

Caracterização térmica de painéis sanduíche em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP)

Pedro Miguel de Oliveira Fernandes

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues

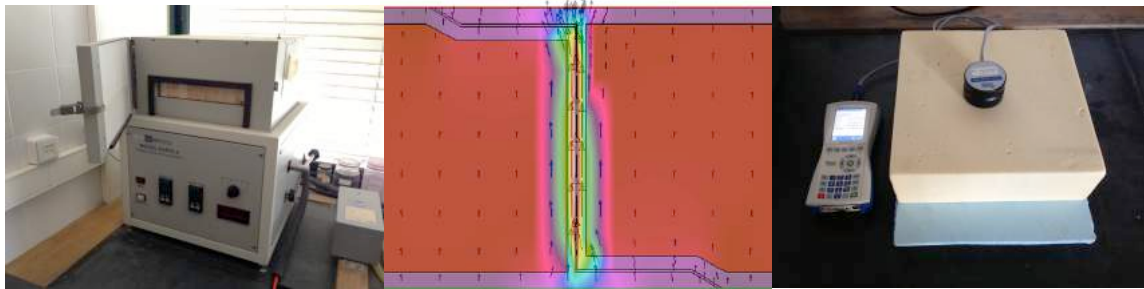
Júri

Presidente: Professora Doutora Ana Paula Patrício Teixeira Ferreira Pinto França de Santana

Orientador: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogal: Professor Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa

Abril 2014



Caracterização térmica de painéis sanduíche em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP)

Pedro Miguel de Oliveira Fernandes

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Dissertação elaborada no âmbito do Projecto *REHAB-GFRP*

Rehabilitation of Building Floors with Lightweight High Performance GFRP

Sandwich Panels

Task 7 – Thermal behavior of GFRP sandwich panels for application in
building floors

Projecto FCT PTDC/ECM/113041/2009



União Europeia
FEDER



Governo da República Portuguesa

FCT **Fundação para a Ciência e a Tecnologia**
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR Portugal

*À memória da minha mãe, Maria Manuela, e do meu avô, José,
por tudo o que fizeram por mim.*

Resumo

A necessidade de construir novos edifícios e reabilitar os existentes, levou a que o homem desenvolvesse novos materiais para assegurar as exigências por si impostas. A procura de elementos mais leves, mas resistentes e com um adequado conforto térmico, levou a um aumento da utilização de materiais compósitos, nos quais se inserem as soluções sanduíche. Os painéis sanduíche em polímeros reforçados com fibras apresentam como principais vantagens uma elevada relação resistência/peso estrutural próprio e garantem o conforto térmico desejado, assegurado por núcleos em material isolante térmico.

No presente trabalho é apresentado um estudo sobre o comportamento térmico de painéis sanduíche em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), constituídos por quatro núcleos diferentes: favos de mel em polipropileno (PP); madeira de balsa; espuma de tereftalato de polietileno (PET) e espuma rígida de poliuretano (PUR). Para esse efeito, foi realizada uma campanha experimental, com o intuito de avaliar o comportamento térmico dos materiais em função da temperatura e do teor de humidade. A campanha experimental permitiu concluir que os materiais sofrem um aumento da condutibilidade térmica linear face ao aumento da temperatura, e exponencial face ao aumento do teor de humidade. No entanto, a condutibilidade térmica do GFRP não foi afectada pela presença de humidade, por se ter revelado impermeável. Por último, foi realizada uma modelação com recurso a um programa de cálculo automático (THERM), para prever o comportamento dos painéis sanduíche GFRP em serviço e avaliar as perdas de calor resultantes das ligações entre painéis, que potencialmente podem constituir uma ponte térmica linear. Este estudo revelou que diferentes combinações de materiais e espessuras podem ser usados em paredes e pisos do ponto de vista térmico, consoante as exigências impostas. Com este estudo concluiu-se ainda que as perdas de calor através de pontes térmicas na zona de ligação entre painéis são desprezáveis para o dimensionamento térmico.

Palavras-chave:

- GFRP
- Painéis sanduíche
- Comportamento térmico
- Ensaios experimentais
- Influência da temperatura
- Influência do teor de humidade
- Modelos de previsão
- Pontes térmicas

Abstract

The need to build new and rehabilitating existing buildings, led humans to the development of new materials, ensuring the demands imposed by themselves. This search for lighter construction elements, with higher and appropriate structural resistance and thermal comfort, led to an increased use of composite materials, in which sandwich solutions are included. Sandwich panels made of fibre reinforced polymers and cores of thermal insulators, present a high structural resistance/weight ratio and a good thermal comfort as main advantages.

The present work presents a study on the thermal behaviour of sandwich panels made of glass fibre reinforced polymer (GFRP), with four different types of cores: polypropylene (PP) honeycombs; balsa wood; polyethylene terephthalate foam (PET); and rigid polyurethane foam (PUR). For this purpose, an experimental campaign was carried out in order to evaluate the materials' thermal behaviour at different temperatures and moisture contents. The study revealed that the thermal conductivity of materials increase linearly with the increasing of temperature and exponentially with the increasing of moisture content. However, GFRP's thermal conductivity, which proved to be waterproof, is not affected by moisture content. Finally, a numerical modelling was made through an automatic calculation program (THERM), to predict GFRP sandwich panels' thermal behaviour, and to estimate the heat losses from panels' junctions, which constitute a linear thermal bridge. This study revealed that depending on the demands, different combinations of materials with different thicknesses can be used as walls and floors from the thermal point of view. With this study, it was also concluded that heat losses from thermal bridges are negligible for the sandwich panels' design.

Keywords:

- GFRP
- Sandwich panels
- Thermal behaviour
- Experimental tests
- Temperature influence
- Moisture content influence
- Prediction models
- Thermal bridges

Agradecimentos

O presente trabalho, que agora vejo terminado, representa um marco muito importante na minha vida, quer a nível pessoal, quer a nível académico. Contudo, a realização deste trabalho e o fecho deste ciclo não podia ter sido alcançado sem a ajuda de todos os que, directa ou indirectamente, contribuíram para o seu desenvolvimento e para a minha formação. Sendo a lista de pessoas a quem quero agradecer muito vasta, exprimo a todos o meu sincero e profundo agradecimento, não podendo no entanto, deixar de agradecer em especial a algumas pessoas.

À Professora Maria da Glória Gomes e ao Professor António Moret Rodrigues, orientadores científicos desta dissertação, por toda a disponibilidade, conhecimento, motivação e simpatia que me forneceram e transmitiram para a realização deste trabalho.

Aos Engenheiros Mário Garrido e António Soares, pelo trabalho de preparação das amostras e pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas relacionadas com os ensaios experimentais.

Aos técnicos do LC do IST, Senhor Leonel e João, por toda a simpatia e ajuda necessária para solucionar problemas com os equipamentos.

Aos colegas e amigos, Jorge Pontes e Sofia Real, pela ajuda nos ensaios e pela companhia nos longos períodos de trabalho em laboratório.

Ao amigo Paulo Brito da Luz, pela revisão do texto em língua inglesa.

À minha colega e amiga Filipa Carvalho, pela amizade, apoio e trabalhos de grupo que desenvolvemos ao longo dos últimos anos.

Aos meus colegas e amigos, Gonçalo Rebelo e Miguel Galha, pela amizade e apoio na formatação do documento.

A todos os colegas e amigos dos cursos de Electrotécnica e Civil que frequentei, em especial, à Catarina Gomes, à Teresa Maia, à Catarina Brito ao Guilherme Garcia, ao Roberto Dias e ao João Caeiro pelas amizades criadas e por todo o vosso apoio.

A todos os colegas e amigos da Comissão de Praxe de Mestrado em Engenharia Civil, que me mostraram o verdadeiro sentido de tradição académica.

A todos os colegas e amigos do Fórum Civil, pela experiência de trabalho numa associação, em especial ao Fernando Rodrigues e à Filipa Caleiro, pelo espírito de liderança que mostraram.

A todos os colegas e amigos da Federação Nacional de Estudantes de Engenharia Civil, em especial ao André Cavadinha e ao Tiago Soares, pelo trabalho que se tem desenvolvido.

Aos colegas e amigos do Grupo de Fotografia do IST, em especial ao João Valado e à Rita Pires, pelas actividades desenvolvidas.

Às minhas amigas, Sandra Machado, Inês Ferreira e Mariana Brito, pela amizade, forte apoio e motivação transmitidos para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos de infância, João Neves, Guilherme Neves e Vasco Pereira pelo verdadeiro sentido de amizade e apoio nos momentos mais difíceis.

Ao meu pai Manuel Luís e à minha madrinha Balbina, mentores da minha educação e formação, o meu especial agradecimento por tudo o que fizeram, e têm feito por mim.

Simbologia

Caracteres Romanos

A	área	[m ²]
A _s	área do sólido	[m ²]
A _{zona}	área de uma zona	[m ²]
c	capacidade térmica	[J/kg.°C]
c _p	calor específico do ar	[J/kg.°C]
c _p	capacidade térmica volumétrica	[J/m ³ .°C]
e	espessura	[m]
h _c	coeficiente de condutância térmica superficial por convecção	[W/m ² .°C]
h _r	coeficiente de condutância térmica superficial por radiação	[W/m ² .°C]
H ₂ O	água	[-]
I	inércia térmica	[J.m ² .°C.s ^{-1/2}]
K	condutância térmica	[W/m ² .°C]
L _m	largura do modelo	[m]
L _{PTL}	comprimento da ponte térmica linear	[m]
m _{dry}	massa da amostra húmida	[kg]
m _{wet}	massa da amostra seca	[kg]
N	parâmetro de calibração do Rapid-k	[W/m ² .°C]
N _i	necessidades anuais de energia útil para aquecimento	[kWh/m ² .ano]
N _{ic}	necessidades nominais de aquecimento	[kWh/m ² .ano]
N _v	necessidades anuais de energia útil para arrefecimento	[kWh/m ² .ano]
N _{vc}	necessidades nominais de arrefecimento	[kWh/m ² .ano]
Q	fluxo de calor	[W]
Q _{a-a}	fluxo de calor por convecção ar-ar	[W]
Q _{a-s}	fluxo de calor por condução ar-sólido	[W]
Q _c	fluxo de calor por condução	[W]
Q _{calc}	fluxo de calor calculado	[W/m]
Q _{PTL}	fluxo de calor que atravessa uma ponte térmica plana	[W]
Q _r	fluxo de calor por radiação	[W]
Q _{THERM}	fluxo de calor obtido com recurso ao THERM	[W/m]
R	resistência térmica	[m ² .°C/W]
R _{ph}	taxa de renovação de ar por hora	[m ³ /h]
R _{se}	resistência térmica superficial exterior	[m ² .°C/W]
R _{si}	resistência térmica superficial interior	[m ² .°C/W]
T _{°C}	temperatura em grau Celsius	[°C]
T _{mV}	temperatura em miliVolt	[mV]
T _I	temperatura na placa inferior	[mV]
T _{mean}	temperatura média	[°C]
T _u	temperatura na placa superior	[mV]
U	coeficiente de transmissão térmica superficial	[W/m ² .°C]
U _{máx}	coeficiente de transmissão térmica superficial máximo	[W/m ² .°C]
U _{med}	coeficiente de transmissão térmica superficial médio	[W/m ² .°C]
U _{ref}	coeficiente de transmissão térmica superficial de referência	[W/m ² .°C]
U _{tot}	coeficiente de transmissão térmica superficial total	[W/m ² .°C]

U_{zona}	coeficiente de transmissão térmica superficial de uma zona	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$
V	volume	$[\text{m}^3]$
w	teor de humidade	$[\%]$

Caracteres Gregos

α	difusividade térmica	$[\text{m}^2/\text{s}]$
Δt	intervalo de tempo	$[\text{s}]$
ΔT	gradiente térmico	$[\text{ }^\circ\text{C}]$
Δx	espessura da amostra	$[\text{m}]$
Δx_{cal}	espessura da amostra de calibração	$[\text{m}]$
λ	condutibilidade térmica	$[\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}]$
λ_{cal}	condutibilidade térmica de calibração	$[\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}]$
θ	temperatura	$[\text{ }^\circ\text{C}]$
θ_e	temperatura exterior	$[\text{ }^\circ\text{C}]$
θ_i	temperatura interior	$[\text{ }^\circ\text{C}]$
ρ	massa volúmica	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
Ψ	coeficiente de transmissão térmica linear	$[\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}]$
Ψ_{ref}	coeficiente de transmissão térmica linear de referência	$[\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}]$

Acrónimos

ASTM	American Society for Testing and Materials
BGR	Bulgária
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Polymer
DCP	Directiva dos Produtos da Construção
DEU	Alemanha
DNK	Dinamarca
EN	European Norm
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite último
EPS	Poliestireno Expandido
ETICS	External Thermal Insulation System
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia
FRA	França
FRP	Fibre Reinforced Polymer
GBR	Reino Unido
GFRP	Glass Fibre Reinforced Polymer
GHP	Guarded Hot Plate
HFM	Heat Flow Meter
INE	Instituto Nacional de Estatística
ISO	International Organization for Standardization
IST	Instituto Superior Técnico
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LC	Laboratório de Construção
MTPS	Modified Transient Plane Source
NP	Norma Portuguesa
OSB	Oriented Strand Board

PET	Tereftalato de Polietileno
PIR	Polisocianurato
PP	Polipropileno
PP honeycombs	Favos de Mel em Polipropileno
PRT	Portugal
PS	Resina Fenólica
PTL	Ponte Térmica Linear
PTP	Ponte Térmica Plana
PU	Poliuretano
PUR	Espuma Rígida de Poliuretano
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RRAE	Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios
SI	Sistema Internacional
TLS	Transient Line Source
TPS	Transient Plane Source
UV	Ultravioleta
XPS	Poliestireno Extrudido

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Simbologia	vii
Índice	xi
Índice de figuras	xiii
Índice de tabelas	xix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objectivos e metodologias	2
1.3 Organização do documento	3
2 Estado de arte	5
2.1 Introdução	5
2.2 Enquadramento histórico da utilização dos painéis sanduíche na construção	5
2.3 Painéis sanduíche	7
2.3.1 Configuração e materiais dos painéis sanduíche	7
2.3.2 Lâminas	8
2.3.3 Núcleo	10
2.3.4 Adesivos	13
2.3.5 Reforços	13
2.4 Processo de fabrico dos painéis sanduíche	14
2.4.1 Produção das lâminas	14
2.4.2 Produção dos núcleos	15
2.4.3 Produção dos painéis sanduíche	16
2.5 Requisitos dos painéis sanduíche	17
2.5.1 Requisitos gerais	17
2.5.2 Requisitos térmicos.....	18
2.5.3 Requisitos acústicos	20
2.5.4 Requisitos mecânicos.....	21
2.5.5 Requisitos de comportamento ao fogo	21
2.5.6 Requisitos de durabilidade a longo prazo	22
2.6 Vantagens e desvantagens	23
2.7 Comportamento térmico dos painéis sanduíche	24
2.7.1 Propriedades térmicas dos materiais.....	24
2.7.2 Mecanismos de transmissão de calor em edifícios.....	26
2.7.3 Coeficiente de transmissão térmica.....	29
2.7.4 Pontes térmicas	30

3	Campanha experimental	33
3.1	Introdução.....	33
3.2	Métodos experimentais para obtenção de condutibilidades térmicas de materiais	33
3.2.1	Métodos estacionários.....	34
3.2.2	Métodos transientes	35
3.3	Descrição dos ensaios realizados	35
3.3.1	Método estacionário através do equipamento Rapid-k	36
3.3.2	Método transiente através do equipamento Isomet 2114	38
3.4	Caracterização das amostras	39
3.5	Plano de ensaios experimentais.....	41
3.6	Comportamento térmico em função da temperatura	43
3.6.1	Resultados obtidos através do Rapid-k	44
3.6.2	Resultados obtidos através do Isomet 2114	47
3.6.3	Comparação de resultados entre o Rapid-k e o Isomet 2114	50
3.7	Comportamento térmico em função do teor de humidade	51
3.7.1	Resultados obtidos através do Rapid-k	51
3.7.2	Resultados obtidos através do Isomet 2114	55
3.7.3	Comparação de resultados entre o Rapid-k e o Isomet 2114	60
3.8	Considerações finais.....	61
4	Modelação numérica	63
4.1	Introdução.....	63
4.2	Método de cálculo de pontes térmicas lineares	63
4.3	Caso de estudo e construção do modelo.....	64
4.4	Cenários em estudo.....	65
4.5	Metodologia de cálculo do coeficiente de transmissão térmica superficial (U) e do coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ)	67
4.5.1	Cálculo de U-médio (U_{med}) e fluxo de calor unidireccional	67
4.5.2	Determinação de U-total (U_{tot}) e fluxo de calor utilizando o THERM.....	68
4.5.3	Cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ)	69
4.6	Apresentação de resultados	70
4.6.1	Solução de laje de cobertura para a situação de Inverno	70
4.6.2	Solução de laje de cobertura para a situação de Verão.....	73
4.6.3	Solução de parede exterior para a situação de Inverno.....	75
4.6.4	Solução de parede exterior para a situação de Verão	77
4.7	Considerações finais.....	80
5	Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros	85
5.1	Conclusões	85
5.2	Perspectivas de trabalhos futuros.....	86
	Referências bibliográficas	89

Índice de figuras

Figura 2.1 - Painel sanduíche para paredes divisórias com lâminas metálicas e núcleo de poliuretano [10]....6	6
Figura 2.2 - Painel sanduíche para cobertura inclinada com lâminas metálicas e núcleo de poliuretano [11]. 6	6
Figura 2.3 - Painel sanduíche para piso estrutural com lâminas metálicas e núcleo de poliuretano [12].6	6
Figura 2.4 - Habitação em painéis sanduíche com lâminas em GFRP [13].....6	6
Figura 2.5 - Cobertura de edifício em painéis sanduíche com lâminas em GFRP [14].....6	6
Figura 2.6 - Edifício residencial em painéis sanduíche moldados com lâminas em GFRP e núcleo de balsa [15].....6	6
Figura 2.7 - Tabuleiro de passagem pedonal em painéis sanduíche com lâminas de GFRP [16].7	7
Figura 2.8 - Constituintes de um painel sanduíche (adaptado de [17]).8	8
Figura 2.9 - Forma das lâminas: a) lâminas lisas; b) lâminas pouco enrugadas; c) lâminas enrugadas [5].....8	8
Figura 2.10 - Disposições das fibras: a) fibras dispostas aleatoriamente; b) fibras direccionadas (0°-90°); c) fibras direccionadas (0°-90°) e fibras dispostas aleatoriamente; d) fibras direccionadas (0°-45°-90°) e fibras dispostas aleatoriamente (adaptado de [23]).....10	10
Figura 2.11 - Configurações de núcleos canelados: a) arranjo simples de tiras paralelas dispostas na vertical; b) treliça dupla; c) elementos tubulares; d) núcleo ondulado [19].....11	11
Figura 2.12 - Configurações de núcleos canelados: a) arranjo simples de tiras paralelas dispostas na vertical; b) treliça dupla; c) elementos tubulares; d) núcleo ondulado (adaptado de [18]).12	12
Figura 2.13 - Configurações de núcleos em favos de mel: a) tiras rectas dispostas perpendicularmente; b) e c) folhas lisas e caneladas aglutinadas aleatoriamente; d) elementos tubulares dispostos perpendicularmente às lâminas; e) folhas deformadas; f) lâminas onduladas e enrugadas (adaptado de [16]).....13	13
Figura 2.14 - Tipos de reforços que atravessam o núcleo: a) reforço muito resistente; b) reforço muito resistente com reforços adicionais à superfície para suportar parafusos; c) reforço com perfil metálico; d) reforço com espuma [24].14	14
Figura 2.15 - Processo de fabrico de moldagem por infusão a vácuo [25].15	15
Figura 2.16 - Linha de fabricação contínua de espuma rígida [19].15	15
Figura 2.17 - Processo de fabrico de núcleos em favos de mel extrudidos [19].16	16
Figura 2.18 - Fabrico dos painéis sanduíche: a) montagem; b) injeção de resina e pormenor do tubo de injeção; c) painel produzido [24].....17	17
Figura 2.19 - Mecanismos de transmissão de calor em edifícios [44].....26	26
Figura 2.20 - Pontes térmicas: a) devido à transição entre diferentes materiais; b) devido a alterações de espessura; c) devido a um pilar num cunhal; d) devido à ligação da laje com a fachada [44].....30	30
Figura 2.21 - Patologia construtiva originada por pontes térmicas [46].....31	31

Figura 2.22 - Aparecimento de bolores potenciados por humidades em zona de ponte térmica da caixa de estore [47].	31
Figura 3.1 - Esquema do método HFM [42].	34
Figura 3.2 - Esquema do método GHP [42].	34
Figura 3.3 - Esquema do método TPS [54].	35
Figura 3.4 - Esquema do método MTPS [54].	35
Figura 3.5 - Esquema do método TLS [55].	35
Figura 3.6 - Aparelho HFM modelo Rapid-k da Holometrix com pormenor do painel de instrumentos.	36
Figura 3.7 - Aparelho MTPS Isomet 2114 da Applied Precision, Ltd.	39
Figura 3.8 - Amostras: a) lã mineral (calibração do Rapid-k); b) lâmina de GFRP; c) favos de mel em PP; d) madeira de balsa; e) espuma de PET; f) espuma rígida de PU (PUR).	40
Figura 3.9 - Estufa a 60°C ventilada para o exterior com pormenor do interior.	42
Figura 3.10 - a) amostras submersas em água para ficarem completamente saturadas; b) amostra a ser envolta em película de celofane; c) amostra pronta.	42
Figura 3.11 - Ensaio no Rapid-k com variação de temperatura das amostras: a) lã mineral (calibração do Rapid-k); b) GFRP; c) PP honeycombs; d) Balsa; e) PET; e f) PUR.	44
Figura 3.12 - Condutibilidade térmica da amostra de GFRP em função da temperatura, obtida com o Rapid-k.	46
Figura 3.13 - Condutibilidade térmica da amostra de PP honeycombs em função da temperatura, obtida com o Rapid-k.	46
Figura 3.14 - Condutibilidade térmica da amostra de Balsa em função da temperatura, obtida com o Rapid-k.	46
Figura 3.15 - Condutibilidade térmica da amostra de PET em função da temperatura, obtida com o Rapid-k.	46
Figura 3.16 - Condutibilidade térmica da amostra de PUR em função da temperatura, obtida com o Rapid-k.	46
Figura 3.17 - Condutibilidades térmicas das amostras em função da temperatura, obtidas com o Rapid-k.	47
Figura 3.18 - Ensaio no Isomet 2114 para diferentes temperaturas das amostras: a) GFRP; b) PP honeycombs; c) Balsa; d) PET; e) PUR.	48
Figura 3.19 - Valores de condutibilidade térmica das amostras para diferentes temperaturas, obtidas com o Isomet 2114.	49
Figura 3.20 - Valores de capacidade térmica volumétrica das amostras para diferentes temperaturas, obtidos com o Isomet 2114.	49
Figura 3.21 - Valores de difusividade térmica das amostras para diferentes temperaturas, obtidas com o Isomet 2114.	49

Figura 3.22 - Comparação das condutibilidades térmicas das amostras interpoladas para 30°C, obtidas pelo Rapid-k e Isomet 2114.	51
Figura 3.23 - Ensaio com teor de humidade no Rapid-k das amostras: a) PPhoneycombs; b) Balsa; c) PET e d) PUR.....	52
Figura 3.24 - Amostra de balsa após os ensaios com teores de humidade apresentando: a) deformações; b) fendas e c) bolores.....	53
Figura 3.25 - Condutibilidade térmica da amostra de PP honeycombs em função do teor de humidade, obtida com o Rapid-k.	54
Figura 3.26 - Condutibilidade térmica da amostra de Balsa em função do teor de humidade, obtida com o Rapid-k.	54
Figura 3.27 - Condutibilidade térmica da amostra de PET em função do teor de humidade, obtida com o Rapid-k.	54
Figura 3.28 - Condutibilidade térmica da amostra de PUR em função do teor de humidade, obtida com o Rapid-k.	54
Figura 3.29 - Variação da condutibilidade térmica das amostras entre o estado seco e o estado saturado, obtida com o Rapid-k.	54
Figura 3.30 - Ensaio no Isomet 2114 para diferentes teores de humidade das amostras: a) PP honeycombs; b) Balsa; c) PET; e) PUR.	55
Figura 3.31 - Condutibilidade térmica da amostra de PP honeycombs em função do teor de humidade, obtida com o Isomet 2114.	57
Figura 3.32 - Condutibilidade térmica da amostra de Balsa em função do teor de humidade, obtida com o Isomet 2114.	57
Figura 3.33 - Condutibilidade térmica da amostra de PET em função do teor de humidade, obtida com o Isomet 2114.	57
Figura 3.34 - Condutibilidade térmica da amostra de PUR em função do teor de humidade, obtida com o Isomet 2114.	57
Figura 3.35 - Variação da condutibilidade térmica das amostras entre o estado seco e o estado saturado, obtida com o Isomet 2114.	57
Figura 3.36 - Capacidade térmica volumétrica da amostra de PP honeycombs em função do teor de humidade, obtido com o Isomet 2114.....	58
Figura 3.37 - Capacidade térmica volumétrica da amostra de Balsa em função do teor de humidade, obtido com o Isomet 2114.	58
Figura 3.38 - Capacidade térmica volumétrica da amostra de PET em função do teor de humidade, obtido com o Isomet 2114.	58
Figura 3.39 - Capacidade térmica volumétrica da amostra de PUR em função do teor de humidade, obtido com o Isomet 2114.	58
Figura 3.40 - Variação da capacidade térmica volumétrica das amostras entre o estado seco e o estado saturado, obtida com o Isomet 2114.	58

Figura 3.41 - Difusividade térmica da amostra de PP honeycombs em função do teor de humidade, obtido com o Isomet 2114.	59
Figura 3.42 - Difusividade térmica da amostra de Balsa em função do teor de humidade, obtido com o Isomet 2114.	59
Figura 3.43 - Difusividade térmica da amostra de PET em função do teor de humidade, obtido com o Isomet 2114.	59
Figura 3.44 - Difusividade térmica da amostra dePUR em função do teor de humidade, obtido com o Isomet 2114.	59
Figura 3.45 - Variação da difusividade térmica das amostras entre o estado seco e o estado saturado, obtida com o Isomet 2114.	59
Figura 3.46 - Comparação das condutibilidades térmicas das amostras em função do teor de humidade, obtidas pelo Rapid-k e Isomet 2114.	61
Figura 4.1 - Secção transversal de um painel sanduíche com pormenor de ligação.	64
Figura 4.2 - Modelo elaborado para a análise térmica da solução.	65
Figura 4.3 - Ambiente de trabalho do software THERM com as janelas de inputs (propriedades dos materiais e superfícies), janela de output (coeficiente de transmissão térmica superficial total) e output gráfico dos vectores de fluxo de calor no modelo.	69
Figura 4.4 - Comparação do coeficiente de transmissão térmica superficial total (U_{tot}) em lajes de cobertura das várias soluções com recomendações de alguns países europeus para o cenário de Inverno.....	72
Figura 4.5 - Coeficiente de transmissão linear (Ψ) em coberturas para o cenário de Inverno.....	72
Figura 4.6 - Comparação do coeficiente de transmissão térmica superficial total (U_{tot}) em lajes de cobertura das várias soluções com recomendações de alguns países europeus para o cenário de Verão.	74
Figura 4.7 - Coeficiente de transmissão linear (Ψ) em coberturas para o cenário de Verão.	74
Figura 4.8 - Comparação do coeficiente de transmissão térmica superficial total (U_{tot}) em paredes exteriores das várias soluções com recomendações de alguns países europeus para o cenário de Inverno.....	76
Figura 4.9 - Coeficiente de transmissão linear (Ψ) em paredes para o cenário de Inverno.	77
Figura 4.10 - Comparação do coeficiente de transmissão térmica superficial total (U_{tot}) em paredes exteriores das várias soluções com recomendações de alguns países europeus para o cenário de Verão. ...	79
Figura 4.11 - Coeficiente de transmissão linear (Ψ) em paredes para o cenário de Verão.....	79
Figura 4.12 - Linhas isotérmicas da solução de 120 mm de PUR para o cenário de Inverno, obtidas com o THERM.	81
Figura 4.13 - Vectores de fluxo de calor da solução de 120 mm de PUR para o cenário de Inverno, obtidos com o THERM.	81
Figura 4.14 - Temperaturas na solução de 120 mm de PUR para o cenário de Inverno, obtidas com o THERM.	81
Figura 4.15 - Fluxos de calor na solução de 120 mm de PUR para o cenário de Inverno, obtidos com TEHRM.	81

Figura 4.16 - Linhas isotérmicas da solução de 120 mm de PUR para o cenário de Verão, obtidas com o THERM.	82
Figura 4.17 - Vectores de fluxo de calor da solução de 120 mm de PUR para o cenário de Verão, obtidos com o THERM.	82
Figura 4.18 - Temperaturas na solução de 120 mm de PUR para o cenário de Verão, obtidas com o THERM.	82
Figura 4.19 - Fluxos de calor na solução de 120 mm de PUR para o cenário de Verão, obtidos com TEHRM.	82
Figura 4.20 - Linhas isotérmicas na zona de ligação entre painéis da solução de 120 mm em PP honeycombs.	83
Figura 4.21 - Vectores de fluxo de calor na zona de ligação entre painéis da solução de 120 mm em PP honeycombs.....	83
Figura 4.22 - Temperaturas na zona de ligação entre painéis na solução de 120 mm em PP honeycombs....	83
Figura 4.23 - Fluxos de calor na zona de ligação entre painéis na solução de 120 mm em PP honeycombs.	83

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Características das principais fibras utilizadas em lâminas (adaptado de [21,22]).	9
Tabela 2.2 - Propriedades físicas e mecânicas das principais resinas termoendurecíveis (adaptado de [21,23]).	10
Tabela 2.3 - Coeficientes de transmissão térmica superficial de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, U_{ref} [$W/m^2 \cdot ^\circ C$] [29].	19
Tabela 2.4 - Coeficientes de transmissão térmica linear de referência, Ψ_{ref} [$W/m \cdot ^\circ C$] [29].	19
Tabela 2.5 - Coeficientes de transmissão térmica superficial máximos admissíveis de elementos opacos, $U_{máx}$ [$W/m^2 \cdot ^\circ C$] [29].	20
Tabela 3.1 - Características das amostras fornecidas.	40
Tabela 3.2 - Massa das amostras secas e saturadas.	43
Tabela 3.3 - Valores de condutibilidade térmica das amostras em função da temperatura, obtidos com o Rapid-k.	45
Tabela 3.4 - Valores da condutibilidade térmica, capacidade térmica volumétrica e difusividade térmica das amostras para diferentes temperaturas, obtidos com o Isomet 2114.	48
Tabela 3.5 - Valores de condutibilidade térmica das amostras interpoladas para 30°C, obtidas através do Rapid-k e Isomet 2114.	50
Tabela 3.6 - Valores de condutibilidade térmica em função do teor de humidade das amostras, obtidas com o Rapid-k.	53
Tabela 3.7 - Valores de condutibilidade térmica, capacidade térmica volumétrica e difusividade térmica das amostras em função do teor de humidade, obtidos com o Isomet 2114.	56
Tabela 3.8 - Condutibilidade térmica das amostras para diversos teores de humidade, obtidos através do Rapid-k e Isomet 2114.	60
Tabela 4.1 - Comprimentos das zonas do modelo elaborado.	64
Tabela 4.2 - Temperaturas de referência de Inverno e de Verão [61].	66
Tabela 4.3 - Resistências térmicas superficiais [62].	66
Tabela 4.4 - Condutibilidades térmicas dos materiais em função da temperatura média.	66
Tabela 4.5 - Coeficientes de transmissão superficial recomendados em vários países da Europa [29,63].	66
Tabela 4.6 - Coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) para lajes de cobertura no Inverno.	71
Tabela 4.7 - Coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) para lajes de cobertura no Verão.	73

Tabela 4.8 - Coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) para paredes exteriores no Inverno.75

Tabela 4.9 - Coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) para paredes exteriores no Inverno.78

1 Introdução

1.1 Enquadramento geral

Em Portugal, a reabilitação de edifícios representa apenas 6% do mercado da construção nova, contrastando com a média europeia que se situa nos 20% [1]. Segundo dados dos Censos de 2011, publicados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), estima-se que cerca de 1 milhão de edifícios habitados necessitam de melhorias [2]. No entanto, factores como a falta de financiamento, a disseminação insuficiente de informação sobre os novos desenvolvimentos no sector da reabilitação, e a falta de qualificação dos vários intervenientes na reabilitação, cuja formação está sobretudo direccionada para a construção de edifícios novos, tornam difícil a tarefa de reabilitar.

Dada a antiguidade do parque edificado, principalmente nos centros urbanos, é necessário desenvolver novas soluções construtivas com bons desempenhos estruturais e funcionais, sem contudo introduzir grandes solicitações à estrutura original, permitindo a reabilitação de edifícios. Saliente-se que muitos destes edifícios apresentam estruturas em paredes de alvenaria de pedra e lajes em madeira, sendo por isso difícil realizar acções de reabilitação que introduzam maiores esforços à sua estrutura. Perante esta situação, os painéis sanduíche em GFRP (do inglês *glass fibre reinforced polymer*), que apresentam um baixo peso e elevada resistência, constituem uma solução possível de reabilitação.

Dos três milhões e meio de alojamentos clássicos em Portugal, cerca de um milhão apresentam problemas de construção ou falta de eficiência energética [2]. Esta falta de eficiência energética, traduz-se num fraco conforto térmico no interior das habitações, sendo estas demasiado frias no Inverno, e demasiado quentes no Verão. A necessidade de contrariar estas duas situações, reflecte-se em elevados consumos de energia de climatização. Neste contexto, e aliado ao mercado da reabilitação de edifícios, surgiram também as directivas europeias 2002/91/CE [3] e 2010/31/UE [4], obrigando a última delas a que os balanços energéticos de edifícios sejam quase nulos a partir de 2020 para edifícios novos. Mais uma vez, os painéis sanduíche em GFRP com núcleos isolantes térmicos, apresentam características térmicas que os tornam indicados para a reabilitação de edifícios.

Os materiais FRP (do inglês *fibre reinforced polymer*), inicialmente introduzidos na indústria aeroespacial e naval nos anos 40, só mais tarde, em meados dos anos 80, é que começaram a ser utilizados na indústria da construção [5]. Sendo os painéis sanduíche em GFRP um material compósito, que combina várias características dos materiais, resulta um material com melhores propriedades, face aos materiais individuais que o compõem.

Apesar dos materiais isolantes térmicos já terem sido alvo de diversos estudos, existe uma escassez de informação relativa ao comportamento térmico de painéis sanduíche em GFRP. Estes começam a ganhar popularidade na indústria da construção, não apenas na reabilitação, mas também em construção nova, tanto em edifícios, como em outras estruturas como pontes pedonais. Neste contexto, pretende-se com o presente estudo caracterizar o comportamento térmico dos painéis sanduíche em GFRP, avaliando os fluxos de calor que os atravessam, bem como as perdas através das suas ligações, as quais constituem uma passagem preferencial de calor (pontes térmicas). Desta forma, é possível fornecer informação adequada para o dimensionamento dos mesmos face aos requisitos térmicos da regulamentação em vigor.

1.2 Objectivos e metodologias

O presente estudo tem como principal objectivo avaliar o comportamento térmico de painéis sanduíche em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), tendo em vista a sua aplicação como elementos estruturais de construção. Estes podem servir como elementos de reabilitação ou de construção nova, constituindo uma alternativa às actuais soluções construtivas de lajes de madeira, metálicas ou mistas. Estes podem ainda ser utilizados em paredes, substituindo as soluções tradicionais em alvenarias de tijolo.

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do projecto da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) PTDC/ECM/113041/2009 intitulado “REHAB-GFRP - Rehabilitation of building floors with lightweight high performance GFRP sandwich panels”, e em particular da “Task 7 - Thermal behaviour of GFRP sandwich panels for applications in building floors” [6].

Foram estudados no total quatro tipos de painéis sanduíche, em que todas as lâminas eram de GFRP, e os materiais do núcleo eram compostos por: i) favos de mel em polipropileno (PP); ii) madeira de balsa; iii) espuma de tereftalato de polietileno (PET); iv) espuma rígida de poliuretano (PUR).

Para o desenvolvimento desta dissertação, foi realizado numa primeira fase, um estudo bibliográfico para introduzir a temática dos painéis sanduíche em geral, e em particular, os painéis sanduíche em GFRP. Foram abordados temas como a utilização dos painéis sanduíche na construção, os materiais e as configurações possíveis, os seus processos de fabrico, requisitos de diversos comportamentos, bem como vantagens e desvantagens. Caracterizou-se ainda o seu comportamento térmico, principal alvo de estudo nesta dissertação.

Numa segunda fase, foi realizada uma campanha experimental no Laboratório de Construção (LC) do Instituto Superior Técnico (IST), de modo a avaliar experimentalmente o coeficiente de condutibilidade térmica dos diferentes elementos constituintes dos painéis (lâminas de GFRP e diferentes materiais de núcleo) em separado. Esta avaliação decorreu segundo dois métodos distintos, e realizados em equipamentos distintos. Numa primeira fase foi feita uma campanha experimental para avaliar o comportamento térmico dos materiais com a variação de temperatura, e numa segunda fase, foi realizada uma campanha experimental para avaliar o comportamento térmico dos materiais face à variação de teores de humidade entre o estado seco e o estado saturado.

O estudo experimental foi complementado com um estudo numérico, com o intuito de avaliar o comportamento térmico de uma solução de painel final. Para tal, calculou-se primeiro de forma analítica o coeficiente de transmissão térmica superficial (U) médio da solução e, de seguida, recorreu-se a um software de modelação (THERM), que simulasse o comportamento térmico de um painel sanduíche com efeito das perdas por pontes térmicas lineares através das zonas de ligação dos painéis. Deste modo foi possível determinar as perdas de calor por pontes térmicas, bem como comparar o coeficiente de transmissão térmica superficial total das solução com as recomendações Europeias.

1.3 Organização do documento

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos.

No presente capítulo, é feita uma breve introdução à temática abordada neste trabalho, inserindo-a no contexto da engenharia civil. São ainda apresentados os objectivos e as metodologias utilizadas para a sua realização, e por fim, uma breve descrição da forma como o documento de encontra estruturado.

No segundo capítulo, intitulado “Estado de arte”, e dividido em 7 secções, descrevem-se as soluções de painéis sanduíche na construção, os seus constituintes e materiais, processos de fabrico e requisitos em serviço. É ainda feita uma caracterização do comportamento dos painéis sanduíche, referindo a importância do isolamento térmico no conforto ambiental dos edifícios, os modos de transferências de calor e as perdas de calor por pontes térmicas.

No terceiro capítulo, intitulado “Campanha experimental”, e dividido em 8 secções, são apresentados numa primeira parte, os métodos experimentais existentes para a obtenção de condutibilidades térmicas dos materiais e descritos os procedimentos dos métodos experimentais adoptados, bem como caracterizadas as amostras a ensaiar e apresentado o plano de ensaios experimentais. Numa segunda parte, são apresentados os resultados de condutibilidade térmica obtidos para os diferentes materiais, face a variações de temperatura e teores de humidade.

No quarto capítulo, intitulado “Modelação numérica”, e dividido em 7 secções, são apresentados numa primeira parte, os métodos de cálculo de pontes térmicas, seguido da caracterização do caso de estudo, da construção do modelo e da identificação dos cenários a serem estudados. Numa segunda parte, é identificada a metodologia de cálculo dos coeficientes de transmissão térmica superficial e linear, apresentados os resultados obtidos.

Finalmente, no quinto capítulo, são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado, bem como perspectivas de trabalhos a serem desenvolvidos no futuro.

2 Estado de arte

2.1 Introdução

O presente capítulo tem como objectivo, introduzir a temática dos painéis sanduíche na construção de um modo geral, e aprofundar os painéis sanduíche de GFRP no que toca ao seu comportamento térmico, principal alvo de estudo nesta dissertação. Para tal, é efectuado um breve enquadramento histórico da utilização dos painéis sanduíche na construção e, posteriormente, uma caracterização dos materiais que os compõem, bem como os comportamentos que adoptam quando solicitados em serviço.

Para a elaboração do presente estado de arte teve-se como base, a literatura relacionada com o tema, nomeadamente artigos em revistas científicas, livros, dissertações, catálogos de fabricantes e informações disponíveis na Internet.

2.2 Enquadramento histórico da utilização dos painéis sanduíche na construção

A incessante e crescente busca do homem para satisfazer as suas necessidades, levou a que ao longo da história novos materiais de construção fossem descobertos e utilizados. As necessidades, que podem ser estruturais, económicas, de conforto, entre outras, levaram a que o homem escolhesse o melhor dos materiais para atingir as exigências por si impostas. No entanto, a utilização independente dos materiais revelou que nem sempre todas as necessidades e exigências são garantidas.

Aliado ao avanço tecnológico, o homem acaba por desenvolver e utilizar materiais compósitos. Estes materiais, que combinam dois ou mais materiais, permitem tirar o melhor partido de cada um dos materiais que o compõem, originando assim um novo material de construção que vai ao encontro das necessidades.

Pode-se pensar que a combinação de materiais é recente, no entanto, registos de 5000 a.C. revelam que na Mesopotâmia foram utilizados tijolos de terra reforçados com palha (adobes), com o objectivo de reduzir a fissuração durante o processo de secagem [7].

Indo ao encontro de satisfazer duas necessidades simultâneas, estrutural e de isolamento térmico, o homem foi conduzido ao desenvolvimento de uma solução compósita denominada “painel sanduíche”. Esta solução é composta por uma estrutura de três camadas: duas lâminas que garantem a resistência estrutural, e um núcleo composto por um material menos denso e resistente quando comparado com as lâminas, que tem como função garantir o isolamento. Para garantir a união do núcleo às lâminas podem também ser utilizados adesivos, dependendo a sua utilização do processo de fabrico.

As principais aplicações de painéis sanduíche destinam-se ao uso em edifícios comerciais e industriais com um ou vários pisos [8,9] onde as cargas actuantes são reduzidas e existem exigências a nível térmico ou acústico. Os painéis são utilizados essencialmente em coberturas, pavimentos e em paredes exteriores e divisórias. A utilização dos painéis sanduíche com núcleo em poliuretano (PU) na construção constitui cerca de 80% dos painéis produzidos. Os restantes apresentam na sua maioria, núcleos em poliestireno extrudido (XPS) e lã mineral, sendo estes últimos, utilizados quando existem maiores exigências no comportamento ao fogo [9].

As Figuras 2.1 a 2.3, apresentam algumas soluções comerciais de painéis sanduíche com diversos fins. Na Figura 2.1, pode-se observar uma solução para paredes divisórias, na Figura 2.2, uma solução para uma cobertura de um edifício, e na Figura 2.3, uma solução para um piso estrutural de um edifício.

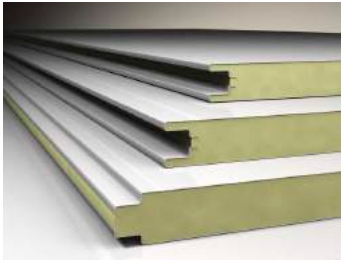


Figura 2.1 - Painel sanduíche para paredes divisórias com lâminas metálicas e núcleo de poliuretano [10].



Figura 2.2 - Painel sanduíche para cobertura inclinada com lâminas metálicas e núcleo de poliuretano [11].



Figura 2.3 - Painel sanduíche para piso estrutural com lâminas metálicas e núcleo de poliuretano [12].

O principal factor que suporta o crescimento da utilização de painéis sanduíche é a diminuição dos custos associados à sua aplicação. A reduzida massa volúmica dos painéis, permite a concepção de uma estrutura ligeira e com pouca mão de obra incorporada na sua execução, quando comparada com soluções tradicionais [9].

Apesar de ser ainda uma solução em estudo, já se encontram alguns casos de aplicação de painéis sanduíche com lâminas de GFRP. Na Figura 2.4 pode-se observar uma habitação temporária pré-fabricada que pode ser erguida em poucos dias, com a finalidade de servir de alojamento a vítimas de catástrofes naturais. Na Figura 2.5 pode-se observar o edifício recepção do Campus da empresa Novartis Pharma, em Basileia na Suíça. Este apresenta uma cobertura feita de painéis sanduíche com lâminas de GFRP e inércia variável. A Figura 2.6, mostra um edifício residencial construído perto de São Francisco na Califórnia, nos Estados Unidos da América, que foi executado em painéis sanduíche moldados com lâminas de GFRP e núcleo de balsa. Na Figura 2.7 pode-se observar uma passagem pedonal construída perto de Vienna no estado da Virgínia, nos Estados Unidos da América, em que o seu tabuleiro é composto por painéis sanduíche com lâminas de GFRP.



Figura 2.4 - Habitação em painéis sanduíche com lâminas em GFRP [13].



Figura 2.5 - Cobertura de edifício em painéis sanduíche com lâminas em GFRP [14].



Figura 2.6 - Edifício residencial em painéis sanduíche moldados com lâminas em GFRP e núcleo de balsa [15].



Figura 2.7 - Tabuleiro de passagem pedonal em painéis sanduíche com lâminas de GFRP [16].

Com a entrada em vigor da Directiva Europeia 2010/31/EU de 19 de Maio de 2010 [4], relativa à melhoria do desempenho energético dos edifícios, todo o edificado novo deve ter necessidades quase nulas de energia até ao final de 2020, e até ao final de 2018 no caso de edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas. A directiva preconiza ainda, que os Estados-membros devem procurar que a remodelação de edifícios vá ao encontro de necessidades quase nulas de energia. Com estas medidas, a adopção de novas soluções construtivas serão potenciadas visando o pretendido, surgindo os painéis sanduíche como possíveis soluções técnicas. A utilização desta solução como piso estrutural, confere uma menor relação peso/rigidez, permitindo assim a reabilitação de estruturas existentes, impondo menores cargas à estrutura comparada com outra solução, e permitindo o aumento do nível de sobrecarga admissível.

2.3 Painéis sanduíche

Neste subcapítulo irá ser abordada a configuração dos painéis sanduíche, bem como os constituintes que os compõem. Serão descritos os tipos de lâminas, os materiais e as configurações dos núcleos, os adesivos que fazem a ligação entre o núcleo e as lâminas, e por fim, os reforços que podem ser aplicados aos painéis sanduíche.

2.3.1 Configuração e materiais dos painéis sanduíche

Um painel sanduíche é um material compósito constituído por diversos materiais que estão ligados entre si. Uma solução de painel sanduíche é composta por três camadas com funções distintas (ver Figura 2.8): duas lâminas finas, rígidas e resistentes, e um núcleo composto por um material menos denso e resistente comparativamente com as lâminas, e que pode assegurar ainda o isolamento térmico e a absorção sonora.

Para garantir a união entre o núcleo e as lâminas são utilizados adesivos, que, dependendo do tipo de material das lâminas e do método de fabrico podem ser suprimidos, sendo a sua função assegurada por um dos outros dois constituintes.

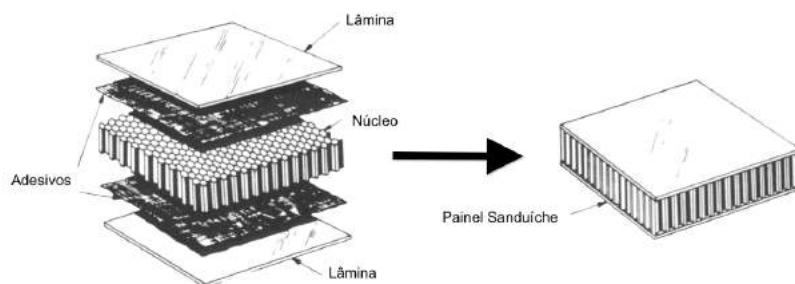


Figura 2.8 - Constituintes de um painel sanduíche (adaptado de [17]).

Tirando partido das potencialidades de cada material, e dependendo do fim a que se destinam, inúmeras tipologias de painéis sanduíche podem ser criadas, através da combinação de diversas formas de núcleo e tipos de materiais das lâminas. Apesar da grande diversidade de materiais e configurações já existentes para os painéis sanduíche, estão constantemente a ser propostos e utilizados novos materiais e novas combinações de materiais existentes [18].

2.3.2 Lâminas

As lâminas são os elementos do painel sanduíche que conferem a resistência às solicitações mecânicas, à corrosão, ao fogo e a estanqueidade ao vento, água e vapor de água [19].

As lâminas podem apresentar várias formas (ver Figura 2.9), sendo a lisa a mais comum. A adoção de uma forma diferente da lisa, pode ser justificada pela funcionalidade a que a lâmina se destina, pela estética, entre outras [20].

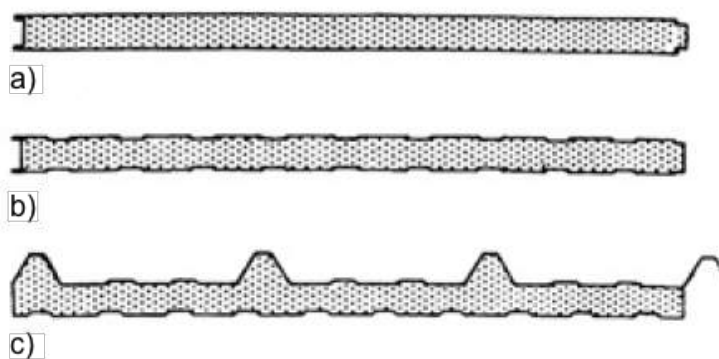


Figura 2.9 - Forma das lâminas: a) lâminas lisas; b) lâminas pouco enrugadas; c) lâminas enrugadas [5].

Os materiais escolhidos para as lâminas dos painéis sanduíche devem satisfazer requisitos de acordo com a função desempenhada pelas lâminas nos painéis: funcional, estrutural e, se possível, permitir a sua reutilização ou reciclagem no fim do seu ciclo de vida [20].

Os materiais das lâminas podem ser classificados em dois grupos: os metálicos e os não metálicos. Os materiais metálicos mais comuns são as ligas de aço, o aço inoxidável, o alumínio e o cobre. Entre os

materiais não metálicos referem-se os derivados da madeira, como o OSB (do inglês *oriented strand board*), os FRP's, o cimento reforçado com fibras e o cartão impregnado com resina [8].

É importante referir que deve ser feita uma escolha cuidada dos materiais a adoptar, e apresentar medidas que fortaleçam a durabilidade dos mesmos. Por exemplo, no caso de lâminas metálicas devem-se prever soluções de protecção contra a corrosão como a galvanização e a metalização.

Como materiais não metálicos, surgem no grupo, os materiais compósitos reforçados com fibras. A combinação de diversos materiais, tirando partido das características de cada um, dá origem a um material compósito com características específicas. A sua constituição resulta da combinação de fibras e de uma matriz polimérica, sendo as primeiras responsáveis pelo desempenho mecânico do material e a última pela aglutinação das fibras e pela transmissão de carga às mesmas [5].

As fibras mais utilizadas nos materiais compósitos são de aramida, de carbono e de vidro. As fibras de carbono, que constituem os laminados de CFRP (do inglês *carbon fiber reinforced polymer*), apresentam uma elevada resistência e um elevado módulo de elasticidade. No entanto, tem como desvantagem, o custo elevado. As fibras de aramida, em que uma das designações comerciais é o *Kevlar*, apresentam uma resistência e um módulo de elasticidade superiores ao das fibras de vidro. No entanto, são susceptíveis à degradação por radiação UV e à ruptura por fadiga. Apresentam ainda, tal como as fibras de carbono, um comportamento anisotrópico. As fibras de vidro, utilizadas nas lâminas de GFRP, são as mais utilizadas na construção, uma vez que, apresentam um peso reduzido, uma resistência elevada e um custo de produção reduzido. Dos vários subtipos de fibras de vidro existentes (E, S, AR, C), todas apresentam o mesmo módulo de elasticidade, no entanto, apresentam diferente resistência mecânica e durabilidade. As desvantagens das fibras de vidro estão relacionadas com o seu baixo módulo de elasticidade, ruptura por fluência, e reduzida resistência a ambientes alcalinos e húmidos. As fibras mais utilizadas são as do tipo E, apresentando elevada resistência mecânica e elevada resistência face a agentes químicos. As fibras S, possuem a resistência mecânica mais elevada, no entanto, são 3 a 4 vezes mais caras que as fibras E, sendo principalmente aplicadas na indústria aeroespacial. As fibras AR, possuem uma boa resistência aos álcalis, permitindo a sua utilização em compósitos de matriz cimentícia. As fibras C, distinguem-se das anteriores pelo bom comportamento face aos ácidos [5]. A Tabela 2.1 apresenta as características típicas das fibras, descritas anteriormente.

As fibras podem apresentar-se em diferentes formas, como se pode observar na Figura 2.10, que incluem mechas ou feixes de filamentos contínuos quase paralelos, não torcidos ou torcidos, ou fibras com 3 a 50 mm de comprimento [21]. Estas fibras podem ser combinadas de forma a obter reforços com forma plana, resultantes de fibras em feixes tecidos, fibras curtas dispostas aleatoriamente ou do conjunto das duas, dependendo o comportamento dos reforços da sua disposição [20].

Tabela 2.1 - Características das principais fibras utilizadas em lâminas (adaptado de [21,22]).

<i>Propriedade</i>	<i>Vidro-E</i>	<i>Carbono</i>	<i>Aramida</i>
Resistência à tracção [MPa]	2350-4600	2600-3600	2800-4100
Módulo de elasticidade em tracção [GPa]	73-88	200-400	70-190
Extensão na rotura em tracção [%]	2,5-4,5	0,6-1,5	2,0-4,0
Densidade [kg/m ³]	2600	1700-1900	1400
Coefficiente de dilatação térmica [10 ⁻⁶ /K]	5,0-6,0	Axial: 1,3 - 0,1 Radial: 18	3,5
Diâmetro das fibras [µm]	3-13	6-7	12
Estrutura das fibras	isotrópica	anisotrópica	anisotrópica

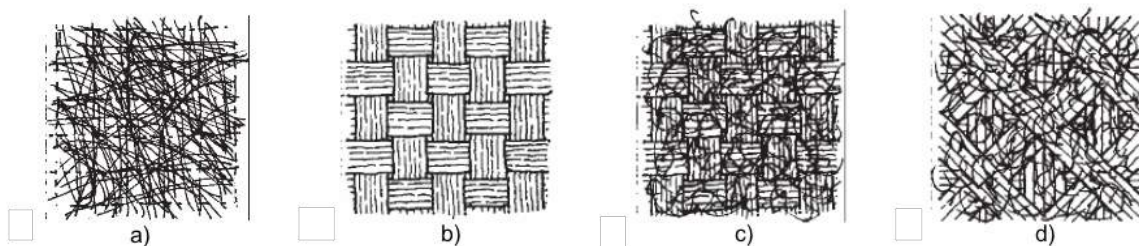


Figura 2.10 - Disposições das fibras: a) fibras dispostas aleatoriamente; b) fibras direccionadas (0° - 90°); c) fibras direccionadas (0° - 90°) e fibras dispostas aleatoriamente; d) fibras direccionadas (0° - 45° - 90°) e fibras dispostas aleatoriamente (adaptado de [23]).

As resinas são a base da matriz polimérica. Estas podem ser divididas em dois grupos: termoendurecíveis e termoplásticas. A distinção entre as duas, é feita pela forma de interligação entre as cadeias poliméricas.

As resinas termoendurecíveis, após efectuada a sua cura, apresentam a propriedade de serem infusíveis, impedindo assim, a soldadura ou o seu reprocessamento. A sua estrutura molecular tridimensional com ligações cruzadas complexa e amorfa, traduz-se num material de viscosidade reduzida, permitindo assim, velocidades de processamento elevadas. Apontam-se ainda como boas propriedades, a capacidade adesiva e de impregnação nas fibras. Exemplos deste tipo de resinas, são o poliéster, o viniléster, as epóxicas e as fenólicas [5].

As resinas termoplásticas por outro lado, apresentam as suas cadeias poliméricas ligadas por forças de *Van der Waals* ou por ligações de hidrogénio, permitindo assim, a sua reciclagem e reprocessamento. Estas apresentam maior viscosidade, dificultando o processo produtivo, e maior dificuldade de impregnação nas fibras. Exemplos deste tipo de resinas, são o polipropileno, a poliamida, o polietileno e o polibutileno [5].

Face às características apontadas, as resinas termoendurecíveis apresentam melhores características face às termoplásticas, sendo por isso mais desejáveis na aplicação em FRP's. A resina mais utilizada é o poliéster, uma vez que, apresenta um bom equilíbrio entre as propriedades e o custo relativamente reduzido. Na Tabela 2.2, pode-se observar as propriedades físicas e mecânicas das principais resinas termoendurecíveis.

Tabela 2.2 - Propriedades físicas e mecânicas das principais resinas termoendurecíveis (adaptado de [21,23]).

<i>Propriedade</i>	<i>Poliéster</i>	<i>Epóxida</i>	<i>Viniléster</i>	<i>Fenólica</i>
Resistência à tracção [MPa]	20-70	60-80	68-82	30-50
Módulo de elasticidade em tracção [GPa]	2,0-3,0	2,0-4,0	3.5	3.6
Extensão na rotura em tracção [%]	1,0-5,0	1,0-8,0	3,0-4,0	1,8-2,5
Massa volúmica [kg/m ³]	1200-1300	1200-1300	1120-1160	1000-1250

2.3.3 Núcleo

Os núcleos dos painéis sanduíche podem-se dividir em dois grupos distintos: i) núcleos homogéneos; e ii) núcleos estruturados (ver Figura 2.11). Os materiais que os constituem devem possuir determinadas propriedades que satisfaçam requisitos de isolamento térmico, elevada resistência à absorção de humidade, adequado comportamento ao fogo e ainda um bom comportamento acústico [8]. Os núcleos homogéneos podem ser constituídos por lãs minerais, espumas, plásticos expandidos, madeira de balsa, betão leve ou produtos de argila (podendo ser classificados em espumas rígidas, materiais inorgânicos e materiais orgânicos) [16]. Por outro lado, os núcleos estruturados podem apresentar diversas formas e são

formados, geralmente, por estruturas laminares estruturadas em diversas formas. Este tipo de núcleo pode ser dividido em núcleos canelados e núcleos em favos de mel [20].

Segundo Ferreira [20], a função estrutural do núcleo varia com a existência ou não de reforços. Caso existam reforços, e dada a elevada rigidez relativa dos reforços em relação ao núcleo, o núcleo deixa de absorver grande parte do esforço transversal, passando a ter como principal função, o impedimento da instabilidade local das lâminas.

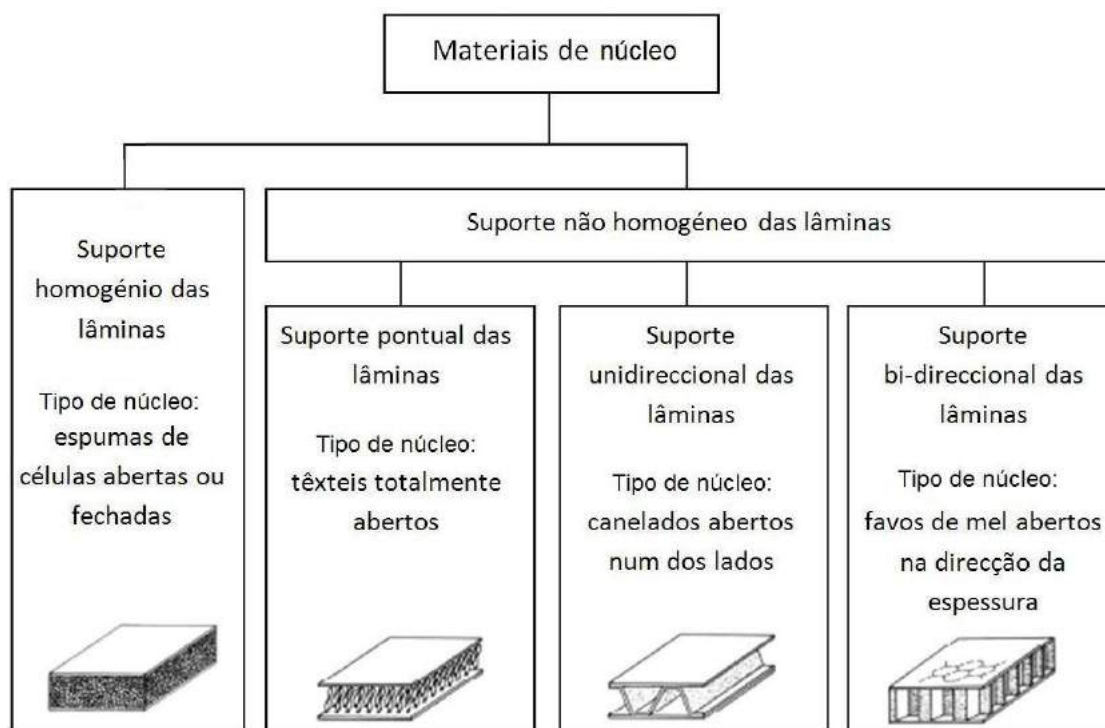


Figura 2.11 - Configurações de núcleos canelados: a) arranjo simples de tiras paralelas dispostas na vertical; b) treliça dupla; c) elementos tubulares; d) núcleo ondulado [19].

i) Núcleos homogêneos

Espumas rígidas

Os núcleos constituídos por espumas rígidas, são os que apresentam menor condutibilidade térmica, e consequentemente, oferecem uma solução com maior isolamento térmico. Usualmente, são utilizadas espumas rígidas de células fechadas [20].

As espumas rígidas mais usuais são o poliuretano (PUR), o polisocianurato (PIR), o poliestireno expandido (EPS), o poliestireno extrudido (XPS) e a resina fenólica (PS) [8]. Um novo material, denominado de tereftalato de polietileno (PET), será alvo de estudo neste trabalho. De um modo geral, as características mecânicas e a condutibilidade térmica aumentam com a densidade do material. A presença de água influencia negativamente o comportamento térmico destes materiais, aumentando a sua condutibilidade térmica (ver capítulo 3).

Materiais inorgânicos

Segundo Ferreira [20], os materiais inorgânicos mais utilizados são as fibras de escória de alto-forno, de rocha e de vidro. Estas fibras são aglutinadas com produtos que podem ser orgânicos e inorgânicos, sendo o mais comum a resina fenólica. Este processo dá origem à lã mineral, de rocha e de vidro, respectivamente.

Materiais orgânicos

Segundo Ferreira [20], o material orgânico mais utilizado é a madeira de balsa devido à reduzida densidade e elevada resistência. Outros materiais orgânicos, como por exemplo a cortiça e seus derivados, podem também ser utilizados como material de núcleo.

ii) Núcleos estruturados

Núcleos canelados

Os núcleos canelados são constituídos por células abertas segundo a direção das lâminas, e ligadas pontualmente às lâminas superior e inferior. Segundo Almeida [19], os materiais utilizados nestas configurações podem ser metais, compósitos, plásticos ou cartão. Na Figura 2.12, podem-se observar exemplos de configurações de núcleos canelados.

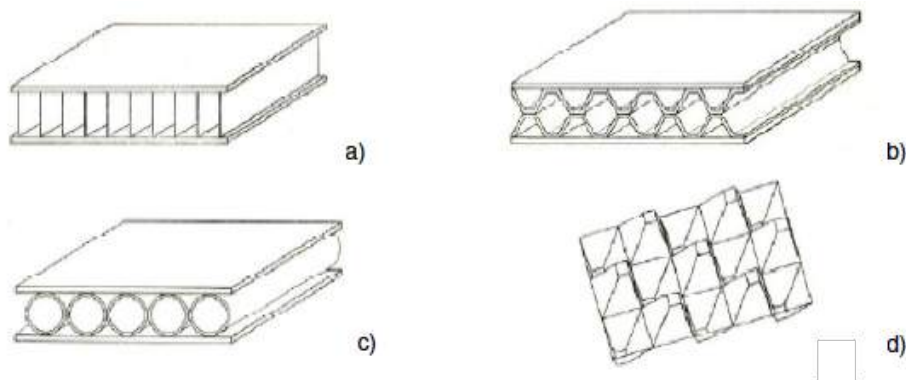


Figura 2.12 - Configurações de núcleos canelados: a) arranjo simples de tiras paralelas dispostas na vertical; b) treliça dupla; c) elementos tubulares; d) núcleo ondulado (adaptado de [18]).

Núcleos em favos de mel

À semelhança dos núcleos canelados, os materiais utilizados podem ser metais, compósitos, plásticos ou cartão. Segundo Almeida [19], o comportamento e as características dos favos de mel são muito diversificadas. Consoante o material e a sua densidade, a configuração e a dimensão das células pode-se obter diferentes desempenhos consoante as necessidades. Os favos de mel podem ainda ser preenchidos por espumas de modo a melhorar o seu comportamento térmico e acústico. Na Figura 2.13 podem-se observar exemplos de configurações de estruturas de núcleo em favos de mel.

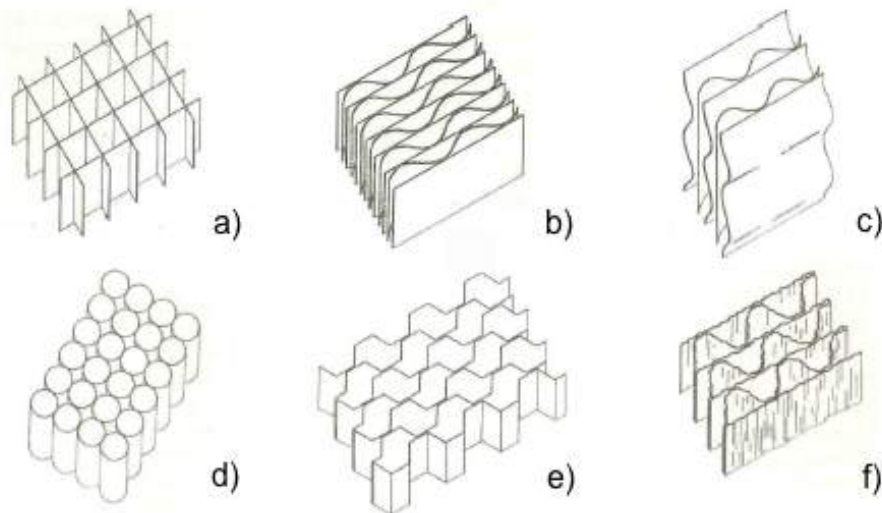


Figura 2.13 - Configurações de núcleos em favos de mel: a) tiras rectas dispostas perpendicularmente; b) e c) folhas lisas e caneladas aglutinadas aleatoriamente; d) elementos tubulares dispostos perpendicularmente às lâminas; e) folhas deformadas; f) lâminas onduladas e enrugadas (adaptado de [16]).

2.3.4 Adesivos

De maneira a garantir a transmissão de tensões entre o núcleo e as lâminas, garantindo o funcionamento estrutural do painel sanduíche e a sua integridade, deve-se assegurar uma correcta união entre os seus elementos. Para tal, a resistência da ligação deverá ser igual ou superior à resistência dos materiais das lâminas ou do núcleo.

Dependendo do processo de fabrico dos painéis sanduíche, para garantir a união dos seus elementos, pode-se adoptar um adesivo, ou caso as lâminas ou o núcleo comportem a sua função, este poderá ser suprimido. Os tipos de adesivo podem-se distinguir em dois grupos dependendo do método de fabrico: em conjunto e em separado. No primeiro caso pode-se tirar partido do material que forma o núcleo ou as lâminas como material adesivo enquanto que no segundo o adesivo é normalmente aplicado em forma líquida.

Os materiais adesivos mais usuais são à base de poliuretano de um ou dois componentes. Existe, no entanto, uma grande variedade de materiais susceptíveis de usar como adesivo, devendo-se contemplar a sua temperatura de serviço e a resistência ao fogo. De um modo geral, o adesivo é aplicado de forma líquida, entre 200 e 350 g/m², permitindo a fácil implementação numa linha de montagem [5]. Deve-se ainda garantir que o adesivo utilizado é quimicamente compatível com as lâminas e com o núcleo.

2.3.5 Reforços

Os reforços em painéis sanduíche são efectuados ao nível da ligação entre lâminas, e devem estar posicionados segundo o sentido de encaminhamento das cargas. Os reforços têm como objectivo, o aumento da rigidez, resistência ao corte e resistência à delaminação. Em geral, a rigidez dos reforços é superior à rigidez do núcleo, sendo grande parte do esforço transversal absorvido pelos reforços. Para que o comportamento seja o desejado, é crucial garantir a ligação eficaz dos elementos de reforço ao núcleo [18].

Segundo Ferreira [20] os reforços podem ser divididos em dois tipos: os que atravessam o núcleo e os laterais. No caso dos que atravessam o núcleo (ver Figura 2.14), são efectuados aquando da sua produção e

consistem em elementos de fibras de arquitectura tridimensional que unem as duas lâminas. No caso dos laterais são feitos posteriormente à sua produção, colocados nas faces laterais, e são, normalmente, do mesmo material que as lâminas, podendo no entanto, ser de diversas naturezas [24].

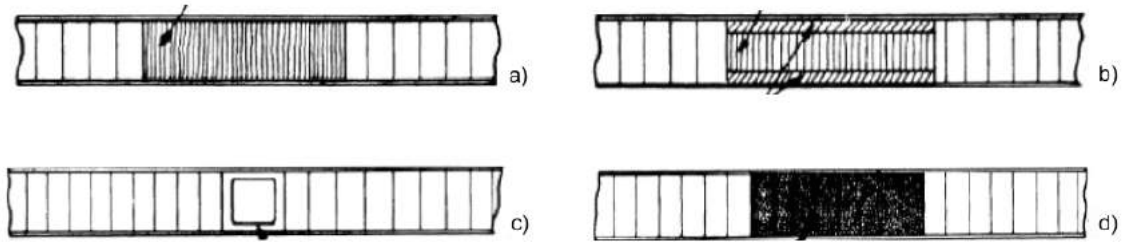


Figura 2.14 - Tipos de reforços que atravessam o núcleo: a) reforço muito resistente; b) reforço muito resistente com reforços adicionais à superfície para suportar parafusos; c) reforço com perfil metálico; d) reforço com espuma [24].

2.4 Processo de fabrico dos painéis sanduíche

O fabrico de painéis sanduíche consiste essencialmente em duas fases: produção das lâminas e produção do núcleo. Consoante o tipo de material do núcleo, este pode ser produzido em placas, que unidas através de um adesivo resultam num painel, ou, no caso das espumas, o núcleo pode ser directamente fabricado e formado entre as duas lâminas do painel, dispensando os adesivos. Nos seguintes subcapítulos, e apesar de existirem vários processos para a fabricação de lâminas e núcleos, serão abordados apenas os processos de fabrico das lâminas e do núcleo dos painéis em estudo nesta dissertação, bem como o processo de produção dos respectivos painéis sanduíche.

2.4.1 Produção das lâminas

As lâminas dos painéis sanduíche em materiais em FRP, podem ser produzidas através de diversos métodos tais como: pultrusão, moldagem manual e por vácuo, e moldagem por transferência de resina (RTM, do inglês *resin transfer moulding*). De seguida será abordado o processo de moldagem por infusão a vácuo, técnica utilizada para a produção dos painéis sanduíche em estudo neste trabalho.

Moldagem por infusão a vácuo

O processo de infusão a vácuo, consiste em envolver o suporte por um fino saco de plástico que dará a forma final à peça (ver Figura 2.15). Através de uma bomba de vácuo é retirado o ar do seu interior, e através de um tubo é injectada a resina. O vácuo é mantido até que seja efectuada a cura da resina. Entre o núcleo e o saco de plástico encontram-se as fibras desejadas de reforço.

A qualidade resultante deste processo é bastante superior à moldagem manual, e a segurança para os utilizadores reforçada, uma vez que não são libertados os gases tóxicos das resinas. Pode ainda ser colocada uma camada de gel para posterior verificação de imperfeições [25].



Figura 2.15 - Processo de fabrico de moldagem por infusão a vácuo [25].

2.4.2 Produção dos núcleos

Como foi referido no capítulo 2.3, os núcleos podem ser homogéneos e estruturados. Neste subcapítulo serão abordados os processos de fabrico dos núcleos em: i) espumas rígidas; ii) materiais orgânicos naturais (núcleos homogéneos); e iii) núcleos em favos de mel (núcleo estruturado).

i) Núcleos homogéneos em espumas rígidas

As espumas rígidas podem ser fabricadas de duas formas: produzidas directamente entre as lâminas do painel sanduíche ou produzidas em placas e posteriormente unidas às lâminas.

No primeiro caso, não são necessários adesivos pois a espuma é moldada pela distância que separa as lâminas previamente fixadas, sendo a distância que as separa a pretendida. Este processo pode ser executado numa linha de montagem como mostra a Figura 2.16, em que as lâminas previamente fabricadas são aquecidas, de modo a reagir quimicamente com a espuma. Por fim, é efectuada a cura do painel através do arrefecimento e cortado com o comprimento desejado.

No segundo caso, a produção de espumas rígidas em placas, é semelhante ao primeiro processo referido, com a diferença que apenas é utilizada a espuma que dá origem às placas. Posteriormente o núcleo é cortado com o comprimento desejado e unido às lâminas através de adesivo.

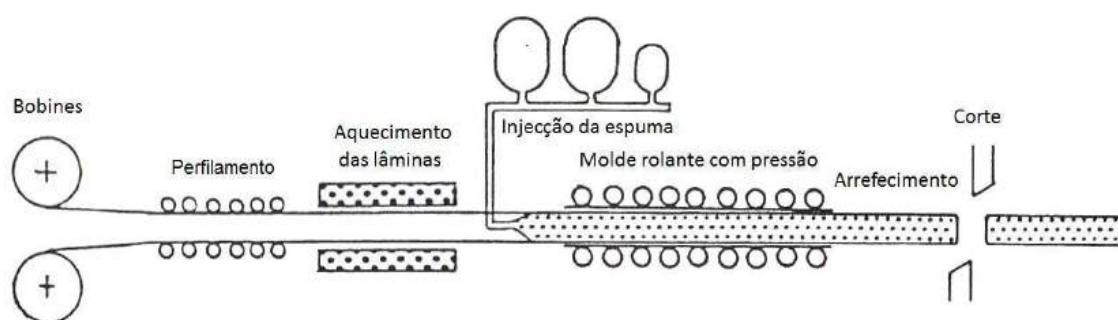


Figura 2.16 - Linha de fabricação contínua de espuma rígida [19].

ii) Núcleos homogéneos em materiais orgânicos naturais

Os núcleos orgânicos, que nesta dissertação, incidem na madeira de balsa, são fabricados a partir de blocos de madeira cortados no sentido transversal às fibras da madeira. Posteriormente são colados, formando um painel de núcleo com as dimensões pretendidas.

Segundo Zenkert [26], a madeira de balsa apresenta uma grande sensibilidade à humidade. Com a variação do teor de humidade, a madeira irá sofrer variações positivas e negativas de tamanho que resultará na rotura da cola que une as peças que formam o núcleo. Pode para isso ser aplicada uma camada absorvente de modo a neutralizar este efeito negativo.

A criação de fendas consideráveis, originadas pelo desprendimento dos blocos, irá criar caminhos preferenciais à passagem de calor, que, conseqüentemente, irão diminuir drasticamente o comportamento térmico destas soluções.

iii) Núcleos em favos de mel

Os processos de fabrico de núcleos em favos de mel (núcleos estruturados), são os seguintes: expansão, canelagem, junção de tubos extrudidos e extrusão.

Será abordado de seguida o processo de extrusão, processo esse que dá origem aos núcleos em favos de mel, estudados na presente dissertação.

O processo de extrusão, utilizado para a produção de núcleos de polipropileno (PP) em favos de mel, consiste na produção de blocos extrudidos, com dimensões em planta, de apenas 150 mm x 150 mm. É necessário posteriormente, unir vários blocos com materiais adesivos apropriados, de modo a se conseguir blocos com maiores dimensões. O bloco é depois cortado com a espessura desejada através de serra ou fio com elevada temperatura [27].

Este processo não permite elevado nível de automatização, tornando a solução mais onerosa face a outras [19]. Na Figura 2.17, pode-se observar o processo de fabrico deste tipo de núcleos.

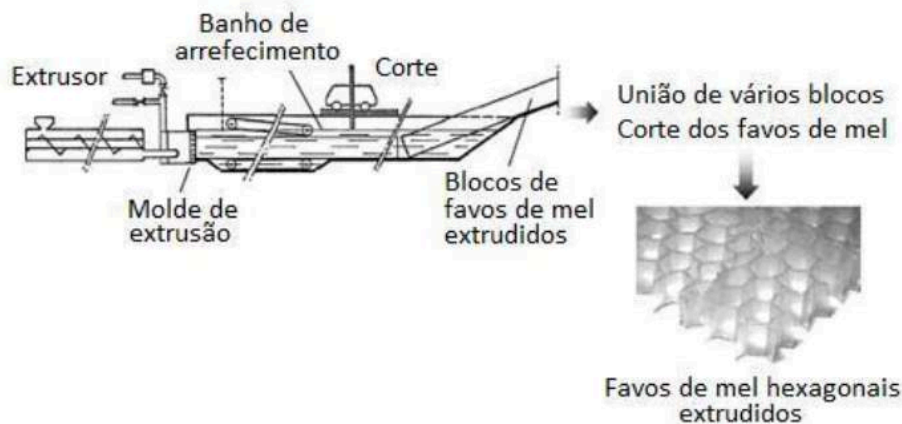


Figura 2.17 - Processo de fabrico de núcleos em favos de mel extrudidos [19].

2.4.3 Produção dos painéis sanduíche

Os painéis sanduíche compósitos, no âmbito desta dissertação, foram produzidos com recurso ao processo de infusão a vácuo (ver Figura 2.18).

Os painéis produzidos são compostos por duas lâminas, constituídas por uma matriz de resina de poliéster reforçada com fibra de vidro, separadas pelo núcleo. É de salientar que o fabrico das lâminas inferior e

superior foram efectuadas em simultâneo, tendo o painel sido colocado em posição vertical, para que tal fosse possível [24].

Neste processo de fabrico não se recorreu a adesivos, uma vez que a resina se impregnou na superfície do núcleo, assumindo assim o seu papel de união das lâminas ao núcleo.

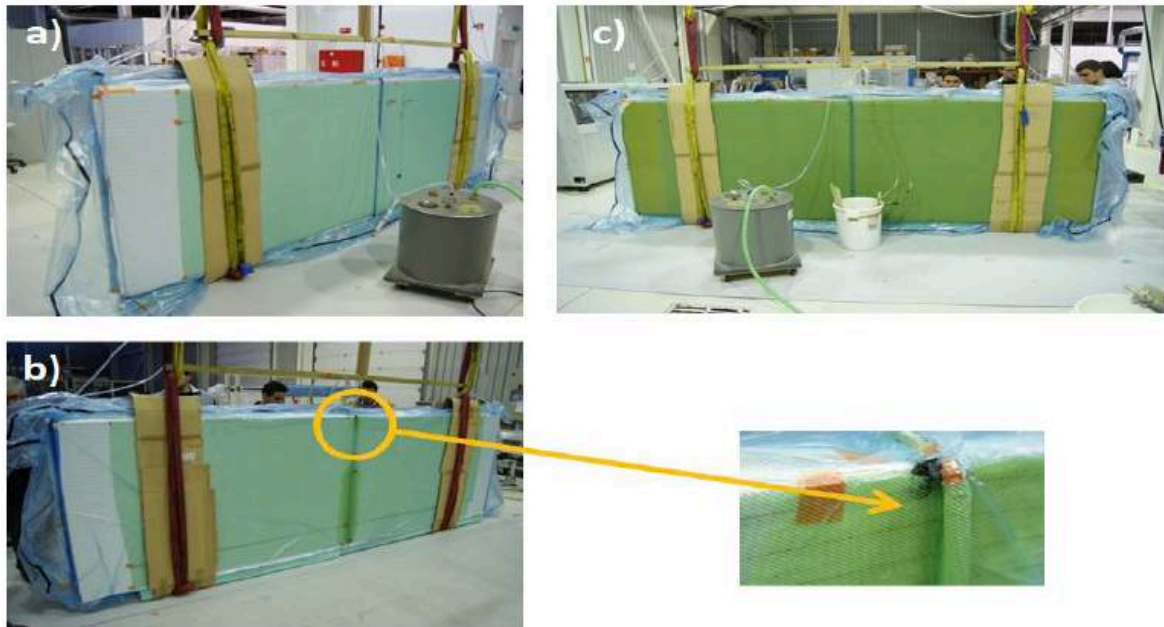


Figura 2.18 - Fabrico dos painéis sanduíche: a) montagem; b) injeção de resina e pormenor do tubo de injeção; c) painel produzido [24].

2.5 Requisitos dos painéis sanduíche

As exigências a cumprir por uma determinada solução construtiva dependem do tipo de aplicação. Neste subcapítulo serão apresentados os requisitos gerais que os painéis sanduíche devem cumprir em geral, e em particular, os requisitos mecânicos, térmicos, acústicos e de comportamento ao fogo.

2.5.1 Requisitos gerais

Segundo Almeida [19], os painéis sanduíche devem cumprir, em geral, os seguintes requisitos:

- resistir às acções do vento e da chuva;
- acomodar as variações dimensionais causadas pelos gradientes térmicos;
- evitar a penetração de água e humidades e a retenção de lixo;
- garantir a segurança contra incêndios;
- cumprir o resultado estético pretendido.

Uma vez que os painéis sanduíche são pré-fabricados, sendo as suas dimensões limitadas por esse facto, é necessário que se estabeleçam diversas ligações entre si, e que dependem do fabricante [8]. Deve por isso, ser feita uma escolha do tipo de ligação que mais se adequa à função que o painel irá desempenhar. Dado que as ligações constituem pontos de fraqueza da solução, Davies [8] aponta três requisitos que devem ser cumpridos:

- função: assegurar a estanqueidade à água e ao ar, isolamento térmico, acústico e resistência mecânica adequada;
- estética: determinada por características como o tipo de materiais escolhidos, o método de fixação e a concepção de ligações;
- execução: as soluções devem ser exequíveis, e no caso de serem aplicadas em condições adversas de trabalho, devem ser o mais simples possível.

2.5.2 Requisitos térmicos

Com a entrada em vigor das novas directivas políticas da União Europeia relativas ao desempenho energético com balanços quase nulos para construções novas e reabilitações profundas [4], e a necessidade de garantir o conforto térmico, os painéis sanduíche têm de cumprir determinados requisitos. Estes requisitos vão ao encontro da necessidade de manter os espaços dos edifícios frescos no Verão e quentes no Inverno, proporcionando aos seus utilizadores o conforto térmico desejado. Apesar de se conseguirem balanços energéticos quase nulos através da utilização de energias renováveis, para se diminuírem os consumos energéticos, o isolamento térmico da envolvente desempenha um papel fundamental.

Em Portugal, o desempenho térmico dos edifícios para a construção nova e para intervenções de grande dimensão, está ao abrigo do recente Decreto-Lei que aprova o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) [28], com os requisitos de comportamento térmico estabelecidos em Portaria do Diário da República [29].

Na Tabela 2.3, podem-se observar os valores de referência de coeficientes de transmissão térmica superficial de elementos opacos e de vãos envidraçados em Portugal Continental e nas Regiões Autónomas. É de salientar que os valores são reduzidos a partir do ano 2016, podendo ser progressivamente actualizados até 2020.

De seguida, na Tabela 2.4, apresentam-se os valores de referência de coeficientes de transmissão térmica linear, aplicados a Portugal Continental e às Regiões Autónomas.

Por último, na Tabela 2.5, podem-se observar os valores máximos admissíveis de transmissão térmica superficial de elementos opacos, em Portugal Continental e nas Regiões Autónomas. Note-se que, qualquer ponte térmica plana (PTP), tais como vigas, pilares e caixas de estores, não pode apresentar um valor de transmissão térmica superior a duas vezes o valor da zona corrente, nem superior aos valores máximos. Caso a transmissão da PTP seja inferior a $0,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, são dispensadas as últimas verificações.

Tabela 2.3 - Coeficientes de transmissão térmica superficial de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, U_{ref} [W/m².°C] [29].

U_{ref} [W/(m ² .°C)]		Zona Climática					
		Portugal Continental					
Zona corrente da envolvente:		Com a entrada em vigor do presente regulamento			31 de dezembro de 2015		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3
em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} > 0.7$	Elementos opacos verticais	0,50	0,40	0,35	0,40	0,35	0,30
	Elementos opacos horizontais	0,40	0,35	0,30	0,35	0,30	0,25
em contacto com outros edificios ou espaços não úteis	Elementos opacos verticais	1,00	0,80	0,70	0,80	0,70	0,60
com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos opacos horizontais	0,80	0,70	0,60	0,70	0,60	0,50
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U_w)		2,90	2,60	2,40	2,80	2,40	2,20
Elementos em contacto com o solo		0,50			0,50		
		Regiões Autónomas					
Zona corrente da envolvente:		Com a entrada em vigor do presente regulamento			31 de dezembro de 2015		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3
em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} > 0.7$	Elementos opacos verticais	0,80	0,65	0,50	0,80	0,60	0,45
	Elementos opacos horizontais	0,55	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
em contacto com outros edificios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos opacos verticais	1,60	1,50	1,40	1,50	1,40	1,30
	Elementos opacos horizontais	1,00	0,90	0,80	0,85	0,75	0,65
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U_w)		2,90	2,60	2,40	2,80	2,40	2,20
Elementos em contacto com o solo		0,50			0,50		

Tabela 2.4 - Coeficientes de transmissão térmica linear de referência, Ψ_{ref} [W/m.°C] [29].

Tipo de ligação	Ψ_{ref} [W/(m.°C)]
Fachada com pavimentos térreos Fachada com pavimento sobre o exterior ou local não aquecido Fachada com cobertura Fachada com pavimento de nível intermédio ⁽¹⁾ Fachada com varanda ⁽¹⁾	0,50
Duas paredes verticais em ângulo saliente	0,40
Fachada com caixilharia Zona da caixa de estore	0,20

Tabela 2.5 - Coeficientes de transmissão térmica superficial máximos admissíveis de elementos opacos, $U_{m\acute{a}x}$ [$W/m^2 \cdot ^\circ C$] [29].

$U_{m\acute{a}x}$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]		Zona Climática		
		I1	I2	I3
Elemento da envolvente em contacto com o exterior ou espaços não úteis com $b_{tr} > 0.7$	Elementos verticais	1,75	1,60	1,45
	Elementos horizontais	1,25	1,00	0,90
Elemento da envolvente em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos verticais	2,00	2,00	1,90
	Elementos horizontais	1,65	1,30	1,20

Os painéis sanduíche compósitos apresentam um bom comportamento térmico, nomeadamente, quando apresentam núcleos de PUR e PET. Estas espumas apresentam baixas condutibilidades térmicas, propriedade conferida pela presença de gás aprisionado em células fechadas [19]. No caso da madeira de balsa, a propriedade isolante é conseguida graças à sua baixa massa volúmica e elevado volume de vazios preenchidos com ar [24]. Os favos de mel em PP, por serem constituídos por células preenchidas com ar, apresentam também baixas condutibilidades térmicas.

É de salientar que as estruturas leves, como os painéis sanduíche, apresentam inércias térmicas reduzidas, pelo que, não são necessárias grandes quantidades de energia para o aquecimento, contrastando com as soluções tradicionais pesadas (lajes em betão armado e paredes de alvenarias) [24].

2.5.3 Requisitos acústicos

Para se assegurar o conforto de um edifício, além da componente térmica, de ventilação e iluminação, é necessário também garantir um bom desempenho acústico.

O som resulta de uma perturbação física originada pela variação de pressão em relação à pressão atmosférica, a qual pode ser percebida pelo ouvido humano, dependendo a sua audibilidade da frequência do som e dos níveis de pressão sonora [20].

Dependendo da utilização dos espaços, são exigidos valores mínimos de isolamento entre eles. Em Portugal, as soluções têm de obedecer ao Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) [30], que exige valores mínimos de índice de isolamento a sons aéreos e valores máximos de índice de isolamento a sons de percussão, entre dois espaços consoante o tipo de uso.

Segundo Almeida [19], face a outras soluções de peso reduzido, os painéis sanduíche apresentam um isolamento acústico na gama de outros painéis leves. No entanto, e face a soluções mais pesadas como betão armado e alvenarias, os painéis sanduíche apresentam fraco isolamento acústico. Desta forma, e de modo a conseguir o máximo isolamento sonoro, a fonte sonora, o meio de propagação do som, a sua frequência e dimensões devem ser tidos em conta no dimensionamento dos painéis sanduíche.

2.5.4 Requisitos mecânicos

O dimensionamento de uma solução, é fortemente condicionada pelos requisitos mecânicos que terá de satisfazer, de modo a garantir a segurança a diversos tipos de combinações de acções, definidas pelos Eurocódigos Estruturais. Segundo o Eurocódigo 0 [31], existem duas verificações que têm de ser satisfeitas: a verificação a estados limites últimos (ELU), associados ao colapso da estrutura; e a verificação a estados limites de serviço (ELS), associados a deslocamentos e deformações máximos, consoante o tipo de utilização.

Os Eurocódigos 0 [31] e 1 [32], permitem determinar as cargas a verificar para cada estado, sendo as cargas definidas como: cargas permanentes, associadas ao peso próprio e restantes cargas permanentes; e cargas variáveis, associadas a sobrecargas provocadas pela utilização, neve, entre outras.

O objectivo da verificação de segurança ao estado limite último é garantir a não rotura da estrutura, acima de uma determinada probabilidade, sendo as resistências superiores aos efeitos das acções. Uma vez que não existe Eurocódigo Estrutural para painéis sanduíche e materiais FRP, pode-se recorrer a uma norma italiana [31], que fornece coeficientes parciais de segurança a aplicar.

Uma vez que as cargas permanentes e cíclicas diminuem a capacidade resistente dos materiais, deve ser verificada também, a segurança da estrutura a longo prazo [20]. Na verificação ao estado limite de serviço em edifícios, deve-se limitar a flecha máxima a $v_{0}/250$ ou $v_{0}/500$, em situações com elementos adjacentes à estrutura que possam ser danificados [33].

2.5.5 Requisitos de comportamento ao fogo

Segundo Gomes e Pinto [34], em caso de incêndio, os materiais de construção estão sujeitos a diversos factores de risco, tais como: o calor produzido pela combustão, podendo danificar a estrutura do edifício; o fumo produzido pela combustão de materiais, e conseqüentemente, a libertação de gases tóxicos.

Segundo a Directiva dos Produtos da Construção (DCP) 89/106/CEE [35], por forma a limitar os riscos de incêndio, é necessário que os materiais empregues cumpram determinados requisitos.

Em caso de incêndio, as construções devem ser concebidas e realizadas, obedecendo aos seguintes requisitos: possuir capacidade resistente durante um determinado período de tempo; minorar a produção e a propagação do fogo e do fumo no seu interior, evitar a propagação do fogo a construções adjacentes; permitir que os ocupantes abandonem o local ou sejam socorridos; e devem garantir a segurança das equipas de salvamento [36].

Com o aumento da temperatura, provocada pela acção do fogo dá-se uma diminuição de resistência e rigidez dos elementos, introduzindo novos esforços na estrutura [20].

Apesar de nem sempre condicionar o seu dimensionamento, as soluções sanduíche devem cumprir determinados requisitos de modo a verificarem a segurança em caso de incêndio [8].

Os painéis sanduíche são bastante sensíveis ao fogo, uma vez que as lâminas são de origem orgânica e estão sujeitas a ignição. As suas propriedades são substancialmente reduzidas na presença de temperaturas entre os 100 e os 200 °C. Na presença de temperaturas entre os 300 e os 500°C, é decomposta a matriz orgânica das lâminas, produzindo calor, fumo e gases tóxicos [5].

As espumas poliméricas, utilizadas em núcleos, constituem uma solução com um fraco desempenho face ao fogo [27].

O comportamento estrutural dos painéis sanduíche face ao fogo, pode ainda ser comprometido em soluções que recorram a adesivos na união das lâminas ao núcleo, uma vez que são feitos de termoplásticos e termoendurecíveis que amolecem na presença de temperaturas da ordem dos 150°C [5].

Pode-se melhorar o comportamento ao fogo dos painéis sanduíche, implementando sistemas de protecção superficial ou através da introdução de aditivos nos seus componentes. Os sistemas de protecção deverão ser implementados no seu exterior, dada a reduzida temperatura de transição vítrea do GFRP, protegendo assim a solução desde que o fogo se inicia. A protecção é conseguida utilizando materiais como lã de rocha, vermiculite esfoliada ou gesso reforçado, por apresentarem uma baixa combustibilidade [8].

2.5.6 Requisitos de durabilidade a longo prazo

Os requisitos de durabilidade, são, na sua generalidade, complexos e variam com diversos factores como o tipo de aplicação e os materiais empregues nas mais diversas soluções. A durabilidade destas soluções, estará dependente das acções a que estarão sujeitas. No entanto, os painéis sanduíche deverão manter algumas propriedades ao longo da sua vida útil para que sejam viáveis, tais como, propriedades resistentes, isolantes e acabamentos de superfícies [19].

Segundo Davies [8], existem várias causas que podem contribuir para a degradação dos painéis sanduíche, tais como:

- acções prolongadas (peso próprio, ou neve);
- acções cíclicas (vento, tráfego no caso de pisos);
- variações de temperatura;
- exposição aos raios ultravioleta;
- humidade.

Estas e outras acções podem contribuir para a degradação dos painéis sanduíche causando deformações exageradas, perda da capacidade resistente e degradação das propriedades dos materiais.

As variações de temperatura e de humidade podem, por exemplo, gerar condensações interiores, levando a uma possível corrosão de elementos ou à perda de aderência entre as lâminas e o núcleo. Esta presença de água altera também o comportamento da solução no que diz respeito ao isolamento térmico, diminuindo a sua capacidade isolante. A exposição directa à radiação ultravioleta pode provocar alterações na cor das lâminas, degradando esteticamente a solução no caso de ser aplicada em fachadas. As temperaturas elevadas podem originar delaminação local no painel, provocada pelo aumento do agente expansivo gasoso presente nas células de alguns materiais de núcleo [8].

A escolha dos materiais mais indicados face às acções a que a solução estará sujeita, torna-se assim, num passo importante de cuidado a ter, de modo a garantir a integridade da solução ao longo da sua vida útil. Note-se que, medidas preventivas devem ser implementadas de modo a prolongar a durabilidade dos materiais, bem como medidas correctivas, no caso de se verificar uma degradação acelerada face ao expectável. Associada a estas medidas devem-se prever acções de manutenção para que a durabilidade seja assegurada ao longo da sua vida útil.

2.6 Vantagens e desvantagens

Os painéis sanduíche apresentam diversas vantagens enquanto solução construtiva, impulsionando cada vez mais a sua utilização:

- peso próprio reduzido: a utilização de materiais de reduzida densidade no núcleo permite soluções muito mais leves comparativamente com as de betão armado no caso de lajes e de alvenarias cerâmicas no caso de paredes;
- elevada rigidez: o núcleo evita a instabilização lateral das lâminas, funcionando como elemento de reforço e conferindo ao painel uma elevada rigidez [37];
- elevada resistência: ao ajustar as dimensões das lâminas e do núcleo, de acordo com as necessidades, consegue-se uma solução com elevada capacidade de rigidez de flexão e carga [37];
- boas propriedades de isolamento térmico: a escolha de bons isolantes térmicos para materiais do núcleo permite uma solução muito mais eficiente que uma solução tradicional de laje em betão armado ou de parede em alvenaria cerâmica;
- boa capacidade de absorção sonora: a escolha de um material de núcleo de célula aberta confere uma maior absorção sonora face a outras soluções leves com núcleos de células fechadas;
- facilidade de adoptar formas complexas e com combinação de diferentes materiais [38];
- possibilidade de economia de produção em massa de elementos com dimensões pré-definidas assegurando a boa qualidade do produto [8];
- boa capacidade de dissipação de tensões: a maioria dos núcleos permite a dissipação de tensões geradas por cargas concentradas, reduzindo a formação e propagação de fendas [39]. Desta forma assegura-se um melhor comportamento em serviço face a outro tipo de estruturas, prolongando a sua vida útil;
- boa capacidade de absorção de energia: estudos realizados comprovam que alguns painéis sanduíche apresentam bom comportamento face a solicitações de acidente como explosões [39];
- boa capacidade de amortecimento: núcleos constituídos por materiais elastómeros (que recuperam rapidamente a sua forma e dimensões iniciais após o fim da solicitação [40]) permitem reduzir os níveis de vibração na estrutura, contrariamente às estruturas de betão que utilizam a sua massa [39];
- facilidade de montagem: a rápida elevação dos painéis dispensa o recurso a pesados equipamentos de elevação, permitindo reduzir os custos de colocação em obra. A configuração dos painéis facilita ainda a sua instalação em condições ambientais adversas [8];
- durabilidade: o acabamento das lâminas possibilita a estanqueidade dos painéis à água, ao vapor e ao ar, conferindo-lhes uma boa resistência em ambientes agressivos e em diferentes condições ambientais. Isto, aliado à facilidade de reparação e substituição dos painéis em caso de danos, permite obter uma economia de custos de manutenção e um aumento do período de vida útil da sua estrutura. Alguns painéis, como os constituídos por lâminas de materiais compósitos, apresentam uma boa resistência à corrosão [19].

Os painéis sanduíche apresentam também desvantagens que podem condicionar a sua adopção como solução construtiva:

- fraca resistência a temperaturas elevadas: os painéis com núcleos ou lâminas constituídos por materiais plásticos rígidos apresentam um mau comportamento ao fogo [19];
- deformações excessivas: a exposição ao calor, nomeadamente a exposição solar, origina dilatações térmicas;
- fraco isolamento acústico: face a outras soluções mais pesadas, apresentam propriedades de isolamento acústico inferiores;

- o manuseamento de resinas no seu fabrico apresenta riscos para a saúde dos utilizadores [38];
- os materiais compósitos apresentam reduzidas possibilidades de reprocessamento, dificultando assim a reciclagem no fim do ciclo de vida [38];
- falta de informação de engenheiros e arquitectos relativamente à utilização de painéis sanduíche como solução estrutural, [38];
- a variabilidade de critérios de ruptura dificulta o seu dimensionamento.

2.7 Comportamento térmico dos painéis sanduíche

Os edifícios, devem no seu interior, assegurar condições mínimas de conforto e habitabilidade consoante o uso a que se destinam. Para assegurar o conforto térmico desejado, é necessário determinar as trocas de calor que se dão entre os espaços e a envolvente.

Neste subcapítulo será abordado o comportamento térmico dos painéis sanduíche como solução construtiva. Serão abordadas as principais propriedades térmicas dos materiais, os mecanismos de transferência de calor nos edifícios, e por último, serão abordadas as pontes térmicas e a influência que estas podem ter no desempenho energético dos edifícios.

2.7.1 Propriedades térmicas dos materiais

Para o cálculo das trocas de calor entre um espaço e a sua envolvente, é necessário conhecer as propriedades térmicas dos materiais. De seguida irão ser abordadas as seguintes propriedades térmicas dos materiais: i) condutibilidade térmica; ii) calor específico volúmico; iii) difusividade térmica; e iv) inércia térmica.

i) Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica de um material (λ), é a propriedade que traduz a facilidade que este tem em conduzir o calor. Materiais com elevadas condutibilidades térmicas conduzem o calor mais rápido, podendo ser usados como dissipadores térmicos, contrariamente aos que apresentam pequenas condutibilidades térmicas, e são utilizados como isolantes térmicos. O inverso da condutibilidade térmica é a resistividade térmica.

Matematicamente, a condutibilidade térmica é a quantidade de calor (Q), que atravessa um objecto de uma determinada espessura (e) por unidade de tempo, numa direcção normal à sua secção com determinada área (A), devido a uma variação de temperatura (ΔT) unitária entre as suas extremidades. A unidade segundo o Sistema Internacional (SI) é o Watt (W) por metro (m) e por Kelvin (K) [W/m. $^{\circ}$ K], sendo que na presente dissertação se irá utilizar o grau Celsius ($^{\circ}$ C) [W/m. $^{\circ}$ C] que toma exactamente o mesmo valor.

Em geral, a condutibilidade térmica dos materiais depende da densidade, temperatura, teor de humidade, bem como dos seus constituintes e vazios presentes na sua estrutura, dependendo assim da estrutura atómica e molecular do material, porosidade, anisotropia e defeitos presentes no material [41].

De um modo geral, a condutibilidade térmica dos materiais aumenta com o aumento da temperatura [42]. Face à presença de humidade em isolantes térmicos, a sua condutibilidade irá aumentar também, uma vez que esta que tem elevada condutibilidade térmica irá preencher os vazios que inicialmente estavam preenchidos com ar.

ii) Capacidade térmica volumétrica

A capacidade térmica de um corpo (c), é a quantidade de energia necessária fornecer a 1 kg para aumentar a sua temperatura de 1°C. Esta propriedade está directamente relacionada com a quantidade de material, sendo que materiais com maior massa necessitam de mais energia para aumentar a sua temperatura. No entanto, e uma vez que depende da quantidade de material, é mais conveniente quantificá-la de acordo com o seu volume, utilizando-se então capacidade térmica volumétrica.

Matematicamente, a capacidade térmica volumétrica ($c\rho$), é a quantidade de calor necessária fornecer (J) a um metro cúbico (m^3), para aumentar a sua temperatura um grau Celsius (°C) [$J/m^3 \cdot ^\circ C$].

Através desta grandeza, é possível saber se é necessária mais ou menos energia para aquecer um determinado material ou solução construtiva, influenciando assim a quantidade de energia a despender para aquecer um determinado espaço.

iii) Difusividade térmica

A difusividade térmica (α) caracteriza a forma como o calor se propaga através de um material. Esta propriedade depende, por um lado, da condutibilidade térmica (λ), e por outro lado, da capacidade térmica volumétrica ($c\rho$).

A difusividade é uma variável muito importante na térmica dos edifícios, uma vez que determina a velocidade com que um corpo se ajusta à temperatura que o rodeia. Então, materiais com baixa difusividade retardam a transferência de variações externas e internas de calor para dentro e fora respectivamente de um espaço.

Matematicamente, a difusividade térmica (α) obtém-se dividindo a condutibilidade térmica (λ) pela capacidade térmica volumétrica ($c\rho$), e a sua unidade do SI é o metro quadrado por segundo [m^2/s], como se pode observar na Equação 2.1.

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (2.1)$$

em que:

α - difusividade térmica [m^2/s];

λ - condutibilidade térmica [$W/m \cdot ^\circ C$];

$c\rho$ - capacidade térmica volumétrica [$J/m^3 \cdot ^\circ C$].

Pode-se assim concluir que, um material com baixa difusividade térmica tem uma baixa condutibilidade (conduz mal), e tem uma capacidade térmica volumétrica elevada (necessita de muita energia para aumentar a sua temperatura).

iv) Inércia térmica

A inércia térmica de um elemento construtivo, traduz a capacidade de contrariar as variações de temperatura que ocorrem nos espaços que separa, estando intrinsecamente associada à sua massa volúmica. Desta forma, um material mais pesado apresentará uma inércia térmica mais elevada face a um

material mais leve que apresenta uma inércia térmica mais baixa. Assim sendo, um material com inércia térmica baixa, muda a sua temperatura com facilidade, enquanto um material com elevada inércia térmica demora mais tempo a sofrer a mesma mudança de temperatura.

Matematicamente, a inércia térmica (I) é a raiz quadrada do produto da condutibilidade térmica (λ) pela capacidade térmica volumétrica ($c\rho$), como mostra a Equação 2.2. A sua unidade do SI é o $[J.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}.s^{-1/2}]$.

$$I = \sqrt{\lambda \times c\rho} \quad (2.2)$$

em que,

I - inércia térmica $[J.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}.s^{-1/2}]$;

λ - condutibilidade térmica $[W/m.^{\circ}C]$;

$c\rho$ - capacidade térmica volumétrica $[J/m^3.^{\circ}C]$.

2.7.2 Mecanismos de transmissão de calor em edifícios

A transmissão de calor entre dois pontos dá-se quando entre eles se estabelece um gradiente térmico, dando origem a um fluxo de calor que se desenvolve no sentido das maiores para as menores temperaturas. A transmissão de calor num determinado espaço pode ocorrer segundo três mecanismos distintos: i) condução; ii) convecção; e iii) radiação (ver Figura 2.19). Conjugando estes três mecanismos é possível calcular o coeficiente de transmissão térmica através de um elemento construtivo. De seguida, abordar-se-ão os três mecanismos de transmissão de calor em edifícios bem como o coeficiente de transmissão térmica através de um elemento.

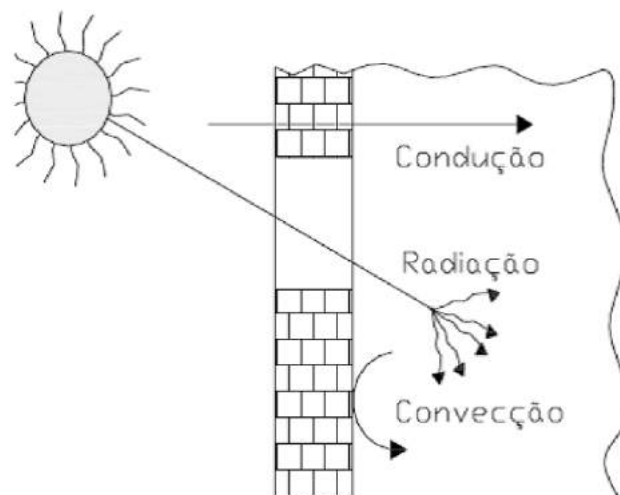


Figura 2.19 - Mecanismos de transmissão de calor em edifícios [43].

i) Condução

A condução é um mecanismo de transmissão de calor que representa a transferência de energia cinética a nível molecular em sólidos, líquidos e gases. Nos líquidos e sólidos não condutores eléctricos, a condução térmica é originada pelas oscilações longitudinais da estrutura molecular. No caso dos metais, a condução do calor é originada pelo movimento dos electrões livres, e por último, nos gases, a condução é gerada pela colisão elástica entre moléculas [43].

A transmissão de calor por condução através da envolvente dos edifícios é condicionada pelo coeficiente de condutibilidade térmica dos materiais (λ), da espessura dos materiais (e) e do gradiente térmico entre os elementos (ΔT). A condução de calor através de um elemento é caracterizada pela sua condutância térmica (K), razão entre a condutibilidade térmica e espessura, tal como mostra a Equação 2.3. A unidade SI da condutância é $W/m^2 \cdot ^\circ C$. O inverso da condutância é a resistência térmica (R), sendo as suas unidades SI $m^2 \cdot ^\circ C/W$. O fluxo de calor em regime permanente (Q) é determinado pelo produto da condutância (K) pela área de um determinado elemento (A) e o gradiente térmico entre as suas faces ($\theta_1 - \theta_2$), tal como se expressa pela lei de Fourier (Equação 2.4). A unidade SI do fluxo de calor é W .

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

em que,

K - condutância térmica do elemento [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

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

λ - coeficiente de condutibilidade térmica do elemento [$W/m \cdot ^\circ C$];

e - espessura do elemento [m].

$$Q_c = K \times A \times (\theta_1 - \theta_2) \quad (2.4)$$

em que,

Q_c - fluxo de calor por condução em regime permanente através do elemento [W];

K - condutância do elemento [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

A - área da secção do elemento [m^2];

θ_k - temperaturas nas faces do elemento [$^\circ C$].

ii) Convecção

A convecção é um mecanismo de transmissão de calor associado ao movimento dos fluídos, podendo estes ser líquidos e gasosos. Para o caso dos edifícios, o fluído é gasoso, sendo o ar o gerador das trocas de calor por convecção. As convecções gasosas podem ser de dois tipos: convecção ar-sólido, entre as faces dos elementos e o ambiente (interior e exterior); e convecção ar-ar, entre massas de ar a diferentes temperaturas. A convecção ar-ar está associada à ventilação dos espaços [43].

No caso da convecção ar-sólido, as trocas de calor são normalmente traduzidas por coeficientes tabelados (ISO 6946 [44]), designados de resistências térmicas superficiais. Para obter o fluxo de calor por convecção ar-sólido, recorre-se à Equação 2.5.

$$Q_{a-s} = \frac{1}{R_{sk}} \times A_s (\theta_f - \theta_s) \quad (2.5)$$

em que,

Q_{a-s} - fluxo de calor por convecção ar-sólido [W];

R_{sk} - resistências térmicas superficiais (i - interior; e - exterior) [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

A_s - área do sólido [m^2];

θ_f - temperatura do fluído [$^\circ C$];

θ_s - temperatura do sólido [$^\circ C$].

No caso da convecção ar-ar, o fluxo de calor depende da taxa de renovação do ar (R_{ph}), do volume e do gradiente térmico entre o interior e o exterior (ver Equação 2.6).

$$Q_{a-a} = \rho \times c_p \times R_{ph} \times V (\theta_i - \theta_e) \quad (2.6)$$

em que,

Q_{a-a} - fluxo de calor por convecção ar-ar [W];

ρ - massa específica do ar [kg/m^3];

c_p - calor específico do ar [$J/kg \cdot ^\circ C$];

R_{ph} - Taxa de renovação de ar por hora [m^3/h];

V - volume do espaço [m^3];

θ_i - temperatura interior [$^\circ C$];

θ_e - temperatura exterior [$^\circ C$].

Apesar da ventilação ser favorável do ponto de vista da qualidade do ar, esta resulta em perdas e ganhos de calor que podem ter implicações directas no conforto térmico, por conseguinte, deverá ser um processo a controlar, com valores recomendados para as taxas de renovação de ar em edifícios [43].

iii) Radiação

A radiação térmica trata-se de um fenómeno electromagnético, de natureza ondulatória e que ocorre sempre que se estabelece uma diferença de temperaturas entre duas superfícies, independentemente do meio que as separa. Nos edifícios, todas as superfícies dos elementos, emitem e recebem radiação térmica de outras superfícies que estejam no seu campo visual. A radiação que chega a uma determinada superfície, é em parte absorvida e a restante reflectida. A transmissão de calor por radiação é dada pela Equação 2.7.

$$Q_r = h_{r2-1} \times A_1(\theta_2 - \theta_1) \quad (2.7)$$

em que,

Q_r - fluxo de calor por radiação entre dois elementos [W];

h_{r2-1} - coeficiente de condutância térmica superficial por radiação entre a superfície 2 e 1 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

A_1 - área do elemento 1 [m^2];

θ_1 - temperatura do elemento 1 [$^\circ C$];

θ_2 - temperatura do elemento 2 [$^\circ C$].

Além da parcela absorvida e reflectida, existe ainda uma parcela transmitida no caso de elementos envidraçados. No entanto, para comprimentos de onda longa os envidraçados são considerados opacos, uma vez que o coeficiente de transmissão da superfície associado é praticamente nulo. O mesmo não se passa para a radiação solar, que apresenta um comprimento de onda curto. Uma importante parcela será então transmitida através dos envidraçados para o interior dos edifícios, que depois é transmitida para as diversas superfícies por trocas de convecção e de radiação de longa onda, dando origem a ganhos solares [43].

2.7.3 Coeficiente de transmissão térmica

Através dos três mecanismos acima descritos, é possível quantificar a totalidade da transmissão térmica através de um elemento construtivo, através de um parâmetro denominado coeficiente de transmissão térmica (U), e calculado segundo a Equação 2.8. O respectivo fluxo de calor (Q), é calculado através da Equação 2.9.

A expressão do fluxo de calor através de um elemento construtivo, é utilizada para contabilizar as trocas de calor em zonas correntes de elementos de construção, onde é possível admitir a unidireccionalidade do fluxo de calor, que neste caso é perpendicular ao elemento. No entanto, e uma vez que na envolvente dos edifícios existem inúmeras heterogeneidades, o fluxo de calor irá dar-se em mais do que uma direcção. Essas heterogeneidades constituem as pontes térmicas, sendo o seu conceito e importância abordados no subcapítulo seguinte.

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \sum R_k} \quad (2.8)$$

em que,

U - coeficiente de transmissão térmica de um elemento [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

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

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

R_k - resistência térmica do elemento [$m^2 \cdot ^\circ C/W$].

$$Q = U \times A(\theta_i - \theta_e) \quad (2.9)$$

em que,

Q - fluxo de calor através de um elemento [W];

U - Coeficiente de transmissão térmica através de um elemento [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

A - área da secção do elemento [m^2];

θ_i - temperatura interior [$^\circ C$];

θ_e - temperatura exterior [$^\circ C$].

2.7.4 Pontes térmicas

Ponte térmica é o termo vulgarmente utilizado para referenciar fenómenos localizados de transferência de calor na envolvente de um edifício, em que existe uma redução das propriedades de isolamento térmico desses locais face à zona corrente. As pontes térmicas podem ser planas (ocorrendo ao longo de uma superfície) ou lineares (ocorrendo ao longo de um comprimento). Nas pontes térmicas não é possível admitir a unidireccionalidade de fluxo de calor, pelo que, não se pode fazer uma abordagem de cálculo convencional de resistência térmica uniforme. Nas zonas de pontes térmicas, as linhas de fluxo de calor deixam de ser rectilíneas (fluxo unidireccional), e adoptam as direcções que oferecem menor resistência à passagem do calor, transformando o processo em bidimensional ou tridimensional. As pontes térmicas podem ser originadas em várias situações: transições entre diferentes materiais, alterações de espessuras, encontros, ligações, entre outras (ver Figura 2.20) [43].

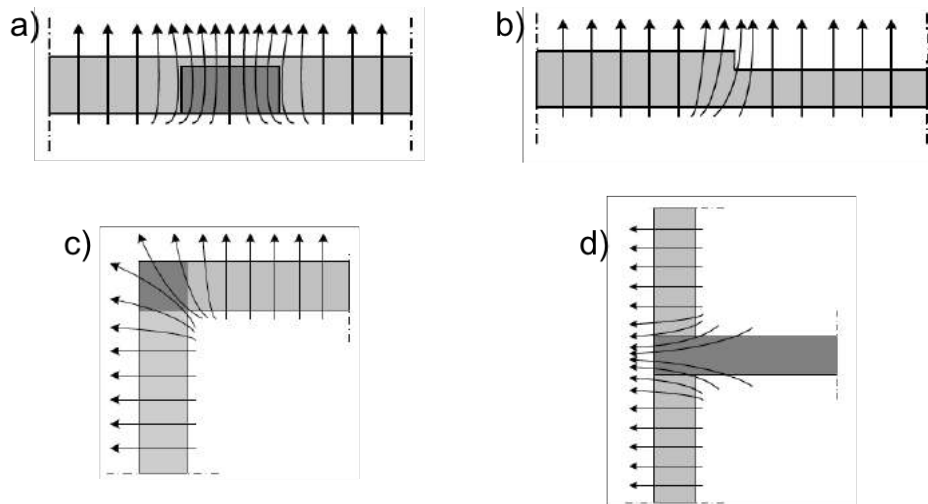


Figura 2.20 - Pontes térmicas: a) devido à transição entre diferentes materiais; b) devido a alterações de espessura; c) devido a um pilar num cunhal; d) devido à ligação da laje com a fachada [43].

O resultado produzido pelas pontes térmicas traduz-se num acréscimo de trocas de calor entre o interior e o exterior, elevando os consumos energéticos e produzindo uma distribuição heterogénea de temperaturas nos paramentos. Esta situação potencia o risco de condensações e o consequente aparecimento de patologias construtivas como as humidades em fachadas (termoforese) e nos paramentos interiores, resultando no aparecimento de bolores que podem levar à insalubridade do ar e do ambiente envolvente (ver Figuras 2.21 e 2.22).



Figura 2.21 - Patologia construtiva originada por pontes térmicas [45].



Figura 2.22 - Aparecimento de bolores potenciados por humidades em zona de ponte térmica da caixa de estore [46].

O aparecimento de fungos e bolores, resultantes de fenómenos de condensação, além de originarem gastos adicionais de manutenção, levam a uma redução da vida útil dos materiais e redução do conforto. As patologias relacionadas com as humidades são altamente indesejadas uma vez que provocam a degradação dos edifícios e conseqüentemente a diminuição da sua vida útil.

Para mitigar os efeitos das pontes térmicas, além de promover a ventilação do ar, é necessário tomar medidas preventivas antes da sua execução, ou correctivas caso tenham sido mal executadas. No caso dos edifícios pode-se recorrer a forras térmicas para minimizar os efeitos de pontes térmicas em vigas, pilares e lajes, ou através da colocação de um sistema de isolamento térmico pelo exterior como a solução em ETICS (do inglês *External Thermal Insulation System*).

As pontes térmicas dos painéis sanduíche a serem estudadas nesta dissertação, são originadas pelas ligações entre painéis, sendo estas do tipo linear. O cálculo e a quantificação do coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ), originado pelas ligações dos painéis sanduíche, será abordado no capítulo 4 desta dissertação, com recurso a software de modelação de transferências de calor.

3 Campanha experimental

3.1 Introdução

O presente capítulo, que descreve a campanha experimental realizada, é um dos dois principais capítulos desta dissertação, que no final traduzirá o comportamento térmico das soluções de painéis sanduíche em estudo. Numa primeira parte, serão abordados os procedimentos experimentais existentes para a determinação da condutibilidade térmica de materiais, é feita uma descrição de como se processam os ensaios adoptados, caracterizadas as amostras disponibilizadas e, por fim, é apresentado o planeamento dos ensaios experimentais. Numa segunda parte, serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais realizados. Por último, são tecidas algumas considerações sobre o decurso de toda a campanha experimental.

3.2 Métodos experimentais para obtenção de condutibilidades térmicas de materiais

A condutibilidade térmica é a principal característica de um isolante térmico, e a maneira mais indicada de a determinar é através de um ensaio experimental padronizado [46]. Assim sendo, existem vários métodos para determinar a condutibilidade térmica de um material, geralmente classificados como: métodos estacionários e métodos transientes. No entanto, na prática de engenharia corrente, estes métodos raramente são aplicados uma vez que necessitam de recursos, tempo disponível e pessoas qualificadas para tal. Alternativamente à determinação da condutibilidade térmica em laboratório, são comumente utilizados valores tabelados provenientes de outras medições para os cálculos de projecto [41].

Apesar dos ensaios laboratoriais para a determinação de condutibilidades térmicas consumirem muito tempo e recursos, foram ainda assim realizados no presente estudo, possibilitando uma caracterização mais precisa das propriedades dos materiais. Desta forma, para a avaliação do comportamento térmico dos painéis sanduíche, foram utilizados dados experimentais dos materiais a empregar nas diversas soluções em estudo.

Como já foi referido no capítulo 2, de um modo geral, a condutibilidade térmica dos materiais depende da massa volúmica, temperatura, teor de humidade, bem como dos seus constituintes e vazios presentes na sua estrutura. Assim sendo, depende da estrutura atómica e molecular do material, porosidade, anisotropia e defeitos presentes no material. As condições em que os materiais são produzidos, a maneira como estão armazenados antes da sua aplicação e a idade, desempenham também um papel importante na condutibilidade térmica que estes materiais irão apresentar em serviço.

De um modo geral, a condutibilidade térmica dos materiais aumenta com o aumento da temperatura e com o aumento do teor de humidade. O aumento da temperatura por um lado, excita as cadeias de moléculas e favorece as trocas de energia, por outro lado, a água presente nos seus vazios inicialmente preenchidos com ar, favorece as trocas por condução, elevando assim a condutibilidade térmica do material [42].

A fiabilidade de um determinado método para a determinação da condutibilidade térmica depende de vários factores. Estes podem estar relacionados com a velocidade a que são efectuados, das condições do meio ambiente necessárias para a sua realização, da própria natureza do material que está a ser estudado, das dimensões, da forma e do estado em que o material das amostras se encontra.

3.2.1 Métodos estacionários

Dentro dos métodos estacionários para obtenção de condutibilidades térmicas, o método do medidor de fluxo de calor (HFM - do inglês *heat flow meter*) e o da placa quente (GHP - do inglês *guarded hot plate*), fornecem resultados bastante precisos (com erros máximos na ordem dos 3%) para medições efectuadas em estado seco [47].

Estes métodos consistem em estabelecer um gradiente térmico em equilíbrio através de uma amostra colocada entre duas placas isotérmicas, uma mais quente que outra, estabelecendo assim, o gradiente térmico pretendido. Uma vez estabelecido o gradiente térmico desejado, são feitas medições, e o valor da condutibilidade térmica é calculado pela lei de Fourier a uma dimensão (Equação 2.4), sendo a quantidade de energia fornecida à placa quente proporcional à condutibilidade térmica do material.

Note-se que a amostra deve ter dimensões consideráveis e superfícies lisas, devendo estas estar completamente em contacto com as placas. Segundo Franco [41], o deficiente ajuste entre as placas e as superfícies da amostra é a principal fonte de erros na obtenção de resultados.

É ainda de salientar que, antes de fazer um determinado ensaio para um dado gradiente térmico, é necessário proceder-se ao ensaio de uma amostra de calibração. Esta amostra, com condutibilidade térmica conhecida em função da temperatura média a que se encontra, irá permitir determinar um parâmetro de calibração, que posteriormente será usado para o cálculo da condutibilidade térmica do material que se pretende ensaiar.

Embora estes métodos forneçam dados bastante precisos, apresentam vários inconvenientes como o preço do equipamento, os recursos dispendidos (energia e água para o arrefecimento das placas), bem como o tempo necessário para se atingir o estado de equilíbrio.

O método HFM obedece às normas europeias ISO 8301 [48] e NP EN 12667 [49], e à norma americana ASTM C518-98 [50], e o método GHP obedece às normas europeia ISO 8302 [51] e NP EN 12667 [49], e à norma americana ASTM C177-97 [52]. Nas Figuras 3.1 e 3.2, podem-se observar esquemas dos métodos HFM e GHP respectivamente. No método do HFM o fluxo de calor dá-se através de uma amostra, da placa mais quente para a placa mais fria. No caso do método GHP são necessárias duas amostras e o gradiente térmico estabelece-se entre elas da superfície mais quente para a superfície mais fria.

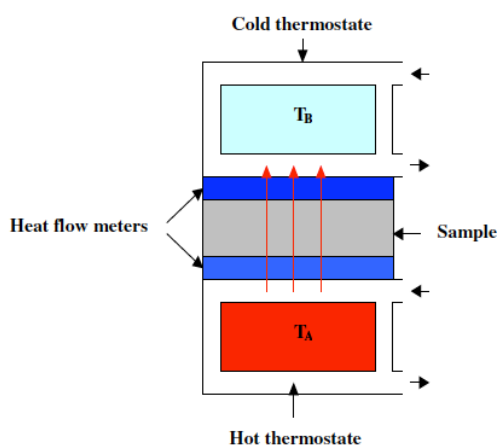


Figura 3.1 - Esquema do método HFM [41].

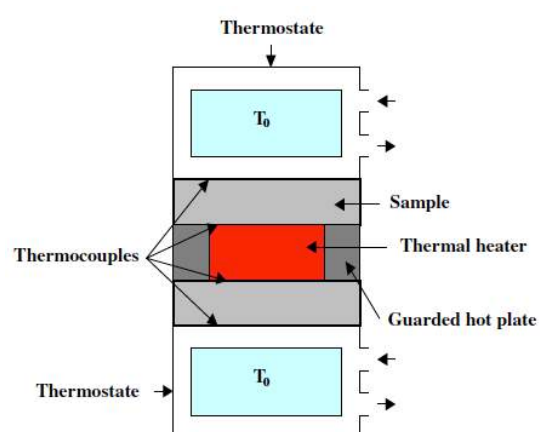


Figura 3.2 - Esquema do método GHP [41].

3.2.2 Métodos transientes

Os métodos transientes, ao contrário dos métodos estacionários que medem a resposta de um fluxo de calor constante através de uma amostra, medem a resposta a um impulso de calor que é aplicado à amostra, de modo a criar um fluxo de calor. Os métodos transientes distinguem-se dos estacionários principalmente pelo curto espaço de tempo que demora para obter os resultados desejados, no entanto, o erro associado é maior (na ordem dos 10%).

Os métodos transientes, utilizam um procedimento em que a amostra se encontra em equilíbrio térmico com o meio ambiente e, através de uma sonda, é-lhe aplicada um impulso de calor. Durante este processo, um aparelho ligado à sonda monitoriza as diferenças registadas na temperatura e determina a sua condutibilidade térmica [41].

Existem vários tipos de métodos transientes, entre os quais, os mais utilizados são o método de fonte plana (TPS - do inglês *transient plane source*), o método de fonte plana modificado (MTPS - do inglês *modified transient plane source*) e o método da fonte linear (TLS - do inglês *transient line source*). No método TPS (ilustrado na Figura 3.3) é colocada uma sonda plana de dupla face no interior de uma amostra previamente cortada, enquanto que no método MTPS (ver Figura 3.4) a sonda é apenas de uma face e colocada em contacto com a amostra que se pretende ensaiar. No método TLS (ilustrado na Figura 3.5) é utilizada uma sonda de agulha que irá fornecer um impulso de calor ao longo de uma profundidade da amostra.

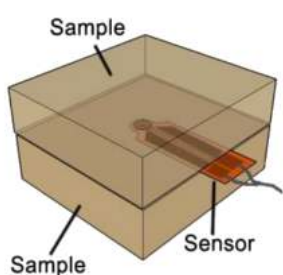


Figura 3.3 - Esquema do método TPS [53].

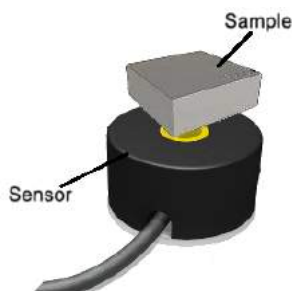


Figura 3.4 - Esquema do método MTPS [53].

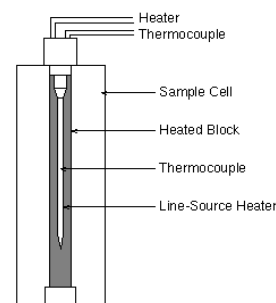


Figura 3.5 - Esquema do método TLS [54].

3.3 Descrição dos ensaios realizados

Uma vez que a escolha dos ensaios está condicionada pelos equipamentos existentes no LC do IST, foi ainda assim possível realizar os ensaios através dos dois métodos apresentados, um método estacionário, e um método transiente. O método estacionário realizado foi o HFM com recurso ao aparelho da Holometrix, modelo Rapid-k (ver Figura 3.6), e o método transiente foi o MTPS (sonda plana) com recurso ao dispositivo da Applied Precision Ltd., modelo Isomet 2114 (ver Figura 3.7).

Neste subcapítulo serão descritos os aparelhos utilizados, bem como os procedimentos a efectuar para realizar ensaios e obtenção dos valores da condutibilidade térmica. Num primeiro subcapítulo será abordado o aparelho e os procedimentos para realizar o ensaio e obter as condutibilidades térmicas dos materiais com recurso ao método estacionário e, no segundo, através do método transiente.

3.3.1 Método estacionário através do equipamento Rapid-k

Para determinar a condutibilidade térmica dos materiais através de um método estacionário, recorreu-se ao método HFM, efectuado com recurso ao aparelho modelo Rapid-k da Holometrix (Figura 3.6). Na Figura 3.6 é possível observar que o aparelho é constituído por uma câmara de ensaio na parte superior e por um painel de instrumentos na parte inferior. Neste painel é possível escolher as temperaturas das faces superior e inferior da amostra e, através de um botão rotativo, seleccionar a grandeza que se pretende registar (espessura [cm], fluxo de calor [mV] e temperaturas superior e inferior das placas [mV]). Para tal, basta consultar o pequeno ecrã que se encontra imediatamente por baixo. Existem ainda botões de ligar/desligar o equipamento e “reset” para dar início ao ensaio.

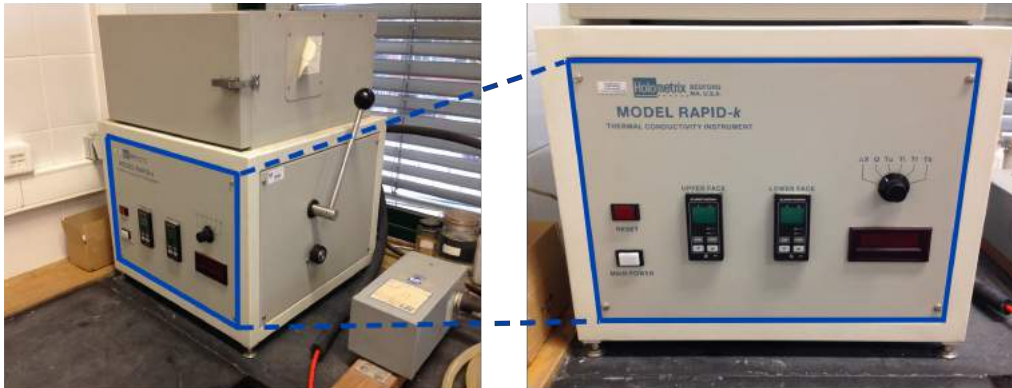


Figura 3.6 - Aparelho HFM modelo Rapid-k da Holometrix com pormenor do painel de instrumentos.

Segundo o manual de operação e manutenção do aparelho [55], as amostras têm de ter dimensões aproximadas de 30x30 cm, com uma espessura entre os 0,5 e os 10 cm, sendo que a área analisada são cerca de 10x10 cm na zona central. A gama de condutibilidades térmicas que é possível determinar, encontra-se entre os 0,015 e os 0,43 W/m.K, apresentando um erro associado entre os 2 e os 5%. É ainda referido que se as amostras tiverem humidade, devem ser envoltas em película de celofane.

Para determinar a condutibilidade térmica de um material, é no entanto necessário efectuar um primeiro ensaio a uma amostra de calibração. Esta amostra (ver Figura 3.8 a)), feita de uma lã mineral e com um comportamento térmico conhecido em função da sua temperatura, permite calcular um parâmetro de calibração que avalia as condições em que o aparelho está a funcionar. Posteriormente, através desse parâmetro de calibração, é possível determinar a condutibilidade térmica dos materiais que se pretendem ensaiar. Uma vez que a condutibilidade térmica da amostra de calibração varia com a temperatura, é necessário efectuar um ensaio de calibração para cada gradiente térmico que se pretende impor às amostras. No entanto, e apesar do manual de operação apontar erros de apenas 1% para a repetição de ensaios nas mesmas condições, foi constatado que as condições higrométricas envolventes em que o aparelho se encontra influenciam também o parâmetro de calibração. Por esse motivo, e com intuito de obter resultados mais precisos, foram sempre efectuados ensaios de calibração cada vez que se dava início a uma nova série de ensaios.

As conversões das leituras efectuadas em miliVolt [mV] (fluxo superior, e temperaturas das placas superior e inferior) podem ser efectuadas com recurso a uma tabela presente no anexo do manual de operação do aparelho, juntamente com os valores da condutibilidade térmica em função da temperatura da amostra de calibração [55].

Para se efectuar um ensaio devem-se seguir os seguintes passos:

- conectar ao equipamento as mangueiras de abastecimento e despejo do líquido refrigerante;
- colocar a amostra dentro da câmara de ensaio, ajustando as placas à amostra através de uma manivela e uma rosca presentes na parte lateral direita do equipamento;
- conectar a fonte de alimentação do aparelho;
- dar início ao abastecimento de líquido refrigerante;
- ligar o equipamento;
- dar início ao ensaio pressionando o botão “reset”;
- escolher as temperaturas desejadas nas placas superior (Tu) e inferior (Tl) de modo a estabelecer o gradiente térmico pretendido entre as faces da amostra;
- esperar cerca de 1 hora (pode ser necessário mais tempo consoante o material, espessura, massa volúmica e humidade, podendo demorar 6 horas ou mais) e efectuar as leituras;
- o ensaio termina se a amostra se encontrar em equilíbrio. Para tal, em duas leituras consecutivas e espaçadas de pelo menos 15 minutos, tem de se verificar uma variação inferior a 1% de Q/(Tu-Tl) entre elas (para $\Delta t > 15\text{min}$: $Q/(Tu-Tl) < 1\%$). Caso contrário, devem-se efectuar leituras espaçadas de pelo menos 15 minutos até que se atinja o estado de equilíbrio verificado pela condição anterior.

Posteriormente ao ensaio é necessário efectuar alguns cálculos até que se consiga determinar a condutibilidade térmica dos materiais. Para tal, é necessário converter as temperaturas lidas em mV em °C. A conversão foi feita através da Equação 3.1, obtida através da tabela de pontos fornecida em anexo com o manual do aparelho [55], e apresentando uma correlação de 1,0. Com base nesta equação é possível calcular a temperatura na placa superior (Tu) e na placa inferior (Tl), de modo a calcular a temperatura média (Tmean) da amostra, através da Equação 3.2. Por sua vez, a condutibilidade térmica da amostra de calibração (λ_{cal}) pode ser calculada com base na Equação 3.3. Esta equação foi obtida também, através de uma tabela de pontos fornecida em anexo com o manual do aparelho, apresentando um coeficiente de correlação de 1,0. O parâmetro de calibração (N), pode então ser calculado através da Equação 3.4 e, por fim, a condutibilidade térmica das amostras (λ) através da Equação 3.5.

$$T_c = 24,332 \times T_{mV} + 0,7704 \quad (3.1)$$

em que,

T_c - temperatura em graus Celsius [°C];

T_{mV} - temperatura em miliVolt [mV].

$$T_{mean} = (Tu + Tl)/2 \quad (3.2)$$

em que,

Tmean - temperatura média na amostra [°C];

Tu - temperatura na placa superior [°C];

Tl - temperatura na placa inferior [°C].

$$\lambda_{cal} = 0,001 \times T_{mean} + 0,0317 \quad (3.3)$$

em que,

λ_{cal} - condutibilidade da amostra de calibração [W/m.°C];

T_{mean} - temperatura média na amostra [°C].

$$N = \frac{\lambda_{cal} / \Delta x_{cal}}{Q / \Delta T} \quad (3.4)$$

em que,

N - parâmetro de calibração [W/m².°C];

λ_{cal} - condutibilidade térmica da amostra de calibração à temperatura média (T_{mean}) [W/m.°C];

Δx_{cal} - espessura da amostra de calibração [m];

Q - fluxo de calor que atravessa a amostra [mV];

ΔT - gradiente de temperatura estabelecido na amostra [mV].

$$\lambda = N \times \Delta x \times \frac{Q}{\Delta T} \quad (3.5)$$

em que,

λ - condutibilidade térmica da amostra [W/m.°C];

N - parâmetro de calibração [W/m².°C];

Δx - espessura da amostra de calibração [m];

Q - fluxo de calor que atravessa a amostra [mV];

ΔT - gradiente de temperatura estabelecido na amostra [mV].

3.3.2 Método transiente através do equipamento Isomet 2114

O procedimento para determinar a condutibilidade térmica de materiais, através de um método transiente, tal como foi descrito no subcapítulo 3.2.2, e ao contrário dos métodos estacionários, é bastante mais simples e rápido.

Para executar este método recorreu-se ao dispositivo Isomet 2114 da Applied Precision Ltd., tal como se pode observar na Figura 3.7. Este dispositivo portátil, é composto por um módulo de processamento com um pequeno ecrã, e a ele, podem-se ligar diversas sondas compatíveis. Neste caso foi utilizada uma sonda plana de 1 lado (MTPS) com a capacidade de medir condutibilidades térmicas entre os 0,04 e os 6 W/m.°C. As leituras apresentam um erro associado de 5% de leitura mais 0,001 W/m.°C na gama de medição entre os 0,04 e os 0,7 W/m.°C, e 10 % de leitura na gama de medição entre os 0,7 e os 6 W/m.°C. Esta sonda permite ainda medir a capacidade térmica volumétrica de amostras entre os $4,0 \times 10^4$ e os $1,5 \times 10^6$ J/m³.°C com um erro associado de 15% de leitura mais 1×10^3 J/m³.°C. As temperaturas apresentadas apresentam

um erro associado de 1°C [56]. Além da condutibilidade térmica e da capacidade térmica volumétrica, o dispositivo apresenta ainda a difusividade térmica que relaciona estes dois últimos parâmetros.

O procedimento para efectuar o ensaio consiste em:

- conectar a sonda ao módulo de processamento;
- ligar o dispositivo;
- colocar a sonda sobre o material que se pretende ensaiar;
- escolher a gama de medição que se pretende;
- dar início ao ensaio;
- efectuar as leituras quando o ensaio terminar (normalmente demora entre os 20 e os 30 minutos);

Note-se o facto de ser necessário colocar um material isolante térmico entre o suporte onde se realizam os ensaios e a amostra. Este procedimento é realizado para neutralizar as trocas de calor entre a amostra e a bancada (de pedra e com temperatura superficial inferior) onde se realizaram os ensaios. É ainda de salientar que, no caso de a condutibilidade térmica do material que está a ser ensaiado estiver entre duas gamas de medição, pode suceder a que o aparelho não consiga obter todos os resultados. Neste caso, deve-se ajustar a gama de medição para a superior ou inferior consoante o caso, e repetir o procedimento experimental. No caso de se executar um ensaio com humidade na amostra, deve-se envolvê-la em película de celofane.



Figura 3.7 - Aparelho MTPS Isomet 2114 da Applied Precision, Ltd.

3.4 Caracterização das amostras

Nesta dissertação encontram-se em estudo 4 tipos de soluções de painéis sanduíche, todas com lâminas de GFRP, sendo que os núcleos que as compõem são compostos por um dos seguintes materiais isolantes: favos de mel em PP (em diante designado PP honeycombs), madeira de Balsa, espuma de tereftalato de polietileno (PET) e espuma rígida de poliuretano (PUR) (ver Figura 3.8). Para além destas amostras, foi ainda testada para as diferentes condições de ensaio a amostra de calibração do Rapid-k (Figura 3.8). Apenas foram disponibilizadas para ensaios de caracterização térmica, 1 amostra de cada tipo de material com as dimensões, pesos volúmicos e teores de humidade presentes na Tabela 3.1. O teor de humidade das amostras apresentado foi obtido por pesagem das amostras e com base na posterior secagem e saturação completa, procedimento este que será descrito no subcapítulo seguinte. Para calcular a percentagem do teor de humidade (w) recorreu-se à fórmula da norma NP EN 1097-5:2002 [57], presente na Equação 3.6. Como se pode observar, todas as amostras se encontravam praticamente secas. Juntamente com as amostras foram fornecidas as condutibilidades térmicas apontadas pelos fabricantes, como se pode observar na Tabela 3.1. Salienta-se o facto de a condutibilidade térmica do GFRP ser a da resina que o compõe, podendo a incorporação das fibras alterar o seu valor.

$$w = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} \times 100 \quad (3.6)$$

em que,

w - teor de humidade da amostra [%];

m_{wet} - massa da amostra húmida [kg];

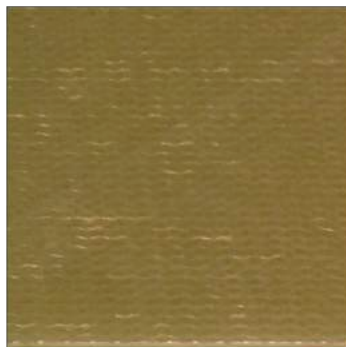
m_{dry} - massa da amostra seca [kg].

Tabela 3.1 - Características das amostras fornecidas.

Amostra	Área (mm x mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Massa volúmica (kg/m³)	w (%)	Condutibilidade térmica fornecida pelo fabricante (W/m. °C)
GFRP	299 x 299	8	1249,0	≈ 1750	0,1	0,3500
PP honeycombs	301 x 299	92	876,5	≈ 110	0,3	0,1400
Balsa	300 x 298	49	424,5	≈ 100	6,5	0,0480
PET	300 x 300	24	209,4	≈ 100	0,9	0,0320
PUR	298 x 296	92	573,0	≈ 70	1,0	0,0250



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 3.8 - Amostras: a) lâã mineral (calibração do Rapid-k); b) lâmina de GFRP; c) favos de mel em PP; d) madeira de balsa; e) espuma de PET; f) espuma rígida de PU (PUR).

3.5 Plano de ensaios experimentais

No presente trabalho, decidiu-se realizar 2 campanhas experimentais para determinar o comportamento térmico das amostras face a duas variações nas condições de ensaio: i) temperatura; e ii) teor de humidade. De seguida, abordar-se-ão os procedimentos a adoptar em cada campanha experimental.

i) Temperatura

A campanha experimental para avaliar o comportamento térmico dos materiais em função da temperatura decorreu nos meses de Julho e Agosto de 2013, tendo sido realizados ensaios às amostras de acordo com os procedimentos descritos no subcapítulo anterior.

No caso do método estacionário para estudar este comportamento, foram realizados ensaios com gradientes térmicos de 10, 20 e 30°C, tendo estes sido estabelecidos com uma temperatura de 30°C na placa inferior e temperaturas de 40, 50 e 60°C na placa superior. Salienta-se o facto de não se terem adoptado temperaturas mais baixas, uma vez que estas estão condicionadas pela temperatura do líquido refrigerante utilizado que, neste caso, foi água canalizada. Escolheu-se então a temperatura mínima de ensaio de 30°C, por se terem efectuado os ensaios no Verão e por se ter constatado que, por vezes, a água saía quente, podendo assim, condicionar o processo de equilíbrio de temperaturas no aparelho.

No caso do método transiente, e uma vez que não é possível determinar as temperaturas a que o ensaio é realizado, optou-se por fazer ensaios em dias e horas diferentes por forma a que se obtivessem resultados para diferentes temperaturas médias na amostra.

Os ensaios foram sempre realizados primeiro com o Isomet 2214, uma vez que após saírem do Rapid-k se encontravam substancialmente mais quentes, demorando bastante tempo até que a sua temperatura equilibrasse com as condições ambientais do laboratório.

ii) Teor de humidade

A campanha experimental para avaliar o comportamento térmico dos materiais em função do teor de humidade decorreu entre os meses de Novembro de 2013 e Fevereiro de 2014, tendo sido os ensaios realizados de acordo com os procedimentos descritos no subcapítulo anterior e com procedimentos de preparação que se descrevem de seguida. Para realizar este estudo estudou-se o comportamento térmico dos materiais com diferentes teores de humidade entre o estado seco e o estado saturado.

Para estudar o comportamento térmico em função da humidade, e uma vez que as amostras se encontravam praticamente secas, procedeu-se à sua secagem completa em estufa a 60°C com ventilação para o exterior (para permitir a extracção de humidade), como se pode observar na Figura 3.9. As amostras permaneceram na estufa até que se verificasse uma variação diária na massa inferior a 1%. Note-se que, após a variação ser inferior a 1%, as amostras só saíram da estufa momentos antes de serem ensaiadas, evitando assim que voltassem a ganhar humidade. Após a secagem registaram-se os dados presentes na Tabela 3.2.



Figura 3.9 - Estufa a 60°C ventilada para o exterior com pormenor do interior.

Após a realização dos ensaios com 0% de humidade, procedeu-se à saturação completa das amostras. Para tal, submergiram-se as amostras em água dentro de uma caixa, como se pode observar na Figura 3.10. Uma vez que a densidade dos materiais em estudo (excepto o GFRP) é bastante inferior à da água, foi necessário recorrer a pesos para que estas ficassem submersas. As amostras foram pesadas todos os dias até que estivessem completamente saturadas. Apenas se consideraram amostras completamente saturadas, as que apresentassem uma taxa de variação na massa inferior a 1% em dias consecutivos. As massas das amostras completamente saturadas encontram-se na Tabela 3.2.

Para efectuar os ensaios com diversos teores de humidade, as amostras foram envolvidas em película de celofane como se mostra na Figura 3.10. Desta forma garantiu-se que estas não danificavam os aparelhos tal como foi referido na descrição dos ensaios, e assegurou-se que o teor de humidade na amostra não alterava significativamente.

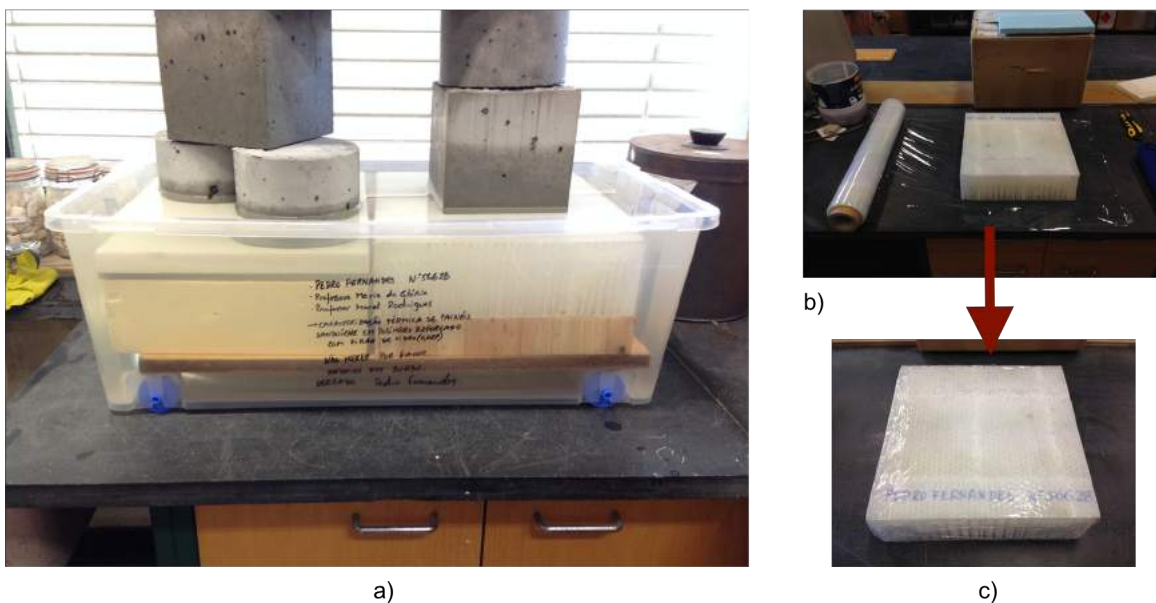


Figura 3.10 - a) amostras submersas em água para ficarem completamente saturadas; b) amostra a ser envolta em película de celofane; c) amostra pronta.

Depois de efectuados os ensaios às amostras completamente saturadas, houve a necessidade de reduzir o seu teor de humidade. Para tal, retiraram-se as películas das amostras e foram colocadas novamente na estufa a 60°C com ventilação para o exterior. Enquanto estiveram na estufa foi constantemente monitorizada a sua massa, para que, assim que atingissem uma massa correspondente a um teor de humidade que se pretendesse estudar, fossem retiradas. Quando tal se verificava, eram retiradas da estufa e envoltas em película de celofane novamente. Posteriormente, e antes da realização do novo ensaio, aguardou-se uma semana, de modo a uniformizar a humidade na amostra. Este processo foi repetido até que todos os teores de humidade em cada amostra estivessem ensaiados.

Durante a realização desta campanha experimental, constatou-se que a película de celofane efectivamente conservava a humidade da amostra no seu interior, tendo-se registados variações mínimas de massa passado uma semana de espera.

Tabela 3.2 - Massa das amostras secas e saturadas.

<i>Amostra</i>	<i>Massa seca (g)</i>	<i>Massa saturada (g)</i>	<i>Massa H₂O absorvida (g)</i>	<i>H₂O absorvida (%)</i>
GFRP	1248,3	1253,1	4,8	0,4%
PP honeycombs	874,2	1135,6	261,4	29,9%
Balsa	398,5	2460,5	2062,0	517,4%
PET	208,6	298,3	89,7	15,6%
PU	567,2	655,5	88,3	43,0%

Pela observação da Tabela 3.2, conclui-se que a amostra de GFRP é impermeável e a massa de água absorvida não é mais do que, humidade que se encontrava à sua superfície. Devido a este facto, conclui-se que este material não terá a sua condutibilidade térmica influenciada pela presença de humidade no seu interior. Assim sendo, não se realizaram ensaios com variação do teor de humidade para esta amostra.

Os ensaios no aparelho Rapid-k foram realizados para um gradiente térmico imposto de 20°C, com a temperatura da placa inferior a 30°C e a temperatura da placa superior a 50°C. Apesar dos ensaios terem sido realizados numa altura com as condições ambientes mais frias, optou-se por manter a temperatura da placa inferior a 30°C, permitindo assim, comparar os novos resultados com os obtidos na primeira campanha experimental.

Salienta-se o facto de os ensaios terem sido efectuados primeiro com o Isomet 2114, uma vez que o ensaio no Rapid-k aumentava substancialmente a temperatura das amostras, tornando assim, o processo de equilíbrio com as condições ambientais do laboratório bastante demoradas. Adicionalmente, a humidade na amostra seria menor devido a pequenas perdas, e a distribuição de humidade no seu interior deixaria de ser uniforme.

3.6 Comportamento térmico em função da temperatura

Neste subcapítulo serão apresentados e analisados os resultados das condutibilidades térmicas dos materiais em função da temperatura, obtidos através dos aparelhos Rapid-k e Isomet 2114. Adicionalmente, serão apresentados e analisados também as capacidades térmicas volumétricas e difusividades térmicas para diferentes temperaturas, obtidos através do aparelho Isomet 2114. No final, será feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos por cada um dos equipamentos, podendo assim, avaliar-se qual a diferença de condutibilidades térmicas apresentadas por cada um dos dispositivos para a mesma temperatura.

3.6.1 Resultados obtidos através do Rapid-k

Durante esta campanha experimental, tal como foi abordado no subcapítulo anterior, cada uma das amostras foi ensaiada para um determinado gradiente térmico, estabelecido através de diferentes temperaturas nas placas superior e inferior do aparelho. A Figura 3.11 b) a f), ilustra os ensaios das amostras para os diferentes gradientes térmicos no Rapid-k, e na Figura 3.11 a) o ensaio de calibração do Rapid-k com a amostra de lã mineral. Este ensaio de calibração foi efectuado para cada um dos gradientes térmicos, uma vez que a condutibilidade térmica da amostra de calibração varia também em função da sua temperatura média.

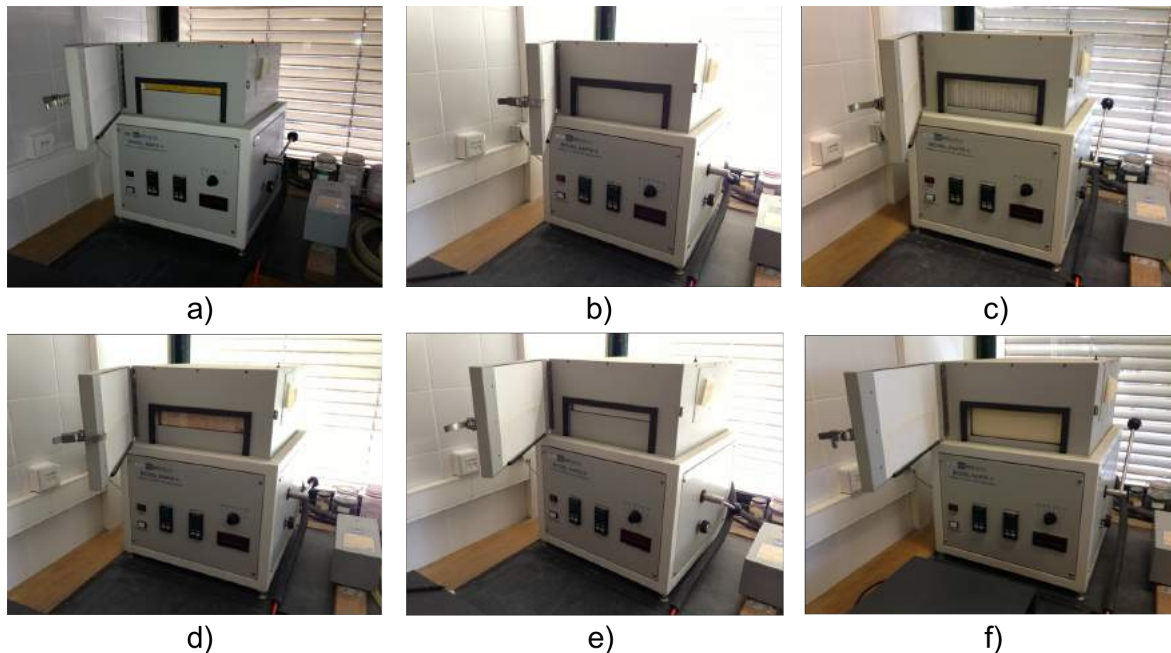


Figura 3.11 - Ensaios no Rapid-k com variação de temperatura das amostras: a) lã mineral (calibração do Rapid-k); b) GFRP; c) PP honeycombs; d) Balsa; e) PET; e f) PUR.

Após a realização dos ensaios e efectuado o tratamento de dados, de modo a converter as leituras em condutibilidades térmicas e temperaturas, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 3.3. Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, ilustra-se nas Figuras 3.12 a 3.16, em forma de gráfico, a variação das condutibilidades térmicas das amostras em função da temperatura, e respectivas linhas de tendência e coeficiente de correlação. Por último, pode-se observar na Figura 3.17 a variação das condutibilidades térmicas de todas as amostras em função da temperatura, permitindo assim uma melhor visualização dos resultados obtidos, e efectuar uma comparação entre eles.

Por observação da Tabela 3.3, todas as amostras, excepto a de GFRP, apresentaram gradientes térmicos próximos dos pretendidos (10, 20 e 30 °C). A Tabela 3.3 mostra ainda que, os gradientes térmicos na amostra de GFRP apenas apresentaram valores de cerca de 4, 8 e 11 °C. Este facto pode ser explicado pela pequena dimensão que a amostra de GFRP apresenta. Com uma espessura de apenas 8 mm e uma condutibilidade térmica mais elevada do que as restantes amostras, o gradiente térmico imposto é difícil de se estabelecer, acabando por o gradiente térmico de equilíbrio corresponder a cerca de um terço do pretendido. Este facto pode ainda ser justificado pelas fugas de calor entre placas uma vez que as amostras apresentam uma área ligeiramente inferior à da câmara de ensaio para que possam ser colocadas. Para obter os gradientes térmicos desejados, uma amostra com uma espessura mais significativa seria o mais indicado.

Pela observação dos gráficos das Figuras 3.12 a 3.16, pode-se constatar que todos os materiais apresentam uma variação positiva da sua condutibilidade térmica com o aumento da temperatura, tal como seria de esperar. Esta variação apresenta-se de forma linear como se pode constatar pelas linhas de tendência obtidas, salientando-se o facto de que todas apresentam um coeficiente de correlação superior a 90%.

Observando o gráfico da Figura 3.17, é possível observar que os PP honeycombs e o GFRP são os materiais que apresentam as maiores condutibilidades térmicas. Com cerca de metade da condutibilidade térmica destes apresenta-se a balsa, e por fim, os materiais de PET e PUR que apresentam as menores condutibilidades térmicas.

Através da análise da Tabela 3.3, é possível verificar que a amostra de GFRP apresentou condutibilidades térmicas bastante inferiores à fornecida pelo fabricante para a resina, sendo a do fabricante sensivelmente o dobro. As amostras de balsa e PET por outro lado, apresentaram condutibilidades térmicas superiores à do fabricante, sendo a do fabricante sensivelmente metade no caso da balsa e cerca de 20% inferior no caso do PET. Por fim, a amostra de PU apresentou condutibilidades térmicas da mesma ordem de grandeza que a fornecida pelo fabricante. Salienta-se o facto de não se saber em que condições ou através de que processo se obtiveram as condutibilidades térmicas fornecidas pelos fabricantes.

Tabela 3.3 - Valores de condutibilidade térmica das amostras em função da temperatura, obtidos com o Rapid-k.

<i>Amostra</i>	<i>λ fabricante (W/m.°C)</i>	<i>λ (W/m.°C)</i>	<i>Tmean (°C)</i>	<i>ΔT (°C)</i>
GFRP	0,3500	0,1581	38,5	3,8
		0,1618	46,5	7,6
		0,1688	54,9	11
PP honeycombs	0,1400	0,1649	35,9	8,9
		0,1741	41,7	17,6
		0,1772	47,4	26,2
Balsa	0,0480	0,0749	35,9	9,1
		0,0757	41,4	18,2
		0,0773	47,1	27
PET	0,0320	0,0398	35,9	9,1
		0,0403	41,6	18
		0,0409	47,1	26,9
PUR	0,0250	0,0243	35,5	10
		0,0261	40,7	19,7
		0,0269	45,7	29,7

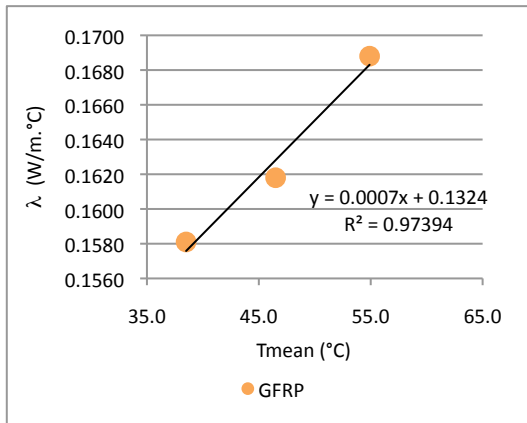


Figura 3.12 - Condução térmica da amostra de GFRP em função da temperatura, obtida com o Rapid-k.

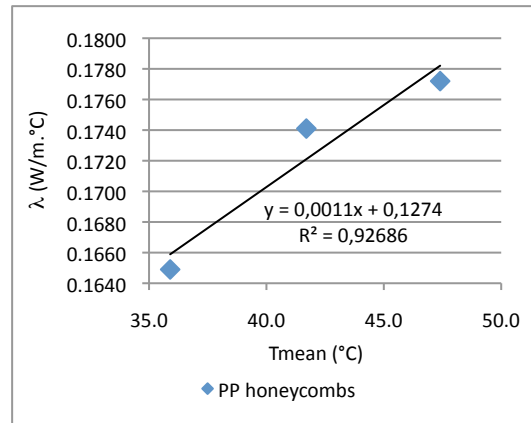


Figura 3.13 - Condução térmica da amostra de PP honeycombs em função da temperatura, obtida com o Rapid-k.

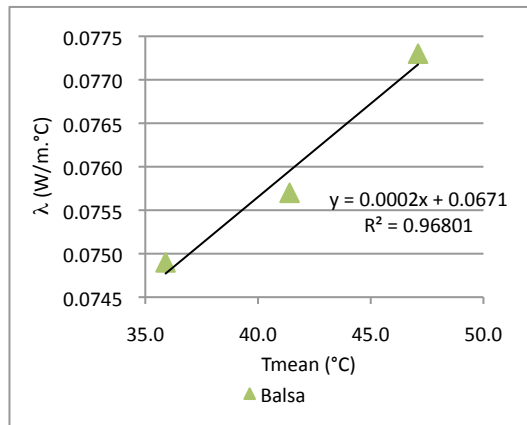


Figura 3.14 - Condução térmica da amostra de Balsa em função da temperatura, obtida com o Rapid-k.

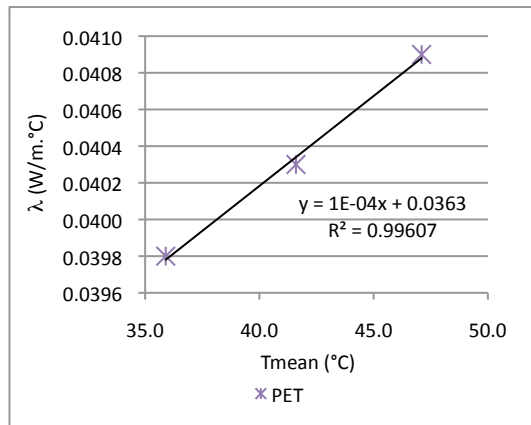


Figura 3.15 - Condução térmica da amostra de PET em função da temperatura, obtida com o Rapid-k.

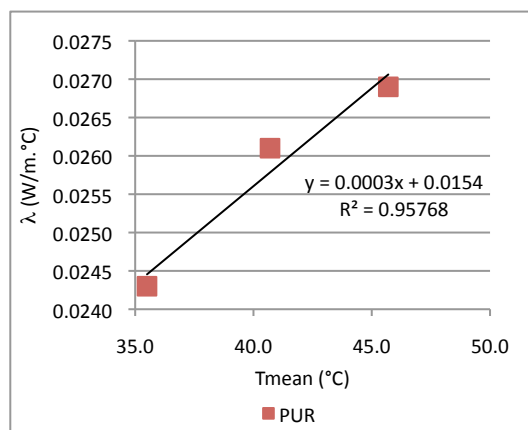


Figura 3.16 - Condução térmica da amostra de PUR em função da temperatura, obtida com o Rapid-k.

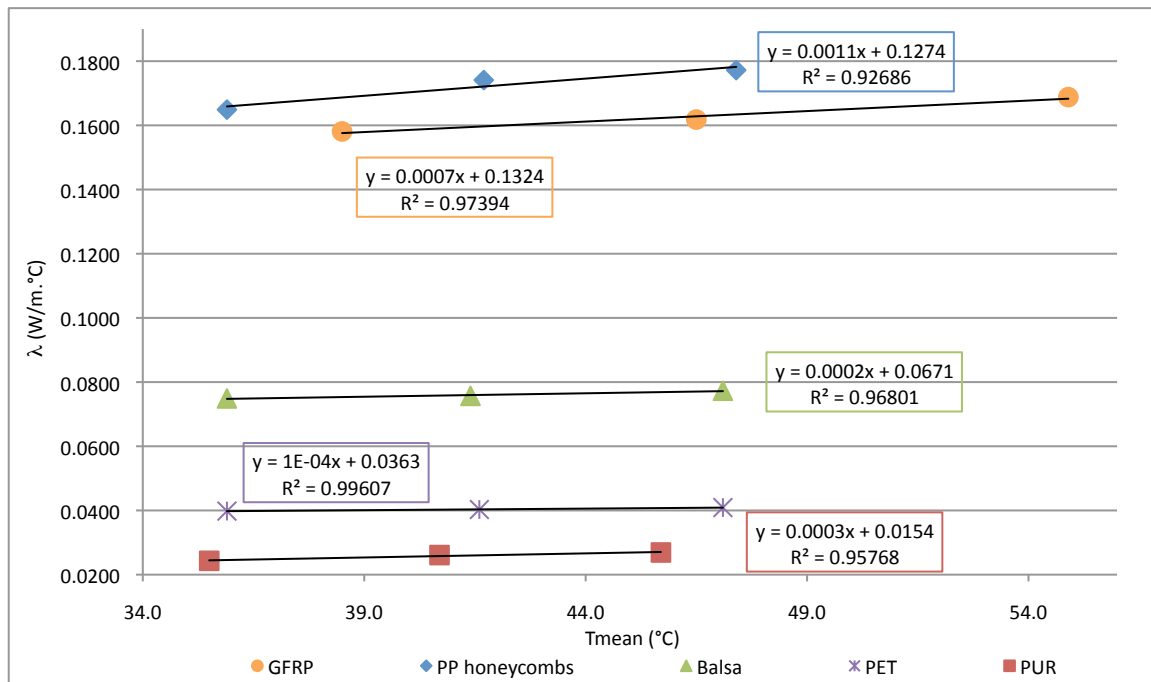


Figura 3.17 - Conduktividades térmicas das amostras em função da temperatura, obtidas com o Rapid-k.

3.6.2 Resultados obtidos através do Isomet 2114

Para obter as conduktividades térmicas dos materiais em estudo, e tal como foi mencionado nos processos experimentais, não é possível através de um método transiente escolher a temperatura a que se realiza o ensaio, estando esta dependente do equilíbrio entre a temperatura da amostra e das condições ambientais em que decorre o ensaio. Por este motivo, e tal como foi referido, os ensaios realizaram-se em dias e horas diferentes, tentando assim, obter temperaturas médias de ensaio com alguma diferença. A Figura 3.18, ilustra os ensaios realizados às várias amostras com o Isomet 2114. Após a realização dos ensaios, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 3.4. As Figuras 3.19 a 3.21, apresentam os resultados da Tabela 3.4 em forma de gráfico, onde se pode observar os valores da conduktividade térmica, capacidade térmica volumétrica e difusividade térmica obtidos para duas temperaturas de ensaio diferentes. Como se pode observar, pelos gráficos das Figuras 3.19 a 3.21 torna-se pouco perceptível a variação dos resultados obtidos, podendo neste caso recorrer-se à Tabela 3.4 para constatar a seguinte análise.

A conduktividade térmica dos materiais aumenta em todos os casos, excepto no PUR, para temperaturas mais elevadas. No entanto, e devido a uma diferença mínima de temperatura, os resultados não permitem retirar conclusões para a este material. Uma vez que a conduktividade térmica do PUR se encontra abaixo da gama mínima de medição do aparelho, os dados obtidos para este material devem ser analisados com cuidado. Os valores de capacidade térmica volumétrica aumentam para todos os materiais, com o aumento da temperatura, e a difusividade térmica diminui em todos, excepto na amostra de PP honeycombs em que se verifica um ligeiro aumento.

Os valores de conduktividade térmica dos materiais do núcleo obtidos pelo Isomet 2114 são da mesma ordem de grandeza dos obtidos pelo Rapid-k, sendo a amostra de PP honeycombs a que apresenta a maior conduktividade térmica, seguida da amostra de Balsa, PET e PUR. O GFRP para este método de ensaio apresenta a maior das conduktividades térmicas obtidas.

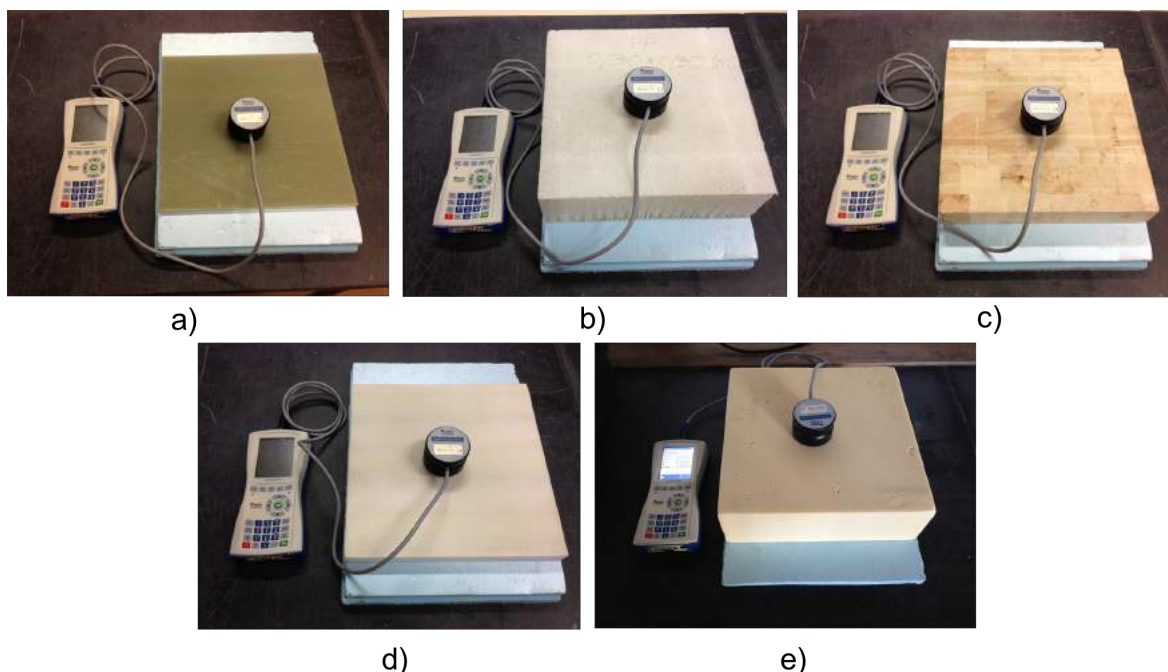


Figura 3.18 - Ensaios no Isomet 2114 para diferentes temperaturas das amostras: a) GFRP; b) PP honeycombs; c) Balsa; d) PET; e e) PUR.

Tabela 3.4 - Valores da condutibilidade térmica, capacidade térmica volumétrica e difusividade térmica das amostras para diferentes temperaturas, obtidos com o Isomet 2114.

1ª Medição	GFRP	PP honeycombs	Balsa	PET	PUR
λ fabricante (W/m.°C)	0,3500	0,1400	0,0480	0,0320	0,0250
λ (W/m.°C)	0,3084	0,0615	0,0506	0,0416	0,0360
$c_p \times 10^{-6}$ (J/m ³ .°C)	1,3381	0,2279	0,1681	0,1285	0,0864
$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	0,2222	0,2700	0,3010	0,3240	0,4169
Tmean (°C)	28,8	25,4	23,9	25,8	27,0
ΔT (°C)	9,4	9,2	8,8	8,7	8,7
2ª Medição	GFRP	PP honeycombs	Balsa	PET	PUR
λ fabricante (W/m.°C)	0,3500	0,1400	0,0480	0,0320	0,0250
λ (W/m.°C)	0,3161	0,0654	0,0523	0,042	0,0364
$c_p \times 10^{-6}$ (J/m ³ .°C)	1,4994	0,2407	0,1967	0,1349	0,0787
$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	0,2108	0,2719	0,2658	0,3115	0,4622
Tmean (°C)	29,4	31,2	30,6	30,4	26,9
ΔT (°C)	9,4	9,1	9,0	8,7	8,6

Face aos fabricantes, e analisando a Tabela 3.4, o GFRP apresenta um valor de condutibilidade térmica semelhante ao fornecido pelo fabricante, ainda que ligeiramente menor. A amostra de PP honeycombs por sua vez, apresenta uma condutibilidade superior à do fabricante em cerca de 70 %. Esta diferença pode ser justificada pelo facto de o método não ser o mais indicado para o ensaio, uma vez que segundo o manual do Isomet 2114 [56], este aparelho serve para analisar amostras compactas e homogéneas. Nos restantes casos, a Balsa, o PET e o PUR apresentam valores de condutibilidades térmicas mais próximas das fornecidas pelos fabricantes, no entanto superiores.

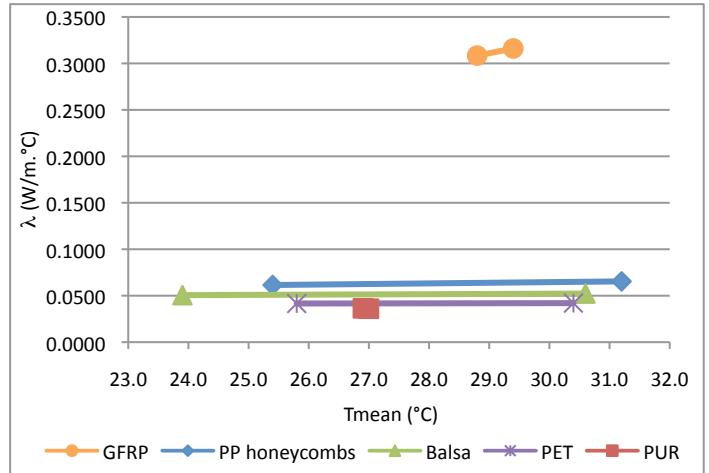


Figura 3.19 - Valores de condutibilidade térmica das amostras para diferentes temperaturas, obtidas com o Isomet 2214.

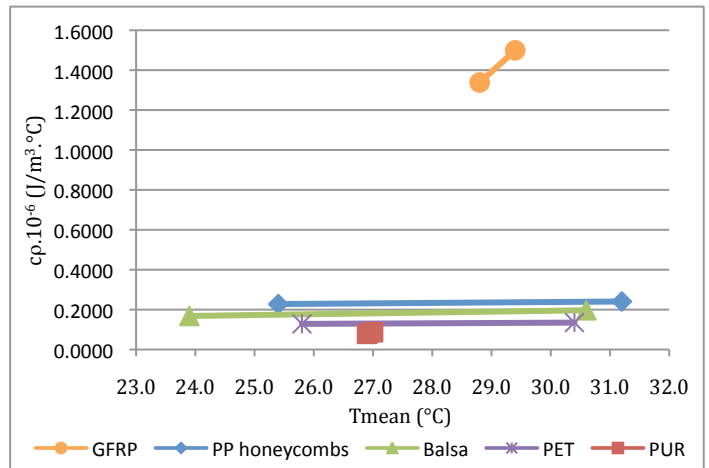


Figura 3.20 - Valores de capacidade térmica volumétrica das amostras para diferentes temperaturas, obtidos com o Isomet 2114.

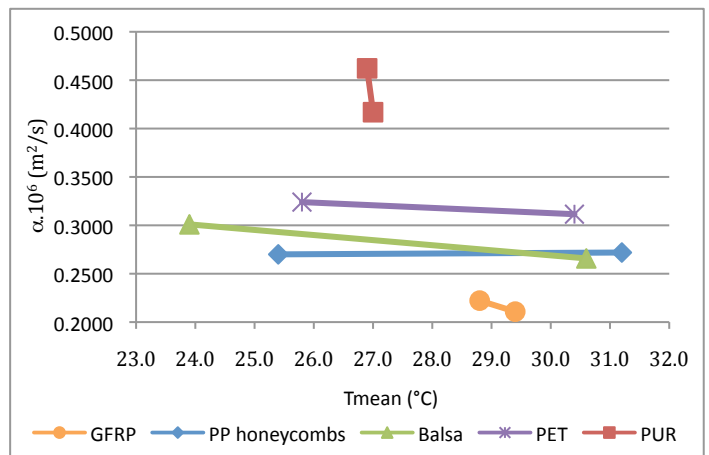


Figura 3.21 - Valores de difusividade térmica das amostras para diferentes temperaturas, obtidas com o Isomet 2114.

3.6.3 Comparação de resultados entre o Rapid-k e o Isomet 2114

De modo a comparar de forma mais precisa os resultados obtidos pelos dois métodos, calculou-se as condutibilidades térmicas através de uma interpolação para a temperatura média mais próxima entre ensaios, sendo esta de 30°C. No caso do Rapid-k a condutibilidade térmica para 30°C foi obtida pelas linhas de tendência apresentadas, e no caso do Isomet 2114 pelas linhas que unem os dois pontos. A interpolação no caso do Isomet 2114 deve ser analisada com cuidado uma vez que os dados obtidos não traduzem o comportamento exacto das amostras. No entanto, determinaram-se desta forma as condutibilidades térmicas para uma temperatura média de 30°C, que se apresentam na Tabela 3.5. Para uma melhor compreensão dos resultados, apresenta-se o gráfico da Figura 3.22.

Observando o gráfico da Figura 3.22, a amostra de GFRP revela o dobro da condutibilidade térmica no Isomet 2114 face ao Rapid-k. Tal como foi referido, não se conseguiram obter os gradientes térmicos desejados nesta amostra através no Rapid-k, no entanto, para aumentos de temperatura o GFRP apresenta uma linha de tendência com um coeficiente de correlação superior a 97%. Salienta-se o facto de a amostra de GFRP apresentar uma espessura de apenas 8 mm, face aos 20 a 40 mm que a sonda analisa segundo o manual do Isomet 2114 [56]. Adicionalmente, e tal como foi referido, a condutibilidade térmica fornecida para este material é a da resina que o compõe, podendo as fibras de vidro influenciar o valor da sua condutibilidade térmica. A amostra de PP honeycombs por sua vez, apresenta um valor de condutibilidade térmica superior através do Rapid-k. Tal como foi referido, o método executado pelo Isomet 2114 é aconselhado para materiais sólidos e homogéneos. A Balsa, o PET e o PUR apresentam resultados mais semelhantes pelos dois métodos. Ambos os equipamentos determinam o PP honeycombs como o material de núcleo mais condutor, seguido da Balsa, PET e PUR.

Tabela 3.5 - Valores de condutibilidade térmica das amostras interpoladas para 30°C, obtidas através do Rapid-k e Isomet 2114.

<i>T_{mean} 30°C</i>	<i>λ fabricante (W/m.°C)</i>	<i>Rapid-k λ (W/m.°C)</i>	<i>Isomet 2114 λ (W/m.°C)</i>
GFRP	0,3500	0,1534	0,3228
PP honeycombs	0,1400	0,1604	0,0654
Balsa	0,0480	0,0731	0,0535
PET	0,0320	0,0393	0,0421
PU	0,0250	0,0244	0,0240

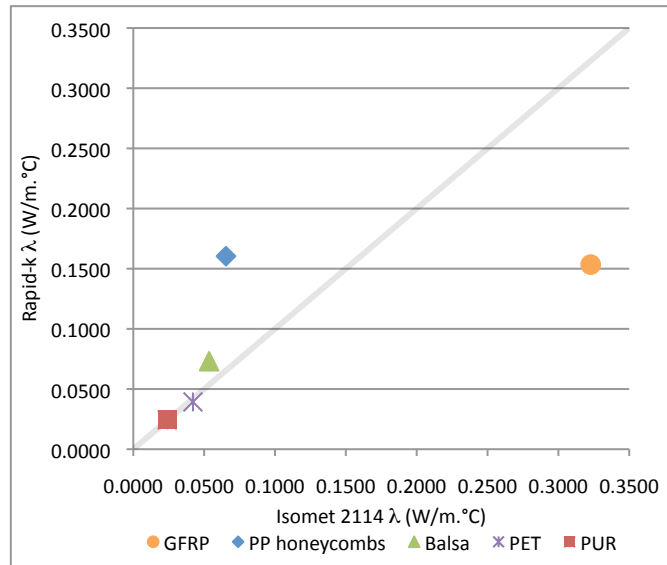


Figura 3.22 - Comparação das condutibilidades térmicas das amostras interpoladas para 30°C, obtidas pelo Rapid-k e Isomet 2114.

3.7 Comportamento térmico em função do teor de humidade

Neste subcapítulo serão apresentados e analisados os resultados das condutibilidades térmicas dos materiais em função do teor de humidade, obtidos pelo Rapid-k, e Isomet 2114. Adicionalmente, serão apresentados e analisados também os valores da capacidade térmica volumétrica e difusividade térmica para os diferentes teores de humidade, obtidos através do aparelho Isomet 2114. No final, será feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos por cada um dos equipamentos, podendo assim, avaliar qual a diferença de condutibilidades térmicas apresentadas por cada um dos dispositivos para os mesmos teores de humidade. Nesta análise não se estudará a amostra de GFRP, uma vez que esta se revelou impermeável (ver Tabela 3.2 do subcapítulo 3.5).

3.7.1 Resultados obtidos através do Rapid-k

Para o estudo do comportamento térmico dos materiais face ao aumento dos teores de humidade, foi escolhido o gradiente térmico de 20°C, imposto por uma temperatura de 30°C na face inferior e uma temperatura de 50°C na face superior. Foram realizados ensaios para diferentes teores de humidade calculados pela Equação 3.6 (subcapítulo 3.4), entre o estado seco e o estado saturado, com intervalos sensivelmente iguais. A Figura 3.23, ilustra os ensaios das amostras para os diferentes teores de humidade no Rapid-k, em que as amostras estão envolvidas em película de celofane, evitando a danificação do equipamento e conservando a humidade no interior da amostra.

Após a realização dos ensaios e efectuado o tratamento de dados, de modo a converter as leituras em condutibilidades térmicas e temperaturas, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 3.6. Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, pode-se observar nas Figuras 3.25 a 3.28, os gráficos da variação das condutibilidades térmicas das amostras em função do teor de humidade, e na Figura 3.29 o gráfico da variação das condutibilidades térmicas (entre o estado seco e o estado saturado) apresentadas pelos 4 materiais de núcleo, permitindo assim, uma melhor comparação entre materiais.



a)



b)



c)



d)

Figura 3.23 - Ensaio com teor de humidade no Rapid-k das amostras: a) PPhoneycombs; b) Balsa; c) PET e d) PUR.

Observando a Tabela 3.6, o gradiente térmico imposto de 20°C em todos os ensaios, diminuiu à medida que o teor de humidade vai aumentando, excepto no caso do PUR, que foi atingido em todos os ensaios. Este facto deve-se à presença de humidade das amostras que irá fazer com que estas sejam ligeiramente arrefecidas, sendo mais evidente na amostra de Balsa, uma vez que a água total para 100% de saturação atingiu mais de 5 vezes o seu peso completamente seco.

Pela observação dos gráficos das Figuras 3.25 a 3.28, pode-se constatar que a presença de humidade nas amostras traduz-se num aumento significativo da sua condutibilidade térmica. Não foram determinadas linhas de tendência uma vez que, face ao aumento do teor de humidade as amostras não apresentaram um comportamento regular. Pela observação dos gráficos é possível constatar que a humidade tem influência na condutibilidade térmica dos materiais até certo ponto, excepto no PUR que se verifica crescente até estar 100% saturado. No caso dos PP honeycombs esta influência observa-se até cerca de 7% de teor de humidade enquanto na Balsa se verifica até 400%, e no caso do PET até 9%.

Observando o gráfico da Figura 3.29, é possível constatar que as condutibilidades térmicas se dispõem do mesmo modo que com a variação da temperatura, no entanto, a amostra de Balsa acaba por ser a que apresenta maior condutibilidade térmica quando todas as amostras estão saturadas. Este facto deve-se à elevada quantidade de água presente da amostra, preenchendo os seus vazios e consequentemente elevando a condutibilidade térmica para valores mais próximos da condutibilidade térmica da água, que se situa nos 0,6 W/m.°C.

É de salientar que após terem sido realizados os ensaios para diferentes teores de humidade, a amostra de Balsa apresentava deformações nas extremidades e fendas que se prolongavam de uma face à outra, provocadas por dilatações e retracções devidas a variações termo-higrométricas (ver Figura 3.24).

Tabela 3.6 - Valores de condutibilidade térmica em função do teor de humidade das amostras, obtidas com o Rapid-k.

<i>Amostra</i>	<i>w</i> (%)	<i>λ fabricante</i> (W/m.°C)	<i>λ</i> (W/m.°C)	<i>Tmean</i> (°C)	<i>ΔT</i> (°C)
PP honeycombs	0,0		0,1790	41,8	17,4
	7,3		0,2224	42,6	16,7
	16,1	0,1400	0,2217	42,4	16,7
	71,2		0,2219	42,6	16,7
	29,9		0,2219	42,6	16,5
Balsa	0,0		0,0722	41,7	18,0
	151,8		0,2095	43,2	15,2
	306,8	0,0480	0,3054	44,1	13,7
	396,5		0,3506	44,4	13,0
	517,4		0,3565	44,3	13,0
PET	0,0		0,0422	41,9	18,0
	8,9		0,0477	42,1	17,5
	24,3	0,0320	0,0485	42,2	17,5
	29,4		0,0491	42,1	17,4
	43,0		0,0482	42,1	17,6
PUR	0,0		0,0277	40,8	19,7
	3,9		0,0274	41,0	19,6
	7,6	0,0250	0,0275	41,1	19,6
	11,0		0,0289	41,1	19,6
	15,6		0,0305	41,0	19,6



a)



b)



c)

Figura 3.24 - Amostra de balsa após os ensaios com teores de humidade apresentando: a) deformações; b) fendas e c) bolores.

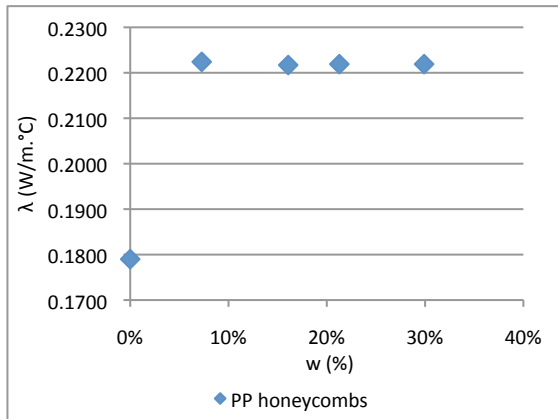


Figura 3.25 - Condutibilidade térmica da amostra de PP honeycombs em função do teor de humidade, obtida com o Rapid-k.

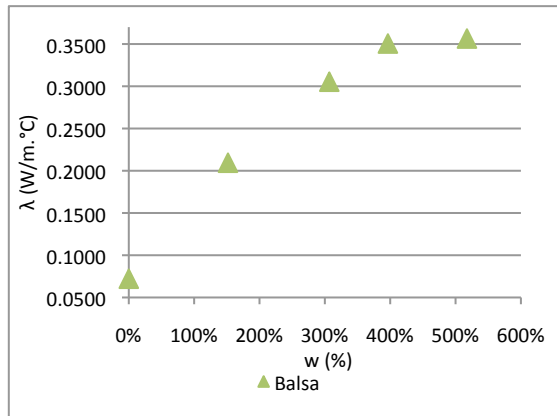


Figura 3.26 - Condutibilidade térmica da amostra de Balsa em função do teor de humidade, obtida com o Rapid-k.

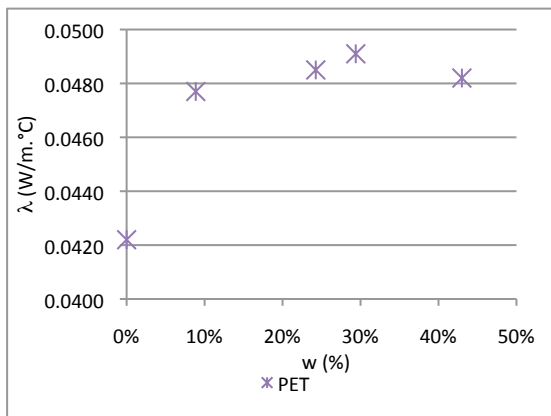


Figura 3.27 - Condutibilidade térmica da amostra de PET em função do teor de humidade, obtida com o Rapid-k.

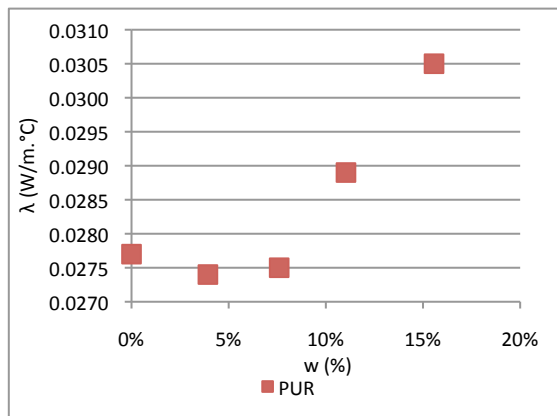


Figura 3.28 - Condutibilidade térmica da amostra de PUR em função do teor de humidade, obtida com o Rapid-k.

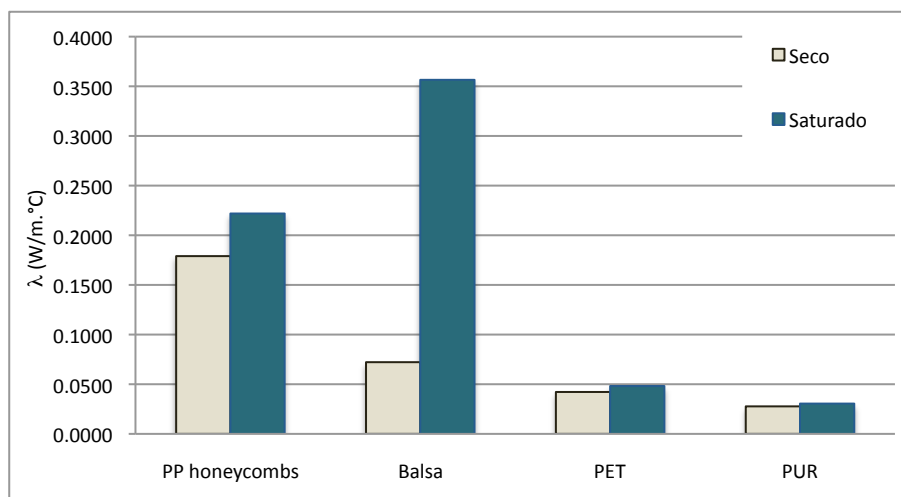


Figura 3.29 - Variação da condutibilidade térmica das amostras entre o estado seco e o estado saturado, obtida com o Rapid-k.

3.7.2 Resultados obtidos através do Isomet 2114

Previamente à realização dos ensaios com o Rapid-k, realizaram-se os ensaios com o Isomet 2114 para os mesmos teores de humidade, ilustrando a Figura 3.30 esse procedimento para as várias amostras. Os resultados obtidos para as diferentes condutibilidades térmicas, capacidades térmicas volumétricas e difusividades térmicas encontram-se na Tabela 3.7.

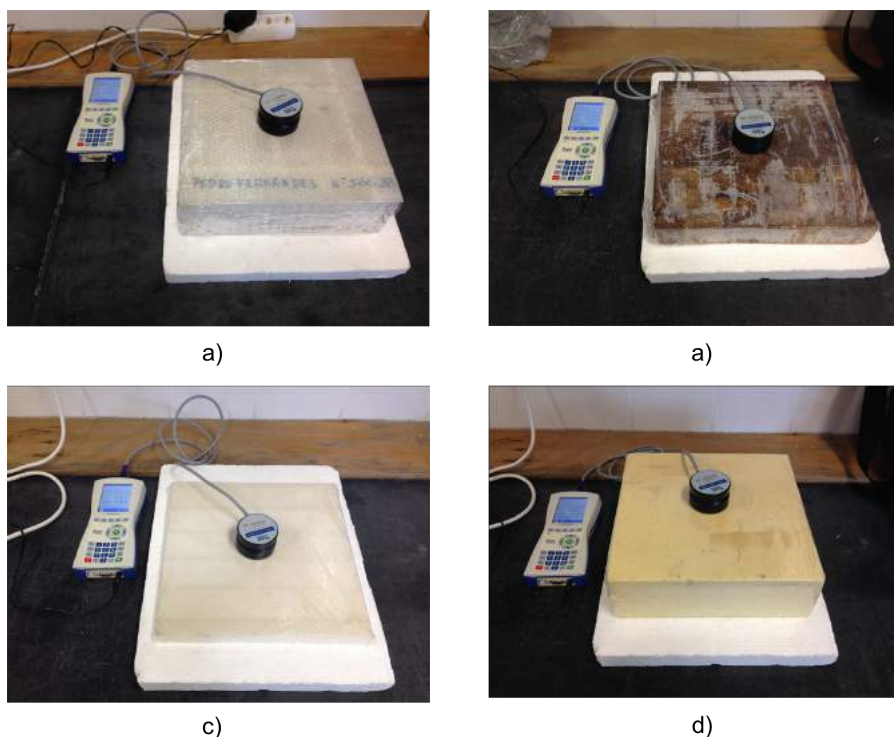


Figura 3.30 - Ensaio no Isomet 2114 para diferentes teores de humidade das amostras: a) PP honeycombs; b) Balsa; c) PET; e) PUR.

Para uma melhor compreensão e análise de resultados, os valores presentes na Tabela 3.7 apresentam-se graficamente nas Figuras 3.31 a 3.45. Nos gráficos das Figuras 3.31 a 3.34 apresenta-se a variação da condutibilidade térmica de cada uma das amostras em função do teor de humidade bem como as suas linhas de tendência, e na Figura 3.35 o gráfico da variação das condutibilidades térmicas dos 4 materiais de núcleo (entre o estado seco e o estado saturado). Nas Figuras 3.36 a 3.39, apresentam-se os gráficos da variação da capacidade térmica volumétrica de cada uma das amostras para diferentes teores de humidade assim como as suas linhas de tendência, e na Figura 3.40 o gráfico da variação das capacidades térmicas volumétricas das 4 amostras (entre o estado seco e o estado saturado). Por último, nas Figuras 3.41 a 3.44 apresenta-se a variação da difusividade térmica das amostras para diferentes teores de humidade e as suas linhas de tendência, e no gráfico da Figura 3.45 o gráfico da variação das difusividades térmicas das 4 amostras entre o estado seco e o estado saturado.

À semelhança dos resultados obtidos com o Rapid-k, o aumento do teor de humidade nos materiais traduz-se num aumento da condutibilidade térmica, tornando-se este bastante significativo na Balsa, uma vez que absorve muita água (mais de 5 vezes o peso inicial).

Pela observação das Figuras 3.31 a 3.34, todas as amostras apresentam um aumento da condutibilidade térmica em função do aumento do teor de humidade, que se aproxima de uma linha de tendência exponencial. Os coeficientes de correlação das linhas de tendência são em todos os casos superiores a 90%, excepto no caso do PUR que se situa nos 81%. Observando a Figura 3.35, é possível constatar que o

material de núcleo mais condutor é o PP honeycombs, seguido da Balsa, PET e PUR para o estado seco. Quando todas as amostras se encontram saturadas a Balsa torna-se o material mais condutor. Observando os gráficos das Figuras 3.36 a 3.39, é possível constatar que todos os materiais apresentam uma variação exponencial positiva na sua capacidade térmica volumétrica. Esta variação é aproximada por linhas de tendência que apresentam coeficientes de correlação acima dos 90% para todos os casos. Pela observação do gráfico da Figura 3.40, pode-se observar a variação das capacidades térmicas volumétricas de cada solução entre o estado seco e o estado saturado. Inicialmente dispostos pela mesma ordem que as condutibilidades térmicas, o PET apresenta a segunda maior capacidade térmica volumétrica para o estado saturado, e a Balsa passa a ser a que apresenta um maior valor quando todas as amostras se encontram saturadas. Relacionada a condutibilidade térmica e a capacidade térmica volumétrica pelo Isomet 2114, os gráficos das Figuras 3.41 a 3.44 traduzem o andamento da difusividade térmica. O andamento da difusividade térmica das amostras em função do teor de humidade, aproxima-se por linhas de tendência exponenciais negativas para todas as amostras, com coeficientes de correlação superiores a 90% em todos os casos. Este comportamento traduz-se por um aumento da capacidade térmica volumétrica muito superior ao aumento da condutibilidade térmica, reduzindo a relação λ/c_p , e assim, originando uma diminuição da difusividade térmica. Pela observação do gráfico da Figura 3.45 (entre o estado seco e o estado saturado) é possível observar este comportamento, em que por exemplo, apesar da amostra de Balsa sofrer um grande aumento da capacidade térmica volumétrica, também o sofre na condutibilidade térmica, resultando assim numa diminuição mais ligeira da difusividade térmica.

Tabela 3.7 - Valores de condutibilidade térmica, capacidade térmica volumétrica e difusividade térmica das amostras em função do teor de humidade, obtidos com o Isomet 2114.

<i>Amostra</i>	<i>w (%)</i>	<i>$\lambda_{fabricante}$ (W/m.°C)</i>	<i>λ (W/m.°C)</i>	<i>$c_p \cdot 10^6$ (J/m³.°C)</i>	<i>$\alpha \cdot 10^6$ (m²/s)</i>	<i>T_{mean} (°C)</i>	<i>ΔT (°C)</i>
PP honeycombs	0,0	0,1400	0,0626	0,2125	0,2944	26,6	9,5
	7,3		0,0632	0,3934	0,1849	18,7	9,4
	16,1		0,0651	0,5097	0,1417	20,0	9,0
	21,3		0,0656	0,8092	0,081	18,1	8,7
	29,9		0,0691	0,8429	0,0820	21,1	9,0
Balsa	0,0	0,0480	0,0474	0,1501	0,3156	24,8	9,1
	151,8		0,0774	0,2884	0,2683	18,0	9,4
	306,8		0,1504	0,5795	0,2596	20,2	9,7
	396,5		0,2034	1,4325	0,2420	18,2	9,2
	517,4		0,4074	1,7235	0,2364	20,0	8,7
PET	0,0	0,0320	0,0406	0,1181	0,3439	23,7	8,8
	8,9		0,0424	0,1926	0,2202	18,7	8,6
	24,3		0,0485	0,6853	0,0707	20,1	8,1
	29,4		0,0495	0,7913	0,0625	17,5	7,9
	43,0		0,0557	1,2372	0,0450	17,9	7,9
PUR	0,0	0,0250	0,0362	0,0876	0,4126	27,1	8,7
	3,9		0,0363	0,1069	0,3393	20,3	8,6
	7,6		0,0368	0,1726	0,2134	17,8	8,7
	11,0		0,0386	0,3821	0,1011	18,8	8,1
	15,6		0,0429	0,7380	0,0581	18,4	8,0

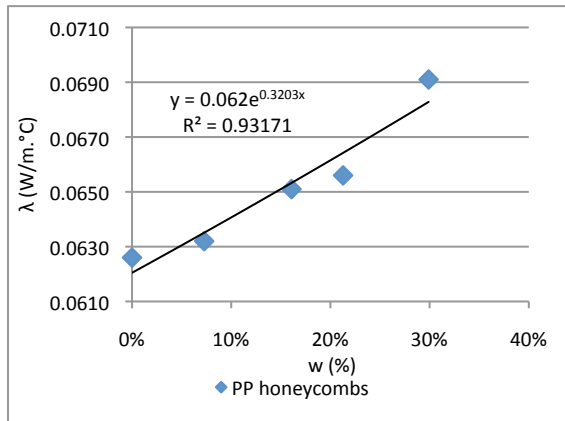


Figura 3.31 - Condutibilidade térmica da amostra de PP honeycombs em função do teor de umidade, obtida com o Isomet 2114.

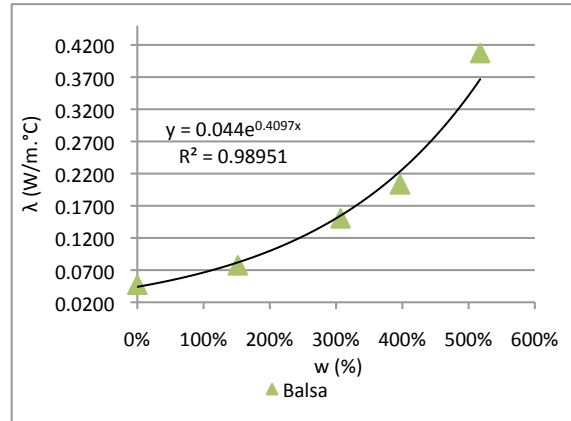


Figura 3.32 - Condutibilidade térmica da amostra de Balsa em função do teor de umidade, obtida com o Isomet 2114.

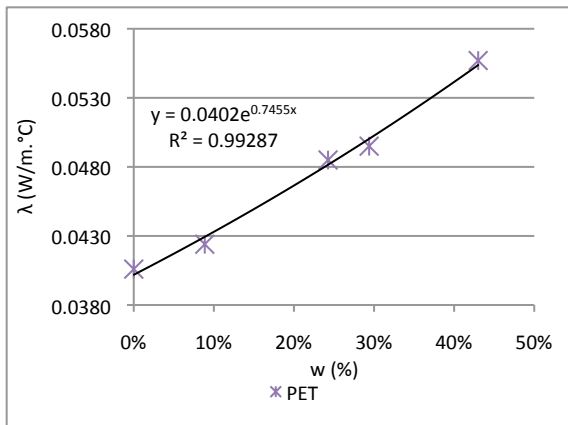


Figura 3.33 - Condutibilidade térmica da amostra de PET em função do teor de umidade, obtida com o Isomet 2114.

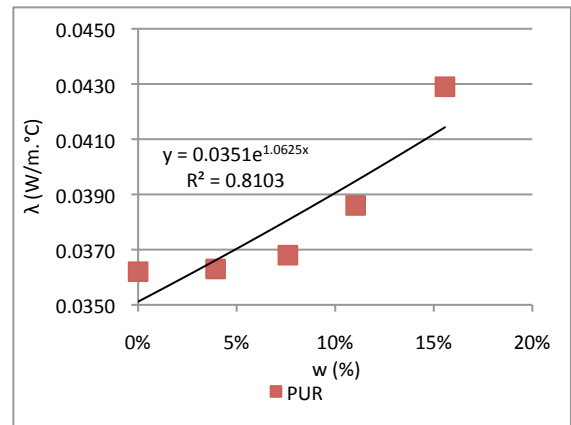


Figura 3.34 - Condutibilidade térmica da amostra de PUR em função do teor de umidade, obtida com o Isomet 2114.

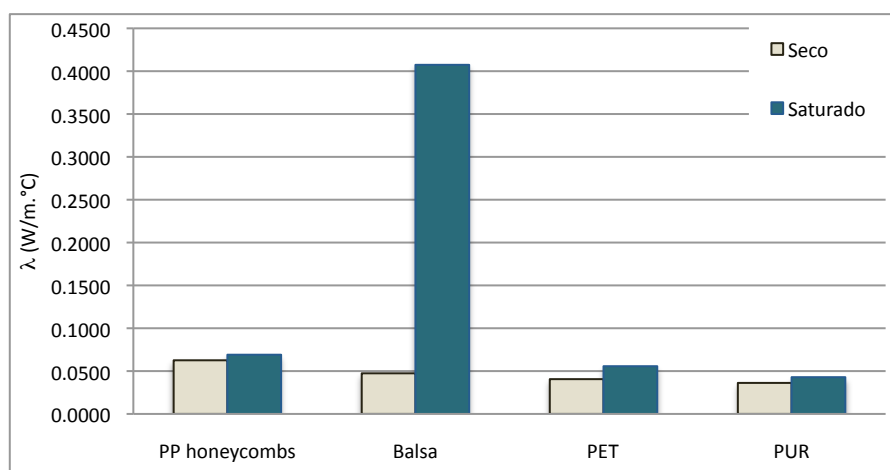


Figura 3.35 - Variação da condutibilidade térmica das amostras entre o estado seco e o estado saturado, obtida com o Isomet 2114.

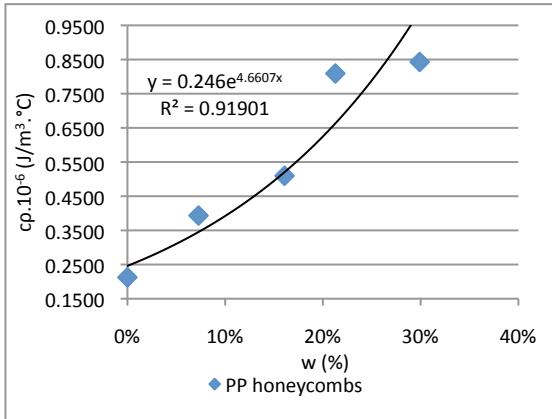


Figura 3.36 - Capacidade térmica volumétrica da amostra de PP honeycombs em função do teor de umidade, obtido com o Isomet 2114.

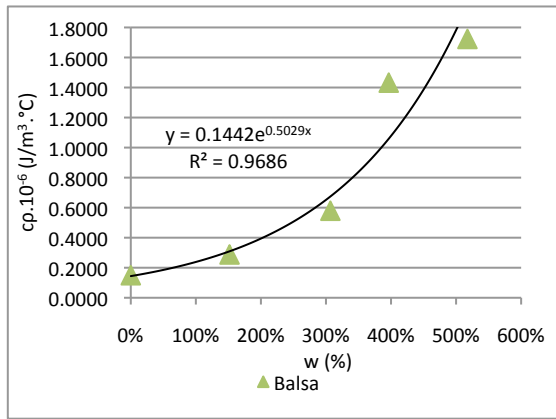


Figura 3.37 - Capacidade térmica volumétrica da amostra de Balsa em função do teor de umidade, obtido com o Isomet 2114.

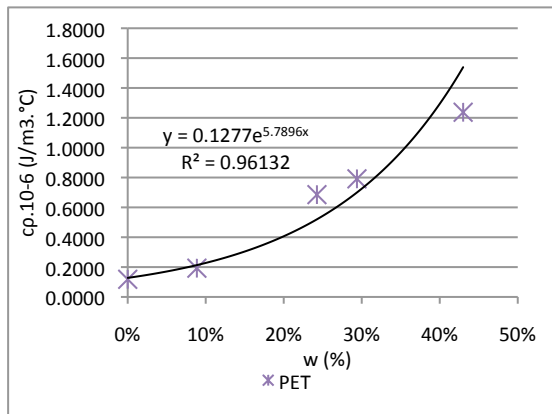


Figura 3.38 - Capacidade térmica volumétrica da amostra de PET em função do teor de umidade, obtido com o Isomet 2114.

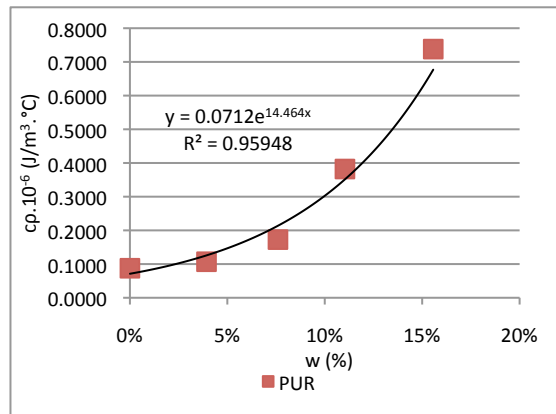


Figura 3.39 - Capacidade térmica volumétrica da amostra de PUR em função do teor de umidade, obtido com o Isomet 2114.

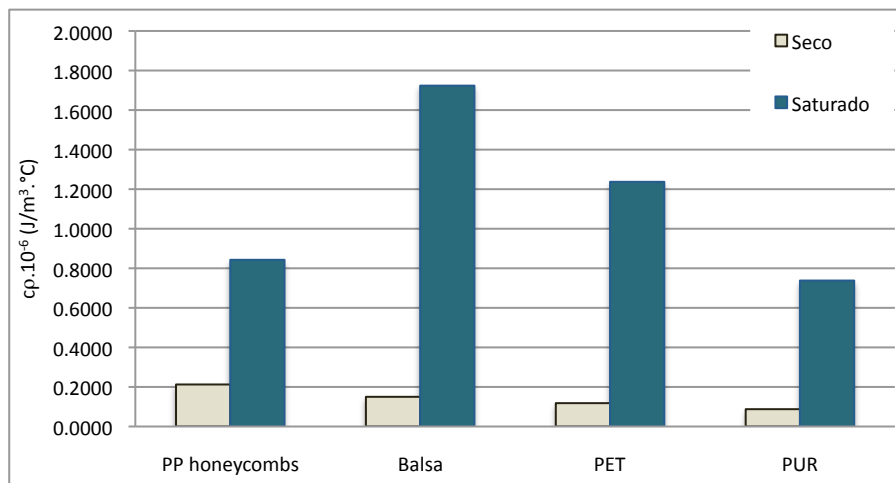


Figura 3.40 - Variação da capacidade térmica volumétrica das amostras entre o estado seco e o estado saturado, obtida com o Isomet 2114.

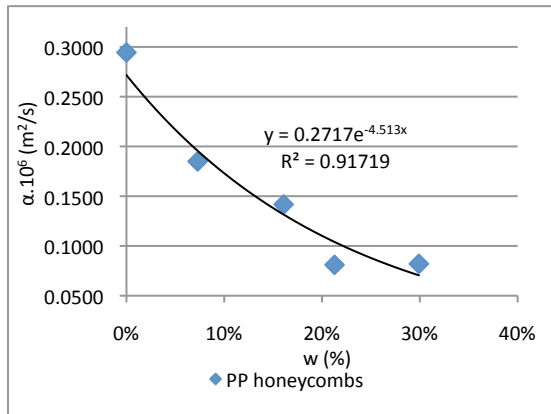


Figura 3.41 - Difusividade térmica da amostra de PP honeycombs em função do teor de umidade, obtido com o Isomet 2114.

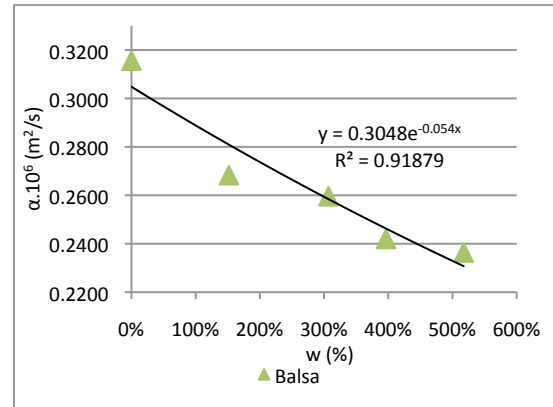


Figura 3.42 - Difusividade térmica da amostra de Balsa em função do teor de umidade, obtido com o Isomet 2114.

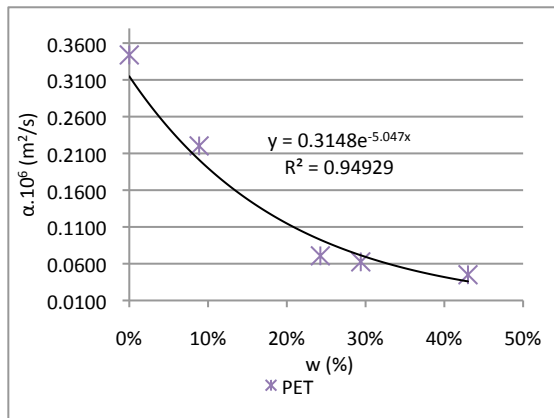


Figura 3.43 - Difusividade térmica da amostra de PET em função do teor de umidade, obtido com o Isomet 2114.

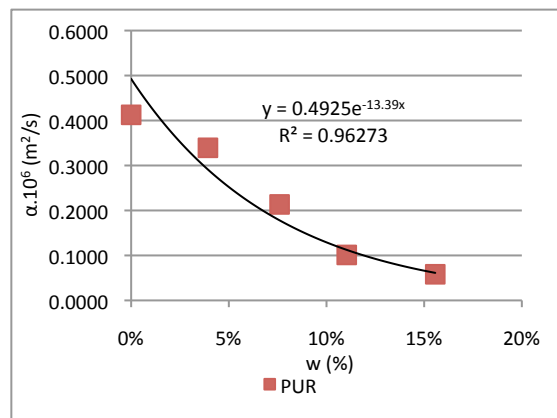


Figura 3.44 - Difusividade térmica da amostra de PUR em função do teor de umidade, obtido com o Isomet 2114.

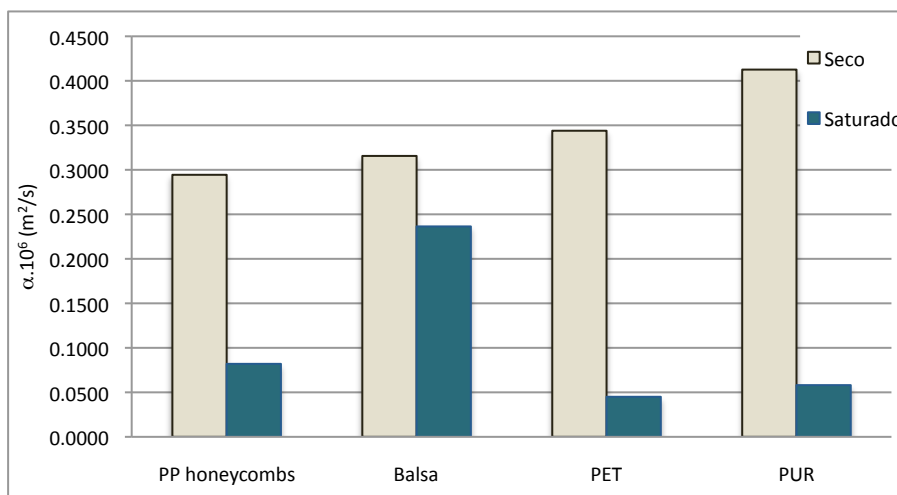


Figura 3.45 - Variação da difusividade térmica das amostras entre o estado seco e o estado saturado, obtida com o Isomet 2114.

3.7.3 Comparação de resultados entre o Rapid-k e o Isomet 2114

Para a comparação de resultados obtidos para a condutibilidade térmica em função do teor de humidade através do Rapid-k e o Isomet 2114 (ver Tabela 3.8), e à semelhança do que se efectuou para os resultados obtidos com a variação da temperatura, apresenta-se o gráfico da Figura 3.46.

Observando o gráfico da Figura 3.46, é possível constatar que os dois equipamentos apresentam o PP honeycombs como o material mais condutor, seguido da Balsa PET e PUR. No entanto, para um grau de saturação de 25% a Balsa passa a ser o material mais condutor (aproximadamente 160% teor de humidade).

Pela observação do gráfico da Figura 3.46, pode ainda concluir-se que os resultados obtidos pelos dois equipamentos foram muito semelhantes para as amostras de PET e PUR, sendo esta relação mais evidente no caso do PET, em que os seus resultados situam-se muito próximo da recta de 45°. Por outro lado, a Balsa e os PP honeycombs apresentam maiores condutibilidades térmicas no Rapid-k do que no Isomet 2114, excepto para 100% de grau de saturação na Balsa, em que o Isomet 2114 apresenta o maior resultado. O facto do Rapid-k ser indicado para amostras secas, aliado a uma temperatura de ensaio bastante superior, e quer o Rapid-k como o Isomet 2114 serem o indicados para materiais homogéneos e sólidos, explica esta diferença nos valores obtidos pelos dois equipamentos.

Tabela 3.8 - Condutibilidade térmica das amostras para diversos teores de humidade, obtidos através do Rapid-k e Isomet 2114.

<i>Amostra</i>	<i>w (%)</i>	<i>λ fabricante (W/m.°C)</i>	<i>Rapid-k λ (W/m.°C)</i>	<i>Isomet 2114 λ (W/m.°C)</i>
PP honeycombs	0,0	0,1400	0,1790	0,0626
	7,3		0,2224	0,0632
	16,1		0,2217	0,0651
	21,3		0,2219	0,0656
	29,9		0,2219	0,0691
Balsa	0,0	0,0480	0,0722	0,0474
	151,8		0,2095	0,0774
	306,8		0,3054	0,1504
	396,5		0,3506	0,2034
	517,4		0,3565	0,4074
PET	0,0	0,0320	0,0422	0,0406
	8,9		0,0477	0,0424
	24,3		0,0485	0,0485
	29,4		0,0491	0,0495
	43,0		0,0482	0,0557
PUR	0,0	0,0250	0,0277	0,0362
	3,9		0,0274	0,0363
	7,6		0,0275	0,0368
	11,0		0,0289	0,0386
	15,6		0,0305	0,0429

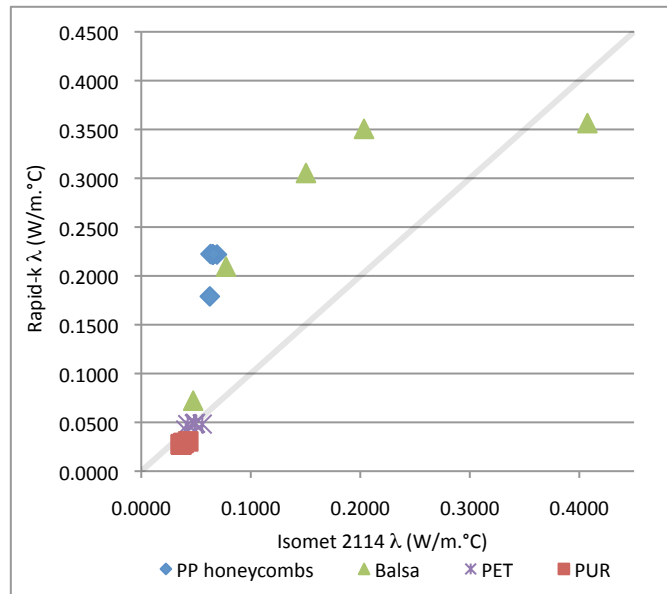


Figura 3.46 - Comparação das condutibilidades térmicas das amostras em função do teor de humidade, obtidas pelo Rapid-k e Isomet 2114.

3.8 Considerações finais

Após a realização da campanha experimental para estudar o comportamento térmico dos materiais de GFRP, PP honeycombs, Balsa, PET e PUR para diferentes temperaturas e teores de humidade (excepto o GFRP), apontam-se as seguintes conclusões:

- as condutibilidades térmicas dos materiais em estudo sofrem um aumento de condutibilidade térmica tanto pelo aumento da temperatura, como pelo aumento do teor de humidade (excepto o GFRP);
- para a análise da variação da condutibilidade térmica com a variação da temperatura, o método HFM, realizado com o Rapid-k, apresenta resultados com boas aproximações por linhas de tendência lineares;
- para a análise da variação da condutibilidade térmica com a variação do teor de humidade, o método MTPS, realizado com o Isomet 2114, apresenta resultados com boas aproximações por linhas de tendência exponenciais positivas;
- características presentes nas amostras, tais como a heterogeneidade, condutibilidades térmicas abaixo da gama mínima de medição, espessura demasiado pequena e teor de humidade podem influenciar os resultados obtidos pelos equipamentos;
- a obtenção de resultados através de um método estacionário pode demorar várias horas até que se atinja o estado de equilíbrio;
- os resultados obtidos através de um método estacionário são tão mais rápidos de adquirir, quanto maior for o equilíbrio de condições entre a amostra e o espaço envolvente;
- os materiais apresentaram condutibilidades térmicas próximas das fornecidas pelos fabricantes no caso do PUR, PET e PP honeycombs. A Balsa apresentou uma condutibilidade térmica sensivelmente 60% superior face ao valor do fabricante, e o GFRP uma condutibilidade térmica 50% inferior, possivelmente explicado pelo facto de este conter fibras de vidro, e a condutibilidade térmica fornecida ter sido apenas a da resina;
- a amostra de GFRP revelou-se impermeável, tal como é desejado pelos requisitos da solução, impedindo a passagem de humidade;

- os aumentos percentuais registados nas condutibilidades térmicas dos materiais, obtidos pelo Rapid-k em função da temperatura foram de 0,4%/°C para o GFRP, 0,6%/°C para os PP honeycombs, 0,3%/°C para a Balsa, 0,2%/°C para o PET e 1%/°C para o PUR;
- os aumentos percentuais registados nas condutibilidades térmicas dos materiais, obtidas pelo Isomet 2114 entre o estado seco e o estado saturado foram de 10% nos PP honeycombs, 760% na Balsa, 37% no PET e 19% no PUR.

4 Modelação numérica

4.1 Introdução

Após a realização da campanha experimental, foi efectuada uma modelação numérica para avaliar o comportamento térmico de soluções de painéis sanduíche em GFRP. Esta modelação é composta por duas partes, sendo que a primeira servirá para determinar as trocas de calor nas zonas correntes de diferentes soluções de painéis sanduíche, e a segunda para avaliar as trocas de calor através das ligações entre painéis, que constituem pontes térmicas lineares.

Neste capítulo será abordado o método de cálculo de pontes térmicas, seguido da descrição dos casos de estudo e do modelo de simulação. Posteriormente, e com base no modelo construído, será abordada a metodologia de cálculo do coeficiente de transmissão térmica superficial (U) e do coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ), sendo estes aplicados a dois casos de estudo, lajes e paredes. No final, serão tecidas algumas considerações, face aos resultados apresentados.

4.2 Método de cálculo de pontes térmicas lineares

Para avaliar o fluxo adicional de perdas de calor através de pontes térmicas lineares, resultantes da ligação entre painéis sanduíche, há que, à semelhança de uma zona corrente, determinar o seu coeficiente de transmissão térmica. Posteriormente, e para determinar o fluxo de calor que por ela atravessa, terá de se multiplicar esse coeficiente por um comprimento e por um gradiente térmico, como se pode observar na Equação 4.1.

$$Q_{PTL} = \Psi \times L_{PTL} \times \Delta T \quad (4.1)$$

em que:

Q_{PTL} - fluxo adicional de calor que atravessa uma ponte térmica linear [W];

Ψ - coeficiente de transmissão térmica linear [W/m.°C];

L_{PTL} - comprimento da ponte térmica linear [m];

ΔT - gradiente térmico entre os dois ambientes separados pela ponte térmica linear [°C].

A norma EN ISO 10211 [58] indica como modelar as pontes térmicas através de programas numéricos de diferenças ou elementos finitos, bem como o cálculo do coeficiente Ψ com recurso a esses programas. Deste modo, consegue-se calcular o coeficiente Ψ com uma reduzida taxa de esforço comparado com os métodos analíticos, bem como, obter uma elevada precisão.

Segundo a norma EN ISO 10211 [58], o modelo construído deve incluir, para além da ponte térmica, uma extensão suficiente da zona corrente, de modo a que, a transmissão de calor seja estável na zona corrente e deixe de sofrer o efeito provocado pela ponte térmica, ou seja, que as linhas de fluxo de calor voltem a ser unidireccionais. Adicionalmente, deve-se ainda atender à necessidade de refinamento da malha em zonas críticas (locais de maior heterogeneidade) e verificar a possível interferência de outras pontes térmicas, adaptando o modelo consoante o caso que se pretende estudar. O coeficiente Ψ resultará depois da diferença entre a transmissão calculada com o coeficiente de transmissão térmica médio (U_{med} , ver Equação 4.3, subcapítulo 4.5.1) e a transmissão total obtida com recurso ao software de modelação.

4.3 Caso de estudo e construção do modelo

Para efectuar o estudo do comportamento térmico dos painéis sanduíche em serviço, existe a necessidade de se criar um modelo que represente a solução final, tanto para os cálculos analíticos, como para a modelação da solução com recurso a um programa de cálculo automático. Para este estudo recorreu-se ao programa THERM, produzido pelo Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) na Universidade da Califórnia [59].

Apesar do comportamento térmico influenciar a escolha de uma solução face a outra, não se apresenta como factor decisivo no seu dimensionamento. Assim sendo, as soluções devem obedecer primeiro aos critérios de comportamento mecânico para que se assegure a integridade da estrutura, e posteriormente combinar os requisitos impostos por outras solicitações. Desta forma, as soluções de painéis sanduíche foram previamente determinadas pelo seu comportamento mecânico, e adoptadas as dimensões que se apresentam na Figura 4.1. Nesta figura pode-se observar que as soluções deverão ter um núcleo de 120 mm composto por um dos 4 materiais em estudo (PP honeycombs, Balsa, PET ou PUR) e duas lâminas de GFRP com 8 mm a envolvê-lo. Na parte direita da imagem é possível observar que as ligações entre painéis se efectuem através da sobreposição de duas abas de GFRP. Para que os painéis fiquem unidos entre si, é aplicada uma resina que terá sensivelmente a espessura de 1 mm. Para o estudo que se segue, considerou-se que a resina terá as propriedades térmicas do GFRP.

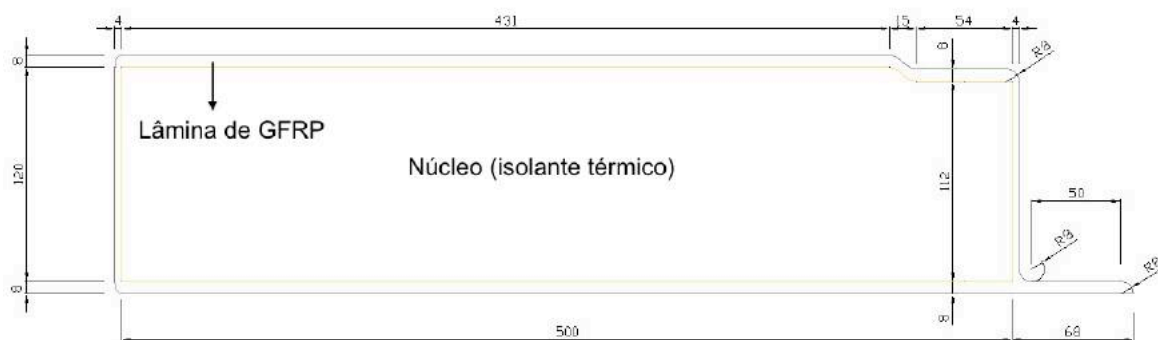


Figura 4.1 - Secção transversal de um painel sanduíche com pormenor de ligação.

Com base na secção transversal apresentada na Figura 4.1, procedeu-se à definição do modelo que servirá para realizar a modelação numérica e a modelação com recurso ao programa THERM. Atendendo à norma EN ISO 10211:2007 [58], para modelar uma ponte térmica, deve ser feito um prolongamento da zona corrente até que deixe de sofrer da influência da ponte térmica. Assim sendo, para modelar o comportamento térmico das soluções sanduíche que se apresentam, decidiu-se considerar duas metades de painéis sanduíche com uma ligação entre eles, como se pode observar na

Figura 4.2. Este modelo encontra-se dividido em 5 zonas: duas zonas correntes, 2 zonas de contacto e 1 junção, com os comprimentos apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Comprimentos das zonas do modelo elaborado.

Zona	Comprimento (mm)
1 - corrente	362 (2x181)
2 - contacto	138 (2x69)
3 - junção	9
TOTAL Modelo	509

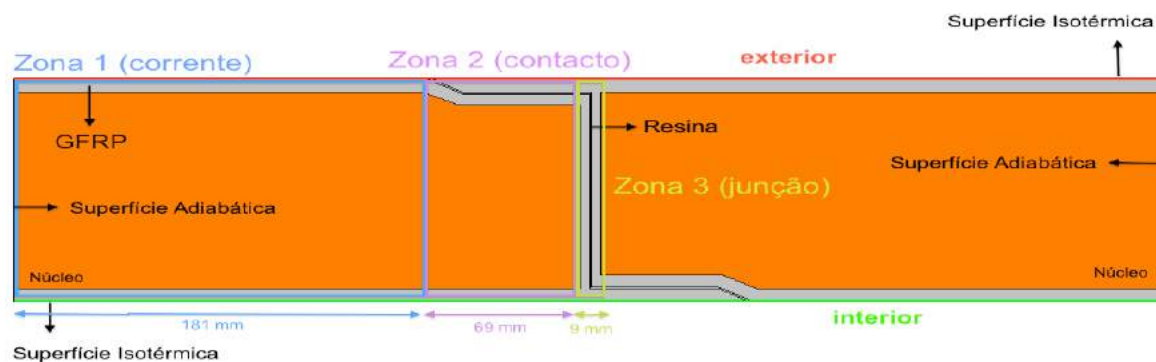


Figura 4.2 - Modelo elaborado para a análise térmica da solução.

Como se pode observar pela

Figura 4.2, cada uma das zonas delimitada apresenta diferentes composições de material. As zonas correntes, com 181 mm cada, são caracterizadas por 2 lâminas de GFRP e o núcleo de 120 mm. As zonas de contacto com 69 mm cada, diferem da zona corrente pela sobreposição de uma aba de GFRP, reduzindo assim a espessura do núcleo. Por último, a zona de junção com um comprimento total de 9 mm, é apenas composta por 2 lâminas de 4 mm em GFRP e 1 mm de resina.

Para efectuar a modelação no THERM, para além da introdução da geometria e características dos materiais, é também necessário caracterizar as superfícies do modelo. Assim sendo, atribuíram-se superfícies adiabáticas (sem trocas de matéria ou calor) às extremidades esquerda e direita, uma vez que o elemento tem continuidade, e superfícies isotérmicas às superfícies superior e inferior, que representam a fronteira para o ambiente exterior e interior respectivamente.

4.4 Cenários em estudo

Para o estudo do comportamento térmico dos painéis sanduíche, utilizados como soluções de pisos (elementos horizontais) e de paredes (elementos verticais), existem vários cenários que requerem análise. Se as soluções sanduíche forem utilizadas como lajes, há que equacionar a possibilidade de estas serem utilizadas como pisos intermédios ou como coberturas planas. Face a esta situação, e uma vez que trocas de calor em pisos intermédios entre dois espaços aquecidos são praticamente nulas, e entre um espaço aquecido e outro não aquecido são inferiores às que ocorrem numa cobertura exterior, só se estudará a situação mais condicionante, que neste caso serão as lajes de cobertura. Analogamente, se as soluções sanduíche forem utilizadas como paredes, só se fará o estudo para as paredes exteriores. Se estas soluções cumprirem os requisitos mínimos, assegura-se assim o cumprimento dos restantes casos. Adicionalmente ao tipo de utilização, existem dois cenários distintos que podem ocorrer na envolvente da solução, o Inverno e o Verão. Se é fácil reconhecer que o caso de Inverno é o mais condicionante quando se considera a condutibilidade térmica constante, o mesmo não se pode afirmar quando se faz um estudo dinâmico, em que a condutibilidade térmica dos materiais é influenciada pela sua temperatura média. Assim sendo, estudar-se-ão as soluções sanduíche em lajes de cobertura e paredes exteriores para a situação de Inverno e para a situação de Verão. Uma vez que o fluxo de calor se dá das temperaturas mais alta para as mais baixas, o fluxo de calor unidireccional nas paredes será sempre horizontal independentemente da estação do ano, sendo que nas coberturas será ascendente no Inverno e, em certas horas do dia, descendente no Verão.

Em face dos cenários a serem estudados, apresenta-se na Tabela 4.2 as temperaturas médias (diárias) de referência de Inverno e de Verão, para posterior cálculo de necessidades energéticas. Na Tabela 4.3 apresentam-se as resistências térmicas superficiais de acordo com a direcção de fluxo de calor e na Tabela

4.4 as condutibilidades térmicas dos materiais para a situação de Inverno e para a situação de Verão, com base nas linhas de tendência obtidas com o Rapid-k. Para este estudo, serão ainda considerados painéis sanduíche com dimensões diferentes das que foram determinadas pelas características mecânicas. Para cada tipo de material de núcleo, estudar-se-ão as espessuras de 80, 100, 120, 140 e 160 mm. Para uma posterior análise face aos resultados obtidos, na Tabela 4.5 encontram-se os valores recomendados para os coeficientes de transmissão superficial de paredes exteriores e coberturas de 6 países europeus, incluindo Portugal. De referir, que estes valores são os recomendados e não necessariamente os máximos regulamentares. De facto, em Portugal os valores máximos admissíveis para uma cobertura e parede exterior são de 0,9 e 1,45 W/m².°C, sendo os valores indicados na Tabela 4.5 os valores de coeficiente de transmissão térmica de referência [29].

Tabela 4.2 - Temperaturas de referência de Inverno e de Verão [60].

	<i>Temperaturas de referência</i>	
	<i>Inverno</i>	<i>Verão</i>
T_{in} (°C)	20	25
T_{out} (°C)	0	30
T_{mean} (°C)	10	27,5
ΔT (°C)	20	5

Tabela 4.3 - Resistências térmicas superficiais [61].

	<i>Direcção do fluxo de calor</i>		
	<i>Ascendente</i>	<i>Horizontal</i>	<i>Descendente</i>
R_{si} (m ² .°C/W)	0,10	0,13	0,17
R_{se} (m ² .°C/W)	0,04	0,04	0,04

Tabela 4.4 - Condutibilidades térmicas dos materiais em função da temperatura média.

	<i>Inverno</i>	<i>Verão</i>
	<i>T_{mean} = 10°C</i>	<i>T_{mean} = 27,5°C</i>
Material	λ (W/m.°C)	λ (W/m.°C)
GFRP	0,1394	0,1517
PP honeycombs	0,1384	0,1577
Balsa	0,0691	0,0726
PET	0,0373	0,0391
PUR	0,0184	0,0237

Tabela 4.5 - Coeficientes de transmissão superficial recomendados em vários países da Europa [29,62].

País	ISO 3166-1 Código do País	<i>Recomendações Existentes</i>			
		<i>U (W/m².°C)</i>			
		<i>Paredes exteriores</i>		<i>Coberturas</i>	
		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Bulgária	BGR	0,50	0,50	0,30	0,30
Dinamarca	DNK	0,20	0,40	0,15	0,25
França	FRA	0,36	0,40	0,20	0,25
Alemanha	DEU	0,30	0,30	0,20	0,20
Portugal	PRT	0,35	0,50	0,30	0,40
Reino Unido	GBR	0,25	0,35	0,13	0,20

4.5 Metodologia de cálculo do coeficiente de transmissão térmica superficial (U) e do coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ)

Neste subcapítulo será descrita a metodologia para determinação do coeficiente de transmissão térmica superficial por via analítica, obtendo-se o seu valor médio (U_{med}), e por via do programa de cálculo automático THERM, obtendo-se o seu valor total (U_{tot}). Adicionalmente, serão calculados também os fluxos de calor por forma a determinar o coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ).

4.5.1 Cálculo de U-médio (U_{med}) e fluxo de calor unidireccional

Um elemento de uma construção, ao ser constituído por mais do que um tipo de material, pode apresentar diversas combinações de materiais face ao fluxo de calor: em série, em paralelo ou em série e paralelo simultaneamente. Como se pode observar pelo modelo elaborado (

Figura 4.2) existem três zonas diferentes em paralelo (zona 1 - zona corrente; zona 2 - contacto; zona 3 - contacto), e cada uma das zonas é composta por diferentes materiais em série face ao fluxo de calor. Para determinar o coeficiente de transmissão térmica superficial médio (U_{med}), há que determinar primeiro o coeficiente de transmissão térmica de cada zona, sendo o seu valor médio determinado por uma ponderação de cada zona com as respectivas áreas perpendiculares ao fluxo de calor. Começando por analisar cada uma das 3 zonas com elementos dispostos em série, o seu coeficiente de transmissão térmica pode ser obtido através da Equação 4.2. Depois de calculado o coeficiente de cada zona, é possível calcular o coeficiente médio através da Equação 4.3. Esta equação contabiliza a contribuição de cada zona com base na sua área perpendicular ao fluxo.

$$U_{zona} = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \sum \frac{e}{\lambda}} \quad (4.2)$$

em que,

U_{zona} - coeficiente de transmissão térmica superficial da zona [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

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

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

e - espessura do material [m];

λ - condutibilidade térmica do material [$W/m \cdot ^\circ C$].

$$U_{med} = \frac{\sum U_{zona} \times A_{zona}}{\sum A_{zona}} \quad (4.3)$$

em que,

U_{med} - coeficiente de transmissão térmica superficial médio do modelo [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

U_{zona} - coeficiente de transmissão térmica superficial da zona [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

A_{zona} - área da zona com U_{zona} [m^2].

Depois de calculado o coeficiente de transmissão térmica médio, é possível então, determinar o fluxo de calor que atravessa o modelo através da Equação 4.4. Note-se que este fluxo de calor não contabiliza as trocas adicionais provocadas pela ponte térmica, contabilizando apenas a quantidade de fluxo unidireccional.

$$Q_{calc} = U_{med} \times L_m \times \Delta T \quad (4.4)$$

em que,

Q_{calc} - fluxo de calor unidireccional que atravessa o modelo por metro de profundidade [W/m];

U_{med} - coeficiente de transmissão térmica superficial médio do modelo [W/m².°C];

L_m - largura do modelo [m];

ΔT - gradiente térmico estabelecido no modelo [°C].

4.5.2 Determinação de U-total (U_{tot}) e fluxo de calor utilizando o THERM

Para determinar o coeficiente de transmissão térmica total (U_{tot}) através do modelo que foi elaborado, contabilizando as perdas de calor adicionais provocadas pela ponte térmica, recorreu-se ao programa THERM. Este programa permite, com base no modelo elaborado (ver

Figura 4.2), obter directamente o coeficiente de transmissão térmica superficial total (U_{tot}) de cada solução em análise. Para tal, introduzem-se as temperaturas dos ambientes exterior e interior do cenário que se pretende analisar (Inverno ou Verão), presentes na Tabela 4.2, as resistências térmicas superficiais de acordo com a direcção de fluxo de calor (ver Tabela 4.3 e a condutibilidade térmica dos materiais para a temperatura média de cada cenário (ver Tabela 4.4).

Na Figura 4.3, apresenta-se o ambiente de trabalho do software THERM. Na parte superior esquerda do ambiente de trabalho é possível observar a janela de input das características dos materiais, nomeadamente os valores de condutibilidade térmica dos materiais. Na parte superior direita é possível observar a janela de input das características das superfícies, onde se introduzem os coeficientes de condutância térmica superficial, e a temperatura do ambiente. Por último, na parte inferior é possível observar a janela de output de resultados, onde se pode obter o valor dos coeficientes de transmissão térmica superficial de cada modelo em análise, e os outputs gráficos no modelo tais como os vectores de fluxo de calor. Adicionalmente, podem-se obter outputs gráficos de linhas isotérmicas, bem como temperaturas e fluxos de calor ilustrados com cores. Para calcular o fluxo de calor que atravessa o modelo recorreu-se à Equação 4.5.

$$Q_{THERM} = U_{tot} \times L_m \times \Delta T \quad (4.5)$$

em que,

Q_{THERM} - fluxo de calor total que atravessa o modelo, obtido através do THERM [W/m];

U_{tot} - coeficiente de transmissão térmica superficial total do modelo, obtido através do THERM [W/m².°C];

L_m - largura do modelo [m];

ΔT - gradiente térmico estabelecido no modelo [°C].

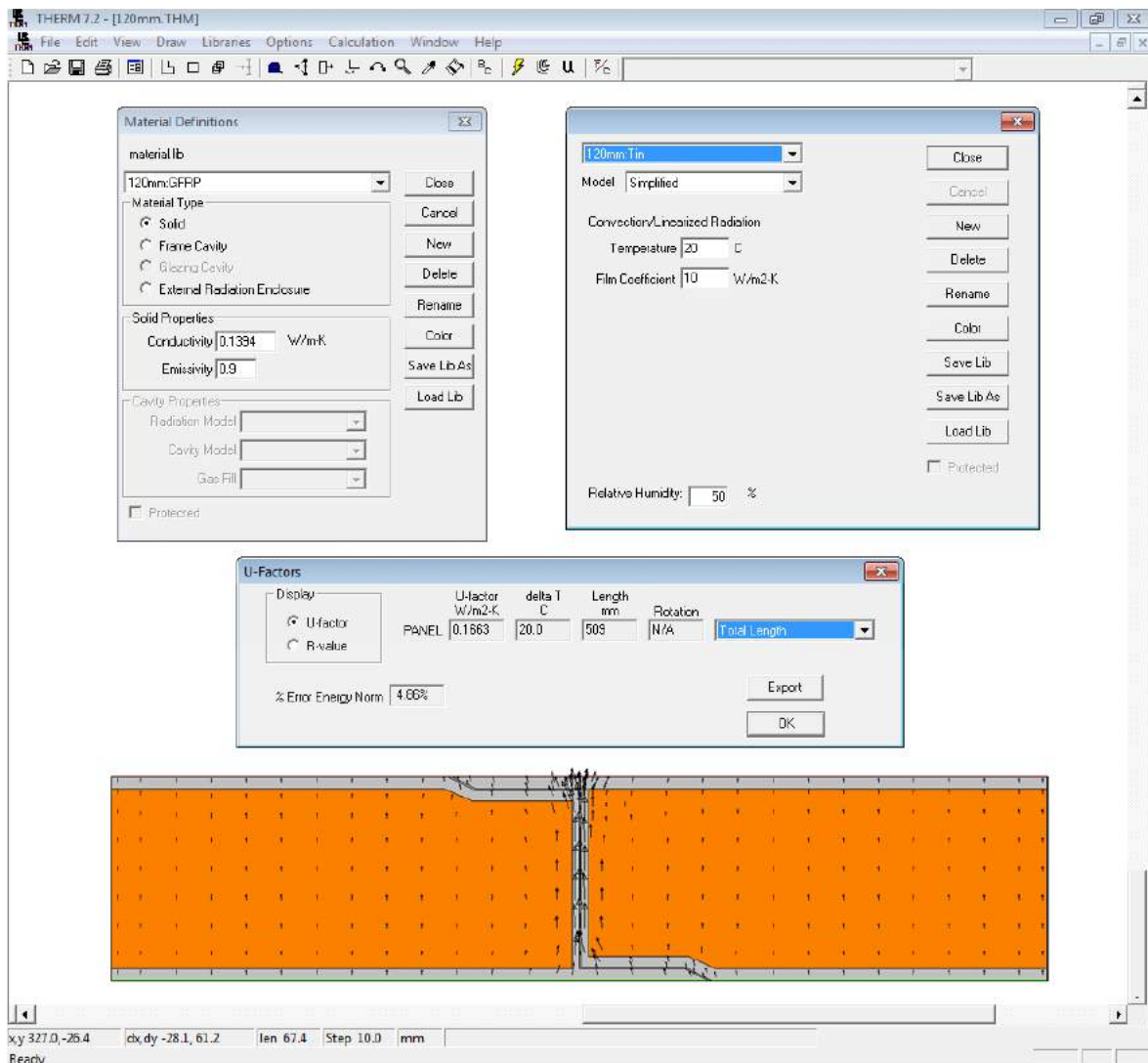


Figura 4.3 - Ambiente de trabalho do software THERM com as janelas de inputs (propriedades dos materiais e superfícies), janela de output (coeficiente de transmissão térmica superficial total) e output gráfico dos vectores de fluxo de calor no modelo.

4.5.3 Cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ)

Após a determinação dos fluxos de calor unidireccional e total, através de expressões analíticas (Equação 4.4) e do THERM (Equação 4.5) respectivamente, é possível determinar o coeficiente de transmissão térmica linear para os cenários de Inverno e Verão. Este coeficiente é calculado através da Equação 4.6, em que o numerador ($Q_{\text{THERM}} - Q_{\text{calc}}$) corresponde à parcela adicional de fluxo de calor originada pela ponte térmica.

$$\Psi = \frac{Q_{THERM} - Q_{calc}}{\Delta T} \quad (4.6)$$

em que,

Ψ - coeficiente de transmissão térmica linear [W/m°C];

Q_{THERM} - fluxo de calor total que atravessa o modelo, obtido através do THERM [W/m];

Q_{calc} - fluxo de calor que atravessa o modelo por metro de profundidade [W/m];

ΔT - gradiente térmico estabelecido no modelo [°C].

4.6 Apresentação de resultados

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados dos coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), bem como os fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}), obtidos respectivamente por via analítica e com recurso ao programa de cálculo automático THERM, bem como os coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ). Para a obtenção destes resultados foi utilizada a metodologia descrita no subcapítulo anterior. Os resultados serão apresentados em 4 subcapítulos, correspondentes às 4 situações analisadas: lajes de cobertura e paredes exteriores para os cenários de Inverno e Verão.

4.6.1 Solução de laje de cobertura para a situação de Inverno

Para a solução de laje de cobertura em situação de Inverno, apresentam-se na Tabela 4.6 os coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), os fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e os coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ). Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, apresentam-se os gráficos das Figuras 4.4 e 4.5, onde é possível observar os coeficientes de transmissão térmica superficial e de transmissão térmica linear, respectivamente. Estes apresentam-se em função da espessura do núcleo para os diferentes materiais que o podem constituir. Na Figura 4.4, apresentam-se ainda os valores de coeficientes de transmissão térmica recomendados em vários países europeus, incluindo Portugal, para que sejam comparados os desempenhos das soluções face à regulamentação em vigor.

Pela observação da Tabela 4.6 e da Figura 4.4, é fácil constatar que à medida que a espessura do núcleo aumenta, diminui o coeficiente de transmissão térmica superficial de cada solução. Consequentemente, o fluxo de calor irá também diminuir. O coeficiente de transmissão térmica é também função da condutibilidade térmica dos materiais, em que os PP honeycombs apresentam a maior transmissão, seguidos da Balsa, PET e PUR. Analisando agora cada uma das soluções face à regulamentação dos diversos países seleccionados, para todas as espessuras de núcleo entre os 80 e os 160 mm, as soluções de PP honeycombs e Balsa não garantem as recomendações de nenhum dos países analisados. A solução de PET garante a partir dos 120 mm, as recomendações para a Bulgária e para Portugal. Já a solução em PUR, garante as recomendações para todas as espessuras analisadas (a partir dos 80 mm) para Portugal e Bulgária, a partir dos 100 mm para a Dinamarca, a partir dos 140 mm apresenta uma transmissão da ordem de grandeza recomendada para França e Alemanha, e para 160 mm de espessura garante as recomendações de todos os países, incluindo o Reino Unido.

Tabela 4.6 - Coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) para lajes de cobertura no Inverno.

$\Delta T = 20^\circ C$	comprimento = 509 mm	Calculado		THERM		
Material do núcleo	Espessura do núcleo (mm)	U_{med} ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Q_{calc} (W/m)	U_{tot} ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Q_{THERM} (W/m)	Ψ ($W/m \cdot ^\circ C$)
PP honeycombs	80	1,2010	12,2264	1,2010	12,2262	0,0000
	100	1,0234	10,4184	1,0234	10,4182	0,0000
	120	0,8916	9,0763	0,8916	9,0765	0,0000
	140	0,7898	8,0405	0,7899	8,0412	0,0000
	160	0,7089	7,2169	0,7089	7,2166	0,0000
Balsa	80	0,7251	7,3810	0,7260	7,3907	0,0002
	100	0,6010	6,1184	0,6018	6,1263	0,0002
	120	0,5132	5,2248	0,5139	5,2315	0,0002
	140	0,4479	4,5591	0,4484	4,5647	0,0001
	160	0,3972	4,0440	0,3976	4,0476	0,0001
PET	80	0,4386	4,4652	0,4421	4,5006	0,0009
	100	0,3580	3,6446	0,3606	3,6709	0,0007
	120	0,3025	3,0793	0,3044	3,0988	0,0005
	140	0,2619	2,6660	0,2635	2,6824	0,0004
	160	0,2309	2,3506	0,2321	2,3628	0,0003
PUR	80	0,2400	2,4435	0,2459	2,5033	0,0015
	100	0,1942	1,9772	0,1985	2,0207	0,0011
	120	0,1632	1,6611	0,1663	1,6929	0,0008
	140	0,1407	1,4324	0,1431	1,4568	0,0006
	160	0,1237	1,2592	0,1256	1,2786	0,0005

Pela observação da Tabela 4.6 e da Figura 4.5, o coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ) é desprezável, chegando mesmo a ser nulo no caso dos PP honeycombs. A razão pela qual não existe influência da ponte térmica, deve-se ao facto de o GFRP e o PP honeycombs apresentarem praticamente a mesma condutibilidade térmica para esta temperatura. Assim sendo, o modelo comporta-se termicamente como se fosse constituído por um só material. Este facto pode ainda ser constatado pela observação da Tabela 4.6, onde os fluxos de calor calculados e os obtidos com recurso ao THERM são praticamente iguais.

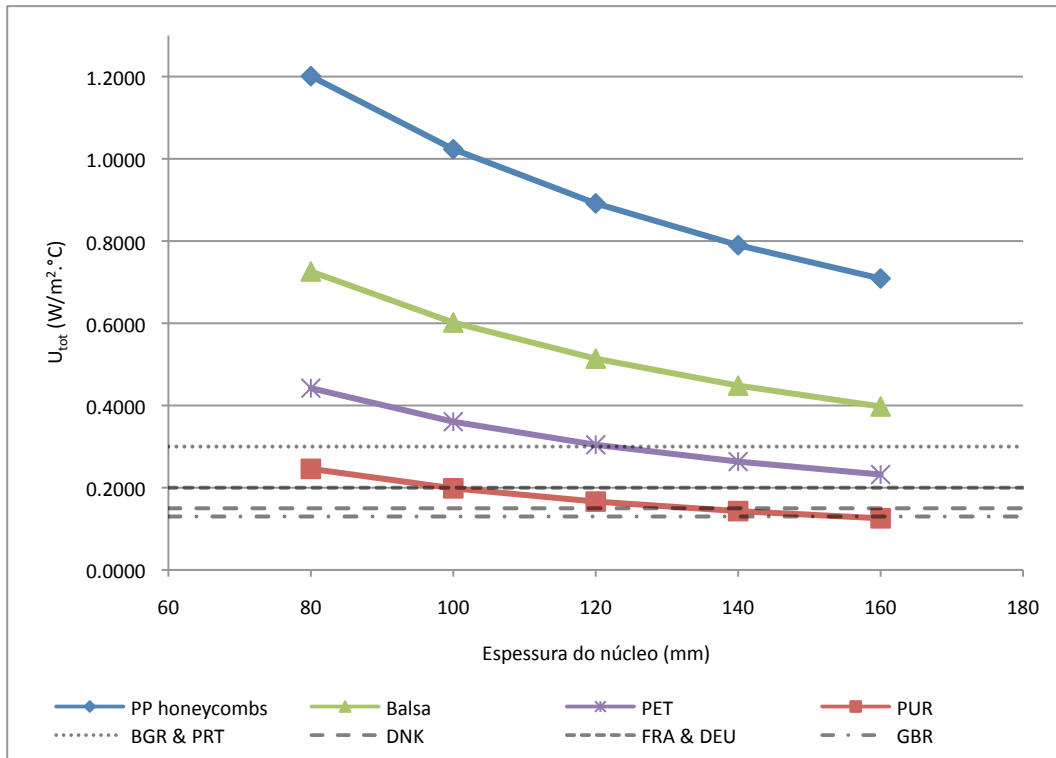


Figura 4.4 - Comparação do coeficiente de transmissão térmica superficial total (U_{tot}) em lajes de cobertura das várias soluções com recomendações de alguns países europeus para o cenário de Inverno.

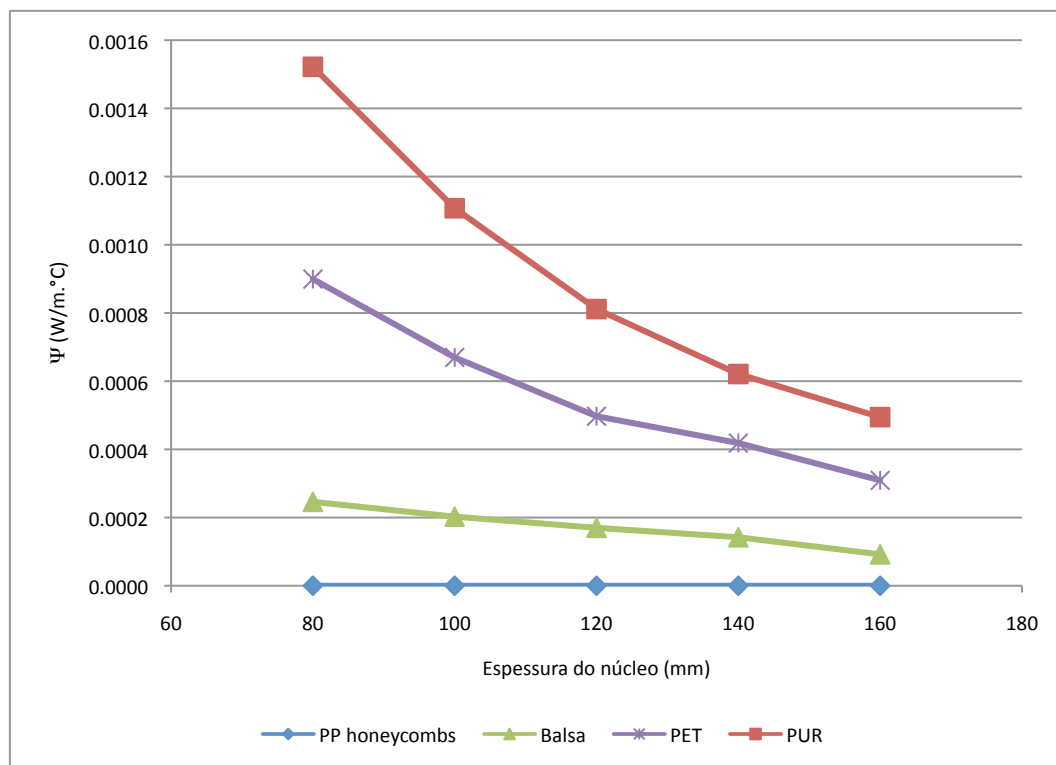


Figura 4.5 - Coeficiente de transmissão linear (Ψ) em coberturas para o cenário de Inverno.

4.6.2 Solução de laje de cobertura para a situação de Verão

Analogamente à solução de laje de cobertura para a situação de Inverno, apresenta-se agora na Tabela 4.7, os coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), os fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e os coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) para a situação de Verão. Nas Figuras 4.6 e 4.7, apresentam-se estes resultados em gráfico, bem como as recomendações para os vários países europeus seleccionados.

Tabela 4.7 - Coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) para lajes de cobertura no Verão.

$\Delta T = 5^{\circ}C$	comprimento = 509 mm	Calculado		THERM		
Material do núcleo	Espessura do núcleo (mm)	U_{med} ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)	Q_{calc} (W/m)	U_{tot} ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)	Q_{THERM} (W/m)	Ψ ($W/m \cdot ^{\circ}C$)
PP honeycombs	80	1,2138	3,0892	1,2141	3,0899	0,0001
	100	1,0517	2,6767	1,0520	2,6773	0,0001
	120	0,9279	2,3614	0,9281	2,3620	0,0001
	140	0,8301	2,1126	0,8304	2,1134	0,0001
	160	0,7510	1,9112	0,7512	1,9118	0,0001
Balsa	80	0,7221	1,8377	0,7234	1,8411	0,0007
	100	0,6040	1,5372	0,6051	1,5400	0,0006
	120	0,5192	1,3213	0,5200	1,3234	0,0004
	140	0,4552	1,1585	0,4560	1,1605	0,0004
	160	0,4053	1,0315	0,4059	1,0330	0,0003
PET	80	0,4444	1,1309	0,4492	1,1432	0,0025
	100	0,3649	0,9287	0,3683	0,9373	0,0017
	120	0,3096	0,7880	0,3125	0,7953	0,0015
	140	0,2689	0,6844	0,2713	0,6905	0,0012
	160	0,2377	0,6049	0,2396	0,6098	0,0010
PUR	80	0,2927	0,7450	0,2998	0,7630	0,0036
	100	0,2383	0,6065	0,2436	0,6200	0,0027
	120	0,2011	0,5117	0,2051	0,5220	0,0021
	140	0,1739	0,4426	0,1772	0,4510	0,0017
	160	0,1532	0,3900	0,1559	0,3968	0,0014

Os coeficientes de transmissão térmica, à semelhança do cenário de Inverno, encontram-se ordenados do maior para o menor, de acordo com a condutibilidade térmica dos materiais. Uma vez que a condutibilidade térmica dos materiais aumenta com a temperatura, origina coeficientes de transmissão térmica superficial mais elevados face ao cenário de Inverno, ainda que a resistência superficial interior seja maior. Face às recomendações dos países, o PUR ainda garante as recomendações para todas as espessuras analisadas (dos 80 aos 160 mm) para a Bulgária e Portugal, no entanto, a solução de 160 mm apenas satisfaz as recomendações da Dinamarca, sendo que as do Reino Unido não são satisfeitas por nenhuma solução. A solução de 120 mm de PET está perto de garantir as recomendações para Portugal e Bulgária, estando estas asseguradas para espessuras de 140 e 160 mm.

Apesar de neste caso os coeficientes de transmissão térmica linear serem superiores, são valores que se podem considerar desprezáveis face à importância que terão nas trocas de calor.

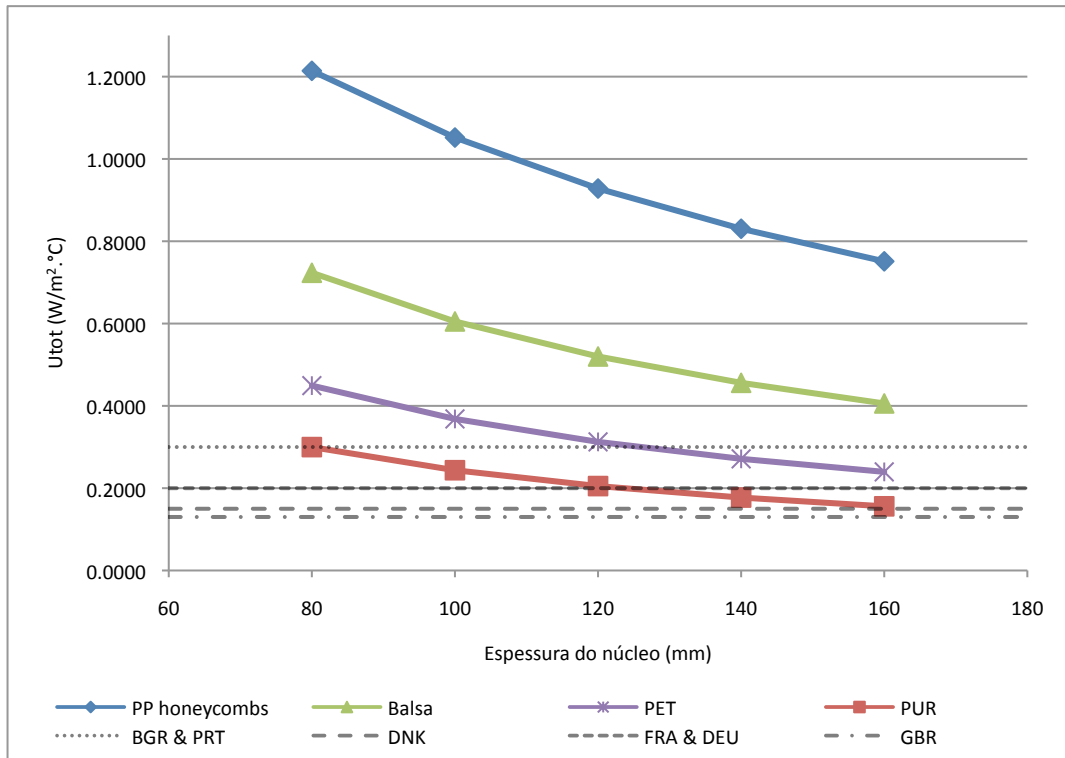


Figura 4.6 - Comparação do coeficiente de transmissão térmica superficial total (U_{tot}) em lajes de cobertura das várias soluções com recomendações de alguns países europeus para o cenário de Verão.

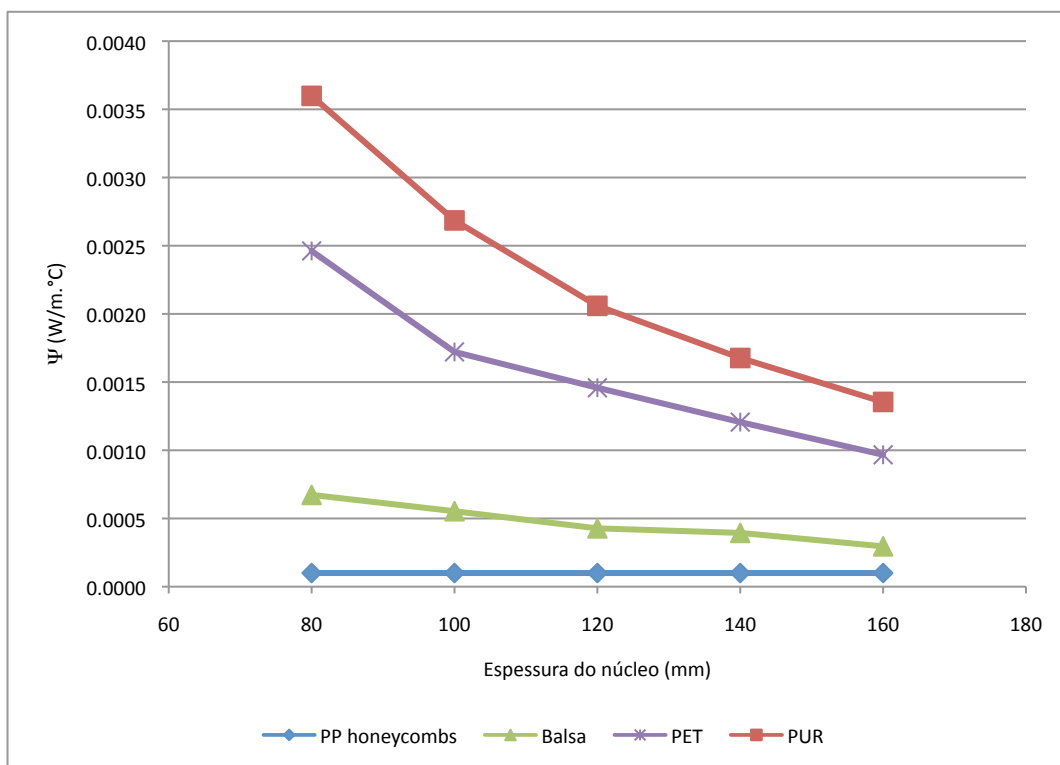


Figura 4.7 - Coeficiente de transmissão linear (Ψ) em coberturas para o cenário de Verão.

4.6.3 Solução de parede exterior para a situação de Inverno

Para a solução de parede exterior em situação de Inverno, apresentam-se na Tabela 4.8 os coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), os fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e os coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ). As Figuras 4.8 e 4.9 mostram os resultados de coeficientes de transmissão térmica superficial e de transmissão térmica linear, respectivamente, em função da espessura do núcleo para os diferentes materiais que o podem preencher. Na Figura 4.9, apresentam-se ainda as recomendações de vários países europeus, incluindo Portugal, para que sejam comparados os desempenhos das soluções face à regulamentação em vigor.

Tabela 4.8 - Coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) para paredes exteriores no Inverno.

$\Delta T = 20^\circ C$	comprimento = 509 mm	Calculado		THERM		
Material do núcleo	Espessura do núcleo (mm)	U_{med} ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Q_{calc} (W/m)	U_{tot} ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Q_{THERM} (W/m)	Ψ ($W/m \cdot ^\circ C$)
PP honeycombs	80	1,1593	11,8012	1,1592	11,8007	0,0000
	100	0,9929	10,1081	0,9929	10,1077	0,0000
	120	0,8684	8,8398	0,8683	8,8393	0,0000
	140	0,7715	7,8544	0,7716	7,8549	0,0000
	160	0,6942	7,0666	0,6941	7,0659	0,0000
Balsa	80	0,7095	7,2226	0,7105	7,2329	0,0003
	100	0,5903	6,0090	0,5911	6,0174	0,0002
	120	0,5054	5,1448	0,5060	5,1511	0,0002
	140	0,4419	4,4980	0,4424	4,5036	0,0001
	160	0,3925	3,9958	0,3929	3,9997	0,0001
PET	80	0,4326	4,4041	0,4363	4,4415	0,0010
	100	0,3540	3,6035	0,3567	3,6312	0,0007
	120	0,2996	3,0497	0,3016	3,0703	0,0005
	140	0,2597	2,6437	0,2614	2,6611	0,0004
	160	0,2292	2,3332	0,2305	2,3465	0,0003
PUR	80	0,2378	2,4211	0,2440	2,4839	0,0016
	100	0,1927	1,9621	0,1972	2,0075	0,0012
	120	0,1621	1,6501	0,1654	1,6838	0,0009
	140	0,1399	1,4241	0,1425	1,4507	0,0007
	160	0,1231	1,2527	0,1251	1,2735	0,0005

Analisando a Tabela 4.8 e a Figura 4.8, e à semelhança das mesmas soluções aplicadas em coberturas, os coeficientes de transmissão térmica superficial decrescem com o aumento da espessura do núcleo, e com a diminuição da condutibilidade térmica da solução do núcleo. Este facto é facilmente constatado, uma vez que o único parâmetro que muda é a resistência térmica superficial interior do elemento.

Para as soluções em paredes exteriores, as recomendações para os vários países não se apresentam com um grau de exigência tão elevado como para coberturas, o que leva a que outras soluções possam vir a ser aplicadas. Ainda assim, as soluções estudadas em PP honeycombs não garantem as recomendações de nenhum país. Por outro lado, a solução de Balsa pode ser aplicada na Bulgária como parede exterior a partir dos 120 mm de espessura, no entanto, não garante as recomendações em mais nenhum país. A solução de PET encontra-se ao nível das recomendações para Portugal e França a partir dos 100 mm, da Alemanha a

partir dos 120 mm e do Reino Unido para 160 mm, não garantindo apenas as recomendações da Dinamarca. Por último, a solução de PUR cumpre todas as recomendações a partir dos 100 mm, e com 80 mm de espessura apenas não verifica a recomendação da Dinamarca.

À semelhança da aplicação da solução em coberturas para a situação de Inverno, o coeficiente de transmissão térmica linear é praticamente nulo em todas as soluções, chegando mesmo a sê-lo para a solução composta por PP honeycombs no seu núcleo. Este facto deve-se à condutibilidade térmica deste material ser praticamente igual à do GFRP para a temperatura média de Inverno. Assim sendo, a solução comporta-se como se fosse constituída apenas por um material com essa condutibilidade térmica em que não existem efeitos de pontes térmicas.

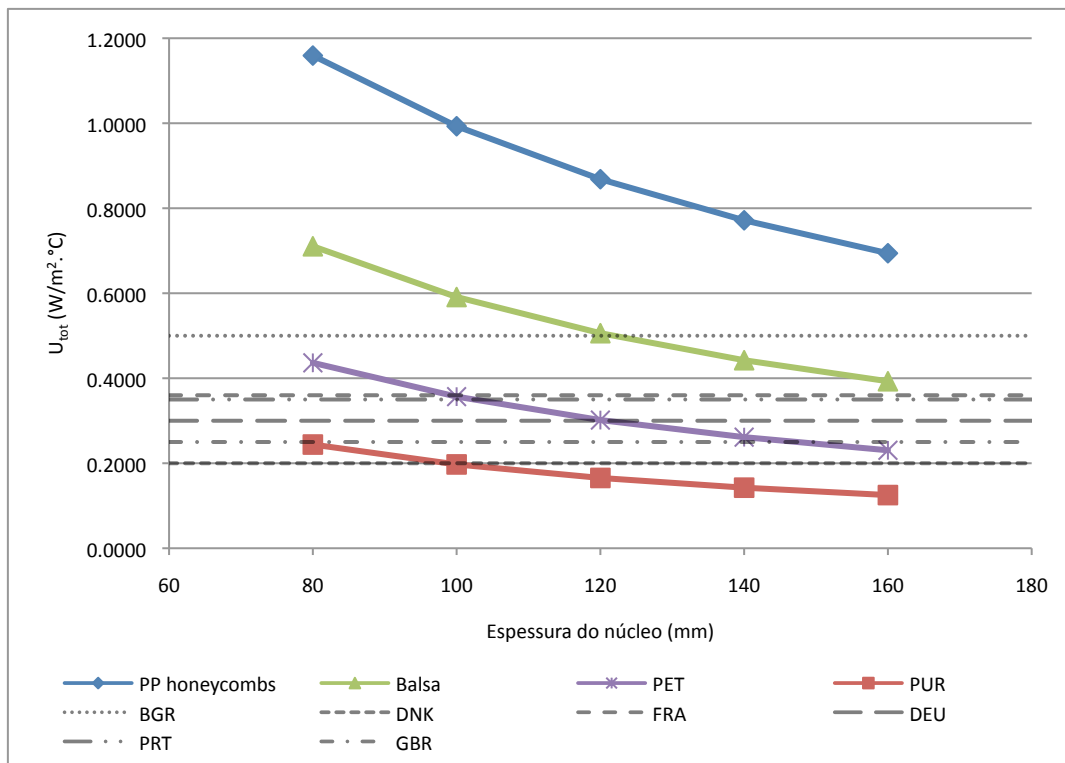


Figura 4.8 - Comparação do coeficiente de transmissão térmica superficial total (U_{tot}) em paredes exteriores das várias soluções com recomendações de alguns países europeus para o cenário de Inverno.

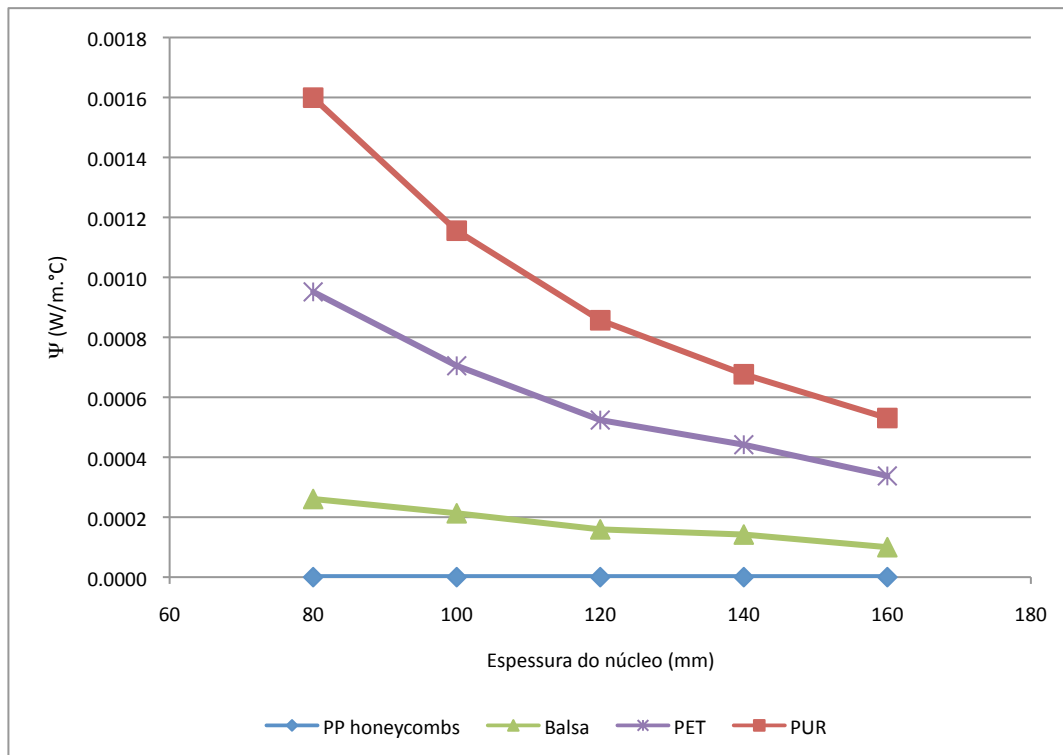


Figura 4.9 - Coeficiente de transmissão linear (Ψ) em paredes para o cenário de Inverno.

4.6.4 Solução de parede exterior para a situação de Verão

Analogamente à solução de parede exterior para a situação de Inverno, apresenta-se agora na Tabela 4.9, os coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), os fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e os coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) para a situação de Verão. Nas Figuras 4.10 e 4.11, apresentam-se estes resultados em forma de gráfico, bem como as recomendações para os vários países europeus seleccionados.

Face ao aumento da temperatura média, que se traduz num aumento de condutibilidade térmica, os coeficientes de transmissão térmica superficial vão ser superiores face ao cenário de Inverno, uma vez que mais nenhum outro parâmetro sofre modificações.

Uma vez que os coeficientes de transmissão térmica aumentaram, e as recomendações se mantêm constantes, soluções que inicialmente garantiam as recomendações regulamentares deixarão de o fazer. A solução de Balsa por exemplo, necessitaria de um núcleo com aproximadamente 130 mm para satisfazer as recomendações da Bulgária, ou seja, um acréscimo de 10 mm no seu núcleo. A solução de PET para atingir as recomendações de Portugal e França, necessita agora 120 mm em vez dos 100 mm, para garantir as recomendações da Alemanha necessita de um núcleo de 140 mm e com 160 mm ainda garante as recomendações do Reino Unido. A solução de PUR apenas garante as recomendações para todos os países a partir dos 120 mm de espessura de núcleo, deixando aos 100 mm de garantir para a Dinamarca e aos 80 mm para o Reino Unido também.

Tabela 4.9 - Coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}) e totais (U_{tot}), fluxos de calor unidireccionais (Q_{calc}) e totais (Q_{THERM}) e coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) para paredes exteriores no Inverno.

$\Delta T = 5^\circ C$	comprimento = 509 mm	Calculado		THERM		
Material do núcleo	Espessura do núcleo (mm)	U_{med} ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Q_{calc} (W/m)	U_{tot} ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Q_{THERM} (W/m)	Ψ ($W/m \cdot ^\circ C$)
PP honeycombs	80	1,2758	3,2468	1,2761	3,2477	0,0002
	100	1,0979	2,7943	1,0983	2,7952	0,0002
	120	0,9636	2,4524	0,9639	2,4531	0,0002
	140	0,8586	2,1851	0,8589	2,1859	0,0002
	160	0,7742	1,9704	0,7744	1,9708	0,0002
Balsa	80	0,7437	1,8928	0,7450	1,8960	0,0006
	100	0,6191	1,5756	0,6201	1,5782	0,0005
	120	0,5303	1,3496	0,5311	1,3516	0,0004
	140	0,4638	1,1803	0,4645	1,1822	0,0004
	160	0,4121	1,0487	0,4126	1,0501	0,0003
PET	80	0,4528	1,1525	0,4575	1,1643	0,0024
	100	0,3707	0,9433	0,3742	0,9523	0,0018
	120	0,3138	0,7986	0,3165	0,8055	0,0014
	140	0,2721	0,6924	0,2743	0,6981	0,0011
	160	0,2402	0,6112	0,2420	0,6159	0,0009
PUR	80	0,2968	0,7554	0,3036	0,7727	0,0035
	100	0,2411	0,6136	0,2461	0,6263	0,0025
	120	0,2031	0,5168	0,2068	0,5263	0,0019
	140	0,1754	0,4465	0,1785	0,4543	0,0016
	160	0,1544	0,3930	0,1569	0,3993	0,0013

Comparativamente com as soluções de paredes exteriores para o cenário de Inverno, os coeficientes de transmissão térmica linear são sensivelmente duplicados. Ainda assim, e uma vez que são muito pequenos para cada solução, influenciam o fluxo de calor de uma forma quase desprezável.

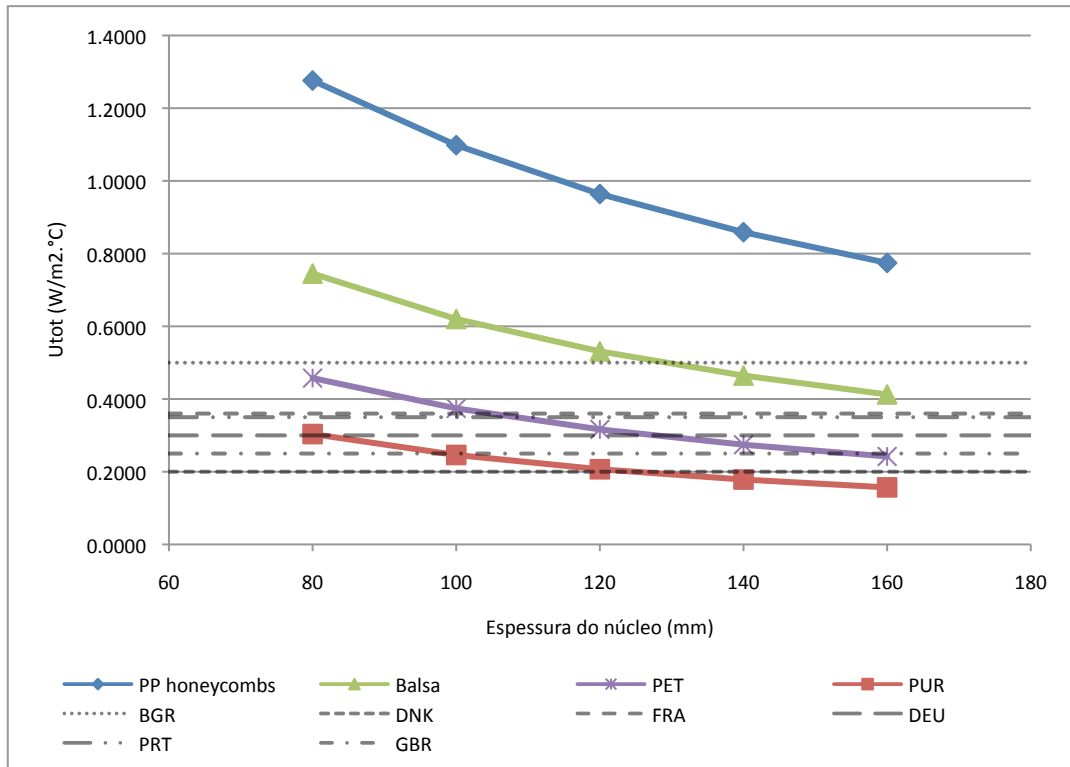


Figura 4.10 - Comparação do coeficiente de transmissão térmica superficial total (U_{tot}) em paredes exteriores das várias soluções com recomendações de alguns países europeus para o cenário de Verão.

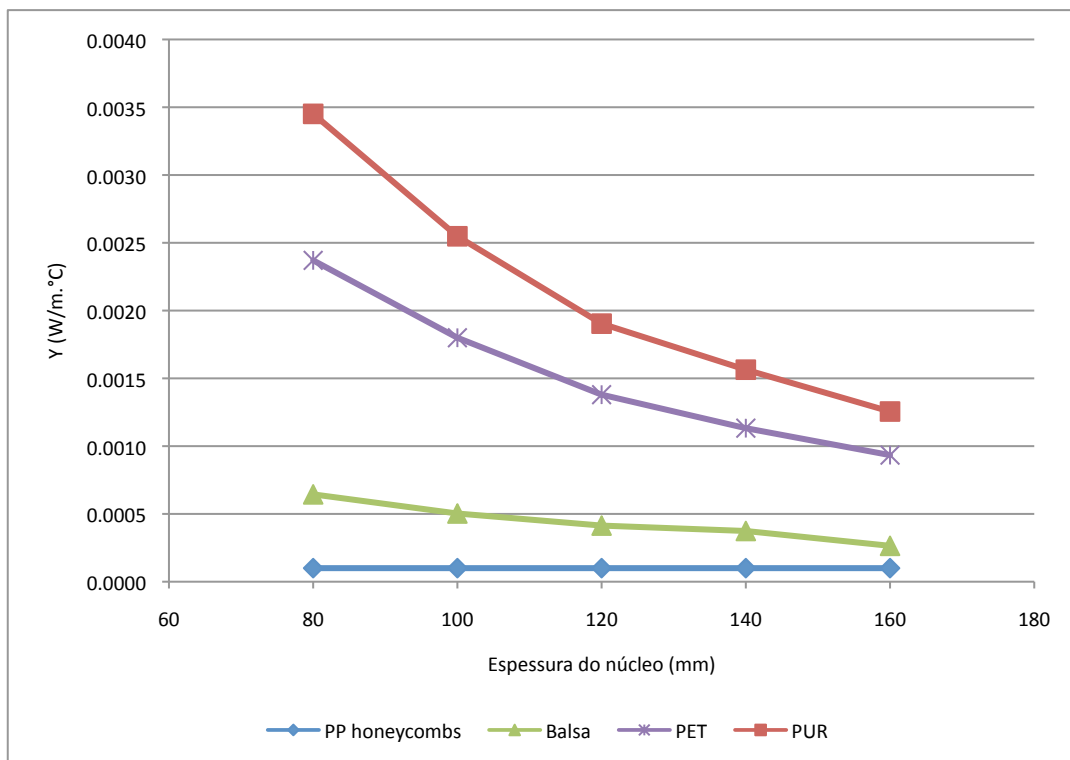


Figura 4.11 - Coeficiente de transmissão linear (Ψ) em paredes para o cenário de Verão.

4.7 Considerações finais

Face aos resultados apresentados no subcapítulo anterior, salientam-se as seguintes conclusões:

- a situação de Inverno, que se considera como situação mais condicionante para o dimensionamento de soluções, apenas o é, no caso de se considerar a condutibilidade térmica dos materiais constante face a variações de temperatura. Os materiais que foram estudados em laboratório, apresentaram aumentos de condutibilidade térmica que, apesar da resistência térmica superficial interior ser superior, fará com o que o seu coeficiente de transmissão superficial seja maior no Verão do que no Inverno;
- apesar do coeficiente de transmissão térmica ser superior no Verão, o fluxo de calor será substancialmente menor que no Inverno, uma vez que o gradiente térmico de referência são apenas 5°C face aos 20°C do Inverno. No entanto, no Verão, as temperaturas à superfície dos materiais atingem temperaturas muito superiores aos 30°C considerados devido a fenómenos de absorção solar, dependendo do local onde se encontrem. Assim sendo, o coeficiente de transmissão térmica superficial, pode ser inflacionado para um valor bastante superior ao de Inverno.
- a solução de PP honeycombs revelou-se a menos eficiente, não atingindo nenhuma recomendação dos países europeus seleccionados, com espessuras entre os 80 e os 160 mm;
- a solução de Balsa, face às recomendações dos países europeus seleccionados, apenas pode ser utilizada como parede exterior na Bulgária, e com espessuras superiores a 130 mm;
- a solução de PET revelou que pode ser utilizada em vários países com várias combinações de espessuras, sendo no entanto, menos eficiente que a solução de PUR;
- a solução de PUR revelou-se a mais eficiente, garantindo quase todas as recomendações dos países europeus seleccionados, para a espessura de 120 mm escolhida como solução face dos requisitos mecânicos. Se a solução apresentar um núcleo de 160 mm satisfaz as recomendações de todos os países seleccionados;
- todas as soluções de 120 mm de núcleo (excepto os PP honeycombs no Verão em coberturas), apesar de não garantirem as recomendações, garantem os valores mínimos de coeficientes de transmissão térmica máximos para Portugal que são os 0,9 W/m².°C;
- apesar de várias soluções apresentarem coeficientes de transmissão térmica superficial aquém das recomendações para elementos exteriores, se forem aplicadas em elementos em contacto com outros edifícios, ou em pisos e paredes interiores, garantem o desempenho recomendado;
- o fluxo de calor adicional, gerado pelo efeito da ponte térmica revelou-se insignificante para todas as soluções estudadas. No entanto, quanto maior for a disparidade de condutibilidades térmicas dos materiais e menores as espessuras do núcleo, mais se evidencia o seu efeito.

O programa THERM, para além do coeficiente de transmissão térmica superficial, apresenta ainda vários grafismos no modelo, podendo assim, compreender melhor como se efectuam as trocas de calor através dos materiais entre dois meios.

Nas Figuras 4.12 a 4.15, apresentam-se as linhas isotérmicas, os vectores de fluxo de calor, as superfícies isotérmicas a cores e os fluxos de calor a cores para a solução de 120 mm de PUR no Inverno.

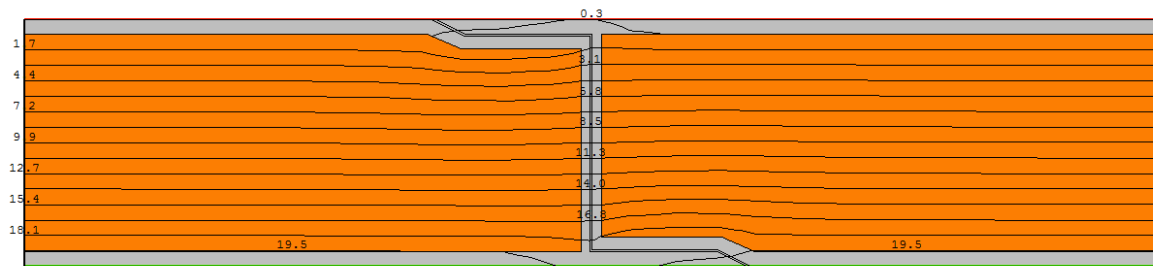


Figura 4.12 - Linhas isotérmicas da solução de 120 mm de PUR para o cenário de Inverno, obtidas com o THERM.

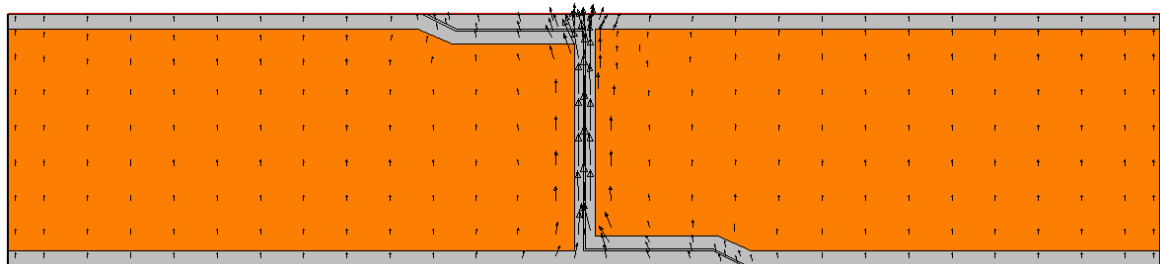


Figura 4.13 - Vectores de fluxo de calor da solução de 120 mm de PUR para o cenário de Inverno, obtidos com o THERM.

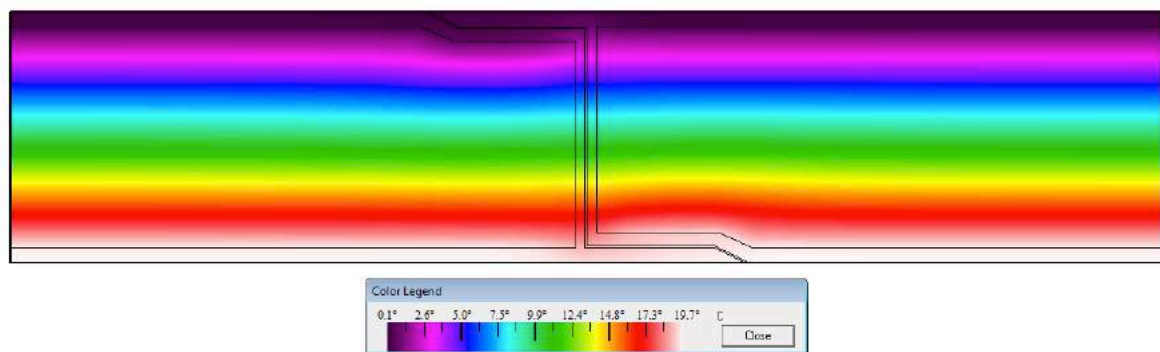


Figura 4.14 - Temperaturas na solução de 120 mm de PUR para o cenário de Inverno, obtidas com o THERM.

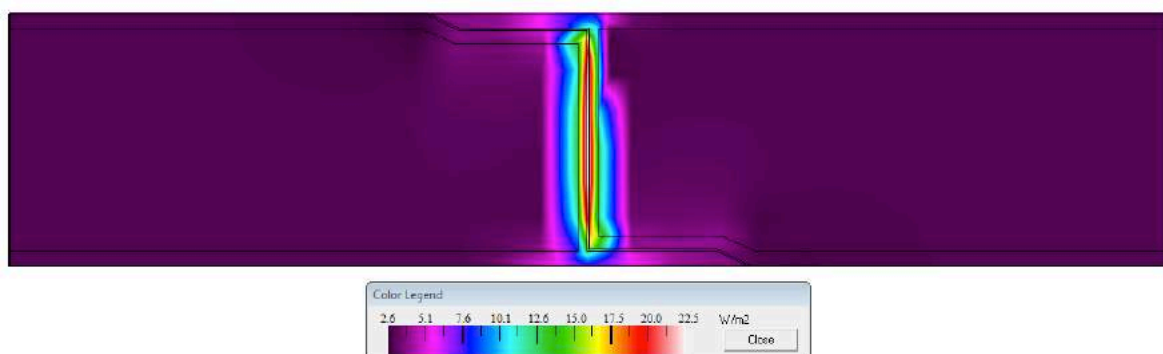


Figura 4.15 - Fluxos de calor na solução de 120 mm de PUR para o cenário de Inverno, obtidos com TEHRM.

Nas Figuras 4.16 a 4.19, apresentam-se as linhas isotérmicas, os vectores de fluxo de calor, as superfícies isotérmicas a cores e os fluxos de calor a cores para a solução de 120 mm de PUR no Verão.

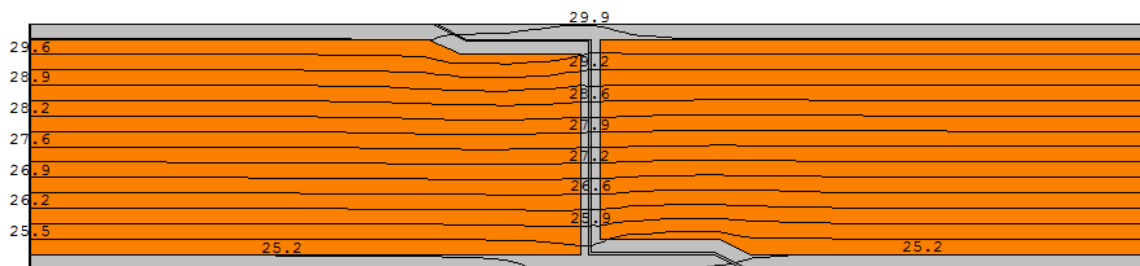


Figura 4.16 - Linhas isotérmicas da solução de 120 mm de PUR para o cenário de Verão, obtidas com o THERM.

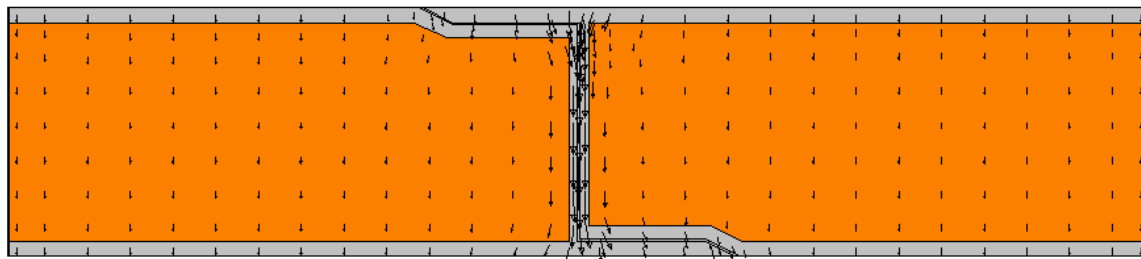


Figura 4.17 - Vectores de fluxo de calor da solução de 120 mm de PUR para o cenário de Verão, obtidos com o THERM.

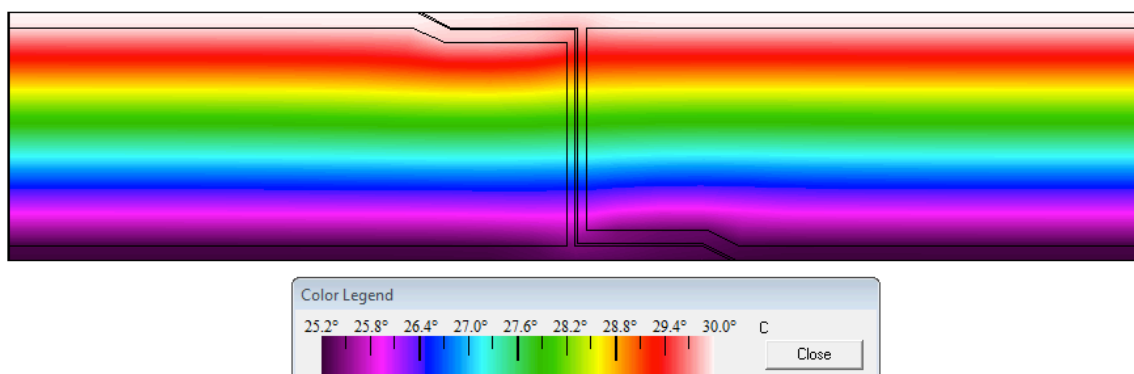


Figura 4.18 - Temperaturas na solução de 120 mm de PUR para o cenário de Verão, obtidas com o THERM.

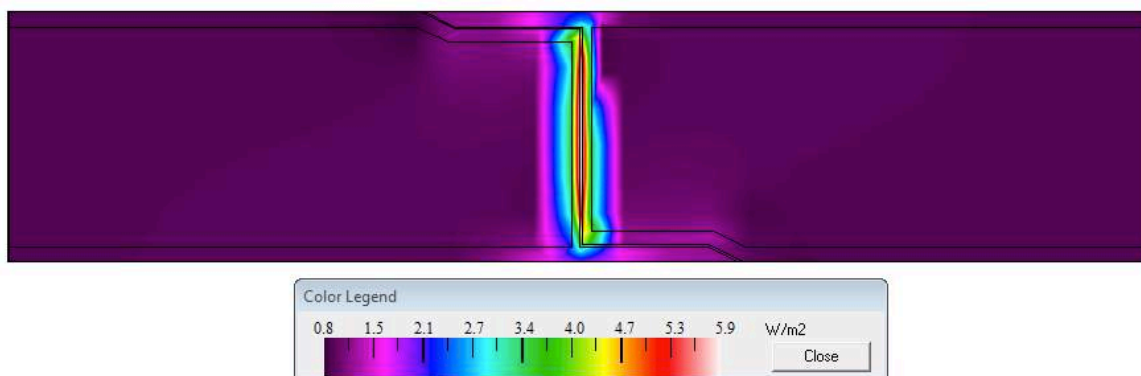


Figura 4.19 - Fluxos de calor na solução de 120 mm de PUR para o cenário de Verão, obtidos com TEHRM.

Através da observação das imagens, correspondentes à solução de 120 mm de PUR para a situação de Inverno e Verão, é possível identificar com clareza a direcção do fluxo de calor, bem como a intensidade a que este se dá em cada um dos materiais. É possível ainda determinar a zona de influência da ponte

térmica, como se distribuem as temperaturas na secção transversal da solução, entre outras. Por exemplo, através das Figuras 4.20 a 4.23 é possível identificar que a influência da ponte térmica na solução de PP honeycombs é praticamente desprezável. Como se pode observar, a variação de temperatura na secção transversal (Figura 4.20 e 4.22) é linear ao longo da espessura (isotérmicas horizontais), e os vectores de fluxo de calor são todos paralelos e perpendiculares à secção (Figura 4.21), representando assim o fluxo unidireccional que não é influenciado pelas pontes térmicas. Na Figura 4.23 pode-se observar que na união de GFRP, o fluxo é apenas ligeiramente superior ao das restantes zonas.

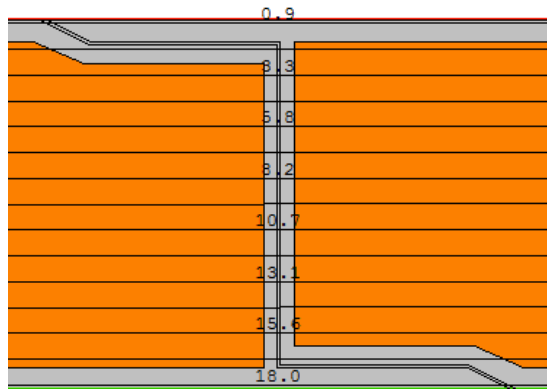


Figura 4.20 - Linhas isotérmicas na zona de ligação entre painéis da solução de 120 mm em PP honeycombs.

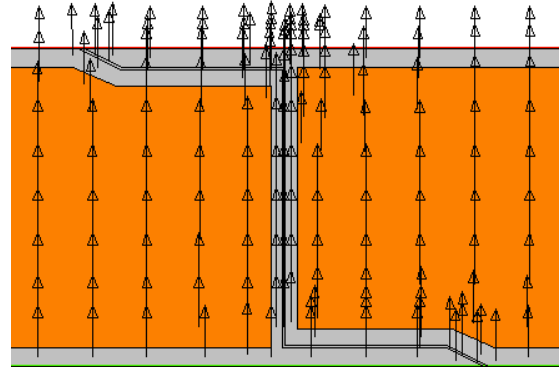


Figura 4.21 - Vectores de fluxo de calor na zona de ligação entre painéis da solução de 120 mm em PP honeycombs.

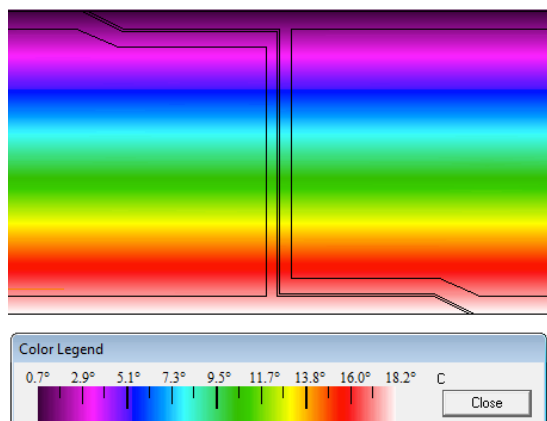


Figura 4.22 - Temperaturas na zona de ligação entre painéis na solução de 120 mm em PP honeycombs.

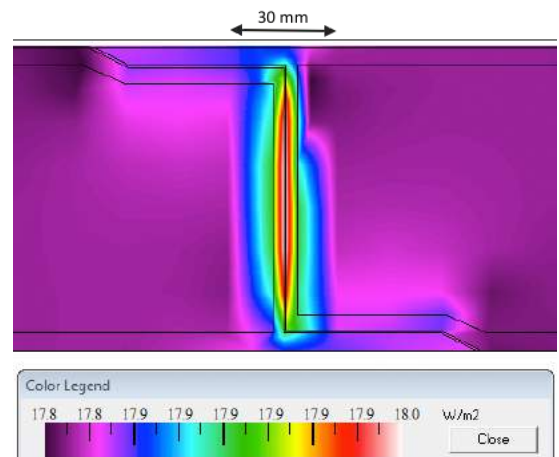


Figura 4.23 - Fluxos de calor na zona de ligação entre painéis na solução de 120 mm em PP honeycombs.

Salienta-se o facto de a realização deste estudo não contemplar a influência do teor de humidade na condutibilidade térmica dos materiais. Uma vez que as lâminas de GFRP são impermeáveis e asseguram a função de estanqueidade da solução como é desejado, supõe-se que a solução irá funcionar em serviço apenas com variações de temperaturas.

5 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Após a realização do presente trabalho, pode-se concluir que, em geral, os objectivos propostos foram alcançados. A presente dissertação, tal como foi referido, pretendeu caracterizar o comportamento térmico de painéis sanduíche em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), com o intuito de serem utilizados como pisos ou paredes na reabilitação e construção nova.

Neste sentido, após uma revisão bibliográfica, com o qual foi possível conhecer as características gerais e o comportamento dos painéis sanduíche, realizou-se uma campanha experimental, onde foram estudados os vários materiais constituintes dos painéis sanduíche com lâminas de GFRP. Em particular, foram estudados os painéis sanduíche em GFRP com núcleos em: i) favos de mel em polipropileno; ii) madeira de balsa; iii) tereftalato de polietileno; e iv) espuma rígida de poliuretano, face às seguintes variações nas condições: i) temperatura; e ii) teor de humidade. Os ensaios realizados, permitiram caracterizar termicamente os materiais constituintes dos painéis sanduíche em GFRP.

A realização da campanha experimental, permitiu concluir que para estudar o comportamento térmico em função da variação da temperatura, é mais adequado realizar ensaios através de um método estacionário como o medidor do fluxo de calor. Contudo, este apresenta a desvantagem de ser bastante demorado para materiais com maior espessura e densidade. Através deste método, foi possível concluir que todos os materiais apresentam uma variação linear positiva da condutibilidade térmica face ao aumento da temperatura, tendo-se obtido linhas de tendência com um coeficiente de correlação superior a 90% em todos os casos. Os favos de mel apresentaram a maior condutibilidade térmica dos cinco materiais testados, seguidos das lâminas em GFRP, da madeira de balsa, do tereftalato de polietileno, e por último, a espuma rígida de poliuretano.

No que diz respeito ao estudo do comportamento térmico em função do teor de humidade, a campanha experimental permitiu concluir que é mais adequado realizar ensaios através de um método transiente como o método da fonte plana modificado. Este método, além de apresentar dados com bastante precisão, apresenta a grande vantagem de ser bastante rápido, comparativamente aos métodos estacionários. Através deste método, foi possível concluir que todos os materiais (excepto o GFRP), apresentam variações exponenciais positivas da condutibilidade térmica face ao aumento do teor de humidade, tendo-se obtido linhas de tendência com um coeficiente de correlação superior a 90% em todos os casos, excepto para a espuma rígida de poliuretano que se apresentou com um coeficiente de correlação superior a 80%. As capacidades térmicas volumétricas e a difusividade térmica dos materiais apresentaram também, uma variação exponencial positiva e negativa respectivamente, com coeficientes de correlação superiores a 90%. Os favos de mel apresentaram-se como o material mais condutor antes dos aumentos do teor de humidade, passando posteriormente a madeira de balsa a ser o mais condutor. O tereftalato de polietileno apresentou-se sempre como o segundo menos condutor e a espuma rígida de poliuretano como a menos condutor dos quatro. O GFRP revelou-se impermeável, assegurando deste modo a estanqueidade dos painéis sanduíche, tal como é desejado. No entanto, se ocorrer uma perfuração da lâmina e os materiais absorverem água, alerta-se para o facto de cargas adicionais serem impostas à estrutura. Salienta-se ainda para o facto, de a madeira de balsa ter sofrido deformações que originaram fendas, degradação e criação de bolores com a presença de humidade. Estes fenómenos podem originar a perda de características estruturais e térmicas, fundamentais para o correcto funcionamento da solução em serviço.

Com os resultados obtidos na campanha experimental e a criação de um modelo, caracterizou-se o comportamento térmico dos painéis sanduíche em GFRP em serviço. Através de cálculos analíticos, e com recurso a um programa de cálculo automático, foi possível determinar o coeficiente de transmissão térmica

superficial de cada solução, o coeficiente de transmissão térmica linear resultante da ponte térmica originada pela união dos painéis, bem como os respectivos fluxos de calor associados. Para este estudo considerou-se apenas a variação da temperatura, uma vez que se considera que as lâminas de GFRP asseguram a estanqueidade da solução.

O estudo do comportamento térmico dos painéis sanduíche em GFRP face a variações de temperatura, permitiu concluir que o coeficiente de transmissão térmica superficial é mais condicionante para o cenário de Verão para coberturas e paredes exteriores, ao invés do cenário de Inverno, admitindo a condutibilidade térmica dos materiais constante perante diferentes temperaturas. Para o caso de elementos horizontais, o aumento da condutibilidade térmica em função da temperatura, contraria a diminuição do coeficiente de transmissão térmica superficial, originado pelo aumento da resistência térmica superficial interior (R_{si}) no cenário de Verão. No caso de elementos verticais, o aumento da condutibilidade térmica aumenta o coeficiente de transmissão térmica directamente, uma vez que as resistências térmicas superficiais se mantêm constantes no cenário de Inverno e de Verão.

Com base na solução determinada pelo comportamento mecânico, um núcleo com 120 mm de espessura, é possível concluir que as soluções de favos de mel em polipropileno e de madeira de balsa apresentam um fraco desempenho térmico face aos valores de referência indicados na legislação portuguesa, para coberturas e paredes exteriores. No entanto, estas soluções apresentam valores de coeficiente de transmissão térmica superficial (excepto os PP honeycombs no Verão) inferiores aos máximos permitidos. Assim sendo, estas soluções podem ser utilizadas se as necessidades nominais de aquecimento (N_{ic}) e de arrefecimento (N_{vc}), forem inferiores às necessidades anuais de energia útil para aquecimento (N_i) e arrefecimento (N_v), calculadas com os coeficientes de transmissão térmica superficial de referência. Por outro lado, as soluções com núcleos em tereftalato de polietileno e espuma rígida de poliuretano garantem os valores de coeficientes de transmissão térmica superficial de referência definidos na legislação portuguesa. Salienta-se o facto de que uma solução final de cobertura ou de parede exterior, poderá apresentar mais camadas, não estando exposta directamente ao meio envolvente. Deste modo, a resistência térmica da solução será maior, e conseqüentemente o seu coeficiente de transmissão térmica superficial menor.

Por último, o estudo do comportamento térmico em serviço das soluções sanduíche em GFRP permitiu concluir que, as ligações entre painéis que constituem uma ponte térmica, apresentam um coeficiente de transmissão térmica linear desprezável (que chega a ser mesmo nulo no caso dos núcleos em favos de mel por apresentarem a mesma condutibilidade que o GFRP). Deste modo, pode-se considerar que o coeficiente de transmissão térmica superficial médio, pode ser utilizado directamente no cálculo do fluxo de calor do painel sem implicar diferenças significativas face ao valor total.

Este trabalho mostra que, os painéis sanduíche em GFRP podem ser utilizados como elementos de construção, sob o ponto de vista térmico, podendo ser feitas inúmeras combinações de espessuras e materiais, consoante a funcionalidade e as exigências regulamentares a que têm de obedecer. Para tal, há que aprofundar o conhecimento na sua área, de modo a que possam vir a ser utilizados no sector da construção, e se apresentem como uma solução viável e competitiva face a soluções tradicionais instaladas, com um vasto conhecimento associado.

5.2 Perspectivas de trabalhos futuros

Os painéis sanduíche, em particular os que apresentam lâminas compósitas, por serem um material ainda em fase de estudo e com poucas aplicações práticas, revelam uma necessidade acrescida de serem estudados, de modo a que possam constituir uma solução alternativa viável, face às soluções tradicionais do sector da construção, assegurando as necessidades e exigências impostas. Desta forma, apresentam-se

de seguida algumas sugestões e aspectos susceptíveis de serem desenvolvidos em trabalhos futuros, complementando o trabalho desenvolvido na presente dissertação:

- elaboração de um estudo de simulação energética de edifícios, aplicado a um caso prático com a solução de painel sanduíche de GFRP, quantificando as necessidades energéticas nas estações de aquecimento e arrefecimento em diferentes climas/países, e comparando com um edifício com soluções construtivas tradicionais;
- elaboração de um manual técnico para apoio aos projectistas no dimensionamento térmico de painéis sanduíche em GFRP;
- realização de um maior número de ensaios para variações de temperatura e humidade, aumentando assim a amostra de resultados para uma melhor caracterização das propriedades dos materiais estudados;
- realização dos ensaios para os mesmos materiais mas com diferentes massas volúmicas, caracterizando assim a sua influência no comportamento térmico dos materiais;
- estudo da influência da degradação dos materiais constituintes dos painéis sanduíche no comportamento térmico da solução;
- avaliação do impacto das pontes térmicas originadas por outros tipos de ligações entre painéis e originadas por reforços (laterais e interiores);
- estudo de soluções com outros tipos de lâminas compósitas como as de polímero reforçado em fibra de carbono ou aramida;
- elaboração de um estudo comparativo económico-financeiro entre soluções sanduíche e soluções tradicionais, de modo a avaliar a viabilidade da sua aplicação.

Referências bibliográficas

- [1] AECOPS - Associação de Empresas de Construção Obras Públicas e Serviços, O mercado da reabilitação - enquadramento, relevância e perspectivas, 2009. Disponível para descarga em: http://prewww.aecops.pt/pls/daecops3/WEB_EXTRACT_EXTERNAL.GET_EXTERNAL?code=29390781&col_ext=FILE1&tab=blist_downloads.
- [2] INE - Instituto Nacional de Estatística, LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, O parque habitacional e a sua reabilitação - análise e evolução 2001-2011, INE e LNEC, 2013.
- [3] JOCE - Jornal Oficial das Comunidades Europeias, Directiva 2002/91/CE DO Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético de edifícios.
- [4] JOUE - Jornal Oficial da União Europeia, Directiva Europeia 2010/31/EU de 19 de Maio de 2010 - Melhoria do desempenho energético dos edifícios.
- [5] Correia, J.R., Compósitos de matriz polimérica, capítulo 11 do livro *Materiais de construção*, IST Press, 2012.
- [6] Fernandes, P., Gomes, M.G., Moret Rodrigues, A., Thermal behaviour of GFRP sandwich panels for applications in building floors, Relatório ICIST, DTC n.º15/2014, Abril de 2014.
- [7] Oates D., Innovations in mud-brick: decorative and structural technique in ancient mesopotania, *World Archaeology* 21, 1990.
- [8] Davies, J.M., *Lightweight sandwich construction*, Osney Mead, Osxford OX2 0EL: Blackwell Science Lta,2001.
- [9] Dedecker, K., Deschaght, J., Kumar, R., Sandwich panels supporting growth with an established and proven technology, Huntsman polyurethanes.
- [10] Site da exposição online ArchiEXPO: www.archiexpo.com, em 08-04-2014.
- [11] Site da empresa Irmalex: www.irmalex.pt, em 10-01-2014.
- [12] Site da empresa SPS: www.ie-sps.com, em 10-01-2014.
- [13] Site da empresa Ernst Balsler + Partner: <http://www.jeccomposites.com/news/composites-news/large-structural-thermoplastic-composite-panels>, em 10-01-2014.
- [14] Site da empresa Kreysler & Associates: <http://www.ebp.ch/en/geschaefsbereiche/ingenieurbau/aktuell/reception-building-novartis-campus-basel%20.html>, em 10-01-2014.
- [15] Site da empresa AS Composite Inc.: <http://www.compositesworld.com/articles/residential-construction-breakthrough-composites-find-a-home>, em 10-01-2014.
- [16] Site do blog Composite Build: <http://compositebuild.com/case-studies/bridge-deck/>, em 10-01-2014.
- [17] Site do blog Aerospace Engineering: <http://aerospaceengineeringblog.com/sandwich-panel/>, em 11-01-2014.
- [18] Allen, H. G., *Analysis and design of structural sandwich panels*, Pergamon Press, Oxford, 1969.

- [19] Almeida, Maria Inês A., Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicação na indústria da construção, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2009.
- [20] Ferreira, Diogo Marques, Comportamento estrutural em serviço e à rotura de painéis sanduíche compósitos, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2012.
- [21] Keller, T., Use of fibre reinforced polymers in bridge construction, Structural Engineering Documents, Volume 7, IABSE, Zurich, 2003.
- [22] Bank, L.C., Composites for construction: Structural design with FRP materials, Wiley, Hoboken, NJ, 2006.
- [23] Fiberline design manual, 2002, Descarregado do site da empresa Fiberline Composites: www.fiberline.com, em 11-02-2014.
- [24] Videira, Elisa Augusta Dias, Caracterização do comportamento mecânico viscoelástico de painéis sanduíche compósitos de elevado desempenho para aplicação na reabilitação de pisos de edifícios, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2013.
- [25] Site do blog Manutenção e Suprimentos: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteúdo/6064-o-que-e-processo-de-infusao-a-vacuó/>, em 13-02-2014.
- [26] D. Zenkert, The handbook of sandwich construction, London, UK: Chameleon Press Ltd., 1997.
- [27] Pflug, J., Vangrimde, B., Verpoest, I., Bratfisch, P., Vandepitte, D., Continuously produced honeycomb cores, *Proc. SAMPE 2003*, Long Beach, CA, USA, 11-15 May 2003.
- [28] Decreto-Lei 118/2013 de 20 de Agosto, Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), Diário da República, 1ª Série - N.º 159, 20 de Agosto de 2013, Lisboa.
- [29] Portaria n.º 349-B/2013 de 29 de Novembro, Regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação (REH) - requisitos de concepção para edifícios novos e intervenções, Diário da República, 1ª Série - N.º 232, 29 de Novembro de 2013, Lisboa.
- [30] Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei n.º96/2008 de 9 de Junho.
- [31] NP EN 1990:2009, Eurocódigo 0 - Bases para o projecto de estruturas, Instituto Português da Qualidade, Monte de Caparica, 2009.
- [32] NP EN 1991-1-1:2009, Eurocódigo 1 - Acções em estruturas, Parte 1-1: acções gerais: pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios, Instituto Português da Qualidade, Monte de Caparica, 2009.
- [33] CNR-DT 205/2007, Guide for the design and construction of structures made of FRP pultruded elements, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome, 2008.
- [34] Gomes A., Pinto APF., “Módulo 1 – Introdução à disciplina e à ciência dos materiais”, apontamentos das aulas teóricas, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010.

- [35] JOUE - Jornal Oficial da União Europeia, Directiva Europeia 89/106/CEE de 21 de Dezembro de 1988 - Directiva dos produtos da construção.
- [36] NP EN 1991-1-2:2010, Eurocódigo 1- acções em estruturas, Parte 1-2: acções gerais: acções em estruturas expostas ao fogo, Instituto Português da Qualidade, Monte de Caparica, 2010.
- [37] Hause, T. J., Thermomechanical postbuckling of geometrically imperfect anisotropic flat and doubly curved sandwich panels, PhD Thesis in Engineering Mechanics, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [38] Leite, M., Freitas, M., Silva, A., Sandwich construction, apresentação IST, descarregada de: https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fin3.dem.ist.utl.pt%2Fmscdesign%2F02ed%2F01materiais%2Fpres8_1.pps&ei=0tz6UoWHGqHE7AaolC4Bg&usg=AFQjCNGvx0WwAeWxumczpHY4Ff0k7-hAZA, DesignStudio, 2004.
- [39] Zhou, F., Ultimate strength of clamped steel-elastomer sandwich panels under combined in-plane compression and lateral pressure, PhD Thesis in Aerospace Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- [40] Site do Portal da Indústria da Borracha: www.rubberpedia.com/borrachas/borrachas.php, em 12-02-2014.
- [41] A. Franco, An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method, Applied Thermal Engineering 27, 2007.
- [42] Callister, William, Materials science and engineering - An introduction, John Wiley & Sons, INC, 2003.
- [43] Moret Rodrigues, A., Braga, A.M., Canha da Piedade, A., Térmica de edifícios, Editora ORION, 2009.
- [44] ISO 6946:2007, Building components and building elements - thermal resistance and thermal transmittance - calculation method, International Organization for Standardisation, 2007.
- [45] Freitas V.P., Alves S., Patologia de argamassas, APFAC - Tectónica, 2008.
- [46] Valério, Jorge G.M.A.P., Avaliação do impacte das pontes térmicas no desempenho térmico e energético de edifícios residenciais correntes, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2007.
- [47] F.Domínguez-Muñoz, B. Anderson, J. M. Cejudo-López, A. Carrillo-Andrés, Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials, Energy and Buildings 42, 2010.
- [48] ISO 8301:1991, Thermal insulation - determination of steady-state thermal resistance and related properties - heat flow meter apparatus, International Organization for Standardisation, 1991.
- [49] NP EN 12667:2012, Desempenho térmico de materiais e produtos da construção - determinação da resistência térmica pelos métodos de placa quente e fluxometria de calor - Produtos de resistência térmica elevada e média, Instituto Português da Qualidade, Monte de Caparica, 2012.
- [50] ASTM C 518-98, Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus, American Society for Testing and Materials, 1998.

- [51] ISO 8302:1991, Thermal insulation - determination of steady-state thermal resistance and related properties - guarded hot plate apparatus, International Organization for Standardisation, 1991.
- [52] ASTM C 177-97, Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus, International Organization for Standardisation, 1991.
- [53] Site da empresa Therm Test: www.thermtest.com, em 19-02-2014.
- [54] Site da Universidade de Santa Clara: http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/rm_doc/RM_graphics/02mat_props/fig02-10/fig02-10.gif, em 20-02-2014.
- [55] Holometrix, Operation & maintenance manual of Holometrix model Rapid-k - heat flow meter thermal conductivity instrument, Bedford, MA.
- [56] Applied Precision Ltd., Isomet 2114 Thermal properties analyzer user's guide, Version 120712.
- [57] NP EN 1097-5:2002, Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, parte 5: determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada, Instituto Português da Qualidade, Monte da Caparica, 2007.
- [58] EN ISO 10211:2007, Thermal bridges in building construction - heat flows and surface temperatures - detailed calculations, International Organization for Standard Organization, 2007.
- [59] LBNL, THERM 7.2.5, Lawrence Berkeley National Laboratory. Disponível para descarga em: http://windows.lbl.gov/software/therm/7/t7_download7_2_5.asp?, 2014.
- [60] ISO 15099, Thermal performance of windows, doors and shading devices - detailed calculations, International Organization for Standardisation, 2003.
- [61] ISO 6946:2007, Building components and building elements - thermal resistance and thermal transmittance - calculation method, International Organization for Standardisation, 2007.
- [62] European Insulation Manufacturers Association (EURIMA), U-values in Europe - requirements and/or recommendations on component level, EURIMA (2007), Disponível em: <http://www.eurima.org/resource-centre/facts-figures/u-values-in-europe>, em 26 de Novembro de 2013.