, superficiais e lineares dos elementos da envolvente; a classe de inércia térmica do edifício ou da fração autónoma; o fator solar dos envidraçados; taxa de renovação de ar.

Os índices e parâmetros são determinados tendo em conta os dois períodos contabilizados pelo RCCTE – Verão e Inverno – devido ao sentido do fluxo de calor que vai ser diferente em cada um dos períodos.

### **2.1.1.3. Limitações das necessidades nominais de energia**

O Decreto-Lei nº80/2006 limita, através do artigo 15.º, os valores máximos admissíveis das necessidades nominais de energia útil para aquecimento ( $N_i$ ), arrefecimento ( $N_v$ ), produção de águas quentes sanitárias ( $N_a$ ) e o valor máximo das necessidades nominais globais de energia primária de um edifício ( $N_{tc}$ ).

Segundo o artigo 15.º os valores limite máximo de  $N_i$  variam em função da morfologia da fração autónoma (fator de forma  $FF$ ) e da zona climática (graus-dias  $GD$ ) onde estão inseridos, onde  $FF$  é determinado segundo a metodologia indicada no Anexo II do Decreto-Lei nº80/2006 e os valores de  $GD$  estão tabelados no Anexo III do mesmo Decreto-Lei.

Os valores de limite máximo de  $N_v$  dependem da zona climática onde está localizada a fração autónoma. Portugal Continental está dividida em 3 zonas climáticas ( $V_1, V_2, V_3$ ) (Figura 2.2). Os arquipélagos da Madeira e Açores constituem 2 zonas distintas com valores próprios.

Em cada fração autónoma os valores das necessidades globais de energia primária ( $N_{tc}$ ) nunca podem ser superiores aos valores das necessidades globais de energia primária máximas ( $N_t$ ). Os valores limites de  $N_{tc}$  são calculados com base nos fatores de ponderação das necessidades de aquecimento, arrefecimento e de preparação de AQS baseados em padrões habituais de utilização dos respetivos sistemas relativamente aos padrões admitidos no cálculo de  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$ . O valor de  $N_t$  é calculado com base nos valores de  $N_i$ ,  $N_v$  e de  $N_a$ .

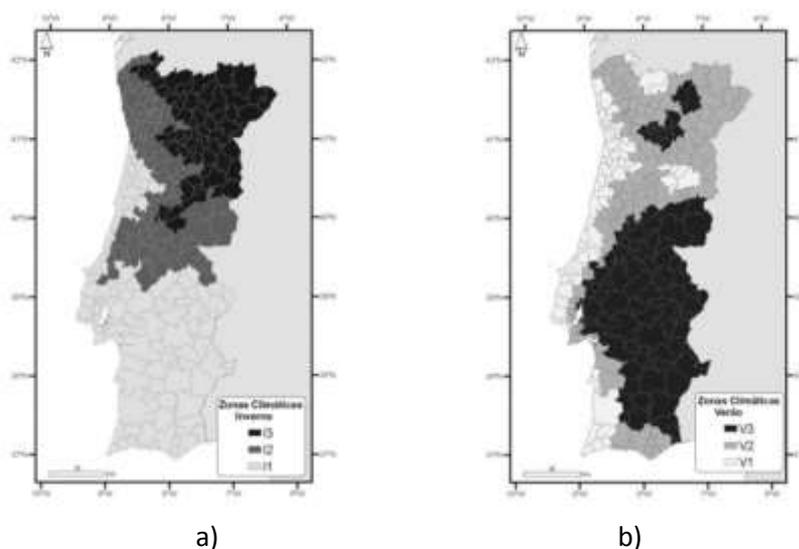


Figura 2.2 – a) Zonas climáticas de inverno b) Zonas climáticas de verão (RCCTE).

#### 2.1.1.4. Condições interiores de referência

O RCCTE define as seguintes condições de referência no interior de cada fração autónoma:

- Estação de aquecimento (Inverno): Temperatura do ar é 20[°C]
- Estação de arrefecimento (Verão): Temperatura do ar 25[°C] e humidade

relativa 50%

#### 2.1.1.5. Classe de eficiência energética

Os edifícios abrangidos pelo RCCTE são classificados segundo a sua eficiência energética. A classe de eficiência energética é determinada segundo o quociente entre as necessidades globais de energia primária calculadas ( $N_{tc}$ ) e as necessidades globais de energia primária máximas ( $N_t$ ). A classe energética é definida segundo os intervalos de valores de eficiência energética segundo os valores impostos.

$$R = \frac{N_{tc}}{N_t}$$

As classes energéticas variam da classe A à classe G. Os edifícios novos de habitação e que sofreram grandes intervenções variam entre as classes A+ e B- (A+,A,B,B-). Os edifícios existentes podem ter qualquer classe energética.

Classe energética	R
A+	$R \leq 0,25$
A	$0,25 < R \leq 0,50$
B	$0,50 < R \leq 0,75$
B-	$0,75 < R \leq 1,00$
C	$1,00 < R \leq 1,50$
D	$1,50 < R \leq 2,00$
E	$2,00 < R \leq 2,50$
F	$2,50 < R \leq 3,00$
G	$3,00 < R$

Tabela 2.1 – Classe energética dos edifícios segundo o RCCTE.

## 2.2. Envidraçados

Envidraçados são todos os elementos construtivos semi-transparentes que possibilitem a entrada de luz e radiação solar para o interior dos edifícios, como por exemplo, janelas de peitoril, janelas de sacada, portas envidraçadas, vitrais, janelas de sótão (tipo *Velux*), etc. Constitui um envidraçado os elementos translúcidos (vidro simples ou duplo), toda a caixilharia (madeira, metal ou “plástico”) e todos os elementos de proteção e sombreamento que possui (portadas, estores, cortinas). Os vãos envidraçados são elementos construtivos onde ocorrem trocas de calor entre o interior e exterior da fração habitacional.

Os ganhos ou perdas energéticas através destes elementos estão diretamente ligados à sua orientação, sendo que a maior eficiência ocorre quando estes se orientam a sul, no caso do hemisfério norte. Deste modo, a maior área de envidraçados deve estar orientada a sul. No inverno, estação de aquecimento, os ganhos energéticos devido à radiação solar serão máximos. No verão, estação de arrefecimento, os ganhos energéticos devido à radiação solar podem ser minimizados com a introdução de sistemas de sombreamento, nomeadamente palas (horizontais e/ou verticais), varandas ou qualquer outro tipo de pormenor arquitetónico que alterem o ângulo de incidência solar no envidraçado.

### 2.2.1. Influência dos envidraçados no RCCTE

A transferência de calor que ocorre nos vãos envidraçados é contabilizada como ganhos solares. Os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da energia solar são considerados positivos na estação de aquecimento (inverno) e negativos na estação de arrefecimento (verão), devido à variação do sentido de fluxo de calor.

Balanço energético de um edifício:

- Verão:

$$N_{vc} = (Q_i + Q_s + Q_{opaco}) \cdot (1 - \eta_{arref}) / A_p$$

- Inverno:

$$N_{ic} = (Q_t + Q_v - Q_s - Q_i) / A_p$$

onde:

$Q_i$  – Ganhos de calor associados à dissipação de calor pela iluminação, equipamentos e pelo metabolismo dos ocupantes

$Q_s$  – Ganhos solares pelos vãos envidraçados

$Q_{opaco}$  – Ganhos solares pela envolvente opaca

$\eta_{arref}$  – Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento

$Q_t$  – Perdas de calor através da envolvente do edifício

$Q_v$  – Perdas de calor resultantes da renovação do ar

$A_p$  – Área útil de pavimento do espaço

### 2.2.1.1. Ganhos solares pelos vãos envidraçados

Os ganhos solares pelos vãos envidraçados são determinados com base em duas metodologias diferentes, consoante a estação de aquecimento ou arrefecimento. Fato, que ocorre devido à variação das relações angulares do sol entre o inverno e verão.

Para a estação de arrefecimento, os ganhos solares pelos vãos envidraçados são contabilizados com base na seguinte equação:

$$Q_s = I_r \times A_s \text{ [kWh]}$$

onde:

$I_r$  - Valor médio da intensidade da radiação solar para a estação de arrefecimento [(kWh/m<sup>2</sup>) – Quadro III.9, página 2484 do RCCTE

$A_s$  – Área efetiva equivalente coletora da radiação solar do vão envidraçado m<sup>2</sup>.

Para a estação de aquecimento, os ganhos solares pelos vãos envidraçados são contabilizados com base na seguinte equação:

$$Q_s = M \times G_{sul} \times X \times A_s \text{ [kWh]}$$

onde:

$M$  – Duração média da estação convencional e aquecimento (contabilizada no nº de meses)

$G_{sul}$  – Energia solar média mensal incidente numa superfície vertical orientada a sul na estação de aquecimento [kWh/m<sup>2</sup>mês], em função da zona climática de inverno.

$X$  – Fator de orientação do envidraçado (Quadro IV.4 do RCCTE)

$A_s$  – Área efetiva equivalente coletora da radiação solar do envidraçado m<sup>2</sup>

### 2.2.1.2. Área efetiva coletora de radiação solar ( $A_s$ )

A área efetiva coletora de radiação solar ( $A_s$ ) é o único componente que não vem tabelado para o cálculo dos ganhos solares. Este parâmetro influencia os ganhos solares dos vãos envidraçados tanto na estação de aquecimento como de arrefecimento.

O valor de ( $A_s$ ) é determinado recorrendo à equação:

$$A_s = A \times F_s \times F_g \times F_w \times g_{\perp} \text{ [m}^2\text{]}$$

onde:

$A$  – Área do envidraçado (vidro e caixilho) [m<sup>2</sup>]

$F_s$  – Fator de obstrução

$F_g$  – Fração envidraçada [m<sup>2</sup>]

$F_w$  – Fator de correção da seletividade angular

$g_{\perp}$  - Fator solar do vidro

### 2.2.1.3. Requisitos mínimos dos vãos envidraçados

O RCCTE limita os valores de  $g_{\perp}$  para vãos de envidraçados com área total superior a 5% da área útil de pavimento do espaço que serve, exceto quando orientadas a norte. O fator solar do vão envidraçado juntamente com o dispositivo de proteção ativo não pode ultrapassar os valores impostos pelo quadro IX.2 do RCCTE.

## 2.2.2. Dispositivos de proteção solar

Existem situações em que o aproveitamento desta fonte de energia não é benéfico, nomeadamente no Verão. Na tentativa de minimizar os ganhos térmicos e de iluminação nestas situações, são aplicados um dispositivo de proteção solar. Os dispositivos de proteção solar podem ser internos ou externos consoante a posição dos mesmos em relação ao vão envidraçado. Portadas, persianas, estores, cortinas, são exemplos de dispositivos de proteção solar.

### **2.2.2.1. Como funcionam e para que servem**

Os dispositivos de proteção solar têm como principal função evitar os ganhos térmicos indesejáveis no verão, e funcionarem como dispositivos de oclusão para reduzir a entrada de luz na fração habitacional. A sua utilização e o tipo influencia o fator solar do vão envidraçado ( $g_{\perp}$ ).

Os dispositivos de proteção solar interior, ou seja, dispositivo aplicado entre o envidraçado e o interior da fração habitacional tem a característica de absorver e refletir parcialmente a energia que é absorvida pelo envidraçado. A parte absorvida pelo dispositivo converte-se em calor que se liberta pelo interior da fração. A cor dos dispositivos é importante na eficiência do mesmo, visto que o coeficiente de reflexão é influenciado por esta característica. A radiação refletida para o exterior tem o comprimento de onda original. As cortinas e os *blackouts* são alguns exemplos destes dispositivos.

Os dispositivos de proteção solar exterior impedem a incidência dos raios solares no envidraçado. Desta forma, a radiação solar é interceptada antes de atravessar o vidro. O dispositivo é aplicado junto à face externa do edifício o que faz com que parte da radiação solar incidente seja refletida e o restante seja absorvida, originando um aumento da temperatura entre o dispositivo de proteção solar e o envidraçado (temperatura de proteção). Por convecção, o valor da temperatura do ar existente entre o dispositivo e o envidraçado aumenta. Sendo o ar um bom isolante térmico, o aumento da distância entre o dispositivo e o envidraçado (aumento da espessura de ar), vai permitir uma maior eficiência do dispositivo.

### **2.2.2.2. Oferta de mercado**

O mercado atual dispõe de uma vasto leque de dispositivos de proteção solar interiores e exteriores. Nos dispositivos de proteção solar interiores destacam-se os mais usuais, nomeadamente, cortinas, *blackouts*, estores de interiores (palhinha, laminados, pregas e verticais). Os materiais mais utilizados para estes dispositivos são o PVC, alumínio e tecido. Nos dispositivos de proteção solar exteriores os estores e as persianas são os mais comuns. Os estores distinguem-se pelo material usado (PVC e alumínio).

## 2.3. Transferência de calor

“Qualquer sistema pode trocar energia com a vizinhança através de processos de transferência de calor e trabalho, sendo o correspondente balanço materializado pela conhecida primeira lei da termodinâmica.” [3]

A 1ª lei da termodinâmica diz que a variação da energia interna ( $\Delta U$ ) de um sistema corresponde à diferença entre a energia térmica recebida pelo sistema na forma de calor ( $Q$ ) e a energia cedida para os sistemas vizinhos na forma de trabalho ( $W$ ).

$$\Delta U = Q - W$$

A energia pode ser transferida pela interação entre o sistema e vizinhança. As interações entre sistema e vizinhança incluem a transferência de energia por calor e trabalho, bem como a transferência de energia associada ao fluxo de massa.

Existem três modos de transferência de calor: Condução, Convecção e Radiação.

### 2.3.1. Modos de transferência de calor

*O calor é a energia em movimento devido à diferença de temperatura*

Na presença de uma diferença de temperatura existe sempre transferência de calor entre o sistema e vizinhança.

#### 2.3.1.1. Condução

Em condições de gradiente de temperatura em ambiente estacionário, que pode ser líquido ou gasoso, usa-se o termo condução para referir a transferência de calor que ocorre entre o sistema e vizinhança.

O mecanismo físico deste modo de transferência de calor envolve conceitos de atividade molecular e atômica, onde a transferência de energia ocorre da mais energética para a menos energética da substância, devido à interação entre as partículas.

Altas temperaturas são associadas a alta energia molecular. Quando ocorre colisão entre as moléculas vizinhas, a transferência de energia ocorre da parte mais energética para a menos energética. Na presença de um gradiente de temperatura, a

transferência de energia ocorre na direção decrescente da temperatura. A mesma situação ocorre em líquidos, no entanto a interação molecular ocorre de maneira mais forte e mais frequente devido ao maior espaçamento entre a rede de moléculas. Na condução o movimento entre moléculas é devido à vibração das moléculas e da migração de elétrons.

A quantidade de calor transferida no processo pode ser quantificada pela taxa de calor. Esta taxa contabiliza a quantidade de calor transferido por unidade de tempo. A equação de Fourier contabiliza a quantidade de calor transferido por unidade de tempo:

$$q_x^n = -k \frac{dT}{dx}$$

O fluxo de calor  $q_x^n$  [W/m<sup>2</sup>] é a transferência de calor por unidade de tempo na direção  $x$  por unidade de área (perpendicular à direção do fluxo), e proporcional ao gradiente de temperatura  $dT/dx$ . A constante de proporcionalidade  $k$  é a propriedade de transporte conhecido como condutividade térmica [W/m.K] e é característica do material. O sinal menos é consequência do facto da transferência de calor ocorrer na direção decrescente da temperatura.

No caso particular do vão envidraçado, a transferência de calor por condução ocorre quando existe um fluxo transmitido por comunicação molecular direta entre a superfície em contacto com o exterior e a superfície em contacto com o interior, fenómeno presente no vidro e na caixilharia. Para minimizar este processo de transferência de calor, os envidraçados atuais possuem vidros duplos e corte térmico nas caixilharias. A utilização do vidro duplo permite ter um volume de ar (caixa-de-ar) entre as duas superfícies, reduzindo assim as trocas de calor por condução.

Na tabela seguinte são apresentados os valores do coeficiente de transmissão térmica  $U_w$  de um vão envidraçado para a situação de sem corte térmico na caixilharia e com corte térmico. Os valores são referentes a uma caixilharia metálica. IT50 LNEC

<b>Vão envidraçado s/ corte térmico</b>	<b><math>U_w</math> [W/(m<sup>2</sup>.°C)]</b>
Vidro simples	6
Vidro duplo c/ 6 mm de esp. de lâmina de ar	3,9
<b>Vão envidraçado c/ corte térmico</b>	<b><math>U_w</math> [W/(m<sup>2</sup>.°C)]</b>
Vidro simples	5,4
Vidro duplo c/ 6 mm de esp. de lâmina de ar	3,7

Tabela 2.2 – Valores do coef. de transmissão térmica  $U_w$  de um vão envidraçado IT50 LNEC.

### 2.3.1.2. Convecção

O mecanismo de transferência de calor por convecção implica a transferência de calor entre uma superfície e o movimento ou repouso de um fluido, quando se encontram a diferentes temperaturas.

A transferência de calor por convecção é um processo de transporte de massa devido ao movimento de um fluido originado pela sua diferença de densidade. O grande número de moléculas em movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para que ocorra o fenómeno de transferência de calor.

O modo de transferência de calor por convecção é composto por 2 mecanismos: Convecção quando se refere ao transporte de energia por acumulação e por Advecção quando se refere ao transporte de energia devido ao movimento de massa no fluido.

O fenómeno de transferência de calor por convecção pode ser classificado de acordo com a natureza do fluido. Designa-se convecção forçada quando o fluxo é originado por meios externos, tais como, ventilador, bomba ou vento atmosférico. Em contraste, designa-se convecção natural quando o escoamento do fluido é induzido por ação de uma força de corpo proporcional à massa específica, no qual existem diferenças da massa volúmica do fluido originado pelas diferenças de temperatura. As velocidades do fluido na convecção natural, em geral, são mais pequenas comparativamente às velocidades do fluido na convecção forçada. Desta forma a taxa de transferência de calor é maior em condições de convecção forçada.

Independente do mecanismo de transferência de calor por convecção, a equação imposta é a equação conhecida como lei de Newton para o arrefecimento:

$$q^n = h(T_s - T_\infty)$$

onde  $q^n$  é o fluxo de calor convectivo [ $W/m^2$ ], proporcional à diferença entre a temperatura de superfície e a temperatura do fluido,  $T_s$  e  $T_\infty$  respetivamente, e a constante de proporcionalidade  $h$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] é o coeficiente de transferência de calor por convecção. Quando se utiliza a equação acima descrita, o sinal de  $h$  é positivo quando a transferência de calor ocorre da superfície para o fluido ( $T_s > T_\infty$ ) e o sinal é negativo quando a transferência de calor ocorre do fluido para a superfície ( $T_\infty > T_s$ ).

No entanto, se  $T_{\infty} > T_s$  nada impede que se utilize a equação da forma:

$$q^n = h(T_{\infty} - T_s)$$

A utilização da equação nas diferentes formas depende do contexto do problema.

O coeficiente de convecção depende da camada limite, que é dependente da geometria da superfície, da natureza do fluido, da classificação termodinâmica do fluido e as suas propriedades de transporte.

No caso particular dos envidraçados, a transferência de calor por convecção ocorre devido ao movimento de massa de ar em contacto com o vão envidraçado tanto no exterior como no interior da fração habitacional.

### **2.3.1.3. Radiação**

Todas as superfícies emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Embora nos foquemos só na radiação proveniente das superfícies sólidas, a emissão de calor por radiação pode ocorrer nos líquidos e nos gases. O fenómeno de radiação pode ser atribuído à mudança da configuração de eletrões com oscilação e vibração dos mesmos, influenciando a constituição dos átomos ou das moléculas. A energia de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas. A energia transmitida é dependente do comprimento de onda, assim desta forma, quando menor o comprimento de onda maior a energia transmitida.

Contrariamente ao que ocorre nos mecanismos de transferência de calor por condução e convecção que necessita de um meio material para ocorrer, no mecanismo de transferência de calor por radiação não precisa. A transferência de calor por radiação ocorre de forma muito eficiente no vácuo.

A lei que descreve o fenómeno de transferência de calor por radiação é a lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T_s^4$$

onde  $T_s$  é a temperatura absoluta (K) da superfície e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$ ). A utilização da equação de Stefan-Boltzmann implica considerar a superfície como um corpo negro (superfície ideal).

O corpo negro é considerado o corpo ideal. O corpo negro assenta no pressuposto que absorve toda a radiação incidente, independentemente do comprimento de onda ou direção. A radiação emitida pelo corpo negro depende da temperatura e comprimento de onda e não da direção. Não há superfície que emita mais energia do que a superfície do corpo negro.

O fluxo de calor radiativo emitido por superfícies de corpos reais é menor comparativamente ao corpo negro quando à mesma temperatura. Assim o fluxo de calor radiativo é dado por:

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4$$

onde  $\varepsilon$  é a propriedade radiativa da superfície em termos de emissividade.

Os valores variam entre 0 e 1 ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ). A emissividade provém da eficiência da superfície em termos de calor comparativamente à superfície do corpo negro, sendo esta propriedade fortemente dependente do material constituinte e do seu acabamento superficial. [11]

No caso particular do vão envidraçado, transferência de calor por radiação ocorre devido à radiação de onda curta proveniente do Sol, que pode incidir de forma direta ou de forma difusa. Esta radiação pode ser refletida, absorvida ou transmitida, conforme sejam os coeficientes de reflexão  $\rho$ , absorção  $\alpha$  e transmissão  $\tau$  do envidraçado.

Em virtude da sua translucidez ou transparência, parte da radiação solar incidente vai ser transmitida para o interior da fração habitacional. A quantidade de radiação refletida depende do ângulo de incidência da radiação solar. Assim, quanto maior o ângulo de incidência da radiação solar, maior será a quantidade de radiação refletida pelo vão. A radiação absorvida é convertida em calor no interno da fração habitacional, sendo posteriormente convertida em radiação de onda longa.

A seleção do vidro é fundamental para potenciar ou reduzir a contribuição da radiação solar. As propriedades do vidro permitem adotar o tipo de vidro mais adequado para cada situação. Existem os vidros coloridos, caracterizados pelo reduzido coeficiente de transmissão e elevado coeficiente de absorção; os refletantes, caracterizados pela eficiência ao refletirem uma grande parte da radiação solar; os de baixa emissividade, caracterizados pela diminuição da emissividade da radiação de onda longa; e os translúcidos, caracterizados pela baixa transmissão térmica e pela difusibilidade à passagem da radiação solar.



Figura 2.3 – Modos de transferência de calor num vão envidraçados .[2]

### 3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

“A simulação de edifícios pode ser definida como a introdução das características do edifício, que, com um certo grau de abstração, representam a realidade. Como um edifício é composto por milhares de variáveis, é necessário apenas representar as mais importantes e simplificar ou não introduzir as de menor importância”, (Adelard et al 1999).

Neste capítulo descrevem-se todos os procedimentos efetuados para a realização das simulações numéricas. Foi utilizado o *software CFX Ansys versão 13.0*. As simulações realizadas incidiram sobre uma lâmina de um estore de alumínio, submetida a condições semelhantes, temperaturas e fluxo de radiação. Simularam-se lâminas comerciais e lâminas onde foram implementadas alterações estruturais de forma a melhorar o comportamento térmico.

O modelo em estudo, lâmina de estore, foi construído utilizando o *software SolidWorks versão 2013*.

O procedimento efetuado compreende seguintes etapas:

- Construção do modelo – *SolidWorks*
- Importação do modelo – *DesignModeler*
- Geração de malha – *Meshing*
- Pré-processamento – *CFX-Pre*
- Resolução de equações – *CFX-Solver*
- Obtenção de resultados – *CFX-Post*

### 3.1. Construção do modelo

A construção do modelo baseou-se nas dimensões e nas características da lâmina de estore. O perfil da lâmina tem uma geometria complexa, não obedecendo a um perfil constante. Para simplificar a reprodução do modelo, digitalizou-se o perfil da lâmina (Figura 3.2) e importou-se a imagem para o *SolidWorks*. Desenhou-se o perfil da lâmina sobre a imagem importada. Finalizado o perfil do modelo, gerou-se um *extrude*. A Figura 3.1b) representa o modelo da lâmina de estore.

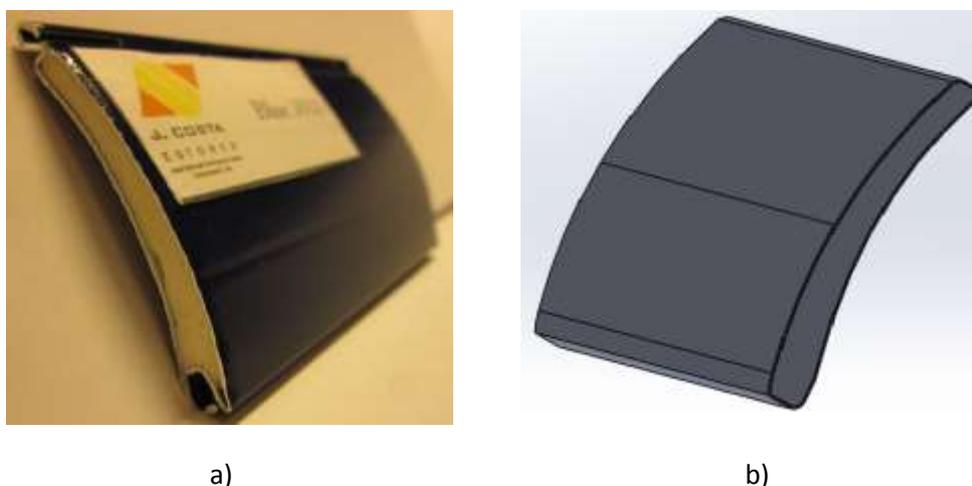


Figura 3.1 – a) Lâmina de estore *Alugix45* b) Modelo em CAD da lâmina de estore.

As características geométricas do modelo estão resumidas na tabela 3.1.

Caraterística	Dimensões
Altura	45 [mm]
Comprimento	50 [mm]
Espessura de alumínio	0,27 [mm]

Tabela 3.1 – Características geométricas do modelo.

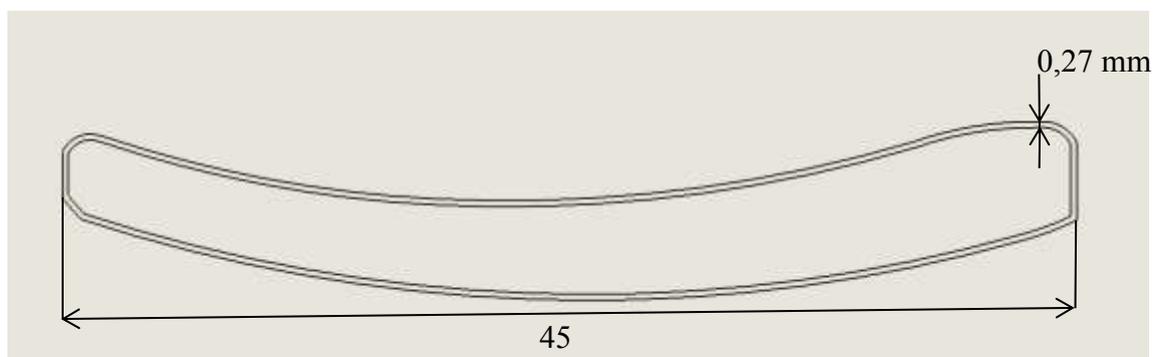


Figura 3.2 – Perfil da lâmina de estore *Alugix45*.

### 3.2. Geração da malha

A geração de malha consiste na divisão, em pequenos volumes, do modelo. O número de divisões do modelo condiciona os resultados, uma vez que, para cada uma das divisões são determinadas equações de transferência de calor. Quanto mais divisões o modelo sofrer (malhagem refinada) maior será o tempo de simulação comparativamente ao modelo com menor divisões. Para que os resultados não dependam do número de divisões, efetua-se um estudo de independência de malha. O objetivo desse estudo é determinar os parâmetros de uma malha tão grande quanto possível, sem que isso condicione os resultados obtidos.

O modelo construído em *SolidWorks* é importado para o *Ansys*, permitindo a definição da geometria. A malhagem processasse no *meshing* (Figura 3.3).

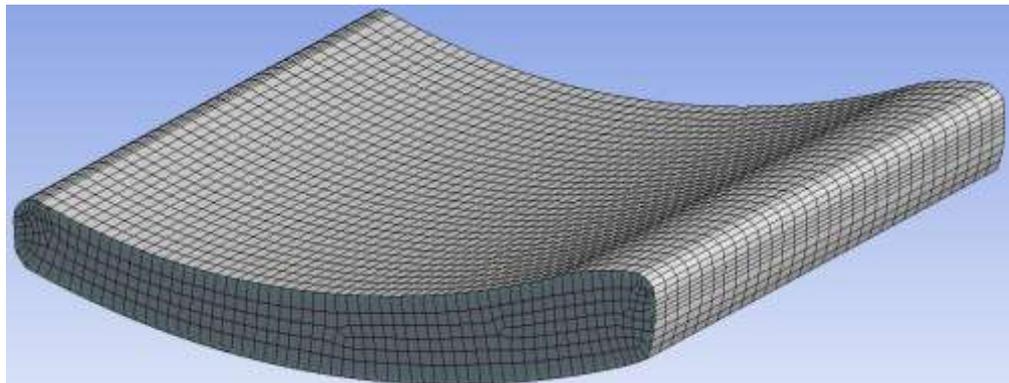


Figura 3.3 – Malhagem utilizada no modelo.

### 3.3. Pré-processamento

No pré-processamento definem-se características físicas, condições de fronteira e característica do processo de transferência de calor.

O modelo é constituído por um perfil em alumínio e o seu interior é preenchido com poliestireno de alta densidade.

Condições impostas (Figura 3.4):

- Topos do estore adiabáticos
- Face frontal do estore com coeficiente de transferência de calor de  $15 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]}$ , temperatura do ar exterior  $38 \text{ [}^\circ\text{C]}$  e um fluxo de calor radiativo de  $630 \text{ [W/m}^2\text{]}$
- Face posterior do estore com coeficiente de transferência de calor de  $5 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]}$ , temperatura do ar entre o envidraçado e o estore  $25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Existe conservação de calor entre o alumínio e o poliestireno. O maior fluxo de calor ocorre no sentido horizontal, desprezando-se o fluxo ascendente.

Nesta fase resolvem-se todas as equações dos modos de transferência de calor.

$$q_x^n = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Condução})$$

$$q^n = h(T_\infty - T_s) \quad (\text{Convecção})$$

No pré-processamento foi imposto um valor de resíduo igual a  $1 \times 10^{-6}$  para que o processo iterativo possa convergir. O número máximo de iterações é 500 e o número mínimo é 5. Todas as simulações convergiram.

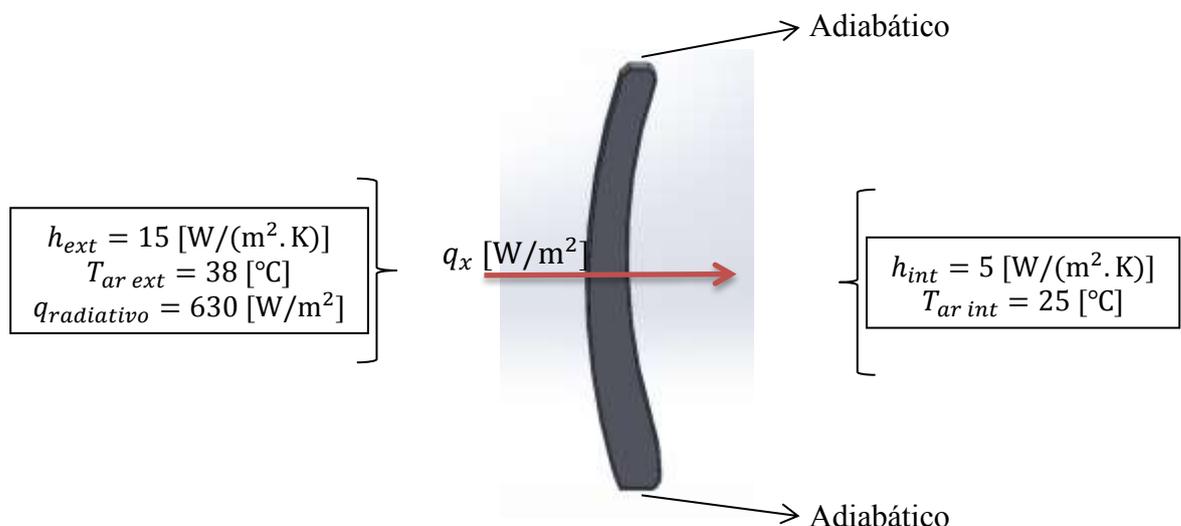


Figura 3.4 – Condições de fronteira impostas.

### **3.4. Obtenção dos resultados**

Os resultados podem ser analisados com base numa escala de cores ou exportar os resultados para Excel. Os resultados a obter são as temperaturas que atinge as várias faces do estore e o seu interior.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Neste capítulo apresentam-se os resultados da simulação numérica dos diferentes ensaios realizados. Realizaram-se 6 ensaios com diferentes características para estudar o comportamento térmico da lâmina de estore, nomeadamente, o seu comportamento atual e o comportamento após terem sido implementadas soluções para melhorar o desempenho energético.

### 4.1. Lâmina Simples

O primeiro ensaio refere-se a uma só lâmina de estore de alumínio, com condições impostas definidas na secção 3.3.

A Figura 4.1 representa os resultados e a variação da temperatura na lâmina de estore.

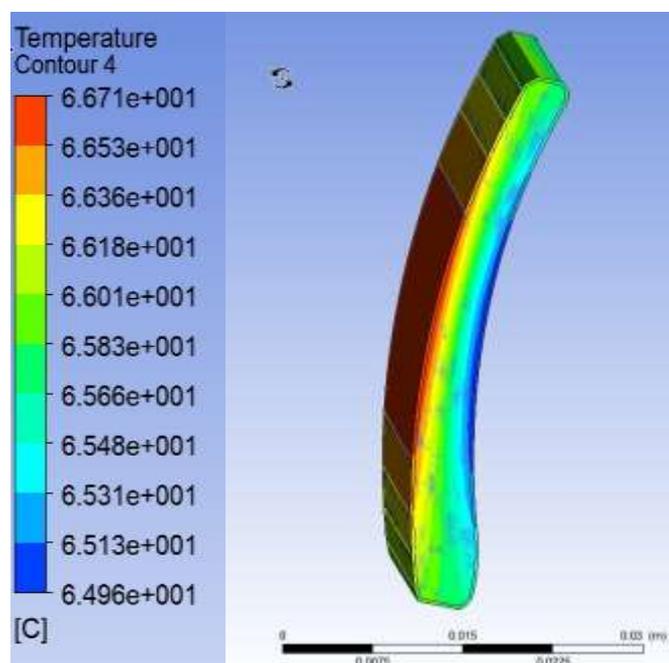


Figura 4.1 – Variação da temperatura numa lâmina simples.

A face exposta ao exterior apresenta as temperaturas mais elevadas, visto que é nessa mesma face que incide o fluxo de calor. Como o alumínio é um material com uma elevada condutividade térmica, o calor é transmitido pela peça, o que provoca um aquecimento em todo o perfil de alumínio. A face exposta às condições interiores apresenta temperaturas mais baixas. O núcleo da lâmina em poliestireno não consegue funcionar como isolamento, apesar de ser um material com baixa condutividade térmica. O sentido de maior fluxo ocorre de fora para dentro, direção horizontal.

Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores das temperaturas obtidas.

$T_{\text{face.exterior}}$	66,7 [°C]
$T_{\text{face.interior}}$	64,9 [°C]
$\Delta T$	1,8 [°C]

Tabela 4.1 – Temperaturas obtidas para uma lâmina simples.

## 4.2. Estore com múltiplas lâminas

Neste ensaio, utilizou-se um estore composto por 5 lâminas, mantendo-se as mesmas condições do ensaio anterior.

Os resultados (Figura B.1) são semelhantes aos obtidos anteriormente. O estore sendo composto por várias lâminas mantém o mesmo desempenho que uma lâmina única. Os valores de temperatura obtidos foram ligeiramente inferiores, no entanto, o valor do gradiente de temperatura manteve-se. A Tabela 4.2 apresenta as temperaturas obtidas.

$T_{\text{face.exterior}}$	66,5 [°C]
$T_{\text{face.interior}}$	64,7 [°C]
$\Delta T$	1,8 [°C]

Tabela 4.2 – Temperaturas obtidas para um estore formado por 5 lâminas.

Resultados semelhantes se verificam para um estore composto por 3 lâminas. As temperaturas variam ligeiramente, mas o gradiente térmico mantém-se igual. A Tabela 4.3 apresenta as temperaturas obtidas para 3 lâminas.

$T_{\text{face.exterior}}$	66,6 [°C]
$T_{\text{face.interior}}$	64,8 [°C]
$\Delta T$	1,8 [°C]

Tabela 4.3 – Temperaturas obtidas para um estore formado por 3 lâminas.

### 4.3. Estore com corte térmico

#### 4.3.1. Corte térmico nos topos da lâmina

O ensaio decorreu com uma lâmina de estore onde foram implementados dois cortes térmicos em cada um dos topos das lâminas (Figura 4.2). O corte térmico implementado é de um material com condutividade térmica muito baixa. Implementou-se uma secção de poliamida 6.6, material vulgarmente utilizado para corte térmico de janelas e portas.

As características mecânicas da poliamida 6.6 estão explicitas na Tabela 4.4.

Característica	Valor
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	1,14
Capacidade calorífica [J/kg. K]	0,0017
Condutividade térmica [W/m. K]	0,23
Expansão térmica [K <sup>-1</sup> ]	0,00006

Tabela 4.4 – Características termofísicas da Poliamida 6.6.

A introdução desta alteração na lâmina de estore, pretende reduzir a transferência de calor pelo alumínio entre a face exterior e interior. Desta forma, todo o calor transferido para o interior passa pelo núcleo de poliestireno.

Os resultados foram bastante satisfatórios, conseguindo obter uma diminuição bastante significativa da temperatura da face interior da lâmina (Figura 4.3)

Na Tabela 4.5 apresentam-se os resultados:

$T_{\text{face exterior}}$	68,7 [°C]
$T_{\text{face interior}}$	45,0 [°C]
$\Delta T$	23,7 [°C]

Tabela 4.5 – Temperaturas obtidas para um estore com corte térmico.

As alterações introduzidas na lâmina de estore permitiram diminuir a temperatura da face interior em cerca de 19,9[°C] relativamente a uma lâmina de estore *standard*. Comparativamente à lâmina exterior a variação de temperatura é de 23,7[°C]. No entanto, a temperatura da face exterior da lâmina aumentou relativamente a outras simulações realizadas.

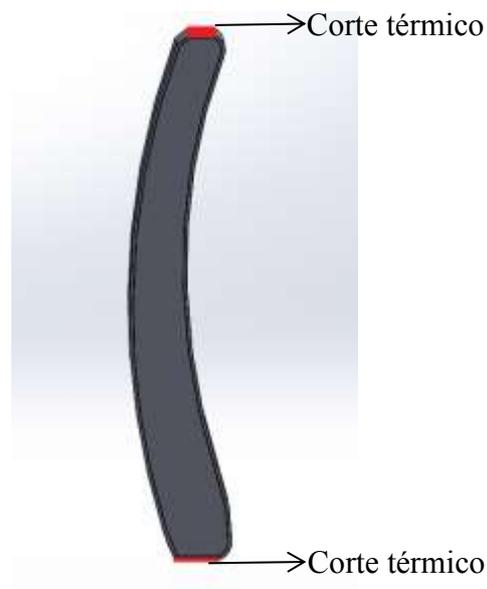


Figura 4.2 – Lâmina de estore com corte térmico.

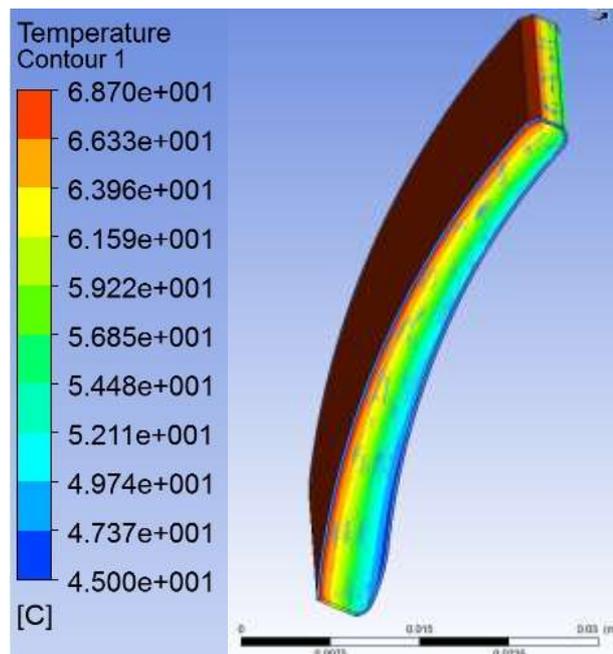


Figura 4.3 – Variação da temperatura no estore com corte térmico.

Foi ainda efetuado um ensaio onde apenas foi feito um único corte térmico na face exterior do estore, cujo o resultado foi pouco significativo. O ensaio encontra-se descrito no anexo B.

#### 4.4. Alteração da estrutura de alumínio

A peça de base (*standard*) foi alterada introduzindo na face interior da lâmina de alumínio furos com secção  $8,4 \times 1,5$  [mm]. Os furos foram introduzidos somente na estrutura de alumínio. Os furos situam-se nas extremidades horizontais da face interior, dispostos em duas filas, de forma alternada. Os furos da mesma fila distanciam entre si  $1,6$  [mm]. As duas filas distanciam-se de  $0,6$  [mm]. A Figura 4.4 representa a alteração introduzida.

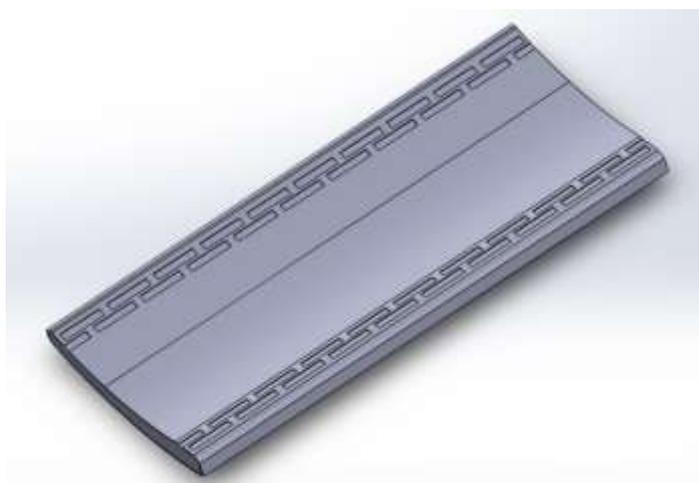


Figura 4.4 – Lâmina de estore com alteração na estrutura de alumínio.

A introdução dos furos teve como pressuposto a diminuição da área de transferência de calor. Ao diminuir a área de transferência de calor, diminuía-se o fluxo de calor transferido. Os furos foram introduzidos na face interior por motivos estéticos e de forma a garantir resistência da estrutura.

Os resultados (Figura 4.5) permitem concluir que ocorre uma diminuição da quantidade de calor transferido pela estrutura de alumínio entre as duas faces (exterior e interior), funcionando como uma espécie de obstáculo. No entanto, a transferência de calor ocorrida pelo interior do núcleo de poliestireno mantém-se igual, o que origina o aumento da temperatura na face.

A Tabela 4.6 apresenta os valores das temperaturas obtidas

$T_{\text{face exterior}}$	64,3 [°C]
$T_{\text{face interior}}$	60,5 [°C]
$\Delta T$	3,8 [°C]

Tabela 4.6 – Temperaturas obtidas para um estore com alteração na estrutura de alumínio.

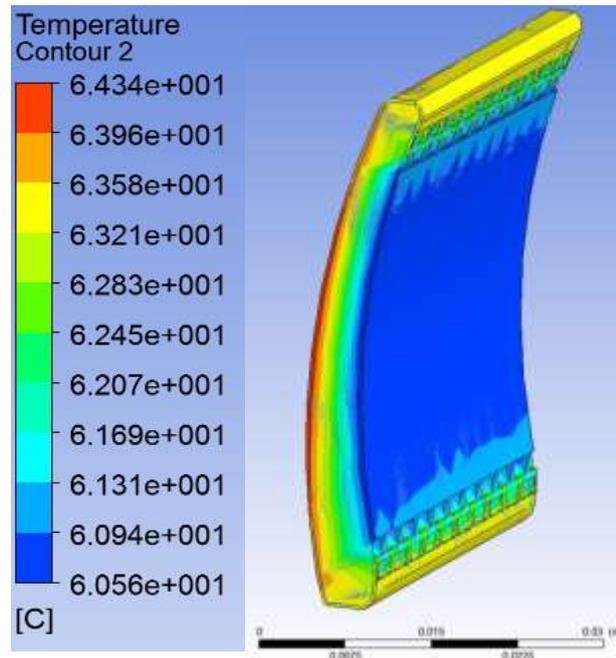


Figura 4.5 – Variação da temperatura na lâmina de estore com alteração da estrutura de alumínio.

Relativamente à peça de base, as alterações introduzidas permitem obter temperaturas ligeiramente mais baixas. Verificou-se uma diminuição de quase 4,4 [°C] na face interior, e uma variação de temperatura entre a face exterior e interior de 3,8 [°C] (superior ao obtido com uma peça de base).

### 4.5. Comparação de resultados

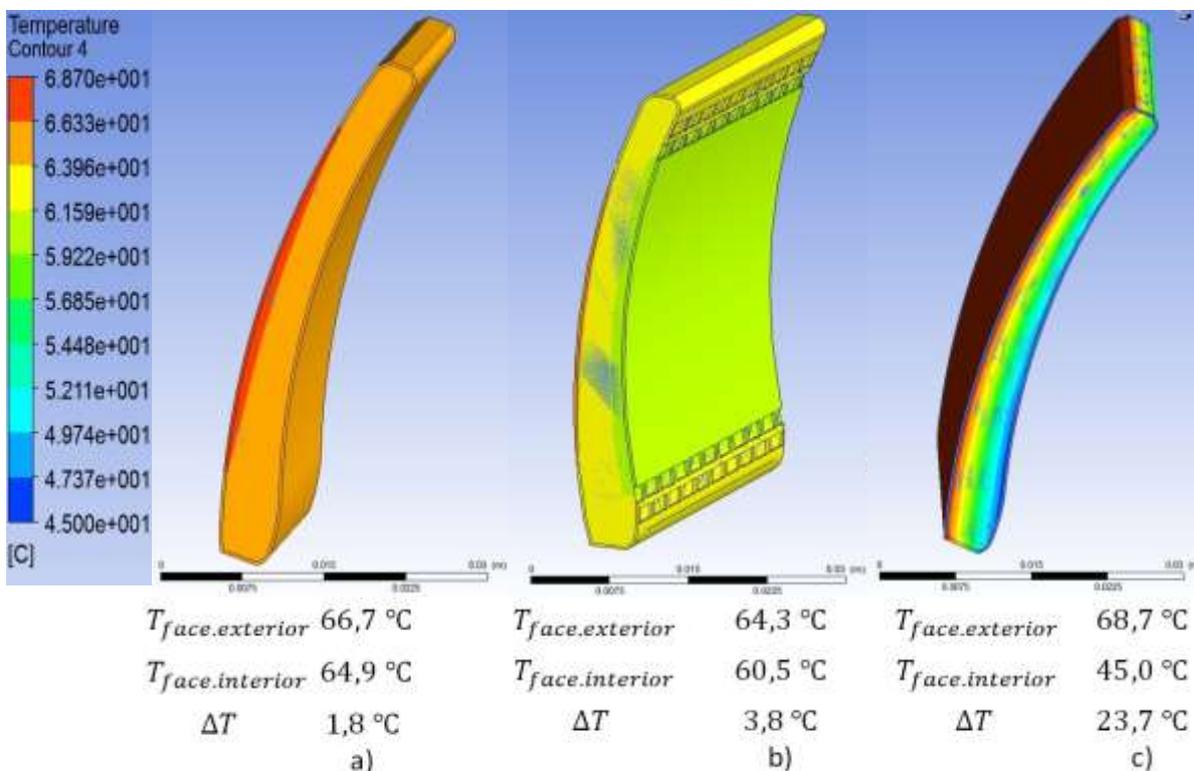


Figura 4.6 – Comparação dos resultados obtidos por simulação numérica adaptados a uma escala comum a) lâmina simples; b) lâmina com furos no perfil de alumínio; c) lâmina com corte térmico nos topos.

A Figura 4.6 permite comparar os resultados para as diferentes configurações da lâmina de estore. Com a imposição de uma escala de cores igual para todos os resultados, consegue-se concluir que a variação de temperatura numa lâmina simples é quase nula (Figura 4.6a). No caso da lâmina onde foram introduzidos furos no perfil de alumínio (Figura 4.6b) existe uma ligeira diminuição da temperatura a montante dos locais do furo com uma diminuição mais acentuada a jusante. No entanto a temperatura máxima e mínima é bastante próxima. Na lâmina com corte térmico nos topos (Figura 4.6c) ocorre uma elevada variação de temperatura originado pela introdução do corte térmico. A variação de temperatura obtida é bastante elevada ( $\Delta T = 23,7[^\circ\text{C}]$ ).

## 5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

### 5.1. Enquadramento

O comportamento térmico de estores de alumínio tem vindo a ser analisado com base em processos de simulação numérica. Com vista a uma validação dos resultados obtidos, de forma numérica, procedeu-se à realização experimental.

A parte experimental tem como objetivo estudar o comportamento térmico dos estores de alumínio de forma a determinar:

- A influência da cor das lâminas no comportamento térmico
- As temperaturas dos estores em dias típicos de Verão
- O fluxo de calor que atravessa as lâminas de alumínio
- As temperaturas que os envidraçados estão submetidos quando protegidos por estes dispositivos.

### 5.2. Instalação experimental

A instalação experimental consistiu em 2 caixotes (96x93,5x15,5[cm]) constituídos na face frontal por lâminas de estore (1 caixote com lâminas de cor verde o outro com lâminas de cor branca) e nas restantes faces, placas *Wallmate* garantindo o isolamento térmico. Desta forma, a instalação tenta representar o espaço delimitado entre o estore e o envidraçado de uma janela típica.

O estore de cada caixa foi instrumentado com 1 termopar na parte exterior, 3 termopares na parte interior e 1 medidor de fluxo na parte interior. A parte de trás foi instrumentada com 1 termopar no interior da placa *Wallmate* (Figura C.2 e C.3).

Os termopares utilizados são do tipo-K (cromel-alumel). Os termopares foram obtidos através da soldadura entre duas pontas dos dois fios. O funcionamento deste tipo de termopares baseia-se no Princípio de Peltier. Posteriormente foram calibrados.

Os termopares foram fixados com fita isoladora. O termopar da parte exterior foi posteriormente coberto com fita de alumínio para evitar o efeito da radiação solar na obtenção da temperatura.

O medidor de fluxo (HFS-3) foi fixo com verniz.

Os sinais dos medidores de fluxo e dos termopares são encaminhados para 2 Picos TC-08 que estão ligados por USB a um PC. O *software* Picolog permite adquirir e tratar os valores.

Cada termopar e cada medidor de fluxo é configurado num só canal. A configuração dos termopares é feita selecionando o tipo de termopar (tipo-k) e inserindo a reta de calibração. Assim foram configurados 8 canais para os 8 termopares. Os medidores de fluxo são configurados adicionando o parâmetro de sensibilidade.

Utilizou-se um solarímetro para medir o fluxo de radiação solar durante o período de ensaio (Figura C.4).

### 5.3. Modelo e nomenclatura

De uma forma genérica, os termopares e medidor de fluxo foram instalados nos modelos experimentais segundo a Figura 5.1.

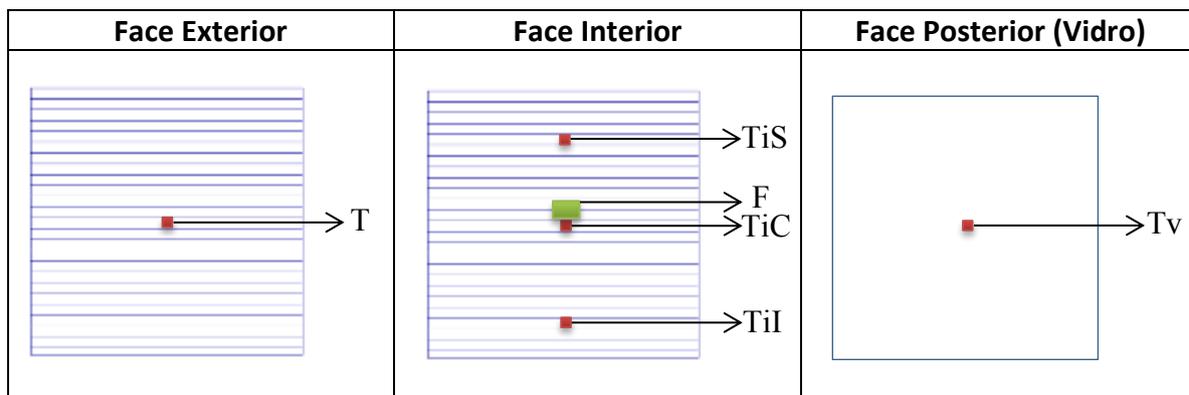


Figura 5.1 – Disposição da instrumentação no modelo experimental.

A nomenclatura utilizada visa uma fácil e intuitiva interpretação dos resultados. A Tabela 5.1 resume a distribuição da instrumentação nos dois modelos utilizados.

Nomenclatura	Definição	Estore verde	Estore branco
Te	Termopar exterior	T4	T8
TiS	Termopar interior superior	T5	T6
TiC	Termopar interior centro	T7	T10
TiI	Termopar interior inferior	T1	T2
Tv	Termopar vidro	T3	T9
F	Medidor de fluxo	F1	F2

Tabela 5.1 – Nomenclatura utilizada na validação experimental.

## 5.4. Ensaios experimentais

O primeiro ensaio decorreu no dia 18 de Julho. Teve início por volta das 9:50 e terminou às 15:50. O céu estava limpo. Às 12 horas foram isoladas as tampas de estore com placas de *Wallmate*.

Os caixotes foram colocados lado a lado no terraço do LAI, orientados para sul com o solarímetro à sua frente (Figura C.5). Foram realizados três ensaios em três dias diferentes.

Obtiveram-se valores negativos do fluxo de calor no primeiro ensaio, ou seja, a transferência de calor estava a dar-se do interior para o exterior do caixote. Assim, no segundo ensaio, para evitar que a temperatura no interior do caixote fosse superior à temperatura envolvente, foram feitos 5 furos na parte superior e 5 furos na parte inferior da placa *Wallmate* para permitir uma renovação do ar no interior do caixote. Desta forma, reduziu-se a carga térmica no seu interior (Figura C.6).

O segundo ensaio decorreu no dia 19 de Julho. Teve início por volta das 11:22 e terminou às 16:56. O céu esteve ligeiramente nublado durante a manhã, o que originou que o segundo ensaio tivesse início mais tarde.

O terceiro ensaio decorreu no dia 23 de Julho. Teve um início mais tardio devido à presença de neblina matinal. Após a melhoria das condições ambientais, o ensaio iniciou-se às 10:45 e terminou às 16:30.

## 5.5. Resultados e discussão

Os resultados apresentados remetem ao terceiro dia de ensaio. Tal opção deve-se ao facto de no primeiro dia de ensaio ser introduzido uma alteração no modelo a meio da recolha de resultados. Por exclusão de partes, optou-se pelo terceiro dia em vez do segundo dia de ensaio devido aos resultados serem bastantes semelhantes e devido a um aumento da percepção prática do ensaio.

Os resultados foram obtidos entre as 10:45 e as 16:30 do dia 23 de Julho de 2013 conforme descrito na secção 5.4. Os dados referentes à radiação solar verificada no dia do ensaio encontram-se expostos graficamente no anexo C.

### 5.5.1. Estore Verde – Temperatura e fluxo

Nesta secção apresentam-se as temperaturas registadas no estore verde durante o tempo de ensaio, bem como o fluxo de calor registado nas lâminas de estore.

No geral, as temperaturas registadas nos diferentes pontos têm um comportamento semelhante. Numa primeira fase entre as 10:45 e as 13:45 ocorre um aumento constante da temperatura e o valor das temperaturas nos diferentes pontos é bastante semelhante. A temperatura registada inicialmente no ponto do “envidraçado” é semelhante à temperatura do estore, devido à radiação solar estar a incidir diretamente da parte de trás do modelo (correspondente ao “envidraçado”); devido ao movimento rotacional da Terra, a radiação passa a incidir diretamente no estore, o que provoca um registo de temperatura no “envidraçado” diferente relativamente às temperaturas obtidas no estore.

Numa segunda fase entre as 13:45 e as 16:45 os valores das temperaturas registadas nos diferentes pontos são sensivelmente constantes ao longo do tempo, registando-se alguns picos e ligeiras variações da temperatura devido ao efeito de convecção provocado pelo vento que origina um ligeiro arrefecimento do estore e à presença de pequenos períodos de nebulosidade.

Durante todo o ensaio as temperaturas registadas nos diferentes pontos do estore são semelhantes e têm um comportamento térmico igual, independentemente do local (exterior ou interior). A temperatura máxima na lâmina de estore foi de 54[°C]. A Figura 5.2 apresenta o valor das temperaturas e a evolução das mesmas ao longo do ensaio nos diferentes pontos do estore.

As temperaturas registadas no período de ensaio na face interior e exterior da lâmina de estore de uma forma geral são iguais, havendo uma ligeira diferença que se mantém constante durante todo o ensaio. A temperatura ao longo do dia tanto na parte interior como exterior da lâmina de estore varia da mesma forma.

O Figura 5.3 apresenta a variação da temperatura ao longo do ensaio na parte interior e exterior da lâmina de estore.

O fluxo de calor que atravessa a lâmina de estore aumenta, atingindo o valor máximo por volta das 14:15 (Figura 5.4). O fluxo de calor evolui de forma semelhante comparativamente à evolução da temperatura na lâmina. Registou-se um valor máximo de fluxo de calor na ordem dos 67[W/m<sup>2</sup>].

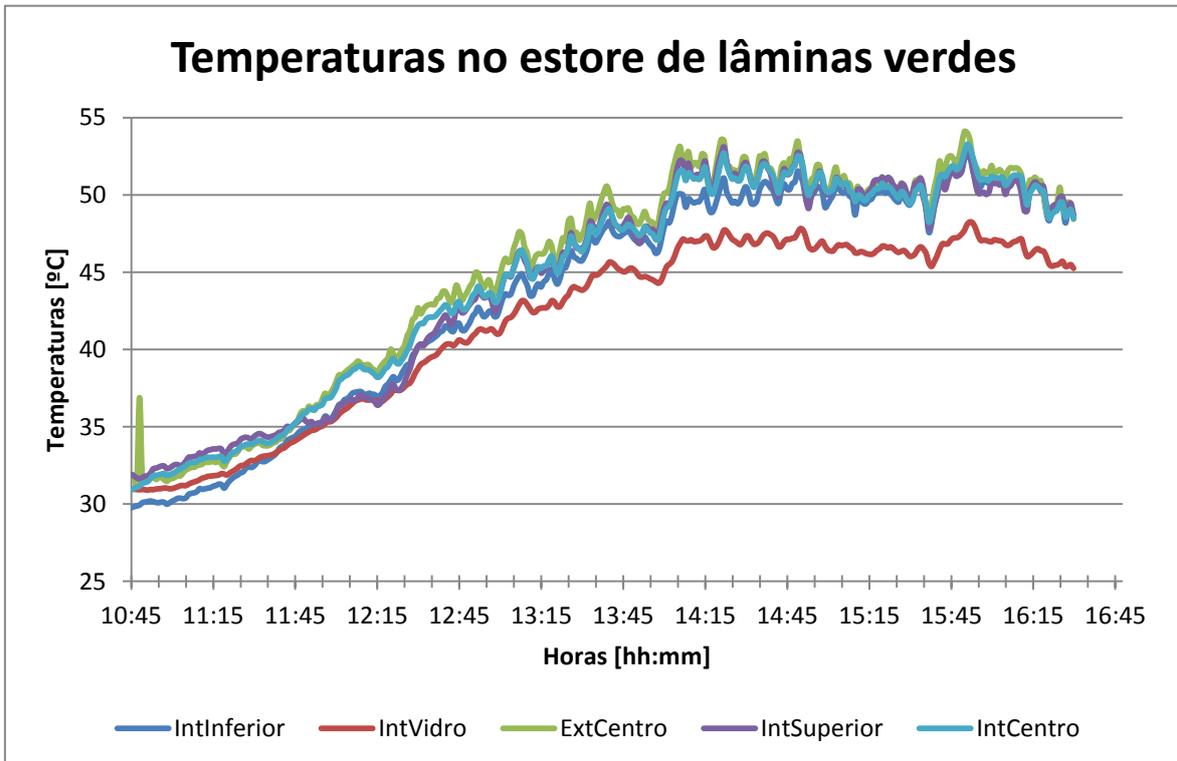


Figura 5.2 - Evolução da temperatura nos diferentes pontos do estore verde durante o ensaio.

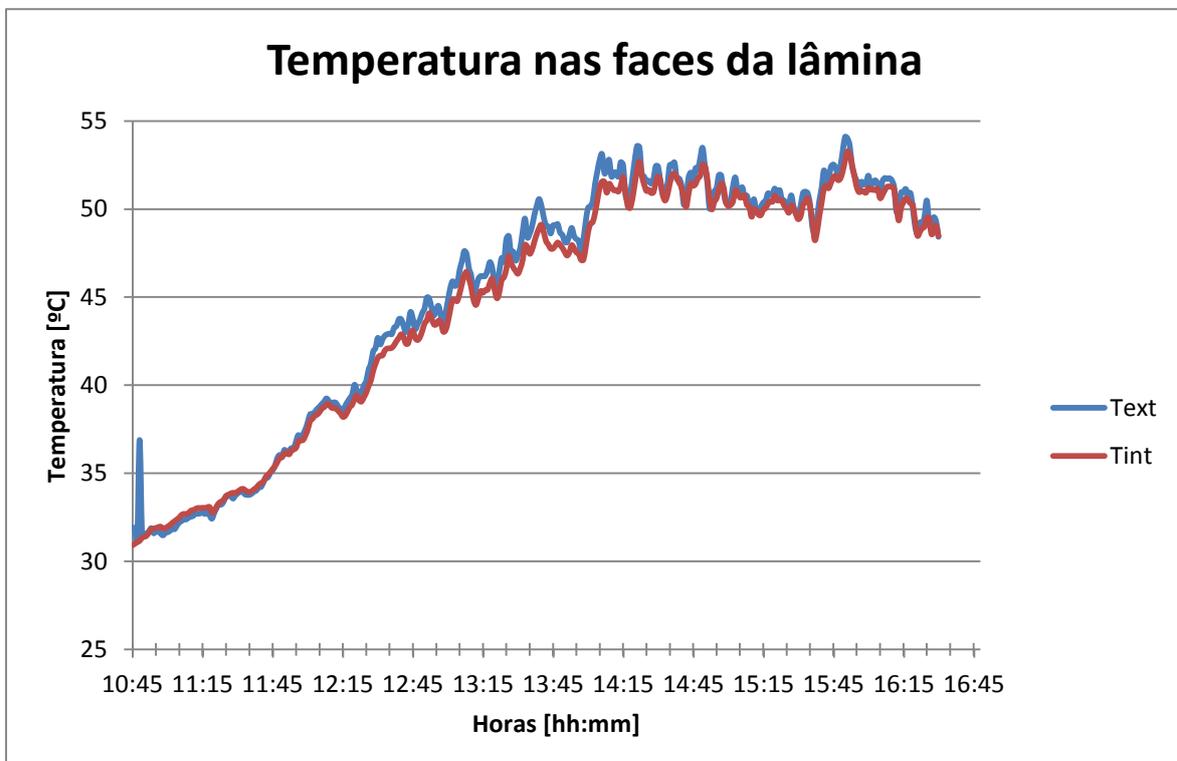


Figura 5.3 – Evolução da temperatura na face exterior e interior de uma lâmina de estore.

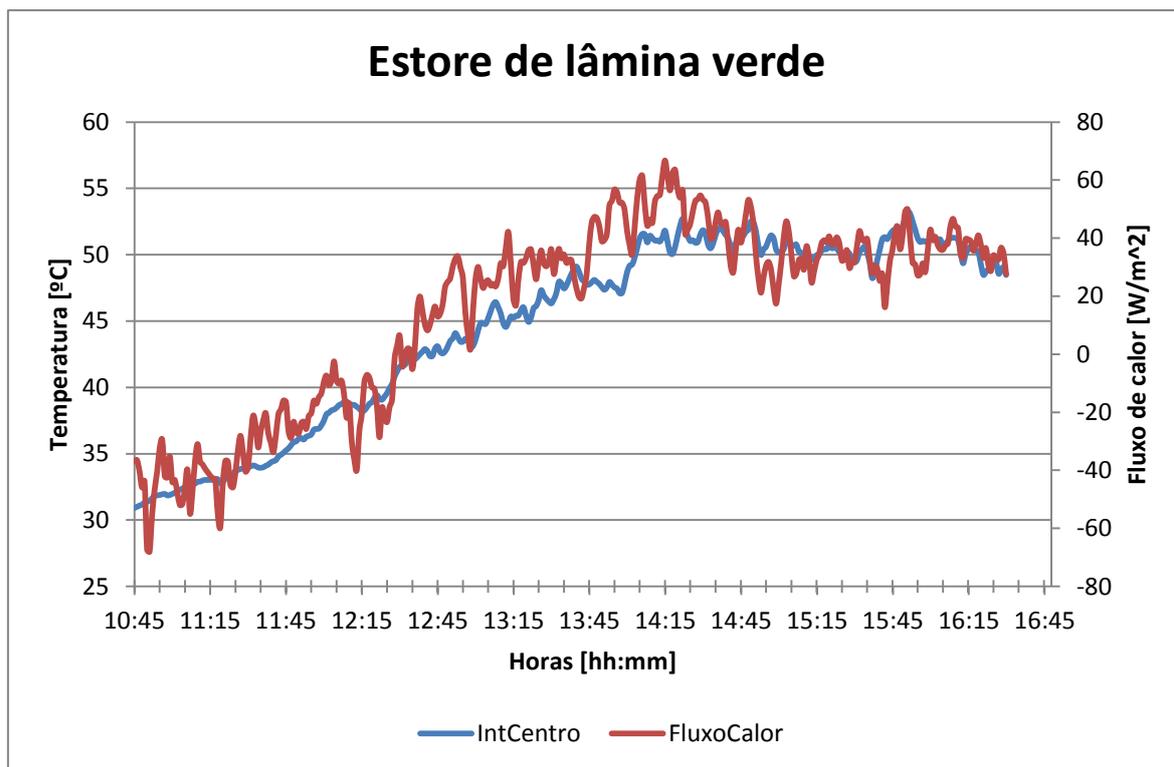


Figura 5.4 – Evolução da temperatura e d fluxo do calor durante o ensaio.

### 5.5.2. Estore branco – Temperatura e fluxo

Nesta secção apresentam-se as temperaturas registadas no estore branco durante o tempo de ensaio, bem como o fluxo de calor registado nas lâminas de estore.

As temperaturas registadas no estore tem um comportamento semelhante ao descrito na secção 5.5.1. Comparativamente ao estore verde, as temperaturas no estore branco são inferiores. A temperatura máxima na lâmina de estore foi de 42,5[°C]. A Figura 5.5 apresenta o valor das temperaturas e a evolução das mesmas ao longo do ensaio nos diferentes pontos do estore.

De igual forma as temperaturas registadas na face interior e exterior da lâmina de estore é semelhante, existindo uma ligeira diferente, sendo a temperatura mais elevada a temperatura na face exterior. A temperatura ao longo do dia tanto na parte interior como exterior da lâmina de estore varia da mesma forma. A Figura 5.6 apresenta a variação da temperatura ao longo do ensaio na parte interior e exterior da lâmina de estore.

O fluxo de calor que atravessa a lâmina de estore aumenta, atingindo o valor máximo por volta das 14:15. O fluxo de calor evolui de forma semelhante

comparativamente à evolução da temperatura na lâmina. Registou-se um valor máximo de fluxo de calor na ordem dos 34 [W/m<sup>2</sup>].

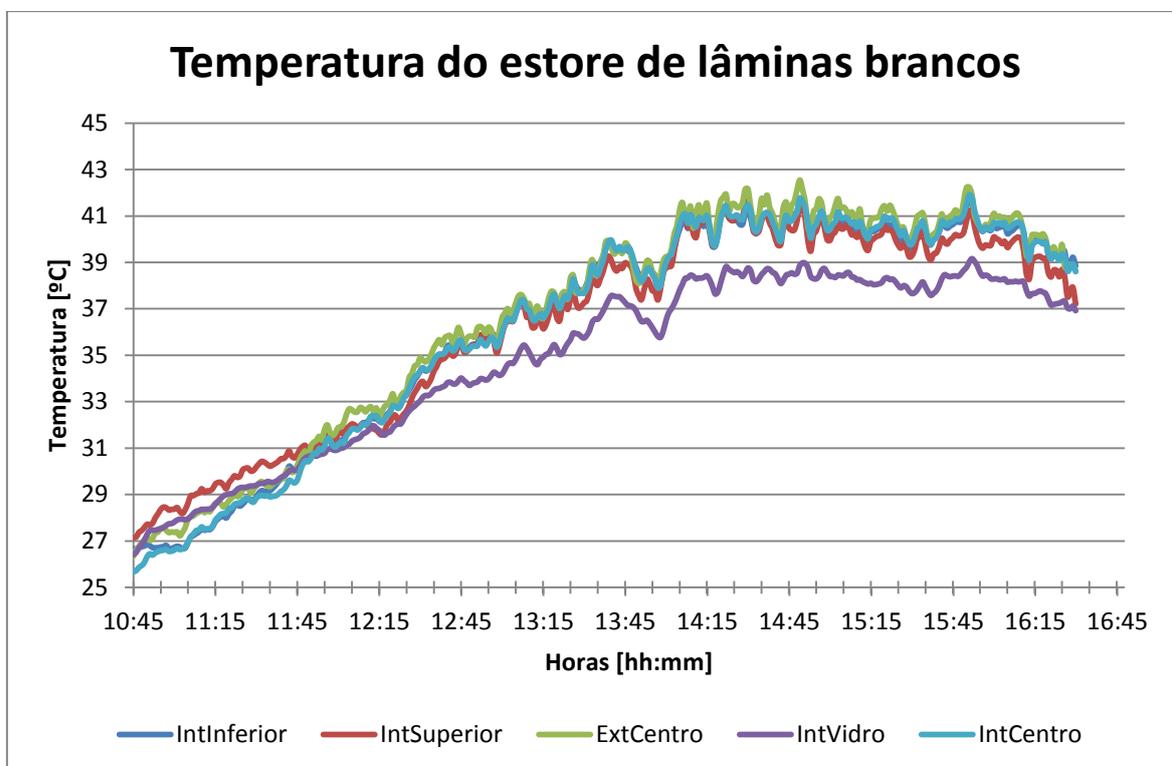


Figura 5.5 – Evolução da temperatura nos diferentes pontos do estore branco durante o ensaio

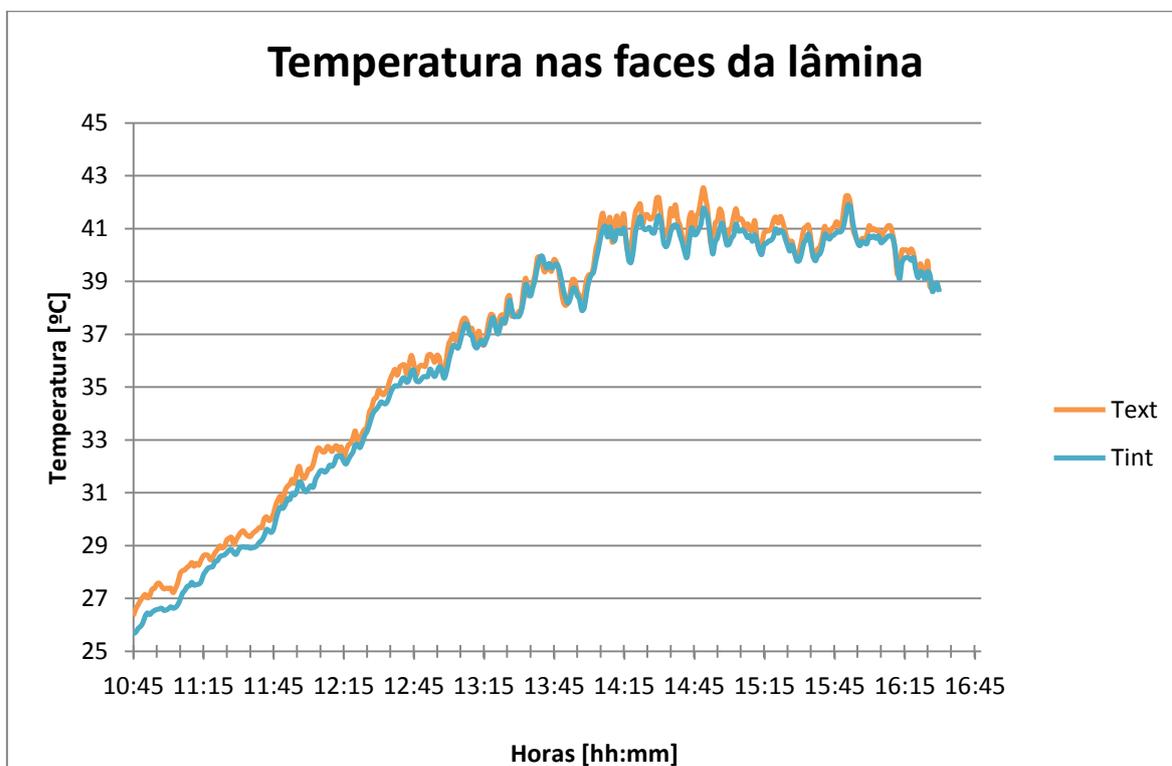


Figura 5.6 – Evolução da temperatura na face exterior e interior de uma lâmina de estore.

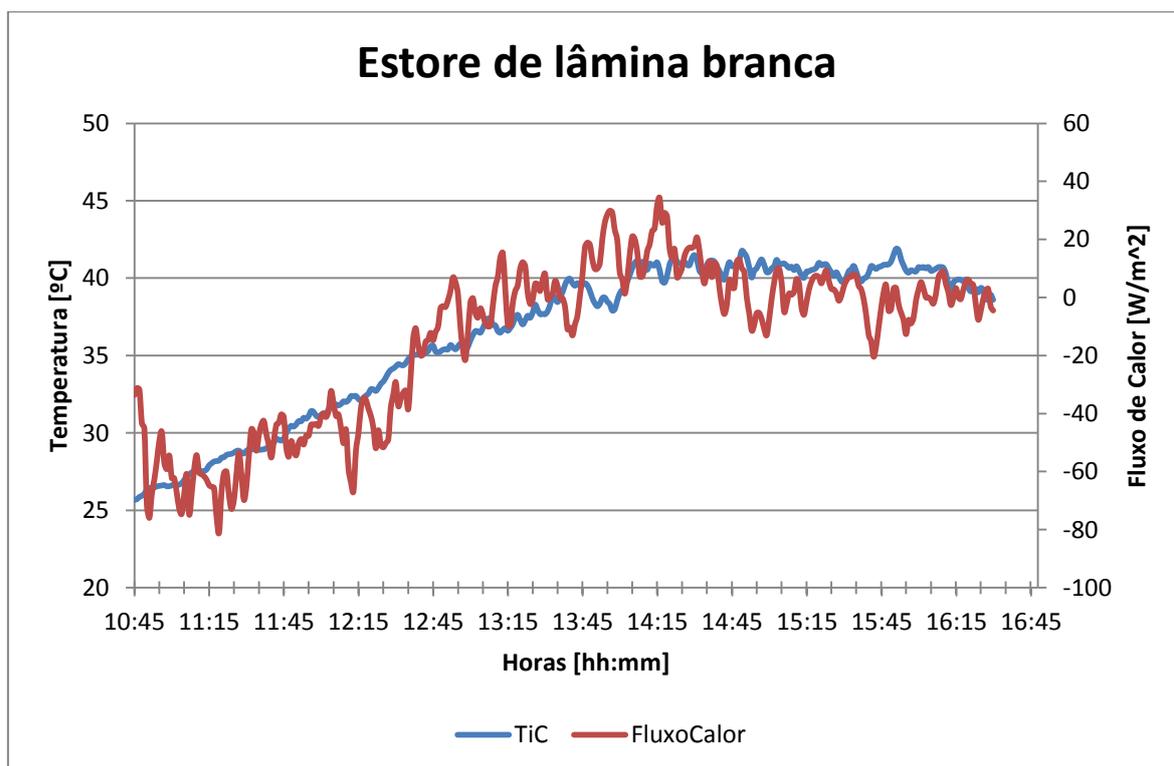


Figura 5.7 – Evolução da temperatura e do fluxo do calor durante o ensaio.

### 5.5.3. Estore verde e estore branco

Nesta seção compara-se os resultados obtidos entre o estore de lâminas verdes e o estore de lâminas brancas.

As temperaturas atingidas no estore verde são muito superiores aos valores atingidos pelo estore branco. A temperatura máxima no estore verde foi de 64[°C] contra os 42,5[°C] registados no estore branco. A amplitude térmica entre os dois estores vai aumentando entre as 10:45 e as 14:15; entre as 14:15 e o final do ensaio o valor de amplitude mantém-se constante.

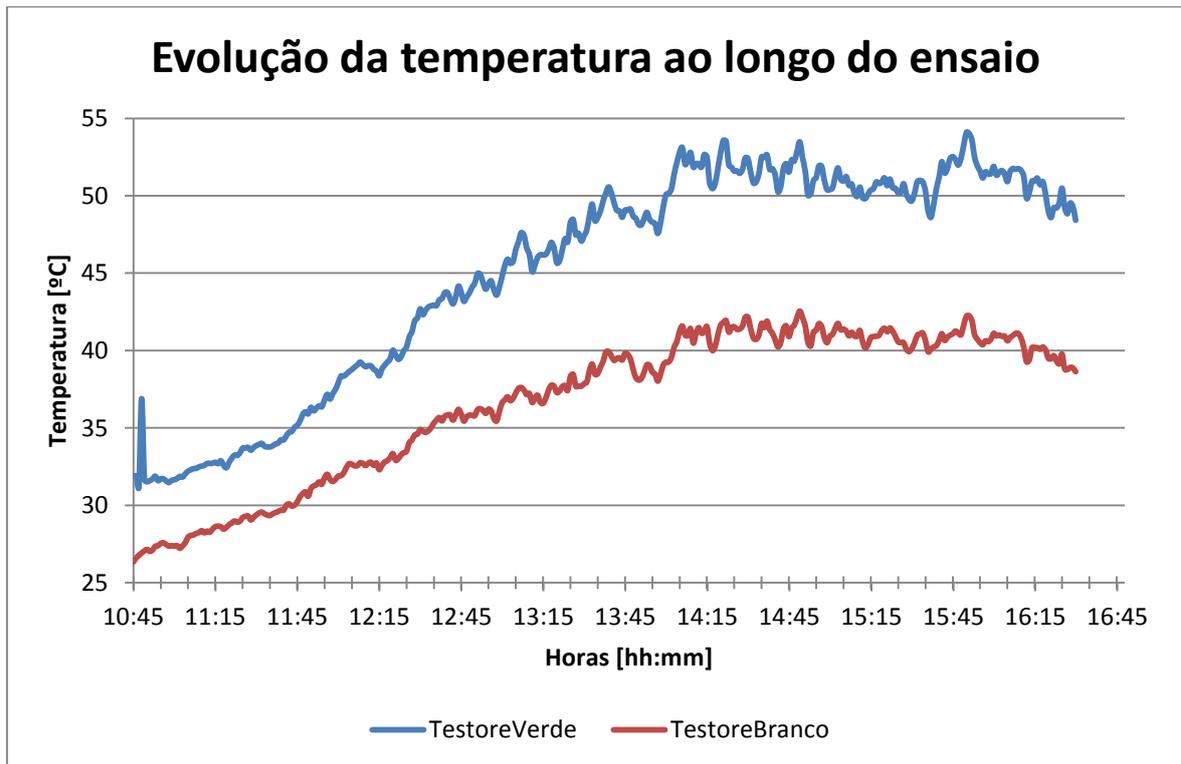


Figura 5.8 – Comparação das temperaturas do estore verde e do estore branco.

## 6. CONCLUSÕES

Na primeira secção do capítulo 4 foi realizada uma abordagem numérica ao modelo para estudar o comportamento térmico de uma lâmina de estore que vulgarmente se encontra disponível no mercado. A simulação numérica permitiu concluir que o núcleo de poliestireno expandido que constitui o núcleo do estore não funciona como isolante térmico. O perfil em alumínio é contínuo, o que possibilita a transferência de calor da face exposta ao ambiente para a face posterior do estore. Assim sendo, as temperaturas em toda a lâmina de estore são muito próximas, existindo só um ligeiro gradiente entre o ponto onde a temperatura é máxima e o ponto onde a temperatura é mínima.

Na terceira secção do mesmo capítulo, a introdução de um corte térmico nos topos superior e inferior da lâmina, permitiu obter resultados bastante satisfatórios a nível do desempenho energético. O fluxo de calor deixa de se processar pelo perfil de alumínio, obrigando o fluxo a passar pelo interior constituído por poliestireno expandido. Só desta forma, o material que constitui o núcleo da lâmina funciona verdadeiramente como isolante térmico.

Na quarta secção do capítulo 4 a introdução de furos na estrutura de alumínio melhorou ligeiramente o desempenho térmico, visto que houve uma redução da área de transferência de calor por condução.

No entanto, a opção que oferece melhor desempenho energético é a introdução do corte térmico na lâmina de estore, o que leva a concluir que a quantidade de calor transferido por condução numa lâmina *standard* processa-se na sua grande maioria pelo perfil contínuo de alumínio.

O capítulo 5 pretendeu-se validar de forma experimental os resultados obtidos por simulação numérica para uma lâmina *standard*, assim como a influência da sua cor. Os resultados obtidos experimentalmente permitiram obter as mesmas conclusões retiradas da simulação numérica. As temperaturas alcançadas em toda a lâmina são muito próximas, existindo um pequeno gradiente de temperatura entre a face exposta ao ambiente e a face posterior. A cor da lâmina é um fator que influencia a gama de temperaturas que se verificam nas lâminas. Lâminas de cor escura (ex. verde) atingem valores de temperaturas muito superiores a lâminas com cor clara (ex. branco).

Sugere-se, como trabalho futuro, o estudo da viabilidade económica no processo de produção de lâminas de estore com corte térmico e o estudo de mercado relativamente a este “novo” produto. Seria interessante estudar o desempenho térmico de um pequeno edifício com estores com corte térmico, para dessa forma, contabilizar a redução dos consumos energéticos na climatização.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Decreto-lei nº 80/2006 de 4 de Abril. “Diário da República nº67 – I Série”. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Lisboa
- [2] Jitka, M., Hasim, A., “Evaluation of optical and thermal properties of window glazing”. Issue 1, Volume 5, (2009), ISSN- 1790-5079
- [3] Oliveira, L.A. e Lopes, A.G. (2010), “Mecânica dos Fluidos” (3ªedição). ETEP – LIDEL
- [4] Camelo, S., Santos, C.P., Ramalho, À, Horta, C., Gonçalves, H., Maldonado, E., “Manual de apoio à aplicação do RCCTE”, (2005), INETI, ISBN-972
- [5] Instituto Nacional de Estatística (2010), “Inquérito ao consumo de energia no sector doméstico” acedido em 19 de Março de 2013, em: <http://www.ine.pt>
- [6] Amador, J., (2010), “Produção e consumo de energia em Portugal: Factos estilizados”, Banco de Portugal, Departamento de Estudos Económicos, acedido em 18 de Março de 2013
- [7] Rebelo, A.G.P.M. (2009), “Optimização e dimensionamento de vãos envidraçados”. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Aveiro (Portugal)
- [8] Gaspar, A.M.R (2012), Módulos (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII) de apoio à cadeira “Climatização e Refrigeração” do MIEM, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra (Portugal)
- [9] Quintela,D. (2011), “Energética do meio ambiente”, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra (Portugal)
- [10] Roriz, Luis (2007), “Climatização, Concepção, Instalação e Condução de Sistemas” (2ªedição). Edições Orion
- [11] Yunus A. Çengel, “Heat Transfer: a practical approach”, 3ª edição, WCB McGraw-Hill, 2006, ISBN: 007-125739-X.

## ANEXO A

Os gráficos presentes no anexo A dizem respeito à secção 1 (introdução).

Os dados relativos aos diferentes gráficos baseiam-se em dados da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) e do Instituto Nacional de Estatística (INE).

Na figura A.1 encontram-se dados sobre a dependência energética de Portugal entre 2000 e 2010. Até 2005 a taxa de dependência oscilava ligeiramente. Em 2005 a taxa de dependência energética disparou para um valor máximo dos últimos 5 anos. Após o ano de 2005 a tendência é a diminuição da dependência energética ao longo dos anos.

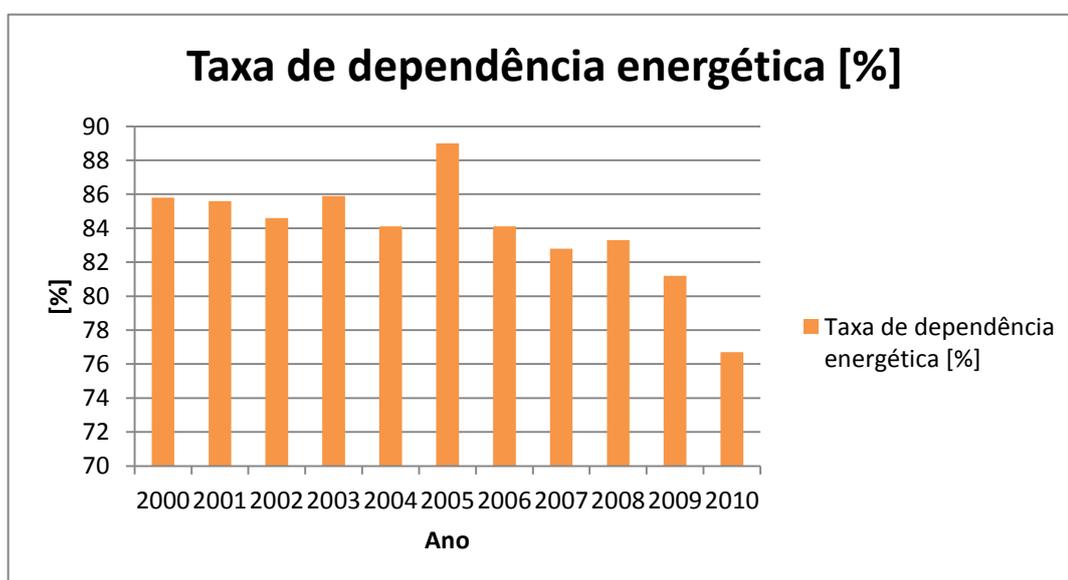


Figura A.1 – Desempenho energético de Portugal entre 2000 e 2010 (DGEG).

A figura A.2 representa a distribuição do consumo energético por setor no ano 2010. O setor em Portugal que consome mais energia é o setor dos transportes (37%) seguido do setor da indústria (29%). O setor doméstico é o terceiro mais consumidor de energia (17%).

A figura A.3 representa a distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de uso. Estes dados foram adquiridos com base no Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico (ICESD) relativo ao ano de 2010 realizado pelo INE.

O consumo de energia para climatização (9%) juntamente com o consumo energético para o aquecimento de águas sanitárias (31%) corresponde à maior porção das necessidades energéticas no alojamento.

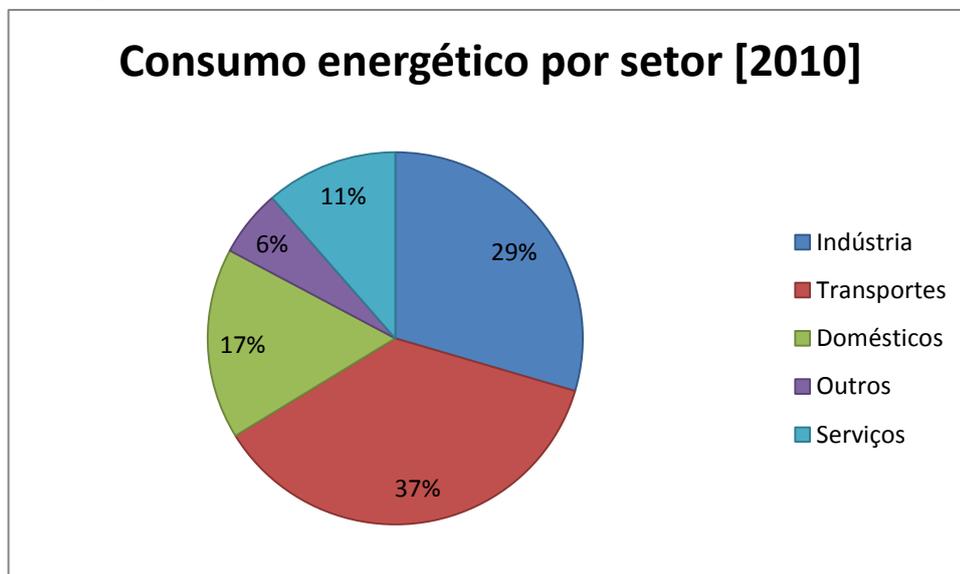


Figura A.2 – Distribuição do consumo energético por setor no ano 2010 (DGEG).

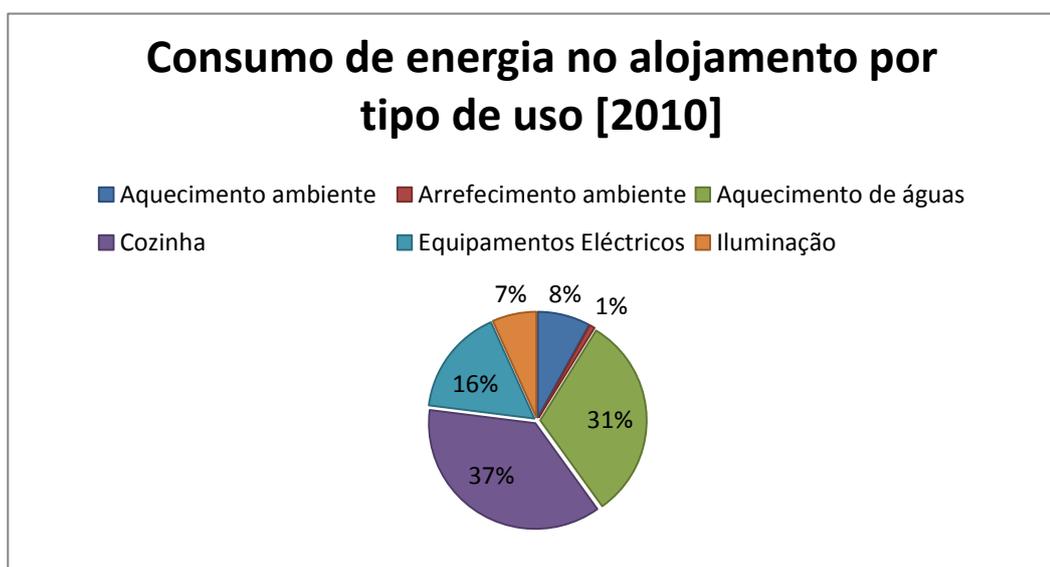


Figura A.3 – Distribuição do consumo de energia no alojamento por unidade de uso (ICESD-2010) INE.

## ANEXO B

Os dados apresentados no Anexo B referem-se aos resultados obtidos por simulação numérica.

A Figura B.1 apresenta os resultados obtidos para um estore formado por 5 lâminas simples. A Figura B.1 permite analisar a variação da temperatura ao longo da peça, identificando o sentido do fluxo térmico, temperaturas máximas e mínimas.

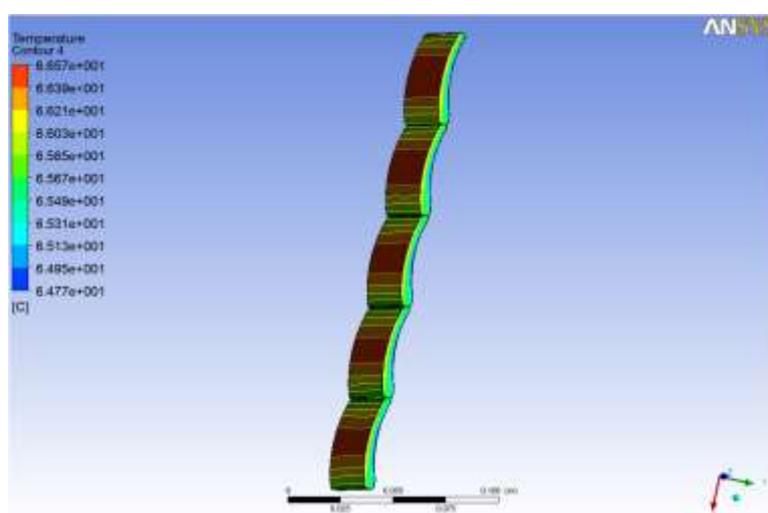


Figura B.1 – Variação da temperatura no estore formado por 5 lâminas simples.

Apresenta-se seguidamente o ensaio de uma lâmina de estore, na qual foi introduzida um corte térmico na face exterior do estore (Figura B.2). O material utilizado foi igualmente uma poliamida 6.6 com dimensões 0,3 [mm] de altura, 50 [mm] de comprimento e 0,27 [mm] de espessura.

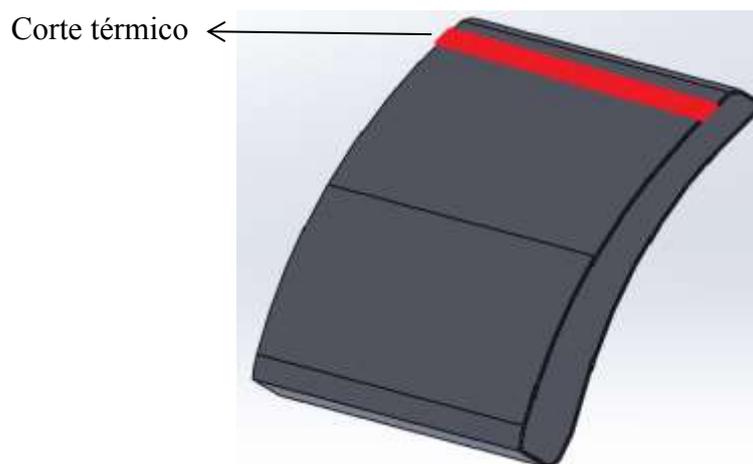


Figura B.2 – Estor com corte térmico na face exterior [0,3x50x0,27].

As temperaturas obtidas com a simulação estão explicitas na Tabela B.1

$T_{face.exterior}$	58,0 [°C]
$T_{face.interior}$	51,9 [°C]
$\Delta T$	6,1 [°C]

Tabela B.1 – Temperaturas obtidas para um estor com corte térmico.

A Figura B.3 permite analisar o comportamento térmico com a introdução do corte térmico.

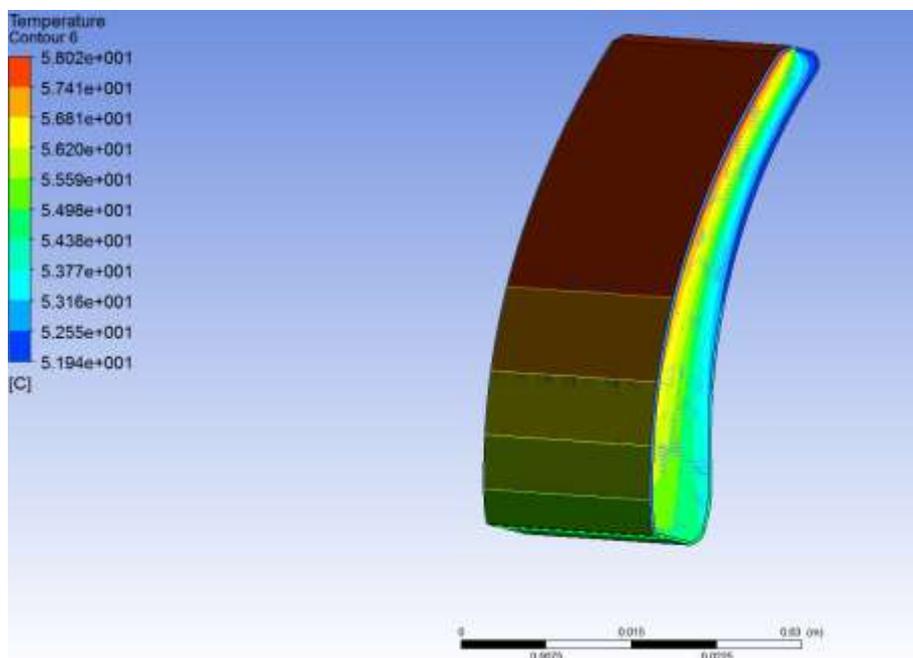


Figura B.3 – Variação da temperatura no estor com corte térmico.

A temperatura registada na da face interior é inferior às obtidas em simulações anteriores com lâminas de estor *standard*, conseguindo-se deste modo uma diminuição da temperatura em cerca de 6,1[°C].

Comparativamente ao ensaio anterior (com corte térmico) a temperatura interior obtida é superior e a temperatura da face exterior é inferior. Situação justificada pela introdução de uma só secção de corte térmico relativamente à simulação anterior em que foram introduzidas duas secções, uma em cada topo.

## ANEXO C

Os dados apresentados referem-se à parte experimental.

A figura C.1 representa a evolução do fluxo de calor radiativo no dia 23 de Julho de 2013. Os valores do fluxo foram registados por um solarímetro.

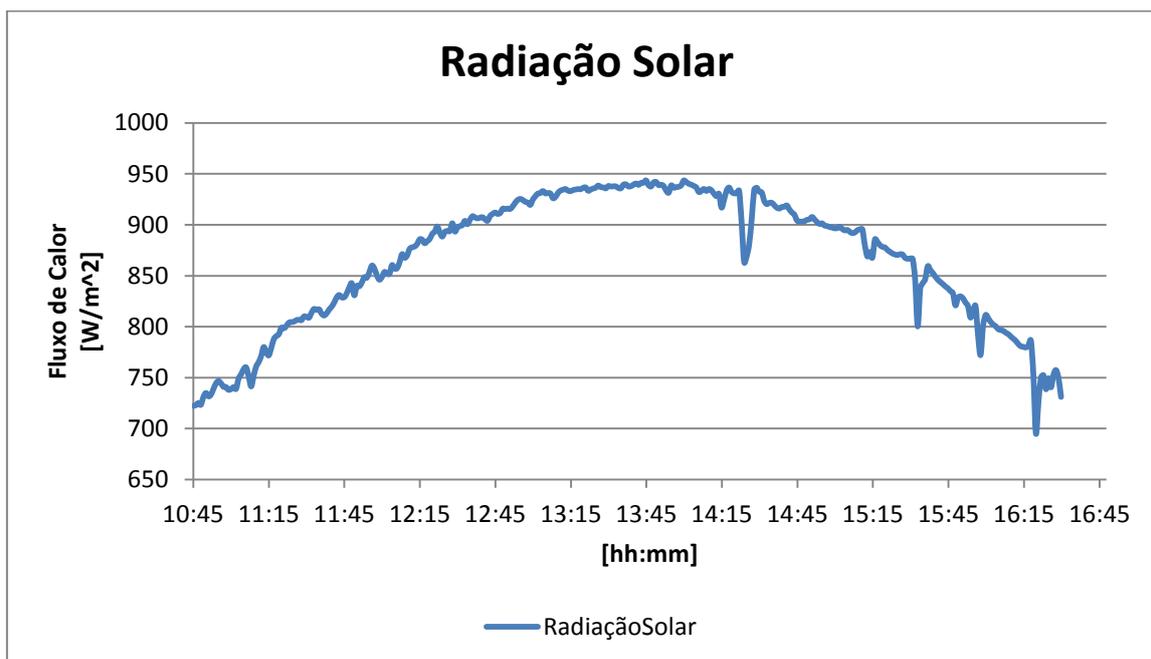


Figura C.1 – Fluxo de radiação solar do dia 23/07/2013 registado pelo solarímetro

A instalação experimental, correspondente à Figura C.2, é constituída por a face frontal em lâminas de estore e nas restantes faces, placas *Wallmate*. Na Figura C.2 e C.3 é possível ver a distribuição da instrumentação utilizada.

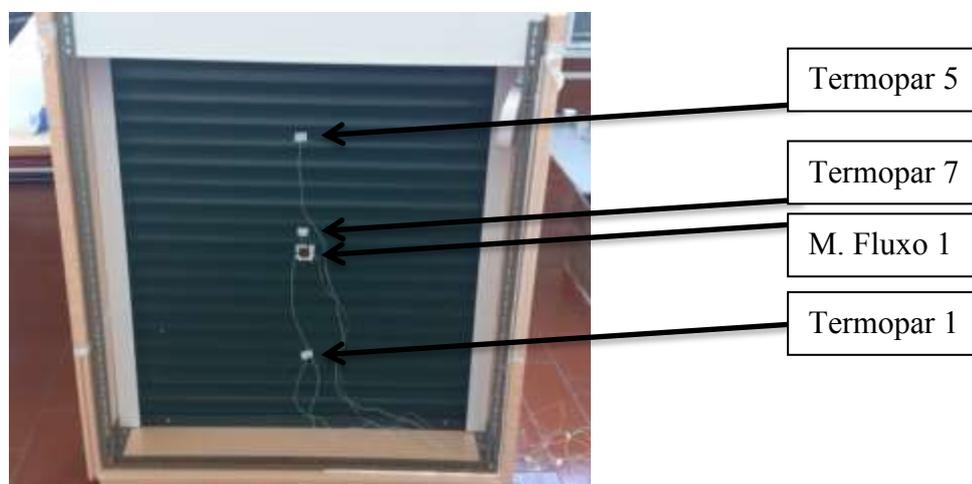
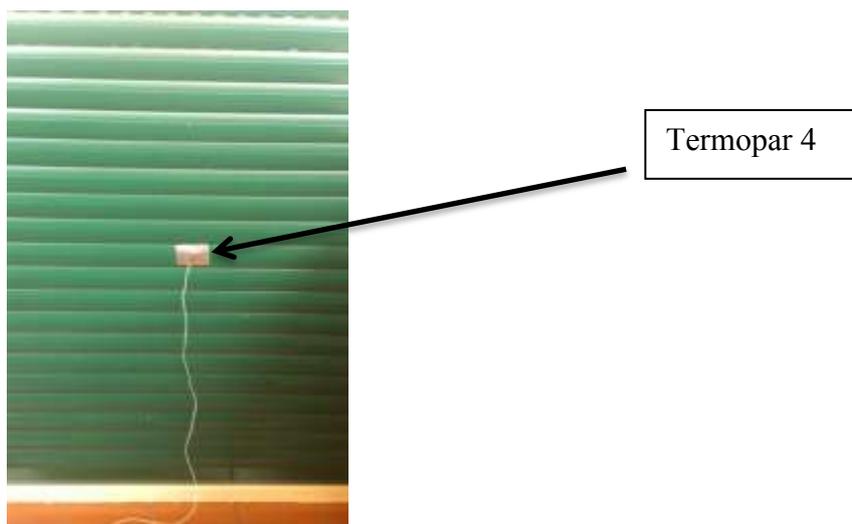


Figura C.2 – Disposição da instrumentação na instalação experimental.



**Figura C.3 – Disposição da instrumentação na instalação experimental.**

Na Figura C.4 é possível observar um solarímetro.



**Figura C.4 – Solarímetro.**

Na Figura C.5 está presente a disposição dos modelos experimentais e do solarímetro no terraço da LAI durante os dias de ensaio.



**Figura C.5 – Disposição dos modelos experimentais e do solarímetro no terraço da LAI.**

Na Figura C.6 é possível ver a alteração introduzida no modelo experimental para reduzir a carga térmica no interior dos caixotes.



**Figura C.6 – Alteração na face posterior do modelo para reduzir a carga térmica no seu interior.**