

# Mestrado Integrado em Engenharia Química

## *Aerogéis e cortiça - A combinação perfeita para um isolamento leve e de alto desempenho?*

### Dissertação de Mestrado

de

Celina Nogueira Fernandes

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

Amorim Cork Composites/unidade de I&D



Orientador na FEUP: Professor Catedrático Doutor Adélio Mendes

Orientador na Amorim Cork Composites: Doutora Susana Silva



Departamento de Engenharia Química

Julho de 2018



*“Sabemos mais do que julgamos, podemos muito mais do que imaginamos.”*

**José Saramago**

---

## Agradecimentos

Ao longo destes cinco meses em que desenvolvi este projeto foi preciso muito trabalho, estudo, dedicação, paciência e muita persistência. Encontrei todos os dias desafios que precisaram de ser ultrapassados, desafios esses que não teriam sido vencidos sem a ajuda de muitas pessoas. Desta forma seria impensável não dedicar um espaço, por mais pequeno que seja, para agradecer a todas essas pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste projeto.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais por todo apoio, encorajamento, compreensão e por todos os esforços que fizeram para me possibilitar chegar até aqui. Muito obrigado por todo o amor e carinho e por todos os valores que me passaram.

Depois agradeço à minha irmã que sempre me acompanhou neste percurso, me apoio e nunca me deixou desistir. Foi sem dúvida um dos pilares ao longo de todo o meu percurso. Obrigada por toda a compreensão, por todo o amor e pela paciência.

De seguida, e como não poderia deixar de ser, quero agradecer à Doutora Susana Silva por toda a orientação na Amorim Cork Composites, dedicação, apoio, disponibilidade, transmissão de conhecimento e pela confiança que depositou em mim para a realização deste projeto. Obrigada por me ter desafiado diariamente, sem dúvida que me tornou muito mais proativa e ajudou a desenvolver o meu espírito crítico.

Agradeço ao meu orientador Professor Catedrático Adélio Mendes por todo o conhecimento transmitido ao longo deste semestre e por toda a ajuda prestada.

Agradeço também à Dr. Marta Ochoa, *Project Manager* na Activeaerogels, por todo o apoio prestado e informação transmitida sobre os aerogéis.

Agradeço também à Doutora Diana Paiva por me ter ajudado com a técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial, uma parte essencial ao projeto.

Quero agradecer também à Professora Doutora Margarida Bastos por se ter disponibilizado a ajudar-me na parte de química do projeto.

Quero dar um profundo agradecimento a toda a equipa de Inovação e Desenvolvimento da Amorim Cork Composites, em especial à Ana Rodrigues, Lurdes Libório, Helena Lopes, Ivo França e João Carvalho por toda a motivação, disponibilidade na realização de técnicas que não tinha tanto conhecimento e por todas as ideias para desenvolvimento do projeto.

Agradeço ao Vítor Monteiro e Marina Rodrigues pela disponibilização em esclarecimento de dúvidas e fornecimento de informação da área da construção.

---

Aos meus amigos e companheiros de estágio, Tiago Araújo e Nelson Dias, agradeço muito por todos o companheirismo, troca de ideias e apoio incondicional nesta etapa. A meu amigo Tiago Santos por todas as conversas de apoio e incentivo e ao Paulo Soares pelo apoio e motivação que me deu ao longo de todos estes anos. A todos os outros meus amigos, de curso ou fora dele, que sempre me deram uma palavra de incentivo e compreenderam sempre que não consegui estar presente.

Por fim quero agradecer à Activeaerogels por ter fornecido sempre que solicitado os aerogéis de sílica e ao LEPABE por ter emprestado o aparelho de aquisição de dados, essencial aos ensaios de condutividade térmica.

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelos projetos POCI-01-0145-FEDER-006939 - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia - LEPABE e NORTE-01 -0145-FEDER-000005 - LEPABE-2-ECO-INOVAÇÃO, financiado pelos recursos do FEDER através do COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e do Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020) e por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia.



## Resumo

O presente projeto surgiu da crescente necessidade de conforto térmico na área da construção, quer por questões de saúde quer de produtividade no trabalho. Essa necessidade muitas vezes é compensada pelo uso de soluções ativas (como os sistemas AVAC - aquecimento, ventilação e ar condicionado), consumidoras de energia. No sentido de promover a redução do uso dessas soluções, a Amorim Cork Composites propôs o desenvolvimento de uma solução passiva que permitisse atingir os níveis de conforto térmico desejáveis e simultaneamente fosse uma solução economicamente acessível ao consumidor. Essa solução consiste no desenvolvimento de um isolamento térmico de alto desempenho obtido pela combinação de dois materiais, a cortiça e aerogel de sílica. A combinação destes materiais conduziu a um conjunto de protótipos que foram avaliados quanto ao seu desempenho térmico, ou seja, a sua condutividade térmica. Esta característica foi avaliada através de um método experimental desenvolvido para o efeito. Este método permitiu concluir que de todas os protótipos desenvolvidos, três deles apresentavam um bom desempenho: um painel tipo sanduiche, um aglomerado em caixa de enchimento e um revestimento para fachadas exteriores e interiores (Corkwall com aerogel - desenvolvido a partir da formulação de Corkwall já comercializado pela Amorim Cork Composites). Estes protótipos apresentam um desempenho muito semelhante ao do aerogel, sendo que o aglomerado atingiu valores de condutividade térmica muito próximos dos do aerogel ( $0,030 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  quando comparado com os  $0,029 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  que o aerogel apresenta para uma temperatura de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Os painéis tipo sanduiche apresentaram valores de condutividade térmica ligeiramente superiores, na ordem dos  $0,034 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Relativamente ao revestimento conseguiu-se a redução de 40 % da condutividade térmica relativamente à formulação original pela adição de 5 % em massa de aerogel. Em termos de resistência mecânica obtiveram-se materiais com propriedades melhoradas (essencialmente na resistência a tensões de rutura) relativamente ao aerogel original.

Concluiu-se que a combinação de aerogéis de sílica com cortiça possibilitou o desenvolvimento de materiais de isolamento térmico de elevado desempenho e com resistência mecânica melhorada. No entanto, o custo dos os painéis tipo sanduiche e o aglomerado de compósito é muito elevado para utilização na área da construção. Pelo contrário, o Corkwall com aerogel teve apenas um incremento de 6 % no custo relativamente ao Corkwall original com uma grande melhoria no seu desempenho térmico (redução de 40 % da condutividade térmica em relação ao original).

**Palavras Chave:** Cortiça, aerogel de sílica, isolamento térmico, inovador, condutividade térmica, resistência mecânica, reação ao fogo.

---

## Abstract

The present project addresses from the growing need for thermal comfort in the construction area, both for health and productivity reasons. This need is often compensated using active solutions (such as HVAC systems - heating, ventilation and air conditioning), which are energy consumers. To promote the reduction of the use of these solutions, Amorim Cork Composites proposed the development of a passive solution that allows achieving the desired levels of thermal comfort and simultaneously being an economically accessible solution for the consumer. This solution consists of the development of a high-performance thermal insulation obtained by combining two materials, cork and silica aerogel. The combination of these materials led to a set of prototypes that were evaluated for their thermal performance, that is, their thermal conductivity. This characteristic was evaluated through an experimental method developed for this purpose. This method allowed us to conclude that of all the prototypes developed, three of them showed a superior performance: a sandwich panel, a packing box agglomerate and a coating for exterior and interior façades (Corkwall with aerogel - developed from the Corkwall formulation already marketed by Amorim Cork Composites). These prototypes show a very similar performance to that of aerogel, with the agglomerate reaching thermal conductivity values very close to those of the aerogel ( $0.030 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  compared to  $0.029 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  which the aerogel displays at a temperature of  $30^\circ \text{C}$ ). The sandwich panels had slightly higher thermal conductivity values, in the order of  $0.034 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . With respect to coating the 40 % reduction in thermal conductivity was achieved with respect to the original formulation by the addition of 5 % by mass of aerogel. In terms of mechanical strength, materials with improved properties (essentially in the tensile strength) were obtained relative to the original aerogel.

It was concluded that the combination of silica aerogels with cork made possible the development of thermal insulation materials of high performance and with improved mechanical resistance. However, the cost of the sandwich panels and the composite chipboard is very high for use in the construction area. On the contrary, Corkwall with aerogel had only a 6 % increase in cost over the original Corkwall with a significant improvement in its thermal performance (40 % reduction in thermal conductivity over the original).

**Key words:** Cork, silica aerogel, thermal insulation, innovative, thermal conductivity, mechanical resistance, reaction to fire.

---



## Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Porto, 30 de julho de 2018

---

*(Celina Nogueira Fernandes)*

---

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto .....	1
1.2	Apresentação da Empresa .....	3
1.3	Contributos do Trabalho.....	3
<b>2</b>	<b>Contexto e Estado da Arte .....</b>	<b>5</b>
2.1	A cortiça .....	5
2.1.1	Composição química, estrutura e caraterísticas .....	5
2.2	Aerogéis de sílica .....	8
2.2.1	Processo de síntese dos aerogéis de sílica.....	9
2.2.2	Aplicações dos aerogéis.....	13
2.2.3	Compósitos com aerogéis de sílica .....	13
2.3	Isolamentos térmicos atuais .....	16
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos .....</b>	<b>18</b>
3.1	Preparação dos compósitos .....	18
3.1.1	Painéis tipo sanduíche .....	18
3.1.2	Aglomerados compósitos.....	19
3.1.3	Incorporação de aerogel no Corkwall.....	20
3.1.4	Painéis do tipo manta flexível .....	21
3.1.5	Espumas com cortiça .....	21
3.2	Técnicas de caraterização .....	22
3.2.1	Densidade aparente .....	22
3.2.2	Condutividade térmica.....	22
3.2.3	Teste de tensão à rutura .....	26
3.2.4	Teste de compressão .....	26
3.2.5	Permeabilidade ao vapor de água.....	26
3.2.6	Reação ao fogo .....	27
3.2.7	Análise Termogavimétrica .....	27
3.2.8	Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC).....	28

---

3.2.9	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier e Refletância Atenuada Total (FTIR- ATR).....	28
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão dos resultados.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Formulações funcionais.....</b>	<b>29</b>
4.1.1	Painéis tipo Sanduíche .....	29
4.1.2	Aglomerados de compósitos.....	30
4.1.3	Corkwall com aerogel .....	32
4.1.4	Espumas com cortiça .....	34
<b>4.2</b>	<b>Avaliação dos protótipos de aerogel e cortiça.....</b>	<b>34</b>
4.2.1	Densidade aparente .....	34
4.2.2	Avaliação da condutividade térmica.....	35
<b>4.3</b>	<b>Caraterização dos protótipos de aerogel e cortiça seleccionados .....</b>	<b>38</b>
4.3.1	Tensão de rutura e resistência a 10 % de deformação .....	38
4.3.2	Permeabilidade ao vapor de água.....	40
4.3.3	Comportamento ao fogo .....	41
<b>5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>44</b>
5.1	Objetivos realizados.....	45
5.2	Outros Trabalhos Realizados.....	45
5.3	Limitações e Trabalho Futuro .....	45
5.4	Apreciação final .....	46
	Referências .....	47
Anexo 1	Propriedades dos aerogéis de sílica utilizados .....	51
Anexo 2	Nomenclatura dos protótipos desenvolvidos .....	52
Anexo 3	Permeabilidade ao vapor de água .....	54
3.1	Método <i>Time-lag</i> .....	54
3.2	Forma de cálculo da permeabilidade ao vapor de água .....	54
Anexo 4	Análise termogavimétrica .....	60
Anexo 5	Capacidade calorífica dos materiais desenvolvidos .....	62
Anexo 6	Fluxograma <i>Matlab</i> .....	63

---

<b>Anexo 7</b>	<b>Formulações testadas para os painéis à espessura em caixa de enchimento .</b>	<b>64</b>
<b>Anexo 8</b>	<b>Comparação com os isolamentos concorrentes .....</b>	<b>66</b>
<b>8.1</b>	<b>Desempenho térmico.....</b>	<b>66</b>
<b>8.2.</b>	<b>Resistência mecânica.....</b>	<b>68</b>
<b>8.3.</b>	<b>Custo .....</b>	<b>69</b>
<b>Anexo 9</b>	<b>Protótipos descartados.....</b>	<b>71</b>

## Notação e Glossário

$A$	Área	$m^2$
$t$	tempo	s
$L$	espessura do protótipo em estudo	m
$J$	Fluxo de vapor de água	$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
$S_D$	Espessura da camada de ar equivalente	Mm
$C_p$	Capacidade calorífica	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$q_x$	Velocidade de transferência de calor	$J \cdot s^{-1}$
$U$	Coefficiente global de transferência de calor	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$R$	Resistência térmica	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

### Letras gregas

$\alpha$	Coefficiente de absorção acústica	
$\mu$	Fator de resistência ao vapor de água	
$\rho_{aparente}$	Densidade aparente	$kg \cdot m^{-3}$
$\sigma$	Tensão de rutura	kPa
$\sigma_{10}$	Resistência à compressão a 10 % de deformação	kPa
$\pi$	Permeabilidade ao vapor de água	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
$\lambda$	Condutividade térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\Delta P$	Gradiente de pressão	Pa

### Lista de Siglas

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado	
APD	Secagem a Pressão Ambiente	
ASTM	<i>American Section of the International Association for Testing Materials</i>	
AD	Alta densidade	
B	Blocos	
C1	Compósito 8405	
C2	Compósito 8113	
C3	Compósito 8404	
DTG	Derivada Termogavimétrica	
DSC	Calorimetria Diferencial de varrimento	
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite System</i>	
EPS	Poliestireno expandido	
EVA	Etil-Vinil-Acetato	
FTIR-ATR	Espetroscopia de infravermelho com Transformada de Fourier e Refletância Atenuada Total	
GS-Ms	Cromatografia Gasosa com Espetroscopia de Massa	
HTSD	Secagem Supercrítica a Alta Temperatura	
HMDS	Hexametildisilano	
HMDSO	Hexametildisiloxano	
HR	Humidade relativa	
ICB	Placas de Aglomerado de Cortiça Expandida	
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	
LTSD	Secagem Supercrítica a Baixa Temperatura	%
LEPABE	Laboratório de Engenharia de Processo, Ambiente e Energia	
MTMS	Metiltrimetoxisilano	
MD	Média densidade	
PCE	Painel em caixa de enchimento	

PS	Painel sanduiche
PU	Poliuretano
rHDPE	<i>Recycle High Density Polyethylene</i>
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios
R	Revestimento
SEM	Microscopia eletrónica de varrimento
SCD	Secagem Supercrítica
TMOS	Tetrametilortosilicato
TEOS	Tetraetilortosilicato
TEM	Microscopia de transmissão eletrónica
TMCS	Tetrametilclorosilano
TGA	Análise Termogavimétrica
XPS	Poliestireno extrudido

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

A sociedade atual procura padrões elevados de conforto térmico e acústico (embora este seja uma necessidade secundária) nos edifícios, quer por questões de saúde e bem-estar, quer por razões de produtividade no trabalho. O conforto térmico num edifício depende do seu tipo de construção, uma vez que é a partir deste elemento que ocorrem as trocas de calor exterior/interior. Até à década de 60 as fachadas dos edifícios eram constituídas com um pano simples de alvenaria ou usando pedra natural. Só a partir dos anos 90 é que o conceito de parede dupla de alvenaria se começou a difundir, assim como o uso de isolamento térmico na caixa de ar. Estes tipos de soluções permitiram satisfazer os padrões de isolamento térmico definidos naquela época [1]. No entanto, a nova legislação portuguesa para o Regulamento térmico das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE, Decreto-Lei nº 80/2006) impõe requisitos ao projeto de novos edifícios e de grandes remodelações mais exigentes por forma a salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico [2]. Além disso, a diretiva europeia 2010/31/EU, relativa ao desempenho energético dos edifícios, obriga a que todos os novos edifícios construídos a partir de 1 de janeiro de 2019 (públicos) e 1 de janeiro de 2021 (públicos e privados), tenham necessidades energéticas líquidas quase nulas; por outro lado, as referidas necessidades energéticas devem ser cobertas essencialmente através de fontes renováveis localizadas na vizinhança do seu consumo. Assim, o conforto térmico deverá ser obtido mais de forma passiva e menos de forma ativa, esta última usando por exemplo sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) consumidores de energia. Uma solução passiva poderá passar pelo isolamento térmico do envelope dos edifícios, uma vez que a transferência energética entre o interior e exterior é um fator determinante do desempenho energético de um edifício. O isolamento térmico permite reduzir significativamente essas trocas de calor, contribuindo de forma decisiva para a obtenção de um conforto térmico eficazmente, sem que para isso seja necessário o uso intensivo de soluções ativas.

O conforto acústico no interior dos edifícios depende não só do tipo de construção de um edifício, mas também dos níveis sonoros do ambiente exterior. Ao longo dos últimos anos tem-se verificado uma disseminação das fontes de ruído por via da industrialização. A diretiva europeia 2002/49/CE relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente obriga a que sejam tomadas medidas de redução do ruído ambiente a que os seres humanos se encontram expostos. A legislação portuguesa vem impor com o condições mínimas e conforto acústico nos edifícios

(Decreto lei nº96/2008 [3]) e, como tal é necessário atuar tanto nas fontes emissoras de ruído como também no planeamento acústico dos locais frequentados pelos seres humanos.

Torna-se assim essencial encontrar soluções construtivas que permitam simultaneamente cumprir com a legislação e terem um preço acessível a toda a população. Uma solução poderá passar pelo uso de isolamentos termo-acústicos que poderá ser conseguido pela aplicação de sistemas de isolamentos térmicos pelo exterior ou pelo interior ou pelo uso de paredes duplas com caixa-de-ar e material isolante [4]. Com qualquer um destes tipos de sistemas consegue-se um nível de isolamento aceitável. No entanto, o isolamento térmico pelo exterior, designado de sistemas ETICS (*External Thermal Insulation Composite Systems*), é o que apresenta mais eficácia e vantagens [4]. O uso do sistema ETICS nem sempre é possível ou o mais adequado; por exemplo, quando se tem uma construção de pedra natural pelo exterior ou quando se pretende manter o aspeto exterior dos edifícios a reabilitar. Neste caso, a solução adequada passa pela implementação do isolamento termo-acústico pelo interior. No entanto, esta configuração é mais perigosa na eventualidade de ocorrer um incendio, uma vez que os materiais utilizados no isolamento térmico, nomeadamente o poliestireno expandido (EPS) e o poliestireno extrudido (XPS), são muito inflamáveis [5].

A Amorim Cork Composites (ACC), uma empresa preocupada com o ambiente e com os elevados consumos energéticos para climatização de edifícios, disponibiliza compósitos de cortiça para isolamentos térmicos, quer para aplicação no exterior quer no interior. A cortiça, uma matéria prima de origem 100 % natural, reciclável e reutilizável, não só tem boas propriedades térmicas (condutividade térmica de  $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) como também acústicas [6]. Além disso, quando entra em contacto com o fogo sofre combustão lenta, com libertação de gases não tóxicos (sem libertação de cloretos ou cianetos e libertação de baixa quantidade de monóxido de carbono e dióxido de carbono [7]). Porém tem a desvantagem de ser cara quando comparado com os isolamentos sintéticos [5].

Recentemente, tem-se implementado isolamentos térmicos inovadores, como os aerogéis de sílica. São materiais inorgânicos que despertaram interesse há pouco mais de duas décadas devido ao seu elevado desempenho térmico, com condutividade térmica entre  $3 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $20 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , e bom isolamento acústico [8]. Além disso, sendo um material de estrutura sólida maioritariamente constituído por sílica, praticamente não arde e a libertação de fumos é reduzida, sendo assim uma ótima barreira contra o fogo [8], [9]. Têm vindo a ser utilizados na forma de manta flexível de baixa espessura em diversas aplicações, nomeadamente em tubagens de fluidos térmicos, ou então em forma de granulado como enchimento em paredes duplas [10]. Todavia, apresentam baixas propriedades mecânicas que limitam as suas aplicações e têm um custo muito elevado [11].

Com isto, a empresa Amorim Cork Composites decidiu investir na produção de compósitos à base de cortiça que tenha elevada capacidade de isolamento térmico em edifícios como também seja uma barreira à propagação de incêndios. Secundariamente esse isolamento térmico também deverá possuir alguma capacidade de redução do ruído transmitido pelos edifícios. Assim, foi proposto desenvolver um compósito inovador à base de cortiça com incorporação de aerogéis de sílica. O objetivo deste projeto visa assim o desenvolvimento de um isolamento térmico de elevado desempenho que configure uma solução passiva e que promova a melhoria de conforto térmico. Adicionalmente, pretende-se estudar uma solução que seja economicamente competitiva no mercado em relação aos produtos já existentes para o efeito.

## **1.2 Apresentação da Empresa**

A ACC é uma empresa que atua na área da cortiça e pertence ao Grupo Amorim. Este grupo teve origem em 1870 e é a maior multinacional portuguesa líder a nível mundial no negócio da cortiça [12]. É a organização responsável pela produção de materiais compósitos à base de cortiça que detém a perspetiva de valorização da matéria prima, na qual a sua estratégia assenta na utilização de toda a cortiça que não pode ser utilizada para a produção de rolas (cortiça de menor qualidade), juntamente com a incorporação de outras matérias-primas (como a borracha, PVC, entre outros) para o desenvolvimento de uma panóplia de materiais inovadores, que satisfaçam os requisitos do mercado [12]. São produtos que se destinam a vários setores desde a construção, soluções termo-acústicas para inclusão em pavimentos e painéis de madeira, objetos de decoração para casa e escritório, componentes para calçado e para a indústria de alta tecnologia, como é o caso da automóvel, aeronáutica e aeroespacial [12].

## **1.3 Contributos do Trabalho**

No âmbito deste projeto desenvolvi um isolamento térmico que procurou aliar a um produto 100 % natural a um material inovador capaz de promover conforto térmico e acústico a custos controlados. O produto visa valorização da cortiça com a colocação no mercado de um produto com alto desempenho.

Este projeto visa contribuir para a melhoria significativa no desempenho térmico de um produto que a ACC já comercializa (reduzindo significativamente a sua condutividade térmica), nomeadamente o Corkwall, permitindo assim que este possa vir a ser mais valorizado no mercado.



## 2 Contexto e Estado da Arte

### 2.1 A cortiça

A cortiça é usualmente conhecida como a casca do sobreiro (espécie *Quercus Suber L.*), indicando que se trata de um tecido 100 % natural [12]. Trata-se tipicamente uma espécie Mediterrânea Ocidental desenvolvendo-se em países como Portugal, Espanha e Marrocos, constituindo assim parte da identidade local [13].

A cortiça é utilizada desde há muito tempo e, em Portugal, já era comercializada no século XIV. Em 1915 existiam plantações de sobreiro a cobrir uma área de 300 000 e 470 000 hectares [14]. Ao longo dos anos, as potencialidades da cortiça têm vindo a ser cada vez mais valorizadas e com isso, a indústria portuguesa tem apostado arduamente no setor corticeiro e, atualmente, Portugal detém a maior extensão do mundo de montado de sobreiro, perfazendo 34 % da área mundial. Essa área corresponde a cerca de 736 000 hectares de montado de sobreiro em Portugal, ou seja, 23 % da floresta nacional [13].

A extração da cortiça implica a existência de condições climáticas adequadas, caso contrário a cortiça não sairá da árvore. Isto obriga a que a extração seja efetuada em meados de maio até meados de agosto, período em que o vento ou a chuva são geralmente pouco abundantes [13]. Dito isto, cada sobreiro apenas pode ser descortiçado pela primeira vez 25 anos após a sua plantação e a partir daí a extração é feita a cada 9 anos. Como resultado da primeira extração (tronco com um perímetro de aproximadamente 0,7 metros) e da segunda extração surge a cortiça “virgem” e a “secundeira”, respetivamente [12],[14]. Esta cortiça resultante das duas primeiras extrações não tem qualidade suficiente para produção de rolhas e, portanto, é utilizada para outras áreas. Alguns exemplos são a construção civil com a produção de materiais para pavimentos (*underlays e underscreeds*) e isolamentos térmicos, o setor da moda com a produção de palmilhas para calçados ou peças de vestuário, na indústria aeroespacial e mesmo para a produção de energia [12]. O aglomerado composto e o aglomerado expandido são dois dos produtos resultantes da cortiça proveniente das duas primeiras extrações [13]. Apenas no terceiro descortiçamento (aos 43 anos) é que surge a “amadia”, que apresenta a qualidade imposta para a produção de rolhas [12].

#### 2.1.1 Composição química, estrutura e características

A cortiça é um tecido homogéneo de células fechadas, agrupadas numa estrutura alveolar característica com formato essencialmente hexagonal com dimensões na ordem dos micrómetros. Por isto, apresenta resistência ao desgaste e é menos afetada pelo impacto ou

atrído do que outras superfícies mais rígidas [13].

Todas a células possuem ar no seu interior de tal modo que mais de 50 % do volume da cortiça são elementos gasosos [13]. Este facto contribui para a leveza deste material e consequentemente para a sua baixa densidade (valor médio de  $200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) [13].

Os principais constituintes desta matéria prima são divididos tipicamente em cinco grandes grupos: suberina, lenhina, polissacarídeos, ceróides, taninos e cinzas. [13]. Na Tabela 1 são apresentados de forma resumida a composição química da cortiça, respetivos valores médios e a sua função na estrutura da cortiça [15].

**Tabela 1 - Composição química da cortiça (baseado em [15]).**

Grupo	Percentagem	Função
Suberina	45	Responsável pela compressibilidade e elasticidade
Lenhina	27	Estrutura das paredes celulares
Polissacarídeos	12	Associados à estrutura celular
Ceróides	6	Repelem a água e contribuem para a impermeabilidade
Taninos	6	Proteção do material
Cinzas	4	Nenhum relevante

As paredes celulares da cortiça são constituídas por uma base morfológica de suberina e polifenóis poliméricos, tipo lenhina, com uma elevada quantidade de ceras extratáveis. Estas são constituídas por cinco camadas, duas de natureza celulósica que forram as cavidades celulares, duas mais internas suberificadas que concedem impermeabilidade e uma camada média lenhificada que outorga rigidez e estrutura à célula [13].

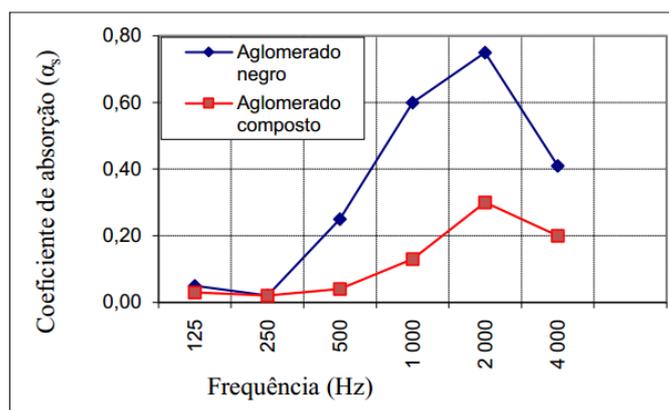
A suberina e a cerina são constituintes hidrofóbicos [16] e como tal contribuem para a impermeabilidade total da cortiça a líquidos e praticamente impermeável a gases, permitindo que esta envelheça sem se deteriorar (duração de aproximadamente 50 anos [5]) [12],[17]. Adicionalmente, a cerina repele a água impedindo a retenção de humidade nas cavidades alveolares da cortiça. Além disso, os taninos (substâncias fenólicas que aparecem na forma polimerizada e que se dividem em taninos hidrolisáveis e condensados) conferem proteção contra ataques de organismos biológicos [15], que juntamente com o carácter impermeável atribuem elevada durabilidade à cortiça. Graças a essa impermeabilidade da cortiça, esta é hermética o que significa que o ar contido nas cavidades celulares não pode sair [13]. Este atributo permite que a cortiça seja comprimida até metade da sua largura sem que perca

flexibilidade, voltando ao seu estado inicial após descompressão, conseguindo-se assim um material flexível e bastante elástico [13].

Dada a sua estrutura molecular composta essencialmente por gás faz com que absorva o calor e mantenha por um longo período de tempo, fazendo destes materiais maus condutores de calor (condutividade térmica na gama dos 0,039-0,045  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [7]) [13].

A presença de cerca de 40 milhões de células em cada centímetro cúbico atuam como um absorvedor de ruído, tornando-o num excelente isolante acústico (resistência acústica de  $1,2\times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  [18]) e vibracional [13]. A sua superfície irregular contribui igualmente para a sua componente acústica uma vez que promove o amortecimento das ondas sonoras e a perda de energia em cada uma [15].

O Aglomerado de cortiça expandido (aglomerado negro) a frequências inferiores a 800 Hz apresenta baixos coeficientes de absorção acústica enquanto que para valores até os 4000 Hz apresenta valores elevados. Quando se aumenta a espessura do aglomerado verifica-se que para frequências inferiores a 800 Hz o coeficiente de absorção acústica<sup>1</sup> aumenta mas para frequências superiores esse aumento é menos significativo [15]. Isto permite afirmar que quanto maior a espessura do material maior será a absorção acústica para frequências médias e que reduzindo a espessura, o máximo de absorção desloca-se para frequências mais elevadas [15] Assim verifica-se que o aglomerado de cortiça absorve essencialmente sons de alta frequência, já que se observam maiores valores de coeficiente de absorção acústica para frequências entre 500 Hz e 2000 Hz (Figura 1 [19]). Este facto é bastante favorável ao ser humano uma vez que os sons que este deteta estão nessa gama de frequências.



**Figura 1- Absorção sonora de aglomerados negros e compostos de cortiça (extraído de [19]).**

<sup>1</sup> “O coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) de um material (a uma dada frequência), é a relação entre a energia sonora absorvida pela superfície e a energia incidente” [15].

O aglomerado negro quando aplicado com 4 cm numa parede dupla de 11 cm permite amortecer 53 dB [20].

Uma outra característica bastante relevante da cortiça é a sua combustão lenta, atuando como o retardante de fogo e, portanto, como uma barreira natural ao fogo. Apesar de ser combustível apresenta vantagens relativamente aos outros isolantes, como os plásticos celulares, pois ao contrário desses materiais a cortiça não funde, apenas carboniza lentamente a temperatura superiores a 100 °C sem libertar grandes quantidades de gases tóxicos para além do monóxido de carbono [21]. A fusão do material implica a perda da forma e resistência, com implicações na estabilidade e aderência a outros materiais. Por outro lado, leva à propagação do incêndio pela propagação da matéria combustível fundida [21]. Ainda assim é apenas classificado segundo o sistema de Euroclasses de reação ao fogo com classe E-s1,d0 [21].

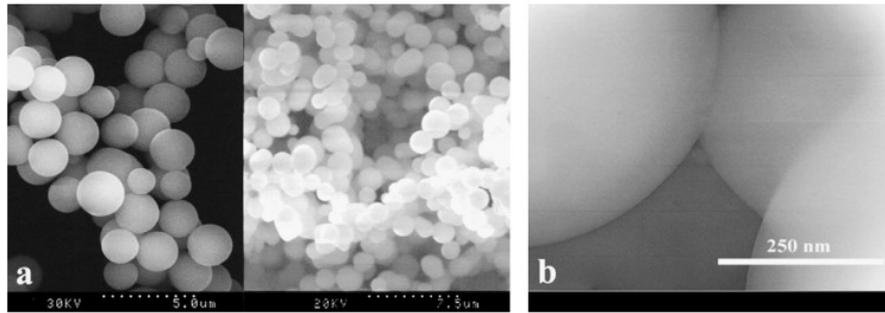
Com isto, a cortiça mostra-se um material sustentável, impermeável, imputrescível e resistente ao fogo. Estas características aliadas ao seu poder de absorção acústica e má condução de calor são uma mais valia para a sua utilização como isolamento térmico e acústico.

## 2.2 Aerogéis de sílica

Nos últimos anos os aerogéis, em especial os aerogéis de sílica, têm despertado um grande interesse em função das excelentes propriedades que apresentam, fazendo destes materiais aplicáveis numa imensa variedade de áreas tecnológicas.

São materiais nanoporosos de elevada porosidade (com cerca de 80 % a 99 % de porosidade), resultando numa densidade muito baixa ( $3\text{-}350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) [11],[22]. O seu esqueleto sólido e nanoporoso (possível de ver na Figura 2) limitam eficientemente a sua capacidade de transferência térmica, tornando este tipo de material um excelente isolamento térmico com condutividades térmicas entre  $3 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  e  $20 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [11]. Adicionalmente, têm boa capacidade de isolamento acústico permitindo um amortecimento da onda sonora superior a 50 dB [23]. Além disso, são materiais com excelente reação ao fogo, estando identificados segundo o sistema de Euroclasse de reação ao fogo com classe C-s1,d0 [8], [24].

Uma outra propriedade que estes materiais apresentam e tem muita importância quando se fala num isolamento térmico é a sua hidrofobicidade. O facto de repelirem a água faz com que tenham um desempenho térmico muito menos afetado ao longo dos anos (já que a água aumenta a condutividade térmica de um material) e tenham um tempo de vida útil muito elevado, podendo ser superior a 60 anos [25]. Complementarmente são materiais transpiráveis, ou seja, têm excelente permeabilidade ao vapor de água (com fator de resistência ao vapor de água,  $\mu$ , igual a 5 [8]).

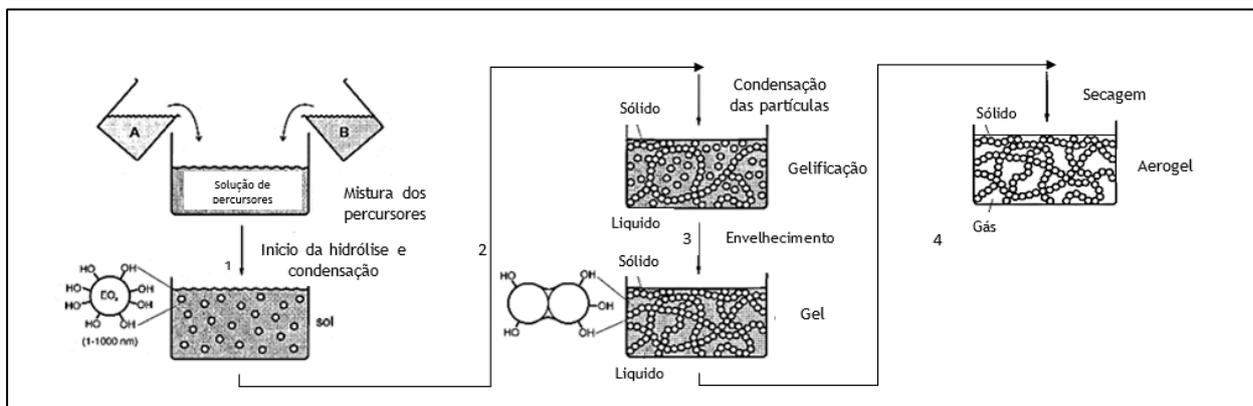


**Figura 2-** SEM (a) e TEM (b) de aerogel de sílica que mostram a característica porosa destes materiais (extraído de [9]).

### 2.2.1 Processo de síntese dos aerogéis de sílica

O processo de produção de aerogéis compreende essencialmente três passos: a formação do gel pela tecnologia sol-gel, o envelhecimento e a secagem do gel [9]. A tecnologia sol-gel é um processo que envolve a transição de uma solução ou “sol” para o sistema gel, designada de transição sol-gel [26]. O “sol” é formado por partículas de diâmetro na ordem dos 1-100 nm dispersos num líquido. Na transição sol-gel, a solução transforma-se em gel pela união e agregação dessas partículas, formando uma rede sólida tridimensional [26].

O método de produção destes aerogéis é, de forma genérica, igual para todos e está esquematicamente representada na Figura 3.



**Figura 3 -** Representação esquemática geral da preparação de aerogéis pelo processo sol-gel (extraído de [27]).

- **Tecnologia sol-gel**

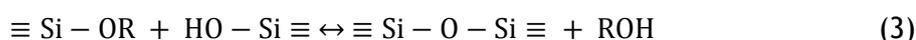
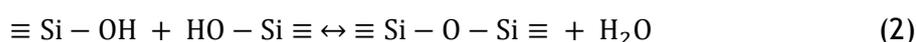
Os formadores essenciais da solução “sol” são o precursor, água, um solvente e catalisadores. A escolha dos precursores utilizados para a produção de aerogéis de sílica é muito importante, uma vez que diferentes precursores originam aerogéis com diferentes estruturas de poros e diferentes propriedades [26], [28].

Os precursores dos aerogéis de sílica ( $\text{SiO}_x(\text{OH})_y$ ) mais utilizados são alcóxidos de silício ( $\text{SiO}_x(\text{OH})_y(\text{OR})_z$ ) e, na maioria das vezes, as fontes de sílica utilizadas são tetralcoxisilanos ( $\text{Si}(\text{OR})_4$ ) [28]. Os precursores mais comumente utilizados são o tetrametilortosilicato (TMOS), o tetraetilortosilicato (TEOS) e o metiltrimetoxisilano (MTMS) [9]. Se se pretender obter um aerogel de caráter hidrofílico deve-se recorrer ao TMOS e ao TEOS [29]. Isto porque ambos têm na sua estrutura grupos que podem ser hidrolisáveis, os grupos metóxido e etóxido, respetivamente. Ambos os grupos, após hidrólise, originando grupos hidroxilo que permitem as reações de condensação, mas que parte deles permanecerão na estrutura dos géis atribuindo-lhes um caráter hidrofílico [29].

O precursor MTMS possui na sua estrutura três grupos metóxido e um metilo. Apenas os grupos metóxido poderão sofrer hidrólise e, portanto, durante a polimerização formar-se-á uma rede tridimensional inorgânica-orgânica na qual um grupo metilo ficará ligado a um grupo siloxano [30]. O facto de se ter um grupo não-polar na rede minimiza a coesão das cadeias e torna as ligações siloxano facilmente deformáveis, originando assim um produto mais flexível [30].

O processo sol-gel envolve duas reações, a de hidrólise (Eq. (1)) e condensação (Eq. (2) e Eq. (3)) [28]. A cinética destas reações é pequena à temperatura ambiente e por isso requer vários dias para concluir o processo de passagem do “sol” a gel [7]. Por esse motivo, a reação de hidrólise é realizada na presença de um catalisador, que pode ser um ácido e/ou uma base [19]. Para que a reação de hidrólise seja possível é necessário adicionar água, sendo feita essa inclusão a partir da adição de uma solução aquosa de catalisador [29]. O solvente utilizado na solução por norma é água ou um álcool que não só funciona como homogeneizante dos precursores como também influencia a formação das partículas e as reações de formação da rede, devido à sua polaridade e viscosidade [31]. Além disso, a água e os alcóxidos de silício são imiscíveis e, por isso, é necessário o uso de um solvente. Neste caso, os solventes a que se recorre são álcoois ou acetona [11].

Na reação de hidrólise (Eq. (1)) um alcóxi é convertido em silanol ( $\text{Si-OH}$ ); grupos de dois silanóis sofrerão condensação, libertando água ou um álcool (Eq. (2) e Eq. (3)), formando grupos siloxano ( $\text{Si-O-Si}$ ) por um processo de polimerização.



O pH a que as reações decorrem (para além do tipo de solvente, temperatura, concentração de alcóxidos e quantidade de água) é um fator que irá definir a velocidade das reações de

hidrólise e condensação e conseqüentemente a estrutura final do produto [9]. Esse parâmetro é controlado pelo tipo de catalisador adicionado [23] e, como tal, o processo sol-gel pode ocorrer num só passo ou em dois passos dependendo da forma como este é adicionado à mistura. No caso de o processo ocorrer num só passo, uma solução de catalisador de origem ácida ou básica é adicionada à solução que contém o precursor e o solvente, decorrendo as duas reações em simultâneo [28]. Quando a reação ocorre em dois passos, primeiramente realiza-se a hidrólise em condições ácidas. Só depois é que se adiciona uma base que irá promover a reação de condensação [28]. Este processo em dois passos possibilita um melhor controlo da microestrutura e conseqüentemente do tamanho das partículas e poros do gel de sílica [28].

Com o decorrer das reações de hidrólise e condensação surgem partículas primárias, que se agregam em partículas secundárias e que, posteriormente, vêm a formar os “clusters” dando origem a um agregado de partículas com uma morfologia de “colar de pérolas” [22]. Quando se atinge o ponto de gel (comportamento elástico sem qualquer fluidez) termina o processo de “gelificação” [22]. As reações químicas que levam à formação do gel continuam a decorrer mesmo após se ter obtido a solução de gel pretendida. Com isto, novas ligações cruzadas são estabelecidas e, portanto, este processo de envelhecimento permite fortalecer e aumentar a rigidez do esqueleto do gel de silício, levando a que durante a secagem o gel contraia menos [22],[9],[32].

O processo de produção de aerogéis de sílica recorrendo a alcóxidos são demasiado dispendiosos quando se pensa em aplicações comerciais, ou seja, produção em larga escala. Por conseguinte utilizam-se soluções de silicato de sódio como fontes de sílica alternativos [28].

### **Métodos de secagem**

A secagem é o estágio mais crítico do processo, quando o objetivo é obter estruturas monolíticas ou preservar a estrutural original do gel húmido. Isto porque numa fase inicial o líquido presente no gel flui do interior do gel até à superfície, o que faz com que o gel contraia para o volume que era anteriormente ocupado pelo líquido [28].

O colapso da rede é resultado de um gradiente de pressões capilares que são geradas no interior dos poros e também da resistência do líquido em fluir por poros de reduzidas dimensões na rede do gel [22],[32]. Devido à diferença de tamanho de poros existente no gel, um elevado gradiente de pressões é desenvolvido no interior da estrutura porosa, levando a uma danificação mecânica na sua estrutura. As tensões capilares desenvolvidas são da ordem dos 100-200 MPa, e não sendo as ligações siloxano suficientemente fortes para suportar estas tensões, resultam a contração e quebra da estrutura do gel [22].

### **Secagem supercrítica (SCD)**

Na secagem supercrítica o produto que se obtém é designado de aerogel. Neste tipo de secagem para evitar o aparecimento das forças capilares, devidas à existência da interface líquido/vapor, a remoção do líquido dos poros é feita acima da temperatura e pressão crítica [22]. Como tal, a estrutura dos aerogéis é praticamente igual à do gel que lhe deu origem, sendo obtidos materiais muito porosos [28].

A secagem pode ser feita com recurso a dois tipos de solventes de extração, nomeadamente solventes orgânicos (geralmente álcoois - metanol ou etanol) ou então recorrendo ao dióxido de carbono líquido [22]. Basicamente, na secagem em condições supercríticas os fluidos existentes nos poros é extraído com o auxílio de um fluido supercrítico que previne a destruição do esqueleto do gel [28].

No caso de se utilizar um álcool como fluido supercrítico, o processo é designado de secagem supercrítica a temperatura elevada (HTSD). São utilizadas temperaturas na ordem dos 250 °C e uma pressão de 7 MPa. Estas condições de alta temperatura e pressão podem trazer complicações no processo assim como a inflamabilidade dos solventes [28]. Em alternativa, pode recorrer-se ao processo de secagem supercrítica a baixa temperatura (LTSD), que envolve o uso de dióxido de carbono líquido [9],[28]. Tem a vantagem do uso de temperaturas críticas baixas (< 40 °C) e pressões críticas moderadas (< 80 bar), tornando o processo mais seguro e não-inflamável [22],[9],[28] Estes métodos requerem o uso de pressões elevadas tornando-se bastantes dispendiosos e perigosos [28].

### **Secagem à pressão ambiente (APD)**

Na secagem subcrítica ou a pressão atmosférica são obtidos xerogéis. É um tipo de secagem bastante interessante para produções em larga escala, uma vez que é uma técnica simples, não perigosa e de custo reduzido [9].

Neste método os géis são secos em estufa a temperaturas que não ultrapassam os 200 °C, já que os solventes usados têm pontos de ebulição mais baixos [29]. Neste processo o líquido presente nos poros dos géis é obrigado a volatilizar sendo que irá ocorrer a formação da interface líquido-vapor, gerando-se tensões capilares. Obtêm-se assim materiais nanos estruturados, os xerogéis, com uma massa volúmica aparente superior aos homólogos aerogéis devido a uma menor porosidade. Adicionalmente, os produtos obtidos por secagem à pressão ambiente têm volume total de poros maior do que quando obtidos por secagem supercrítica a baixa temperatura [9].

### Secagem por congelamento

Este método é o menos comumente utilizado para a obtenção de géis secos, podendo ser apenas utilizado quando o tipo de solvente é a água [29], obtendo-se assim os designados criogéis. Assim como na secagem supercrítica, neste processo as forças capilares são igualmente inexistentes, uma vez que a fase líquida do gel é congelada e posteriormente extraída por sublimação sob vácuo [28].

Uma desvantagem deste processo é que a cristalização do solvente no interior do material pode levar à quebra da estrutura da sílica e, portanto, os criogéis são obtidos apenas em pó [13],[9].

#### 2.2.2 Aplicações dos aerogéis

As propriedades excepcionais dos aerogéis tornam-no muito interessante numa vasta gama de aplicações. Ao longo dos últimos anos foram surgindo várias variantes dos aerogéis de sílica para diversas aplicações, desde a área aeroespaciais até à construção civil. Atualmente os aerogéis de sílica encontram-se na forma de painel flexível e granulado. Existe ainda uma variante que deriva da aglutinação dos grãos de aerogel designada de espumas [10].

Os painéis flexíveis têm vindo a ser aplicados como isolantes térmicos em sistemas de tubagens para transporte de gás e líquidos, em tanques de armazenamento e em contentores criogénicos (*dewars*). Na vertente aeroespacial são utilizados em sondas espaciais, em *rovers* e *landers* para exploração planetária, balões estratosféricos, tanques criogénicos e armazenamento de hélio [10]. Os granulados de aerogel têm sido aplicados em cimentos, argamassas, tintas e revestimentos na construção civil para isolamento térmico. Além disso também são impregnados como enchimento de paredes duplas de contentores criogénicos [10]. As espumas de aerogel têm o mesmo tipo de aplicação que os painéis flexíveis, no entanto são aplicados por pulverização ou projeção e após secagem ficam rígidos, permitindo ser utilizadas em estruturas mais complexas [10].

Além destas aplicações, os aerogéis podem ser encontrados em sensores de humidade, baterias, cosméticos, em aparelhos de desporto (raquetes de ténis) e calçado de desporto [23].

#### 2.2.3 Compósitos com aerogéis de sílica

Os aerogéis foram descobertos em 1931 por Samuel Kistler que definia gel como uma rede sólida com poros de tamanho reduzido, designados de nanoporos. Afirmava que era necessário evaporar a fase líquida existente nessa rede, sem colapso da estrutura, para obter os aerogéis [33]. Depois de várias tentativas conseguiu substituir o líquido presente nesses nanoporos por ar, através da secagem supercrítica [33]. Estes materiais começaram a despertar interesse há cerca de duas décadas devido às suas características excepcionais em termos de condutividade

térmica. No entanto, a sua baixa resistência mecânica tem sido uma limitação ao seu uso mais generalizado. Nesse sentido, investiu-se no desenvolvimento de compósitos que possibilitem a combinação dos aerogéis com outros materiais de modo a aliar as características do aerogel e simultaneamente ter um material mecanicamente resistente.

Os compósitos de aerogéis são materiais muito utilizados em áreas de alto valor como a aeronáutica, aeroespacial e também na construção. Nesta última a combinação entre um isolamento térmico e acústico de elevado desempenho e repelência à água são fatores cruciais.

Desta forma, vários compósitos com aerogéis foram estudados estudos tem em vista obter produtos com baixa densidade, elevada resistência mecânica e um baixo custo. Foi efetuado uma pesquisa de casos de estudo de desenvolvimento de compósitos para isolamento térmico baseados em aerogéis de sílica com o objetivo de compreender o modo como este material é manipulado e se podia misturar com a cortiça.

Atualmente os compósitos à base de aerogéis aplicados na área da construção incluem principalmente sistemas de envidraçados de aerogel [34], mantas de aerogel [35], painéis sanduiche preenchidos com aerogel [36] e revestimentos[37]. As mantas de aerogel usadas em fachadas exteriores de edifícios apresentavam problemas de durabilidade[38]. Surgiram então os painéis sanduiches [36], compostos por um núcleo em estrutura treliçada piramidal preenchida por granulado de aerogel e revestimento de poliestireno com ca. 2 mm de espessura. Estes painéis exibem resultados de condutividade térmica bastante satisfatórios com valores de  $0,027 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . No entanto, não podem ser utilizados em fachadas de edifícios irregulares dada a sua inflexibilidade e impossibilidade de corte. Adicionalmente, a aplicação dos painéis sanduiche e das mantas está restrita a edifícios residenciais pela dificuldade de instalação e custo elevado. Numa perspetiva de melhorar estas limitações Ibrahim *et al.* [37] estudou o desempenho de um revestimento para exteriores à base de aerogéis de sílica que tinha sido recentemente patenteado. Este revestimento é facilmente aplicado por projeção com máquinas de argamassas ou manualmente, o que torna o processo mais rápido e redução de custos associados. É adequado para fachadas irregulares (o que não acontecia com os painéis sanduiche e com as mantas de aerogel) e, por conseguinte, o preenchimento de lacunas e locais de difícil acesso; o estudo revelou valores de condutividade térmica de  $0,027 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . No entanto, devido à abundância de aerogel na matriz do revestimento, algumas partículas de aerogel poderão ser danificadas durante a aplicação e, conseqüentemente o desempenho térmico do revestimento diminui.

Outras investigações prosseguiram numa tentativa de incorporação de aerogel em argamassas térmicas, em cimentos de isolamento térmico [14, 20-21] e em isolamentos térmicos de betão

[14,21]. A aplicação neste caso seria manual de modo a colmatar o problema da aplicação do revestimento. Num tentativa inicial Sughwan *et al.* [39] incorporou aerogel de natureza hidrofóbica em cimentos, através do uso de metanol como dispersante. Dado que o aerogel é hidrofóbico, não é possível preparar o cimento com adição de água. Foi possível diminuir 75 % da condutividade térmica do cimento com apenas a incorporação de 2 % em massa de aerogel, reduzindo-se de  $0,533 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  para  $0,135 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . No entanto, no processo recorreu-se ao uso de um solvente perigoso, que deve ser evitado na construção civil dado os perigos associados. Neste sentido, numa matriz de betão foi experimentada a substituição parcial/total dos agregados normais do betão pelo aerogel, com uso de água como dispersante [40]. A estratégia de mistura dos compostos culminou na junção de todas as partes sólidas e do ligante, de modo a que todo o aerogel ficasse uniformemente revestido pela pasta de cimento e, só depois fez adição lenta da água, por forma a se obter uma mistura homogénea. O betão preparado foi bem-sucedido, tendo-se conseguido uma redução da condutividade térmica do betão em 86 % com a incorporação de 60 % em volume de aerogel. No entanto a força de compressão (8,3 MPa) e tensão de flexão (1,2 MPa) são apenas 13,8 % e 16 % do valor normal apresentado pelo betão comum, devido à influência das baixas propriedades mecânicas do aerogel. Além disso, o custo de produção deste novo betão aumentaria em  $2880 \text{ €}\cdot\text{m}^{-2}$  do betão normal; as propriedades mecânicas e o elevado custo são inoportáveis para aplicação na área da construção.

Um estudo semelhante foi realizado por Júlio *et al.* [41]. No entanto, estes autores incorporaram aerogéis de sílica hidrofóbicos e hidrofílicos obtidos por secagem à pressão ambiente como agregados de cimento. Para a incorporação dos aerogéis seguiram-se dois métodos: i) devido à natureza hidrofóbica do aerogel, fez-se primeiramente a junção deste com um tensoativo aniónico e só depois é que se adicionou a água, lentamente, até se obter uma mistura homogénea. De seguida fez-se a adição dos outros agregados, adicionando o cimento em último lugar; ii) no caso de incorporação de aerogéis hidrofílicos não foi necessária a adição do tensoativo e, portanto, a sua incorporação foi feita em último lugar. Este trabalho mostrou que os aerogéis subcríticos têm vantagens relativamente aos aerogéis comerciais supercríticos, já que o tamanho de partícula pode ser controlado, são mais hidrofóbicos e conferem elevada área superficial e volume total de poros aos cimentos. Verificou-se boa estabilização dos aerogéis na pasta cimentícia aquosa sem afetar a estrutura final dos cimentos.

Recentemente, com objetivo se resolver os problemas associados à aplicação de aerogéis de sílica em fachadas de edifícios para isolamento térmico e promover o seu desenvolvimento comercial, Jia *et al.* [11] propôs o desenvolvimento de um novo compósito. Este compósito foi produzido a partir do uso de perlite expandida misturado com aerogéis de sílica. A perlite

expandida é um tipo de material inorgânico com elevada resistência ao fogo e à propagação do som, já utilizado em alguns materiais de isolamento térmico devido ao seu baixo custo. O compósito foi preparado pela incorporação da perlite expandida no hidrossol formado após reações de hidrólise e condensação, tendo por base uma solução de silicato de sódio como agente precursor. Após algumas observações por SEM averiguou-se que os aerogéis preenchem os poros da perlite expandida de tal modo que ficam protegidos pelo seu esqueleto. Os aerogéis permitiram obter uma boa condutividade térmica para o sistema perlite expandida/aerogel com a redução de 14,7 % a 31,8% relativamente ao sistema de perlite expandida. Conseguiu-se assim um isolamento com a mesma resistência ao fogo que os isolamentos inorgânicos tradicionais e simultaneamente uma condutividade térmica semelhante à dos isolamentos orgânicos comuns. A hidrofobicidade deste novo sistema reduz a absorção de água, o que melhora o desempenho do nível de isolamento e aumenta a durabilidade do material.

### **2.3 Isolamentos térmicos atuais**

Foi efetuado o levantamento dos materiais de isolamento térmico atualmente utilizados para posteriores efeitos comparativos com os protótipos desenvolvidos neste projeto. Esses materiais e respetivas características encontram-se resumidas na Tabela 2, realçando que dos materiais apresentados o Poliestireno Expandido e o Poliestireno Extrudido são os isolamentos térmicos que têm mais uso na área da construção civil.

**Tabela 2- Isolamentos térmicos tradicionalmente utilizados e respectivas características.**

Isolamento	Densidade (kg·m <sup>-3</sup> )	Condutividade térmica (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Fator de resistência ao vapor de água (μ)	Isolamento Acústico (dB)/ coeficiente de absorção sonora (α)	Resistência à tração (kPa)	Resistência à compressão a 10 % de deformação (σ <sub>10</sub> ) (kPa)	Reação ao fogo		Custo *(€·m <sup>-2</sup> )
							Classe	Inflamável	
Lã de vidro	75 [42]	0,034 [42]	1 [42]	59-60 dB [42]	---	15 [42]	A2-s1,d0 [42]	Não [5]	10,5-16 [5]
Lã de Rocha	110 [43]	0,036 [43]	1 [43]	α = 1 [43]	12 [44]	45 [44]	A1 [43]	Não [5]	7,5-16 [5]
Poliestireno Expandido	20-25 [45]	0,034-0,036 [45]	30 – 70 [45]	Baixo [45]	---	100-150 [45]	E [45]	Sim [5]	9,5-16 [5]
Poliestireno Extrudido	32-35 [46]	0,035 [46]	80 – 100 [46]	Baixo	---	200 [46]	E [46]	Sim [5]	8,7-11 [5]
Espumas de Poliuretano	20-50 [47]	0,033 [48]	60 [5]	Elevada (B)	70 [48]	30 [48]	B3 [48]	Sim [5]	16-35 [5]
Aglomerado Expandido de Cortiça (ICB)	100-120 [21]	0,037-0,04 [21]	7 – 14 [21]	53 dB para ruídos aéreos [20]	50-80 [7]	100-200 [21]	E-s1,d0 [21]	Difícilmente [5]	17 [49]

\* Custo variável com a espessura.

## 3 Materiais e Métodos

Este capítulo é dedicado à descrição de todo o procedimento experimental utilizado para obtenção dos vários compósitos para sistema de isolamento térmico bem como se prende com a descrição de todas as técnicas de caracterização adotadas para estudar os materiais elaborados.

### 3.1 Preparação dos compósitos

Os aerogéis de sílica utilizados neste projeto foram fornecidos pela Activeaerogels. Salienta-se que a formulação deste material é confidencial e, portanto, os compósitos que envolveram a produção de aerogéis simultânea à combinação com cortiça foram confeccionados pela empresa Activeaerogels. Foram utilizadas as três variantes de aerogéis que a empresa comercializa, nomeadamente a manta flexível de aerogel (Silflex) para produção de painéis tipo sanduiche, granulado/pó (Silfiller) usado para produção de aglomerados de compósitos e reformulação do Corkwall, respetivamente, e as espumas (Silfoam) (Figura 4). As propriedades dos vários tipos de aerogéis de sílica utilizados neste projeto encontram-se no Anexo 1.



*Figura 4 - Aerogéis de sílica: A- manta flexível; B-Granulado; C-Espuma (extraído de [56],[57],[58]) .*

A nomenclatura de todos os protótipos desenvolvidos bem como uma descrição resumida das suas composições estão apresentadas no Anexo 2.

#### 3.1.1 Painéis tipo sanduiche

Os painéis tipo sanduiche (PS) são constituídos por uma placa de aerogel recoberta por duas de compósito de cortiça. Estes painéis foram produzidos de duas maneiras distintas, mas ambas com intuito de ter um núcleo com manta flexível de aerogel.

#### Procedimento experimental #1

No procedimento experimental #1 o painel sanduiche foi elaborado pela união de placas de aglomerado compósito de cortiça com uma manta flexível de aerogel de sílica por meio de um ligante. Foram selecionados, após experimentação, os materiais incorporados nas amostras,

nomeadamente a resina de colagem das placas, o tipo de cortiça e a espessura do painel de cortiça. As placas de cortiça usadas foram: 8405 (C1), 8113 (C2) e 8404 (C3), que variam no tamanho de grão e na porosidade. As resinas utilizadas para colagem foram: cola de contacto (cola de madeira), resina de poliuretano (PU), resina acrílica de base aquosa (50 % de água) e cola de contacto em *spray UHU*. Os painéis sanduiche produzidos tinham espessuras entre os 10 mm e os 12,5 mm de espessura, de acordo com a espessura do aglomerado de cortiça incorporado.

## **Procedimento experimental #2**

Neste segundo método de produção dos painéis tipo sanduiche, o núcleo foi preparado a partir da solução “sol” que dá origem à manta de aerogel (como a da Figura 4 A). Neste caso não foi necessário recorrer ao uso de qualquer resina uma vez que o objetivo seria promover a ligação diretamente entre a solução de aerogel e os painéis de cortiça após decorrer o processo de secagem.

A produção desta amostra teve por base o processo normal de produção de um aerogel tipo manta flexível. Ou seja, misturam-se o precursor de sílica com a água, com o solvente e um catalisador que irão constituir a solução “sol”. Seguidamente colocou-se na base do molde um painel de cortiça (num teste inicial utilizou-se o painel C1) sobre o qual se verteu a solução “sol”. Após montagem deste sistema deixou-se a solução gelificar, tendo-se posteriormente inserido no topo um outro painel de cortiça. Por fim, decorreram os estágios de envelhecimento e secagem do painel.

### **3.1.2 Aglomerados compósitos**

Os aglomerados compósitos são constituídos por grãos de cortiça e outros materiais auxiliares (neste caso os aerogéis de sílica) ligados através de um agente de aglutinação, por ação conjunta de pressão, temperatura. Os aglomerados de compósitos foram preparados por duas técnicas de produção, nomeadamente por produção de painéis em caixa de enchimento (procedimento experimental #3) e de aglomerados sob a forma de blocos (procedimento experimental #4).

O tipo e quantidade de ligante utilizados basearam-se na patente US005656195A [27]. A quantidade de resina usada na preparação de moldes com aerogel de sílica é de 26 % em relação à massa total do compósito. No entanto, foram efetuadas formulações com quantidades de ligante superiores e inferiores.

## **Procedimento experimental #3**

Na produção de painéis de aglomerado de compósito por caixa de enchimento (PCE) fez-se a impregnação dos grãos de cortiça MD 0.5-1. Como agentes de aglomeração foram testados os seguintes ligantes: resina de PU, resina acrílica de base aquosa (50 % de água), resina de base

fenólica, termoplástico de EVA (etil-vinil-acetato), melamina em pó (termoendurecível), polietileno reciclado com carbonato de cálcio (rHDPE/CaCO<sub>3</sub>) e resina de melamina-ureia-formaldeído (MUF).

A mistura é efetuada num misturador vertical colocando primeiramente a cortiça, seguindo o aglutinante e só depois os grãos de aerogel. Posteriormente a mistura é colocada num molde em caixa de enchimento, com espessura desejada (placa metálica com um conjunto de guias sobrepostas que dão a espessura desejada ao painel) e levado para cura em prensa aquecida durante alguns minutos (as condições de aquecimento variam de acordo com o ligante). Os protótipos resultantes tinham espessura de aproximadamente 5 mm.

#### **Procedimento experimental #4**

Para a produção de blocos de aglomerados (B) utilizaram-se grãos de cortiça de média densidade e granulometria de 0,5 a 1 mm (MD 0.5-1) e também grânulos de baixa densidade com diâmetro de 2 a 3 mm (BD 2-3), uma granulometria mais parecida com a dos aerogéis impregnados. As resinas de aglomeração testadas foram a resina de PU e resina acrílica de base aquosa.

A fabricação dos blocos de aglomerados seguiu um procedimento semelhante ao anterior relativamente à mistura dos grãos de cortiça com o aerogel. Após mistura, esta foi colocada num molde e curada em estufa a 100 °C durante 1 h. Seguidamente os blocos foram laminados para painéis de 17 mm de espessura, aproximadamente.

#### **3.1.3 Incorporação de aerogel no Corkwall**

O Corkwall é um revestimento ecológico para fachadas exteriores e interiores (trata-se de um acabamento e, portanto, não comparável com sistemas de isolamento pelo exterior ou interior) aplicável por projeção. É resultante da mistura de um conjunto de granulados de cortiça selecionados, aproximadamente 10 % em massa, com diferentes tipos de resina de base aquosa, cargas minerais, estabilizantes e vários aditivos, não possuindo qualquer tipo de solventes [33].

A mistura de granulado de cortiça necessita da adição de um catalisador cuja função é acelerar o processo de secagem. Esse catalisador vem num recipiente à parte e só é misturado com a restante massa durante a preparação da mistura que se pretende projetar.

O rendimento da mistura por cada metro quadrado é de 1,8 kg, originando uma camada de revestimento com cerca de 3 mm de espessura. Para essa massa é adicionado cerca de 34,5 g de catalisador. A esta mistura foi acrescentado aerogel em pó, tendo-se inicialmente criado formulações com 5 %, 10 %, 15 % e 20 % de aerogel usando água como dispersante (1ª projeção).

Numa segunda fase (segunda projeção) criaram-se misturas com conteúdo de cortiça e aerogel de 60 % em volume da mistura total. Neste sentido, e tendo em conta que não é possível variar

a quantidade de cortiça do revestimento, criaram-se formulações com 2 %, 5 % e 7 % em massa de aerogel e uma com uma quantidade excessiva de aerogel (20 % em massa).

Com a incorporação de mais sólidos, torna-se necessário a adição de um solvente que permita envolver o aerogel na mistura de modo a tornar a mistura mais trabalhável. Para tal utilizou-se como agente de dispersão a água e uma resina acrílica de base aquosa (50 % de água).

A mistura foi feita com o auxílio de um dispositivo de agitação mecânica, que no presente caso foi uma simples batedeira elétrica de culinária, já que se tratam de baixas quantidades mistura a preparar. Primeiramente é misturado a massa de Corkwall com o catalisador e depois adicionado lentamente o aerogel e o solvente, de forma alternada, até se obter uma mistura homogênea.

A projeção foi feita em placas de HDF (High Density Fiberboard) de aproximadamente 0,20 m<sup>2</sup>, tendo sido adaptada a quantidade de mistura a ser projetada, de acordo com o valor do rendimento por metro quadrado.

Para a aplicação da mistura recorreu-se a um sistema Airless (pistola de projeção de cortiça da GAHESA/JAFE modelo M8R). Adicionalmente, e para que seja possível a projeção, usou-se um sistema de ar comprimido, para ligar à pistola.

A secagem total de cada painel demora entre 12 a 24 h. Após esse período, cada placa de 0,20 m<sup>2</sup> foi cortada em painéis de 0,023 m<sup>2</sup>, aos quais lhes foi retirada a camada de tinta para realização dos vários ensaios de caracterização térmica.

#### **3.1.4 Painéis do tipo manta flexível**

Os painéis tipo manta flexível são painéis iguais aos apresentados na Figura 4 A, facilmente enrolados e moldados

A preparação destas amostras teve por base o processo normal de produção de um aerogel tipo manta flexível onde o granulado de cortiça iria dar estrutura à manta. Isto é, fez-se a mistura do precursor de sílica com a água, com o solvente e um catalisador que iriam constituir a solução “sol”. Depois incorporaram-se grãos de cortiça em diferentes percentagens nessa solução. Segue-se o processo de gelificação, envelhecimento e por fim a secagem à pressão ambiente. Utilizaram-se grãos de cortiça média densidade (MD) e de alta densidade (AD) com granulometria de 0,5-1 mm e 1-2 mm (MD 0,5-1; MD 1-2; AD 0,5-1 e AD 1-2).

#### **3.1.5 Espumas com cortiça**

As espumas (Figura 4 C) são um produto da Activeaerogels que derivam da aglutinação de grãos de aerogel por uso de um agente de aglutinação.

A preparação das espumas com cortiça teve por base a formulação das espumas produzidas pela empresa (formulação idêntica à da Silfoam), ou seja, obtiveram-se estas espumas pela junção

de grãos de aerogel de tamanho médio com um ligante e um aditivo. A esta mistura foram adicionados grãos de cortiça MD e AD com granulometrias de 0,5-1 mm e de 1-2 mm. O aditivo foi o último componente a ser adicionado à mistura pois dificulta a sua manipulação; este que confere estrutura e resistência mecânicas ao produto final. Esta mistura depois foi vertida para moldes de 20 mm de espessura e 150 x 150 mm<sup>2</sup>, sendo posteriormente compactada manualmente com uma espátula. Posteriormente as amostras passam por um estágio de secagem em condições ambiente por um período de aproximadamente uma semana.

Foram produzidas espumas com 6,7 % de cortiça em massa em relação à quantidade de espuma para todos os tamanhos de grão e 17,3 % de cortiça em massa apenas para a cortiça de maior granulometria (1-2 mm).

## 3.2 Técnicas de caracterização

Finalizada a produção dos vários protótipos foi necessário proceder à sua seleção e posterior caracterização.

### 3.2.1 Densidade aparente

As massas volúmicas de todos os protótipos foram determinadas pelo quociente entre a massa e volume de cada corpo em estudo.

### 3.2.2 Condutividade térmica

A determinação da condutividade térmica ( $\lambda$ ) dos materiais que foram produzidos foi o ponto fulcral deste projeto, uma vez que o objetivo visa o desenvolvimento de um isolamento térmico com melhor desempenho possível. Dado que avaliar esta característica em entidades certificadas ficava muito dispendioso optou-se por desenvolver um método que permitisse fazer essa avaliação nos laboratórios da ACC. O método desenvolvido teve por base o método “*Guarded Hot Plate*” (ASTM C177).

Sabe-se que quando um corpo é exposto a um ambiente com temperatura diferente da que este apresenta existe transferência de energia da zona de temperatura mais elevada para a de temperatura mais baixa. Diz-se, portanto, que existe transferência de calor por condução e que essa transferência é proporcional ao gradiente normal de temperatura (Eq. (4))[50]:

$$\frac{q_x}{A} = \frac{\partial T}{\delta X} \quad (4)$$

Quando se insere uma constante de proporcionalidade [50]:

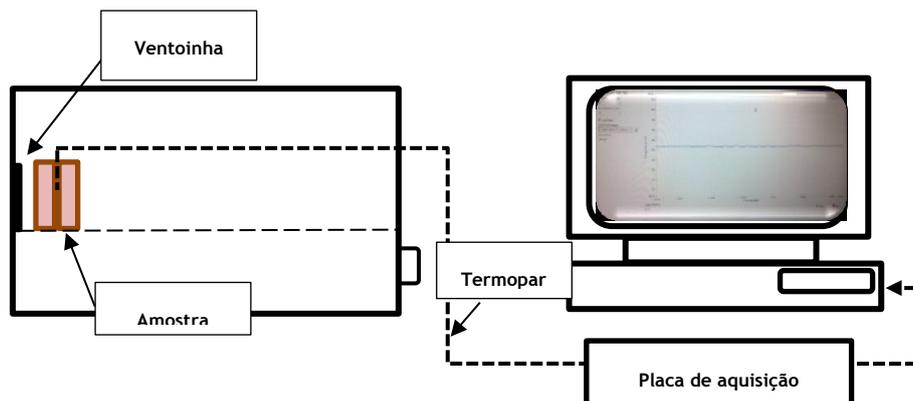
$$q_x = -\lambda A \frac{\partial T}{\delta X} \quad (5)$$

Em que  $q_x$  é a velocidade de transferência de calor e  $\frac{\partial T}{\delta X}$  é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor. A constante  $\lambda$  é positiva e é designada de constante de condutividade

térmica de um material e o sinal negativo na Eq. (5) é colocado para que o segundo princípio da termodinâmica seja satisfeito [50].

É sabido também que um corpo arrefece/aquece mais rapidamente quando exposto a uma corrente de ar fria/quente do que com ar parado. Esse fenómeno é devido à convecção do ar ou outro fluido que esteja em contacto com o material. Este processo é explicado como sendo um fenómeno físico verificado em líquidos e gases em que a propagação de calor se dá pela diferença de densidade desse fluido quando a sua temperatura é alterada [50].

Assim, no trabalho prático estes fenómenos foram tidos em conta tendo-se reproduzido uma situação real em que a temperatura ambiente seria superior à do local que se pretendia manter a temperatura. Dessa forma, a instalação experimental (Figura 5) era constituída por um termopar tipo k, um equipamento de aquisição de dados com conexão ao termopar e ligação USB da *National Instruments*, fornecido pelo Departamento de Engenharia Química da FEUP e uma estufa da *Memmert*.



**Figura 5-** Esquema da instalação experimental para medição da condutividade térmica.

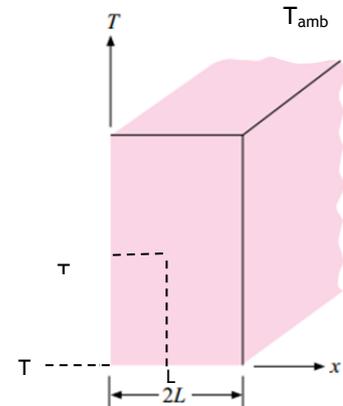
Num primeiro passo ligou-se a estufa à temperatura desejada e deixou-se aquecer até se atingir uma temperatura uniforme. Seguidamente é feita a aquisição da temperatura no meio de dois provetes iguais, de forma a ter-se um sistema simétrico, ao longo do tempo até que se atinja o equilíbrio térmico (temperatura lida no termopar igual à da estufa).

É de salientar que o provete foi colocado em frente da ventoinha. O motivo para tal ato prende-se na eliminação do fenómeno de convecção. Isto é, sempre que existe movimento de um fluido na superfície da placa vão existir diferenças de velocidades no processo de transferência de calor entre o fluido que contorna a placa e a sua superfície. Antes do fluido atingir a placa pode-se dizer que a sua velocidade é de  $u_{\infty}$  e quando a atinge essa velocidade passa a ser zero, gerando-se uma camada limite hidrodinâmica. Esta camada limite é uma região de espessura muito reduzida onde o fluido está estagnado (com gradientes de velocidade e tensões de corte desprezíveis) e pode ser tratado como invíscido. Assim, quando o provete é exposto diretamente a ventilação constante, essa camada deixa de se formar e o fenómeno de

convecção é eliminado, passando-se a ter um sistema em que existe apenas condução em estado transiente, uma vez que existem mudanças na energia interna do corpo com o tempo, antes que o equilíbrio seja estabelecido.

O modelo matemático utilizado para obtenção dos valores de condutividade térmica de cada material foi baseado na resolução da equação geral de transferência de calor pelo método da separação de variáveis.

Considerou-se um plano infinito de espessura  $2L$ , que será a espessura total do sistema (os dois provetes iguais acoplados) como apresentado na Figura 6 [50]. Quer-se medir a temperatura no centro na amostra, ou seja, para a espessura igual a  $L$  ( $x=L$ , espessura de apenas um provete).



**Figura 6** - Esquema representativo para a solução plana.

A temperatura inicial da amostra é uniforme e é  $T_i$ . Quando colocada na estufa essa temperatura é aumentada e a temperatura da superfície passa a ser  $T_1$  (igual à temperatura ambiente,  $T_{amb}$ ). Desta forma a equação diferencial que se aplica a este sistema é a Eq. (6) [50].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{com} \quad \alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (6)$$

Designado de  $\theta = T - T_1$ , a Equação 6 passa a ser expressa por [50]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (7)$$

As condições fronteiras que o sistema expressa são [50]:

$$\theta = \theta_i = T_i - T_1 \quad \text{para} \quad t = 0, 0 \leq x \leq 2L \quad (8)$$

$$\theta = 0 \quad \text{para} \quad t > 0, x = 0 \quad (9)$$

$$\theta = 0 \quad \text{para} \quad t > 0, x = 2L \quad (10)$$

Resolvendo a Equação diferencial 7 com recurso às condições fronteira anteriores chega-se à Eq.(19), a série de senos de Fourier [50]:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_i}{T_i - T_1} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-[n\pi/2L]^2 \alpha t} \sin \frac{n\pi x}{2L}, \quad n = 1,3,5 \quad (11)$$

Como se quer a solução em  $x = L$  a solução simplifica e fica [50]:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_i}{T_i - T_1} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-[n\pi/2L]^2 \alpha t} \sin \frac{n\pi}{2}, \quad n = 1,3,5 \quad (12)$$

Esta equação, após aquisição da história de temperaturas do material em análise, foi resolvida com auxílio do *software Matlab*. Foi criado um código que permitisse através da Eq. (12) calcular o valor esperados de temperaturas no centro do sistema que se deveriam obter por

leitura do termopar. Depois calculou-se o erro entre o valor medido e o valor teórico. De acordo com o somatório do erro, foi feita uma minimização a esse valor para um valor mínimo da condutividade térmica. O fluxograma do código em *Matlab* está apresentado no Anexo 6.

A utilização deste método implicou que várias hipóteses fossem consideradas, nomeadamente: fluxo de calor unidirecional, material em estudo ser isotrópico e homogêneo, inexistência de geração interna de calor e as propriedades físicas do material serem constantes no tempo.

No entanto, alguns dos protótipos desenvolvidos não eram sistemas homogêneos, mas sim de um conjunto de materiais associados em série (como é o caso dos painéis tipo sanduiche). Nestes casos, a Eq. (12) foi igualmente aplicada uma vez que o sistema era maioritariamente composto por aerogel e detinha uma fina camada de cortiça. Como o aerogel tem uma condutividade térmica muito menor que a da cortiça, então a condução de calor no sistema será dominada pelo aerogel, pelo que o painel composto foi aproximado a um sistema homogêneo.

Como forma de comprovar este facto fez-se uma simulação do valor de condutividade térmica que se deveria obter para o painel sanduiche. Para isso efetuou-se a medição em estado transiente da condutividade térmica dos painéis de cortiça e de aerogel separadamente para obter o valor de condutividade térmica de cada elemento individualmente, aplicando a Eq. (12).

Num painel tem-se três materiais associados em série, as duas folhas de cortiça e um painel de aerogel no centro, como se pode ver pela Figura 7. O fluxo de calor,  $q_x$ , que atravessa ambos os materiais será o mesmo para todos e pode ser expresso pela Eq. (13):

$$q_x = k_1 A \frac{T_{amb} - T_1}{L_1} = k_2 A \frac{T_1 - T_2}{L_2} = k_3 A \frac{T_2 - T_3}{L_3} \quad (13)$$

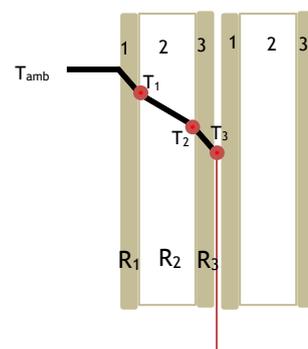
Colocando em evidência a diferença de temperaturas e somando as equações surge a Eq. (14):

$$T_1 - T_3 = \frac{q_x L_1}{k_1 A} + \frac{q_x L_2}{k_2 A} + \frac{q_x L_3}{k_3 A} \quad (14)$$

Simplificando, surge a Eq. (15):

$$q_x = \frac{T_1 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\Delta T_{total}}{R_{total}} \quad (15)$$

Em que  $R_i = \frac{L_i}{K_i}$  é a resistência do material à transferência de calor, com  $i = 1, 2$  e  $3$  e  $R_t = \sum_{i=1}^n R_i$  é a resistência total do sistema.



**Figura 7-** Esquema de transferência de calor no painel tipo sanduiche.

Assim, num caso real, sabendo as condutividades térmicas individuais de cada material e fazendo uma associação em série, facilmente se determina o valor teórico da condutividade térmica de cada sistema de isolamento térmico. Assim calcula-se a resistência total do sistema à transferência de calor e posteriormente obtêm-se o valor da condutividade térmica global, através da Eq. (16).

$$k_{\text{global}} = \frac{L_{\text{total}}}{R_{\text{total}}} \quad (16)$$

### 3.2.3 Teste de tensão à rutura

O teste de tensão à rutura é o mais comumente utilizado para ensaios de tensão-deformação mecânica de um material [51]. Neste ensaio o corpo de prova é deformado, geralmente até à rutura, com carga de tração gradualmente crescente aplicada uniaxialmente ao longo do corpo de prova [51]. Os ensaios foram realizados num tensómetro da *Hounsfield* em provetes com dimensões de 10 x 5 cm<sup>2</sup> de acordo com a ASTM F 152. Este tensómetro fornece valores da força aplicada (em newton) e alongamento (em mm). Para se saber qual a tensão de rutura ( $\sigma$ ) do material em estudo, ou seja, da tensão máxima que o material suporta até rutura, divide-se o valor dessa força pela área de secção transversal do provete.

### 3.2.4 Teste de compressão

Materiais de isolamento térmico quando aplicados em fachadas de edifícios ficam sujeitos a ação de tensões permanentes, nomeadamente ações de compressão, como é o exemplo das coberturas. Assim, este teste foi utilizado para estudar a resistência à compressão a 10 % de deformação ( $\sigma_{10}$ ) dos materiais produzidos.

Os testes de compressão foram realizados de forma semelhante aos testes de tração, no entanto a força é aplicada de forma progressiva e é compressiva, o que gera uma perda de espessura da amostra [51]. Seguiu-se a norma ASTM F36 ensaiando provetes de dimensões de 50 x 50 mm<sup>2</sup> num tensómetro da *QTest<sub>TM</sub>* tendo-se aplicado uma força de compressão em cada provete até se reduzir 10 % da sua espessura. Para se saber a carga que cada provete suporta nestas condições fez-se análise do gráfico que se obtém do ensaio (carga aplicada em função da espessura que se comprimiu), sendo que o valor desejado corresponde ao valor máximo.

### 3.2.5 Permeabilidade ao vapor de água

Avaliou-se a capacidade de permeação do vapor de água dos materiais desenvolvidos. O teste realizado seguiu os padrões indicados na norma ASTM E 96 segundo o “método da água” (*Water Method*). O ensaio decorre num sistema constituído por duas câmaras: uma das camaras (camara 1) é um pequeno recipiente em aço inoxidável com suporte para a amostra em estudo; a outra é uma camara exterior (camara 2) onde a camara 1 é condicionada, com

condições de temperatura e humidade controladas, neste caso foi uma estufa da *Memmert* (Figura 8).



**Figura 8** - Instalação experimental para ensaios de permeabilidade ao vapor de água.

O ensaio realizado pode ser descrito pelo método *Time-lag*, utilizado para medir a permeabilidade de membranas a gases ou solutos [52]. A descrição deste método e modo de cálculo da permeabilidade ao vapor de água dos materiais desenvolvidos é apresentada no Anexo 3.

### 3.2.6 Reação ao fogo

A forma como um material de isolamento térmico reage ao fogo é uma característica de elevada importância quando a sua aplicação visa essencialmente a área da construção. Uma vez aplicados em elementos construtivos deverão agir como uma barreira contra o fogo e promover a segurança do próprio edifício e seus ocupantes. Assim, foram realizados ensaios de reação ao fogo aos isolamentos térmicos desenvolvidos neste projeto, tendo-se para tal seguido os padrões definidos na ISO 11925-2 (ensaio a pequena chama), adequado o procedimento experimental às condições disponibilizadas. A Figura 9 ilustra a instalação experimental usada para os ensaios de fogo.

### 3.2.7 Análise Termogavimétrica

Dado o desconhecimento à cerca dos aerogéis de sílica utilizados no projeto fez-se uma análise termogavimétrica (TGA) com o objetivo de observar variações de massa (perda ou ganho) na amostra quando exposta a um programa de temperatura controlada. Pretendeu-se também verificar a estabilidade térmica do aerogel em termos de retenção do seu caráter hidrofóbico.

**Figura 9** - Instalação experimental para os ensaios de comportamento ao fogo

(dimensões em mm).

Esta análise foi realizada num STA 7200RV da *Hitachi*, tendo a amostra sido submetida a uma taxa de aquecimento de  $10\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$  para o intervalo de temperaturas de  $25\text{ °C}$  a  $1000\text{ °C}$ . O ensaio decorreu em atmosfera controlada com azoto a um caudal de  $200\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ .

No Anexo 4 é apresentado o gráfico TG/DTG obtido e sua análise.

### 3.2.8 Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC)

Esta técnica foi utilizada para determinar a capacidade calorífica de todos os protótipos produzidos, informação necessária posteriormente para o cálculo da condutividade térmica (nomeadamente para obtenção da difusividade térmica).

A determinação experimental da capacidade calorífica dos materiais foi efetuada tendo como referência a norma ASTM- E 1269 (*Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry*) e a norma ISO 11357-4 (*Plastics - Differential Scanning Calorimetry (DSC)- Part 4: Determinations of specific heat capacity*). Recorreu-se a um equipamento da *NETZSCH DSC 214 Polyma* instalado nos laboratórios do Departamento de Engenharia Química da FEUP. Em cada ensaio impôs-se um programa de aquecimento composto por quatro segmentos: primeiro foi feito um arrefecimento da amostra de 20 °C até -40 °C; de seguida fez-se uma isotérmica a -40 °C de duração de aproximadamente 5 minutos; o terceiro segmento fez-se um aquecimento da amostra de -40 °C até 60 °C; por fim, realiza-se um quarto segmento com uma isotérmica a 60 °C, também de 5 minutos. Todos estes segmentos são obtidos com uma taxa de aquecimento de 10 °C·min<sup>-1</sup> em atmosfera controlada com azoto como gás de arrasto a 40 mL·m<sup>-1</sup> e também como purga protetiva a 60 mL·m<sup>-1</sup>. Neste tipo de ensaio é necessário o uso de um material de calibração e, neste caso, usou-se a safira sintética.

No Anexo 5 encontram-se os valores da capacidade calorífica das amostras em estudo obtidos por esta metodologia.

### 3.2.9 Espetroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier e Refletância Atenuada Total (FTIR- ATR)

Esta técnica foi usada para estudar os painéis sanduiche resultantes do procedimento #2 e a manta flexível com cortiça (protótipos descartados por resultados invariáveis). Analisou-se também uma manta de aerogel, para servir de base de comparação. Foi usado um espectrofotómetro da *Perkin Elmer* modelo *Frontier* com detetor MIR TGS de alta sensibilidade, com cristal ATR de Seleneto de Zinco de reflexão, disponível no LabCork (Laboratório Central do Grupo Amorim, Lda).

Os resultados desta análise estão apresentados no Anexo 9.

## 4 Resultados e Discussão dos resultados

### 4.1 Formulações funcionais

#### 4.1.1 Painéis tipo Sanduíche

Para os painéis tipo sanduíche resultantes do procedimento #1 foram testadas várias resinas para colagem das superfícies sendo que aquela que se revelou mais efetiva numa primeira tentativa foi a resina acrílica de base aquosa (Figura 10). Todas as outras mostraram pouca ligação com o aerogel sendo que quando se experimentou a resina de PU não existiu qualquer ligação. Consegue-se perceber se o ligante atua bem através do rasgamento da amostra pois observa-se que a amostra sofre corte pela zona central e não pelas superfícies em contacto, indicando boa adesão entre as superfícies. No entanto, apesar da resina de polímero acrílico ligar bem tem a desvantagem que durante o processo de colagem, parte desta migra para a superfície da cortiça, mesmo utilizando uma camada muito fina de ligante. Além disso, é necessário um processo de aquecimento do sistema para que a água presente na resina (cerca de 50 %) evapore; o aerogel é hidrofóbico e para se ligar as duas superfícies por via do polímero acrílico é preciso eliminar a água presente no ligante.



*Figura 10 - Painel tipo Sanduíche.*

Como tal foi estudada uma resina alternativa que por um lado não migrasse para a superfície da cortiça e, por outro lado, permitisse um processo de colagem mais rápido. A solução passou pelo uso de uma cola de contacto UHU em spray; é de fácil aplicação, tem uma colagem quase instantânea com necessidade de apenas uma prensagem ligeira (suficiente para manter as superfícies em contacto).

Tendo-se conseguido definir o ligante procedeu-se à escolha da cortiça que melhor contribuiu para uma menor condutividade térmica do sistema. Assim, foram realizados ensaios de condutividade térmica aos três painéis de aglomerado de cortiça: painel C1 (com tamanho de grão de cortiça e porosidade média), painel C2 (painel de baixa porosidade com grão de cortiça de pequena granulometria) e o painel C3 (de elevada porosidade e tamanho de grão). Os resultados encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3 - Condutividade térmica dos aglomerados de cortiça.**

Painel de cortiça	$\lambda$ (W·m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	
	30 °C	60 °C
C1	0,040	0,045
C2	0,038	0,039
C3	0,041	0,047

Verificou-se que os painéis que demonstram melhor desempenho térmico são o C1 e C2. Apesar de não existirem diferenças significativas a 30 °C, observa-se que a 60 °C existe um maior desfasamento, associado possivelmente à maior porosidade do painel C3.

Para o painel C3 verificou-se ainda que a elevada porosidade permitia que a resina utilizada para união das placas de aglomerado de composto de cortiça ao núcleo de aerogel migrava para a superfície, mesmo utilizando a cola de contacto UHU em spray (o que não se observa nos aglomerados C1 e C2).

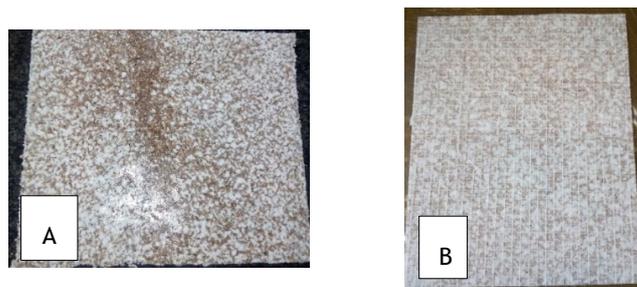
Desta forma, conceberam-se painéis tipo sanduíche com os painéis de cortiça C1 e C2 com espessuras de 0,5 mm, 1 mm e 2 mm para verificar qual a influência da espessura na folha de cortiça no sistema em sanduíche.

#### 4.1.2 Aglomerados de compósitos

##### Painéis à espessura em caixa de enchimento (PCE)

Vários foram os ligantes utilizados para aglomerar a cortiça e o aerogel, mas dada a incompatibilidade dos materiais, já que o aerogel é inorgânico e as resinas e cortiça são orgânicos, foram várias as dificuldades em encontrar um ligante que fosse compatível com ambos os materiais.

Todas as resinas testadas foram rejeitadas para este processo; trata-se de uma incompatibilidade de materiais uma vez que foram criadas formulações com maior conteúdo de resina e ainda assim o material não aglomerou. Os únicos ligantes que permitiram obter resultados positivos foram o termoplástico de EVA e o termoendurecível, a melamina. Saliente-se que no PCE com melamina foi introduzida uma rede de fibra de vidro a revestir o aglomerado; o objetivo foi reforçar a ligação dos constituintes das amostras e reduzir a libertação de partículas. A Figuras 11 é representativa dos protótipos resultantes pelo uso de EVA (PCE-1) e de melamina (PCE-2), respetivamente. No Anexo 7 é possível encontrar as formulações tentadas para obter os PCE.



**Figura 11-** Painéis à espessura em caixa de enchimento: A- PCE-1; B- PCE-2.

### Blocos de aglomerados (B)

Os blocos de aglomerados tinham como objetivo serem laminados a uma espessura desejada e posteriormente serem aplicados como isolamento térmico.

As formulações efetuadas encontram-se na Tabela 4, sendo que foi feito o estudo da influência do tipo de grão de cortiça, da quantidade de aerogel, do tipo e quantidade de resina no bloco na condutividade térmica do produto final.

Note-se que apenas foi incorporado um máximo de 30 % de aerogel nos blocos. Isto sucedeu uma vez que já tinha sido tentado fazer a aglomeração de quantidades superiores nos PCE com as mesmas resinas em estudo utilizadas nos blocos. Como os resultados foram negativos, não foi necessário voltar a repetir o procedimento, uma vez que no formato de bloco o resultado iria ser o mesmo.

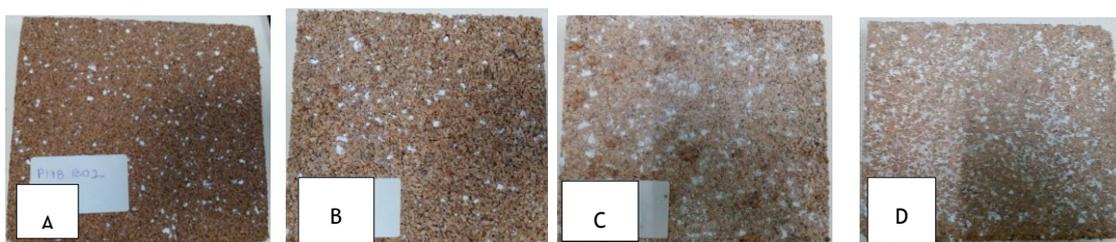
**Tabela 4-** Formulações para blocos de aglomerados.

Protótipo	Grão de Cortiça	% Cortiça	% Aerogel	Ligante	% Ligante
B01	MD 0,5-1	58	15	Resina PU	27
B02	BD 2-3	58	15	Resina PU	27
B03	MD 0,5-1	43	30	Resina PU	27
B04	BD 2-3	43	30	Resina PU	27
B05	BD 2-3	43	30	Resina Acrílica de base aquosa	27
B06	BD 2-3	39	30	Resina PU	31

De todas as formulações, a B05 foi a única que mostrou resultados negativos. Visualmente verificou-se que as partículas de aerogel estavam incorporadas no bloco devido à união que ocorreu entre a cortiça. Na prática, o aerogel não estava ligado e, quando se laminou o bloco

para metade da espessura total, verificou-se que o aerogel estava praticamente todo no centro da amostra e libertava-se do resto do material. Isto poderá ter ocorrido pelo contacto entre uma resina com 50 % de água e a superfície hidrofóbica do aerogel; no processo de produção de blocos a cura é demorada, cerca de 1 h e, portanto, as partículas de aerogel tendem a repelir a resina aquosa e a migrar para o centro do bloco (a cortiça usada é menos densa que o aerogel e por isso a cortiça fica mais à superfície); este tipo de processo não é propício à libertação de água, o que resulta num produto menos coeso.

As Figuras 12 e 13 são ilustrativas dos resultados obtidos na produção de blocos.



*Figura 12 - Blocos de aglomerados desenvolvidos: A - B01; B - B02; C e D - B06 vista de cima e vista do corte pela secção transversal.*

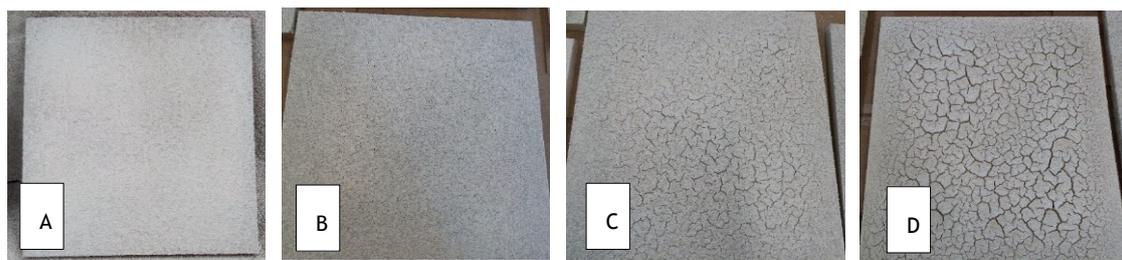


*Figura 13 - Imagem ilustrativa do bloco com formulação B05 depois de laminado pela secção transversal.*

#### 4.1.3 Corkwall com aerogel

##### Projeção com uso de água como dispersante

Todas as misturas após projeção e secagem que continham aerogel apresentaram fissuras. Apenas a mistura sem aerogel (R1) demonstrou total integridade e sem qualquer fissura visível (Figura 14 A). Este facto demonstrou que a introdução de novas cargas no revestimento requer a adição de ligante em quantidade suficiente para envolver todas as partículas sólidas adicionadas à mistura.

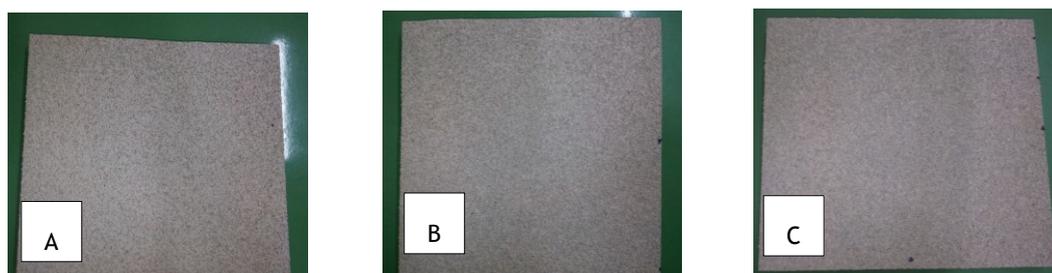


**Figura 14-** Resultados obtidos na primeira projeção do revestimento: A, B, C e D - 0 %, 5 %, 10 % e 20 % de aerogel em massa.

Deste modo fez-se uma segunda projeção em que se incorporou uma resina acrílica de base aquosa com 50 % de água. Trata-se de uma resina adequada a revestimentos de casa, varandas, chão, sendo mais indicada para aplicações horizontais. É também aplicada para proteção de betão e pinturas de casas. Tem excelente resistência à abrasão e alta durabilidade exterior com boa adesão a pinturas antigas e baixa absorção de água.

#### Projeção com uso de resina acrílica de base aquosa como ligante

Nesta segunda projeção e tendo como objetivo a obtenção de uma mistura com um valor mínimo de condutividade térmica percebeu-se que a mistura teria um limite de concentração de sólidos a incorporar. Isto é, a presença de uma quantidade excessiva de aerogel na mistura poderia levar à ocorrência de percolação térmica, ou seja, a probabilidade de uma região estar conectada com o resto dos materiais e formar um trilho condutor. Desta forma, e tendo em conta as experiências realizadas até ao momento na obtenção de argamassas térmicas pela incorporação de aerogel em pó (Subcapítulo 2.2.3), entendeu-se que deveria existir na mistura um máximo de 60 % em volume de sólidos (aerogel e cortiça) para que o fenómeno de percolação térmica não ocorresse. Sabendo que na mistura já existe cerca de 10 % de cortiça, o máximo de aerogel a adicionar seria 7 % em massa (em relação ao valor total da mistura a preparar). Fizeram-se assim misturas com 0 %, 2 %, 5 % e 7 % em massa de aerogel e também se formulou uma mistura com 20 % de aerogel em massa (uma quantidade excessiva de aerogel) para comprovar a hipótese enunciada. Os resultados obtidos podem ser observados pela Figura 15.



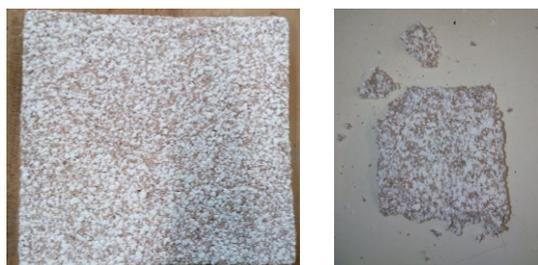
**Figura 15-** Resultados obtidos na segunda projeção: A, B e C - 0 %, 5 % e 20 % de aerogel em massa.

Como se pode verificar, já se obteve um resultado final sem fissuras visíveis em todas as misturas. Obtiveram-se amostras com aspeto “duro” e pouco elástico, associado ao tipo de resina incorporado. No entanto, as amostras mostram-se integras e, portanto, foram realizados ensaios de condutividade térmica.

#### 4.1.4 Espumas com cortiça

A espuma de aerogel com cortiça (Figura 16), como já mencionado no Subcapítulo 3.1.5, foi produzida tendo por base a mesma formulação da espuma da Activaerogels (designada de *Silfoam*), ou seja, apenas se introduziu mais um componente na formulação sem aumento da quantidade dos componentes de base ou adição de um outro produto. Com isto esperar-se-ia obter um painel rígido e compacto, à semelhança da *Silfoam*. O resultado foi exatamente o oposto, obteve-se um produto frágil e com muito pouca coesão possivelmente associada ao uso de pouco ligante e pouco aditivo. À semelhança do que aconteceu no revestimento, a junção de mais cargas à mistura implica o aumento da quantidade de ligante.

Ainda assim, foram realizados ensaios de condutividade térmica ao material como modo de perceber se a adição de cortiça não alterou significativamente as propriedades de isolamento do material. Se isso fosse verificado, então novas formulações seriam testadas por forma a se obter um material mais resistente mecanicamente.



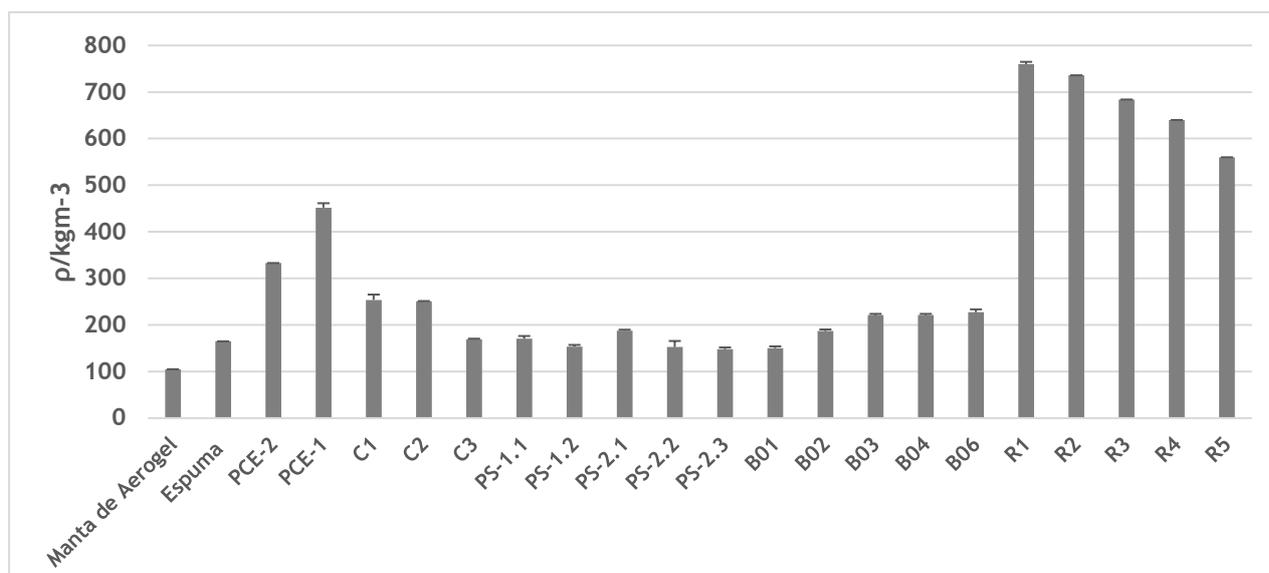
*Figura 16 - Espumas com cortiça desenvolvidas.*

## 4.2 Avaliação dos protótipos de aerogel e cortiça

### 4.2.1 Densidade aparente

A determinação da densidade dos protótipos concebidos é algo importante a registar ao longo do desenvolvimento do presente projeto, uma vez que se pretende obter um isolamento leve. Além disso é um dos parâmetros necessários ao cálculo da condutividade térmica dos materiais, de acordo com o modelo matemático implementado.

Assim, os resultados obtidos são apresentados na Figura 17.



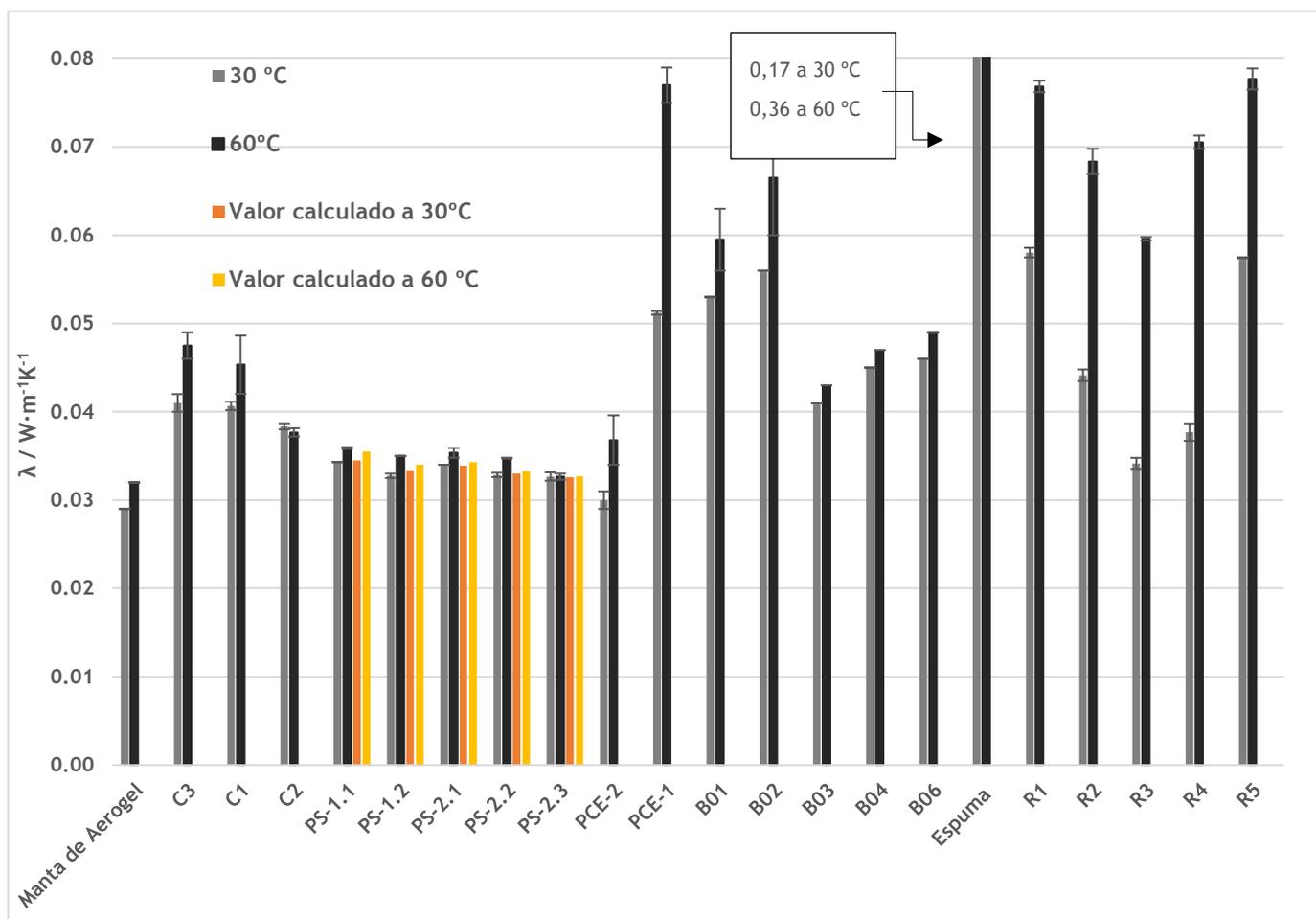
**Figura 17 - Densidade aparente dos materiais desenvolvidos.**

Observa-se que os materiais que têm um valor de densidade aparente mais baixa são os painéis sanduíche. No revestimento verifica-se que se consegue um compósito mais leve com a introdução de aerogel, reduzindo-se até 25 % da densidade aparente por incorporação de 20 % em massa de aerogel.

#### 4.2.2 Avaliação da condutividade térmica

O método desenvolvido para determinação da condutividade térmica foi validado pela medição da condutividade térmica de uma manta de aerogel a 30 °C e 60 °C, tendo sido feita comparação entre os valores obtidos pelo método desenvolvido e os valores obtidos pelo método que segue a norma EN 12667:2001 (“*Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methods*”). O erro que se obteve entre os dois foi de 8,5 %, tendo sido o método aceite para a continuação dos ensaios.

Na Figura 18 são apresentados os resultados obtidos para os protótipos desenvolvidos.



**Figura 18 - Resultados dos ensaios de condutividade térmica realizados.**

Analisando a Figura 18 é possível verificar que o painel de aerogel de sílica original continua a ser o material que apresenta menor condutividade térmica, o que já seria de se esperar. A cortiça tem menor desempenho térmico que o aerogel de sílica e, portanto, a formulação de compósitos com estes dois materiais resultará num sistema com pior desempenho que o aerogel, mas melhor que o da cortiça.

Ao investigar os valores obtidos para os painéis em caixa de enchimento verifica-se que o PCE-2 apresenta uma condutividade térmica muito próxima do painel de aerogel a 30 °C, a diferir em apenas  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . No entanto a 60 °C essa diferença é maior (cerca de  $8 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  mais do que o aerogel).

Observando os resultados para os painéis sanduíche verifica-se que a introdução do aglomerado de cortiça C1 ou C2 conduz a resultados de condutividade térmica do sistema muito semelhantes, embora estes painéis apresentem condutividades térmicas ligeiramente diferentes. Esta semelhança pode ser explicada pelo uso de uma espessura de aglomerado de cortiça pequena quando comparada com a espessura impregnada de aerogel. Sendo a

condutividade térmica do aerogel bastante mais baixa (cerca de 27 % mais baixa que a cortiça a 30 °C), a resistência dominante no painel composto à transferência de calor é conferida pelo aerogel e, portanto, a introdução de quaisquer painéis C1 e C2 não afeta significativamente a condutividade térmica do painel sanduiche. Isto é uma vantagem pois permite selecionar o tipo e espessura de aglomerado de modo a incorporar o mínimo de cortiça e conferir simultaneamente resistência mecânica ao painel necessária para ser mais facilmente aplicável. Nesse sentido fez-se um painel com aglomerado de cortiça C2 com 0,5 mm de espessura (PS-2.3) de modo a combinar o compósito de cortiça com melhor isolamento, utilizar espessura mínima e avaliar se a sua resistência mecânica é comparável com os painéis de 1 mm e 2 mm. Note-se que o modelo de determinação da condutividade térmica desenvolvido pode de facto ser aplicado para a determinação desta característica nos painéis compostos por dois materiais associados em série, uma vez que o valor obtido pelo cálculo da condutividade térmica através Eq. (16), valor calculado, difere muito pouco do valor obtido experimentalmente (erro relativo entre 2 % e 4 %).

Analisando agora nos resultados obtidos para os blocos verifica-se que os valores de condutividade térmica não são satisfatórios quando comparados com os isolamentos atualmente utilizados (Tabela 2 do Subcapítulo 2.3). Verifica-se que o tipo de granulado de cortiça influencia o valor final de condutividade térmica, sendo que o uso de granulado MD 0.5-1 origina produtos com melhor desempenho (B01 e B03); existe uma melhor homogeneização da mistura e conseqüentemente melhor aglomeração dos componentes e, portanto, a condução do calor através da superfície porosa do material vai ser mais difícil. No caso dos blocos com granulado BD 2-3 existe maior porosidade e por isso o trajeto do calor até ao sensor de temperatura facilitado. A quantidade de aerogel influencia claramente o desempenho uma vez que duplicando o conteúdo em aerogel (bloco B03) permite baixar cerca de 28 % da condutividade térmica e 30 °C e cerca de 36 % a 60 °C. A presença de maior quantidade de ligante leva a piores desempenhos (B06).

O valor de condutividade térmica obtido para as espumas de cortiça destaca-se negativamente dos outros compósitos e, portanto, não é útil continuar a fazer formulações com vista a melhoria da coesão do material; a introdução de mais ligante irá agravar o valor da condutividade térmica.

Analisando os resultados obtidos nas preparações de Corkwall com aerogel (R1 a R5) verifica-se que se conseguem resultados bastante positivos. O valor de revestimento R1 (Corkwall sem aerogel) vai de encontro ao apresentado na ficha técnica do produto [53]. A introdução de 5 % de aerogel (R3) leva a uma redução significativa da condutividade térmica (redução de cerca de 40 % relativamente a R1). A adição de 20 % de aerogel não leva a melhoria significativa na capacidade de isolamento quando comparado com R1, aliás o desempenho do isolamento é

praticamente o mesmo sem aerogel ou com 20 % de aerogel, o que permite concluir que 7 % em massa de aerogel é o valor máximo que deverá ser adicionado ao Corkwall. A incorporação de aproximadamente 5 % em massa de aerogel deverá conduzir a uma condutividade térmica mínima; esta hipótese carece, no entanto, de um estudo experimental mais aprofundado.

Fazendo uma análise geral aos valores de condutividade térmica a 30 °C e 60 °C, verifica-se que o aumento da temperatura induz um aumento na condutividade térmica. Este aumento, que é sistemático, poderá estar relacionado com o estabelecimento de correntes de convecção no interior dos poros dos compósitos de cortiça que originam uma maior condutividade. Poderá também estar tão simplesmente ligado ao facto de alguns dos ligantes, como por exemplo o EVA, fundir a uma temperatura inferior a 60 °C. Esta fusão leva a que o cálculo da condutividade térmica origine um valor significativamente superior, sem que este o seja realmente. Um estudo mais aprofundado deverá, no entanto, ser conduzido para esclarecer esta observação. Ainda assim verifica-se que a comparação do desempenho térmico dos protótipos a 60 °C segue o mesmo comportamento que a 30 °C.

Da caracterização dos diferentes painéis podemos concluir que o painel em caixa de enchimento PCE-2 e os painéis tipo sanduíche PS-1.2, PS-2.2, PS-2.3 e o revestimento R3 apresentam melhor desempenho térmico.

### **4.3 Caracterização dos protótipos de aerogel e cortiça selecionados**

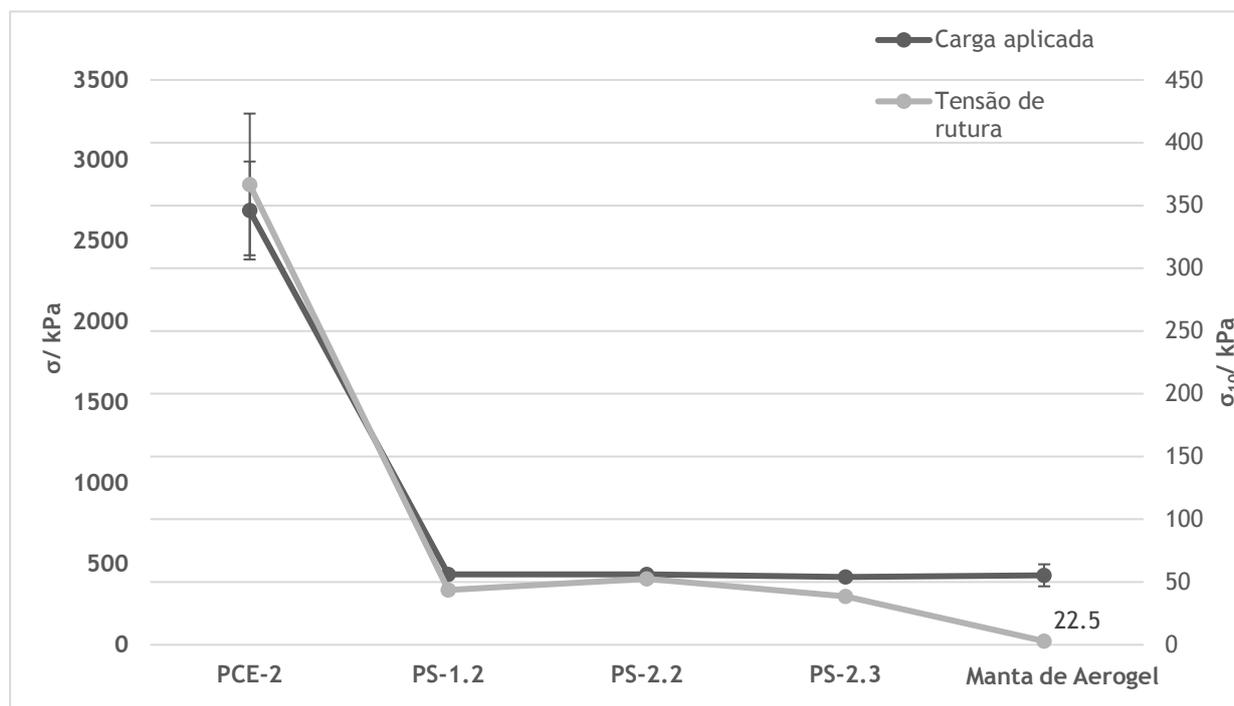
Numa perspetiva de escolher qual o painel sanduíche que mais se adequa na utilização como isolante térmico, uma vez que apresentaram desempenhos semelhantes em termos de transferência de calor, foram realizados testes para avaliação do seu comportamento mecânico quando exposto a tensões. Assim foram realizados ensaios de tensão de rutura ( $\sigma$ ) e resistência à compressão a 10 % de deformação ( $\sigma_{10}$ ). O aglomerado PCE-2 foi igualmente submetido a estes ensaios.

O revestimento R3 foi apenas sujeito a testes de permeabilidade ao vapor de água dado que se trata de um acabamento e não de um painel que possa ser aplicado como ETICS. Os painéis foram igualmente avaliados quanto à sua capacidade de permear o vapor de água.

#### **4.3.1 Tensão de rutura e resistência a 10 % de deformação**

Da análise da Figura 19 verifica-se que o painel PCE-2 apresenta um desempenho mecânico consideravelmente superior ao dos painéis sanduíche. Idealmente, de todos os protótipos apresentados seria este o mais adequado para aplicação como isolamento térmico pois tem a vertente de melhor resistência mecânica aliada à mínima condutividade térmica. No entanto, visualmente não é o que melhor se destaca uma vez que existe uma ligeira libertação de partículas ao manusear o material, evidenciando que o material (aerogel e cortiça) não está

totalmente aglomerado. A resistência que apresenta é conferida essencialmente pela rede de vidro que reveste o aglomerado, pois permite que as partículas se mantenham ligadas.



**Figura 19** - Resultados obtidos para os ensaios de tensão de rutura e compressão.

Nos painéis tipo sanduiche é notório que para a mesma espessura (1 mm) o aglomerado C2 (no painel PS-2.2) confere uma melhor resistência à rutura do que o aglomerado C1 (no painel PS-1.2) em cerca de 17 %. Este facto está associado a uma melhor aglomeração do granulado no compósito C1. Isto é, o aglomerado C1 é composto por cortiça de baixa granulometria (0,5 mm a 1 mm) enquanto que o aglomerado C2 tem na sua formulação granulado de maiores dimensões (2 mm a 4 mm). Desta forma, o granulado de tamanho mais reduzido fica melhor disperso na resina utilizada para aglomerar e, portanto, a mistura fica mais homogénea e os grânulos ligados uniformemente. No caso do compósito C1 os grânulos podem não ficar tão bem revestidos pelo ligante originando um material heterogéneo em termos de dispersão da resina. Assim têm-se zonas em que a cortiça não está tão bem ligada e, portanto, o compósito ao ser exposto a tensões de extensão acaba por sofrer falha nessa zona mais facilmente. Estas afirmações são confirmadas pelas tensões de rutura que os compósitos exibem; o aglomerado C1 sofre rutura quando se aplica uma tensão de 400 kPa enquanto que para isso acontecer no aglomerado C2 é necessário aplicar o dobro da tensão.

Mediante estes resultados preparou-se um painel sanduiche com o aglomerado C2, mas com espessuras das folhas reduzidas a metade, ou seja, para 0,5 mm (painel PS-2.3). Como seria de se esperar a tensão de rutura diminui comparativamente com o painel PS-2.2 (cerca de 27 %). Ainda assim consegue-se uma melhoria bastante significativa na tensão de rutura que o aerogel

isolado suporta, sendo que essa melhoria se reflete num aumento da resistência à tração de aproximadamente 93 %.

Em termos de resistência à compressão a 10 % de deformação nota-se que é praticamente irrelevante a incorporação de cortiça no painel de aerogel. Uma vez que se incorpora uma espessura de cortiça muito baixa quando comparada com a de aerogel, a resistência que este vai conferir é pequena. A vantagem do uso de placas de cortiça está na redução da libertação de pó, melhor manipulação e corte do aerogel. Desta forma, a combinação que permite ter melhor resistência mecânica (com melhoria em 94 % da tensão de rutura) e simultânea baixa condutividade térmica é o painel sanduiche PS-2.2.

#### 4.3.2 Permeabilidade ao vapor de água

Com já afirmado anteriormente, a capacidade que um elemento construtivo tem de proporcionar as condições de humidade ideais no interior de um edifício é muito importante, devendo-se realçar que a escolha do material que deve proporcionar essas condições deve ser feita mediante as condições do ambiente exterior ao edifício. Por exemplo, quando se trata de um ambiente húmido com pouca exposição solar deve-se optar pelo uso de um material não permeável ao vapor de água, caso contrário, como o caso de ambientes Europeus, dever-se-á optar por aplicar um isolamento térmico permeável ao vapor de água. Note-se que se o material tiver alguma capacidade de retenção de humidade, o seu desempenho térmico ao longo dos anos será diminuído.

Desta forma, avaliou-se a capacidade que os isolamentos térmicos selecionados anteriormente tinham de permear o vapor de água. Os resultados que permitem avaliar esse desempenho encontram-se expressos na Tabela 5.

*Tabela 5- Resultados obtidos de permeabilidade ao vapor de água dos protótipos desenvolvidos.*

	$J$ ( $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$\pi$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ )	$\mu$	$S_d$ (mm)
<b>Aerogel</b>	45,5	$1,2 \times 10^{-11}$	8,7	74,0
<b>PCE-2</b>	52,1	$8,4 \times 10^{-12}$	22,3	120,0
<b>PS-1.2</b>	7,5	$2,7 \times 10^{-12}$	70,7	832,3
<b>PS-2.2</b>	7,3	$2,6 \times 10^{-12}$	71,5	857,9
<b>PS-2.3</b>	10,5	$3,3 \times 10^{-11}$	56,7	595,2
<b>R1</b>	553,4	$4,1 \times 10^{-11}$	4,5	11,3
<b>R3</b>	648,9	$4,2 \times 10^{-11}$	4,4	9,6

Foi ainda realizado o teste de permeabilidade ao vapor de água de um painel de aerogel. O valor relativo ao fator de resistência ao vapor de água reportado pela Aspen Aerogels é de 5 [8] sendo que o valor obtido foi de 8,7. Ou seja, obtém-se aqui uma diferença de 43 %, um erro relativamente elevado. Esta diferença poderá ter origem na montagem da instalação experimental. O aerogel é colocado na zona de suporte da camara 1 sendo que posteriormente é sobreposto um dico de aço inoxidável que é aparafusado à camara de modo a manter o aerogel sempre no meso lugar durante o ensaio. Pode ter-se apertado demasiado a amostra e consequentemente a redução da sua porosidade, ou seja, da quantidade de ar existente no material. Sendo o ar permeável ao vapor de água, a redução do seu conteúdo nos poros do aerogel leva a uma maior resistência à passagem do vapor. Ainda assim é notório que o painel de aerogel é o que oferece menor resistência à transmissão de vapor de água (menor valor de  $\mu$ ).

Dos painéis desenvolvidos, aquele que é produzido por aglomeração dos materiais em caixa de enchimento (PCE-2) apresenta menor resistência à passagem de vapor do que os painéis sanduíche, possivelmente associado a uma maior porosidade em todo o painel. Nos painéis sanduíche a cortiça que reveste o núcleo de aerogel prejudica a transmissão do vapor de água (é uma barreira), notando-se que com a diminuição da espessura de aglomerado de cortiça efetivamente se melhora a permeação do vapor de água (reduzindo 1 mm na espessura total do aglomerado leva a redução de 13 % da resistência ao vapor de água). A cortiça apresenta um fator de resistência ao vapor de água entre 7 e 14 [21] que é superior ao valor apresentado pela Aspen Aerogels para o aerogel. Logo, ao revestir o painel de aerogel com cortiça está-se a introduzir uma barreira à passagem de vapor de água. O aglomerado de cortiça C1 confere menor resistência à passagem do vapor de água que o aglomerado de cortiça C2 por ser mais porosa. A introdução de apenas 5 % de aerogel em massa no Corkwall apenas reduz de cerca de 2 % na resistência à transferência de vapor de água. Dito isto, se se tivesse que implementar um dos protótipos num ambiente Europeu, o melhor a escolher seria o painel sanduíche PS-2.3 e o revestimento R3.

#### **4.3.3 Comportamento ao fogo**

Os ensaios de comportamento ao fogo dos protótipos concebidos foram realizados apenas para avaliação qualitativa, uma vez que os procedimentos descritos na norma ISO 11925-2 foram adaptadas às condições existentes. Os resultados que a observação do ensaio permitiu obter estão apresentados na Tabela 6.

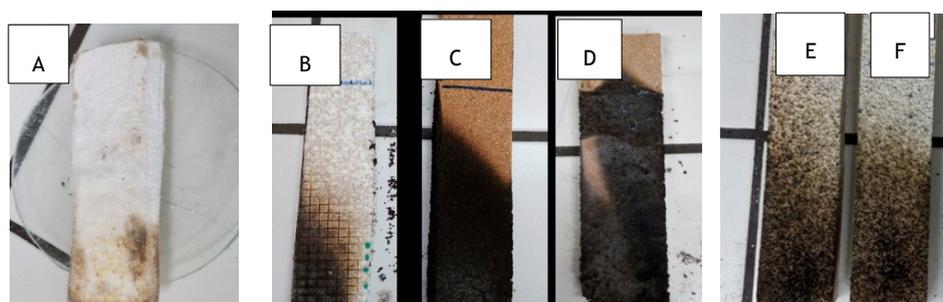
**Tabela 6- Avaliação qualitativa da reação ao fogo dos isolamentos desenvolvidos.**

Parâmetro	Aerogel	C2	PCE-2	PS-2.3	R1	R3
Ocorrência de ignição	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Chama atinge os 150 mm	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não
$L_{30}$ (mm)	---	140	75	150	134	111
$t_{150}$ (s)	>>60	> 60	> 60	22	30	---
Queda de partículas flamejantes	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Queda de gotículas	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Ignição do papel de filtro	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Libertação de fumo	-	++	++	++	-	-

A componente  $L_{30}$  (não incluída na norma ISO 11925-2) e  $t_{150}$  são referentes ao comprimento que a chama atinge em 30 segundos de ensaio e o tempo que a chama demora a atingir 150 mm do provete. A componente  $L_{30}$  foi incorporada como forma de se compreender qual a propagação da chama num total de 150 mm de comprimento de provete e permitir distinguir mais facilmente a reação de cada protótipo ao fogo.

Foi avaliado o comportamento ao fogo do aerogel (classificado segundo as Euroclasses de Reação ao Fogo como C-s1, d0) para comparação com os protótipos desenvolvidos.

Na Figura 20 são apresentadas imagens do resultado após exposição dos vários provetes ao ensaio de pequena chama.



**Figura 20 - Imagem representativa do resultado após exposição de cada protótipo durante 30 segundo a pequena chama: A- Aerogel; B- PCE-2; C- Aglomerado C1; D-PS-2.3; E-R1; F-R3.**

A observação dos ensaios em tempo real permitiu afirmar que de todos os painéis aquele mais se destacou por uma melhor retardância ao fogo foi o painel PCE-2. Não se verificou ignição do material, apenas um escurecimento superficial devido à combustão da rede de fibra de vidro. Todo o sistema é maioritariamente composto por retardantes de fogo, neste caso a melamina e o aerogel.

Comparando os painéis tipo sanduiche (revestido por cortiça) com o aglomerado de cortiça C2 nota-se uma reação diferente. Isto é, enquanto que a cortiça sofre combustão lenta por toda a área transversal (classificado segundo as Euroclasses de reação ao fogo com classe E), o painel sanduiche apenas arde lateralmente e o seu interior praticamente não sofre combustão. Este painel contém pouca quantidade de cortiça (espessura de 1 mm no total) e por isso sofre ignição mais rapidamente (a chama propaga-se mais rapidamente do que no aglomerado). No entanto, o seu interior praticamente não sofre ação do fogo, pois tem núcleo de aerogel, acabando por ser uma barreira à passagem do fogo. Este facto referido pode ser comprovado por observação da Figura 21.



*Figura 21- Imagem representativa do interior de cada painel após a exposição de cada um durante 30 segundo a pequena chama.*

No Corkwall com e sem aerogel nota-se diferença essencialmente na reação inicial do material ao fogo, ou seja, com aerogel a tendência à ignição é retardada; parece existir uma repulsão da chama na fase inicial de combustão. Com apenas 5 % de aerogel em massa no Corkwall tem-se uma redução de propagação da chama em cerca de 17 %.

Dadas as observações efetuadas e de acordo com a ISO 1195-2 os provetes conseguem ser identificados pela sua reação ao fogo a pequena chama com a classificação E. Outros níveis de exposição térmica teriam que ser testados para averiguar a possibilidade destes materiais serem classificados com classe D ou eventualmente superior, como por exemplo o efeito de um objeto isolado em combustão (SBI)(norma EN 13823) [24]. No entanto este tipo de ensaio teria que ser executado por entidades certificadas.

## 5 Conclusões

Neste projeto desenvolveram-se um conjunto de soluções de cortiça e aerogéis de sílica cujo objetivo era a sua implementação na área da construção como isolamento térmico. O aerogel é um excelente isolante térmico, tem elevada durabilidade e uma ótima reação ao fogo. No entanto, tem baixa resistência mecânica, o que torna a sua aplicação limitada na área da construção. Por sua vez, a cortiça é um material natural e reciclável com boas propriedades de isolamento térmico. Tem a vantagem em relação aos isolamentos concorrentes de ser de combustão lenta e dificilmente inflamável. Com a combinação destes dois materiais pretendeu-se criar um novo produto com baixa condutividade térmica, maior resistente e de fácil aplicação.

Assim, ao longo do trabalho desenvolveu-se um conjunto de soluções: painéis sanduiche, painéis de aglomerados compósitos, blocos aglomerados que poderão ser aplicados por exemplo como ETICS e um revestimento para exteriores (Corkwall com aerogel) que é aplicado como um acabamento. De todos estes produtos, três revelaram desempenho térmico muito próximo do aerogel: o painel tipo sanduiche (PS-2.3), um aglomerado em caixa de enchimento (PCE-2) e um revestimento (R3).

O aglomerado compósito foi o protótipo que apresentou o melhor resultado em termos de condutividade térmica (valor de condutividade térmica de  $0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  quando comparado com os  $0,029 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  do aerogel) e resistência mecânica (revelou uma resistência à rutura e à compressão a 10 % de deformação de cerca de 2800 MPa e 340 kPa, respetivamente). No entanto, o material não aglomera completamente sendo a integridade do painel mantida pelo revestimento exterior de rede de fibra de vidro.

Os painéis sanduiche apresentaram valores de condutividade térmico igualmente bons, cerca de  $0,033 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , embora ligeiramente superiores aos do aglomerado compósito. A espessura de cortiça incorporada não tem grande influência no valor final de condutividade térmica do sistema, já que a resistência térmica dominante no painel é conferida pela espessura do aerogel. A incorporação de duas camadas de aglomerado de cortiça com 0,5 mm de espessura melhora significativamente a resistência à tensão de rutura, sendo cerca de 93 % superior em relação ao aerogel original. Na resistência à compressão a 10 % de deformação a melhoria foi marginal.

O Corkwall, um produto já comercializado pela ACC, foi reformulado através da adição de aerogel. Com a incorporação de apenas 5 % de partículas de aerogel em massa, reduziu-se cerca de 40 % da condutividade térmica em relação à formulação original (redução de  $0,058 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

<sup>1</sup> para  $0,034 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Adicionalmente, a nova formulação de Corkwall tem menos 10 % de densidade em relação à formulação original aumentando o rendimento por  $\text{m}^2$  na sua aplicação.

Assim, conseguiram-se encontrar soluções de elevado desempenho em termos de isolamento térmico com propriedades mecânicas melhoradas. Os painéis são soluções ideais para aplicação em fachadas regulares, com pouca libertação de pó e de mais fácil manipulação, facilitando assim o seu processo de aplicação na área da construção. Já o Corkwall com o aerogel é ideal para aplicação em fachadas irregulares através de sistemas de projeção com ar comprimido, uma aplicação rápida e prática.

Fez-se uma avaliação do custo destes três produtos (Anexo 8) tendo-se concluído que o custo dos painéis sanduiche e do aglomerado compósito são demasiado elevados para aplicação na área da construção, quando comparados com os isolamentos mais utilizados atualmente (como o EPS e XPS). Apenas o Corkwall com aerogel tem um aumento de apenas 6 % relativamente ao Corkwall original, mas apresenta uma diminuição de cerca de 40 % da condutividade térmica. Além disso, é um produto de fácil aplicação, propício para fachadas irregulares e com maior rendimento por área. Estas características dão uma nova visibilidade do Corkwall no mercado, tornando-o mais apelativo ao consumidor. Conclui-se desta forma que o objetivo proposto do desenvolvimento de um material com baixa condutividade térmica e resistência mecânica compatível com a sua aplicação foi alcançado.

## 5.1 Objetivos realizados

O objetivo deste projeto foi o desenvolvimento de um isolamento térmico de elevada performance que fosse economicamente acessível ao consumidor. Este objetivo foi atingido com a melhoria significativa do isolamento térmico de um produto que a ACC já comercializava, o Corkwall, e com apenas acréscimo de 6 % no custo relativamente ao Corkwall original.

## 5.2 Outros Trabalhos Realizados

A par deste projeto houve a oportunidade de apresentação do projeto desenvolvido na área de I&D a toda a direção executiva da ACC.

## 5.3 Limitações e Trabalho Futuro

No decorrer deste trabalho houve algumas limitações que fizeram atrasar o projeto. Essas limitações foram essencialmente no pedido tardio de material essencial para o projeto, como a pistola para projeção do Corkwall e o aparelho de aquisição de dados para os ensaios de condutividade térmica (já que a realização destes ensaios em entidades certificadas tinha um custo elevado).

Para trabalho futuro sugere-se que num primeiro passo seja efetuada uma avaliação da capacidade de isolamento acústico dos materiais, nomeadamente a sons aéreos. Era um objetivo secundário de importante avaliação, mas devido à curta duração do estágio não foi possível estudar essa vertente. Em termos de melhoria dos materiais sugere-se a reformulação do Corkwall com a utilização de um único tipo de resina para revestir os sólidos e otimização da quantidade de resina a incorporar. Relativamente aos painéis sanduiche deverão ser testados outros tipos de ligantes.

## 5.4 Apreciação final

O projeto desenvolvido decorreu de modo geral de forma positiva. Apesar de todas as limitações encontradas conseguiu-se solucionar os problemas.

O projeto em si encontrava-se fora da área de trabalho da ACC, uma vez que os produtos da empresa se baseiam mais no isolamento acústico do que térmico. De certa forma foi um aspeto negativo por não ter material necessário ao estudo de um isolamento térmico e acabou por não ser tão bem-recebido pela direção executiva da empresa.

Apesar de tudo, a nível pessoal foi uma experiência muito gratificante. Permitiu-me perceber a nível empresarial o processo de passagem de um material desenvolvido em laboratório de I&D para a sua produção em larga escala. Foi um projeto muito benéfico em que fui diariamente desafiada e me deram confiança e autonomia para a realização do trabalho. Terminado este projeto posso dizer que o meu trabalho é muito mais metódico e com maior capacidade de análise crítica de resultados.

## Referências

- [1] J. A. S. M. T. Martins, «Análise comportamental do fogo em sistemas de fachada com isolamento pelo exterior», Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2009.
- [2] *Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril - Série I-A*. Lisboa, Portugal: Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, 2006, pp. 2468-2513.
- [3] *Decreto-Lei n.º 96/2008*. Portugal: Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008, pp. 3359-3372.
- [4] LNEC, «Regras para a concessão de uma aprovação técnica europeia (ETA) ou de um documento de homologação (DH) a sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior (ETICS)», Lisboa, 2010.
- [5] Institut Bruxellois Pour La Gestion de L'Environnement (IBGE), «Isolation Thermique: Choisir de matériaux sains et écologiques», 2010. [on-line]. Disponível em: [http://app.bruxellesenvironnement.be/guide\\_batiment\\_durable/docs/MAT05\\_FR.pdf](http://app.bruxellesenvironnement.be/guide_batiment_durable/docs/MAT05_FR.pdf). [Acedido: 25-Abr-2018].
- [6] A. Isolamentos, «Declaração de desempenho», 2014. [on-line]. Disponível em: [https://www.amorimisolamentos.com/xms/files/CERTIFICADOS/DoP\\_Declaracao\\_de\\_Desempenho\\_ICB\\_AISOL\\_PT.pdf](https://www.amorimisolamentos.com/xms/files/CERTIFICADOS/DoP_Declaracao_de_Desempenho_ICB_AISOL_PT.pdf). [Acedido: 30-Mar-2018].
- [7] L. Gil, *Manual técnico: A cortiça como material de construção*. Santa Maria de Lamas, 2007.
- [8] «Physical Properties - Aspen Aerogels». [on-line]. Disponível em: [https://www.buy-aerogels.eu/image/data/pdf/Aerogels\\_Construction\\_Applications.pdf](https://www.buy-aerogels.eu/image/data/pdf/Aerogels_Construction_Applications.pdf). [Acedido: 16-Jun-2018].
- [9] A. Soleimani Dorcheh e M. H. Abbasi, «Silica aerogel; synthesis, properties and characterization», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 199, n. 1, pp. 10-26, 2008.
- [10] «Active Aerogels». [on-line]. Disponível em: <https://www.activeaerogels.com/h>. [Acedido: 12-Fev-2018].
- [11] G. Jia, Z. Li, P. Liu, e Q. Jing, «Preparation and characterization of aerogel / expanded perlite composite as building thermal insulation material», *J. Non. Cryst. Solids*, n. October, pp. 0-1, 2017.
- [12] Amorim Cork Composites S.A., «Amorim Cork Composite», 2018. [on-line]. Disponível em: <https://amorimcorkcomposites.com/pt/>. [Acedido: 11-Fev-2018].
- [13] «APCOR- Associação Portuguesa da Cortiça», 2013. [on-line]. Disponível em: <http://www.apcor.pt/>. [Acedido: 11-Fev-2018].
- [14] L. Gil e C. Moiteiro, «Cork», em *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005, pp. 6436-6455.
- [15] L. Gil, «Cortiça», em *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção*, 2012, pp. 663-716.
- [16] Referenciado por L. Gil em «A Química da Cortiça: ponto da situação», *Química*. pp. 20-24, 1993.

- [17] L. Gil, «Cork Composites: A Review», *Materials (Basel)*, vol. 2, n. 4, pp. 776-789, Jul. 2009.
- [18] S. P. Silva, M. A. Sabino, E. M. Fernandes, V. M. Correlo, L. F. Boesel, e R. L. Reis, «Cork: properties, capabilities and applications», *Int. Mater. Rev.*, vol. 50, n. 6, pp. 345-365, 2005.
- [19] C. Micaela, A. Marques, J. Maria, P. António, A. José, e B. Tadeu, «A utilização da cortiça associada a espumas acústicas para absorção sonora», Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2014.
- [20] SOFALCA; ISOCOR, «Isolamento Prefeito em qualquer ambiente». [on-line]. Disponível em: <http://sofalca.pt/pdf/catalogo-isocor.pdf>. [Acedido: 04-Abr-2018].
- [21] SOFALCA, «Aglomerado de cortiça expandida - ICB». [on-line]. Disponível em: <http://sofalca.pt/pdf/aglomerado.pdf>.
- [22] H. Maleki, L. Durães, e A. Portugal, «An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies», *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 385, pp. 55-74, 2014.
- [23] DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, «Aerogels- Structure, properties and applications», 2011. [on-line]. Disponível em: [http://elib.dlr.de/72455/1/Aerogel-Applications-2011\\_k.pdf](http://elib.dlr.de/72455/1/Aerogel-Applications-2011_k.pdf). [Acedido: 25-Abr-2018].
- [24] APSEI, «Open Day: Proteção Passiva contra incêndios», 2016. [on-line]. Disponível em: [https://www.apsei.org.pt/media/eventos/OD16-Passiva/2\\_LNEC.pdf](https://www.apsei.org.pt/media/eventos/OD16-Passiva/2_LNEC.pdf). [Acedido: 24-Mar-2016].
- [25] C. Rikorda, «Catalogo Prodotti -Ecofine». 2013.
- [26] A. N. S. Braga *et al.*, «Síntese de mulita pelo processo sol-gel : Uma revisão da literatura», *Rev. Eletrônica Mater. e Process.*, vol. 2, n. 2, pp. 60-73, 2014.
- [27] N. Hüsing e U. Schubert, «Aerogels—Airy Materials: Chemistry, Structure, and Properties», *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 37, n. 1-2, pp. 22-45, Fev. 1998.
- [28] N. Hüsing e U. Schubert, «Aerogels», em *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, pp. 449-470.
- [29] J. Sofia e G. Meneses, «Estudo do efeito das condições da etapa de catálise básica nas propriedades dos aerogéis obtidos a partir do precursor metiltrimetoxisilano ( MTMS )», Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2014.
- [30] S. D. Bhagat, C. S. Oh, Y. H. Kim, Y. S. Ahn, e J. G. Yeo, «Methyltrimethoxysilane based monolithic silica aerogels via ambient pressure drying», *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 100, n. 1-3, pp. 350-355, 2007.
- [31] F. Arruda, «Aerogel : material leve como o ar e forte como o aço», 2011. [on-line]. Disponível em: <https://m.tecmundo.com.br/curiosidade/11504-aerogel-material-leve-como-o-ar-e-forte-como-o-aco.htm>. [Acedido: 14-Fev-2018].
- [32] G. W. Scherer, «E.L DuPont de Nemours & Co., Central R&D Dept., Experimental Station 356/384, Wilmington, DE 19898, USA», *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 100, n. Aging and Drying of Gels, pp. 77-92, 1988.
- [33] S. S. Kistler, «Coherent Expanded Aerogels and Jellies», vol. 127. Stock. Nature, California, p. 3211, 1931.

- [34] Y. Huang e J. L. Niu, «Energy and visual performance of the silica aerogel glazing system in commercial buildings of Hong Kong», *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 57-72, 2015.
- [35] A. Hoseini, C. McCague, M. Andisheh-Tadbir, e M. Bahrami, «Aerogel blankets: From mathematical modeling to material characterization and experimental analysis», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 93, pp. 1124-1131, 2016.
- [36] K. Chen, A. Neugebauer, T. Goutierre, A. Tang, L. Glicksman, e L. J. Gibson, «Mechanical and thermal performance of aerogel-filled sandwich panels for building insulation», *Energy Build.*, vol. 76, pp. 336-346, 2014.
- [37] M. Ibrahim, P. H. Biwole, E. Wurtz, e P. Achard, «A study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica-aerogel-based insulating coating», *Build. Environ.*, vol. 81, pp. 112-122, 2014.
- [38] R. Baetens, B. P. Jelle, e A. Gustavsen, «Review: Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review», *Energy Build.*, vol. 43, n. 4, pp. 761-769, 2011.
- [39] S. Kim, J. Seo, J. Cha, e S. Kim, «Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel», *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 501-505, 2013.
- [40] T. Gao, B. P. Jelle, A. Gustavsen, e S. Jacobsen, «Aerogel-incorporated concrete: An experimental study», *Constr. Build. Mater.*, vol. 52, pp. 130-136, 2014.
- [41] M. de Fátima Júlio, L. M. Ilharco, A. Soares, I. Flores-Colen, e J. de Brito, «Silica-based aerogels as aggregates for cement-based thermal renders», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 72, pp. 309-318, 2016.
- [42] Saint-Gobain, «Sistem weber.wherm comfort», 2018. [on-line]. Disponível em: [https://www.weber.com.pt/uploads/media/FT\\_Sistema\\_weber.therm\\_comfort\\_2018.pdf](https://www.weber.com.pt/uploads/media/FT_Sistema_weber.therm_comfort_2018.pdf). [Acedido: 16-Jun-2018].
- [43] Saint-Gobain, «Sistem weber.therm mineral», 2018. [on-line]. Disponível em: [https://www.weber.com.pt/uploads/media/FT\\_Sistema\\_weber.therm\\_mineral\\_2018.pdf](https://www.weber.com.pt/uploads/media/FT_Sistema_weber.therm_mineral_2018.pdf). [Acedido: 16-Jun-2018].
- [44] Termolan, «Re Coat». [on-line]. Disponível em: [http://www.termolan.pt/wp-content/uploads/2016/10/re-coat\\_pt.pdf](http://www.termolan.pt/wp-content/uploads/2016/10/re-coat_pt.pdf). [Acedido: 16-Jun-2018].
- [45] S.-G. Weber, «Manual Técnico». Weber-cimenfix, 2006.
- [46] Dow, «Dow - Soluções para a Construção Fichas técnicas». [on-line]. Disponível em: <http://www.idiaurbe.pt/uploads/produtos/34130/ficheiro/Dow.pdf>.
- [47] C. A. Pina dos Santos e L. Matias, *Coeficientes de Transmissão Térmica de elementos da envolvente dos edifícios*, 2ª. Lisboa: LNEC, 2006.
- [48] Soudal, «Espumas Geniu Gun», 2012. [on-line]. Disponível em: <http://www.soudal.com/geniusgun/pt/diyp/technischefichePT.pdf>. [Acedido: 16-Jun-2018].
- [49] Revicork, «Aglomerado de cortiça expandida», 2015. [on-line]. Disponível em: <http://www.revicorck.com/aglomerado/Aglomerado - 2015.pdf>. [Acedido: 17-Jun-2018].
- [50] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10 th. New York: Mc Graw- Hill, 2010.

- [51] W. Callister e D. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*, 7 th., vol. 94. New York: Jonh Wiley and Sons, Inc, 2007.
- [52] C. Carneiro, F. Oliveira, e J. Nogueira, «Towards Chloride Ion», *JCT Res.*, vol. 3, n. 2, pp. 2-5, 2006.
- [53] Amorim Cork Composites S.A., «CorkWall - Ficha técnica», 2017. [on-line]. Disponível em: [https://amorimcorkcomposites.com/media/2628/tds\\_corkwall\\_pt.pdf](https://amorimcorkcomposites.com/media/2628/tds_corkwall_pt.pdf). [Acedido: 24-Fev-2018].
- [54] P. S, R. H. Perry, D. W. Green, e J. O. Maloney, *Chemical Engineers ' Handbook Seventh*, 7th ed., vol. 27. McGraw-Hill, 1997.
- [55] P. da construção Sustentável, «Guia para reabilitação energética de edifícios», 2014. [on-line]. Disponível em: [http://www.csustentavel.com/wp-content/uploads/2014/12/Guia\\_ReabilitacaoEnergeticaEdificios00.pdf](http://www.csustentavel.com/wp-content/uploads/2014/12/Guia_ReabilitacaoEnergeticaEdificios00.pdf). [Acedido: 19-Mai-2018].
- [56] Activeaerogels, «Powder & beads». [on-line]. Disponível em: <https://www.activeaerogels.com/powder-beads/>. [Acedido: 22-Jun-2018].
- [57] Activeaerogels, «Panels». [on-line]. Disponível em: <https://www.activeaerogels.com/flexible-panel/>. [Acedido: 22-Jun-2018].
- [58] Activeaerogels, «Foam». [on-line]. Disponível em: <https://www.activeaerogels.com/spray-on/>. [Acedido: 22-Jun-2018].

## Anexo 1 Propriedades dos aerogéis de sílica utilizados

Tabela 7 - Propriedades dos aerogéis de sílica utilizados neste projeto [10].

	SILFILLER		SILFLEX	SILFOAM
	Granulado médio	Pó	Manta Flexível	Espuma
Densidade ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	200	120	$105 \pm 2$	105 a 120
Temperatura de utilização ( $^{\circ}\text{C}$ )	-250 a 350	-250 a 350	-250 a 350	-196 a 250
Condutividade térmica ( $\text{mW m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )		25	26	27
Modulo de Young (kPa)				-
Tensão de rutura (kPa)	-	-	85	-
Modulo de Flexão (kPa)			51	-
Resistência à compressão (kPa)	-	-	-	29
Modulo de compressão (kPa)	-	-	-	394
Hidrofóbico	Sim	Sim	Sim	Sim

## Anexo 2 Nomenclatura dos protótipos desenvolvidos

*Tabela 8- Nomenclatura dos protótipos produzidos.*

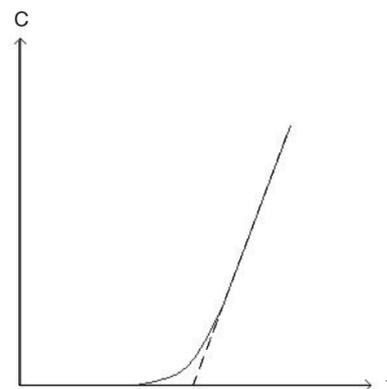
Protótipo	Nomenclatura	Descrição
Aglomerado Compósito de Cortiça	C1	Referência 8405.
	C2	Referência 8113.
	C3	Referência 8404.
Painel tipo Sanduíche	PS-1.1	Painel de cortiça com referência 8405 e 2 mm de espessura; espessura total do painel de 12,5 mm.
	PS-1.2	Painel de cortiça com referência 8405 e 1mm de espessura; espessura total do painel de 12,5mm.
	PS-2.1	Painel de cortiça com referência 8113 e 2mm de espessura 11 mm.
	PS-2.2	Painel de cortiça com referência 8113 e 1mm de espessura; espessura total do painel de 11 mm.
	PS-2.3	Painel de cortiça com referência 8113 e 0,5mm de espessura; espessura total do painel de 10 mm.
Painel em caixa de enchimento	PCE-1	Painel com termoplástico EVA; espessura total do painel de 5 mm.
	PCE-2	Painel com termoendurecível Melamina; espessura total do painel de 5 mm.
Blocos	B01	Bloco com granulado de cortiça MD 0.5-1;15% de aerogel em grão e 27% de ligante; espessura total do bloco de 17 mm.

	<b>B02</b>	Bloco com granulado de cortiça BD 2-3 , 15% de aerogel em grão e 27% de ligante; espessura total do bloco de 17 mm.
	<b>B03</b>	Bloco com granulado de cortiça MD 0,5-1, 30% de aerogel em grão e 27% de ligante; espessura total do bloco de 17 mm.
	<b>B04</b>	Bloco com granulado de cortiça BD 2-3, 30% de aerogel em grão e 27% de ligante; espessura total do bloco de 17 mm.
	<b>B06</b>	Bloco com granulado de cortiça BD 2-3, 30% de aerogel em grão e 30% de ligante; espessura total do bloco de 17 mm.
<b>Revestimento</b>	<b>R1</b>	Corkwall com 0% de aerogel.
	<b>R2</b>	Corkwall com 2% de aerogel.
	<b>R3</b>	Corkwall com 5% de aerogel.
	<b>R4</b>	Corkwall com 7% de aerogel.
	<b>R5</b>	Corkwall com 20% de aerogel.

## Anexo 3 Permeabilidade ao vapor de água

### 3.1 Método *Time-lag*

O ensaio realizado para a determinação da permeabilidade ao vapor de água dos protótipos desenvolvidos pode ser descrito pelo método *Time-lag*, utilizado para medir a permeabilidade de membranas a gases ou solutos [52]. No ensaio é feita uma perturbação em degrau na concentração da câmara de permeação (câmara 1) e registado a variação da concentração ao longo do tempo na câmara de permeado (câmara 2). No ensaio realizado fez-se o registo da variação da massa ao longo do tempo na câmara de permeação. A resposta típica que se obtém deste tipo de ensaio pode ser observada na Figura 22 [52]. Por observação desta figura verifica-se que existe uma resposta não linear na fase inicial



**Figura 22** - Resposta típica de um ensaio com base no método *Time-lag* (extraído de [52]).

do ensaio. Este facto deve-se ao tempo que as moléculas de vapor de água demoram a atravessar a membrana [52]. Ou seja, existe um atraso entre a perturbação na câmara de permeação e o registo dessa mesma perturbação e, por isso, o método se designa de *Time-lag* [52]. Desta forma, apenas podem ser utilizados os dados que descrevam uma variação de massa de água na câmara 1 ao longo do tempo capazes de traçar uma reta (linha a tracejado na Figura 22); isto indica que a transferência de massa da câmara de permeação para a câmara de permeado é constante [52].

Os dados adquiridos foram posteriormente tratados em Excel de modo a obter o valor de permeabilidade ao vapor de água de cada material em análise. Estes resultados poderiam ter sido obtidos pela porção da curva *Time-lag* que descreve uma reta (uma vez que corresponde ao estado estacionário e o seu declive está diretamente relacionado com a permeabilidade da amostra) ou então através do cálculo do fluxo de vapor de água para o período de tempo em que a transferência de massa foi constante; este último caso foi o adotado para o projeto.

### 3.2 Forma de cálculo da permeabilidade ao vapor de água

Como foi referido a permeabilidade ao vapor de água de cada isolamento térmico desenvolvido foi obtida pelo fluxo de vapor ao longo dos dias, considerando-se apenas os dados que foram capazes de ajustar uma reta linear. Assim, nas figuras que se seguem (Figura 23 a 29) são apresentados os dados utilizados para o cálculo da permeabilidade ao vapor de água para cada protótipo em estudo.

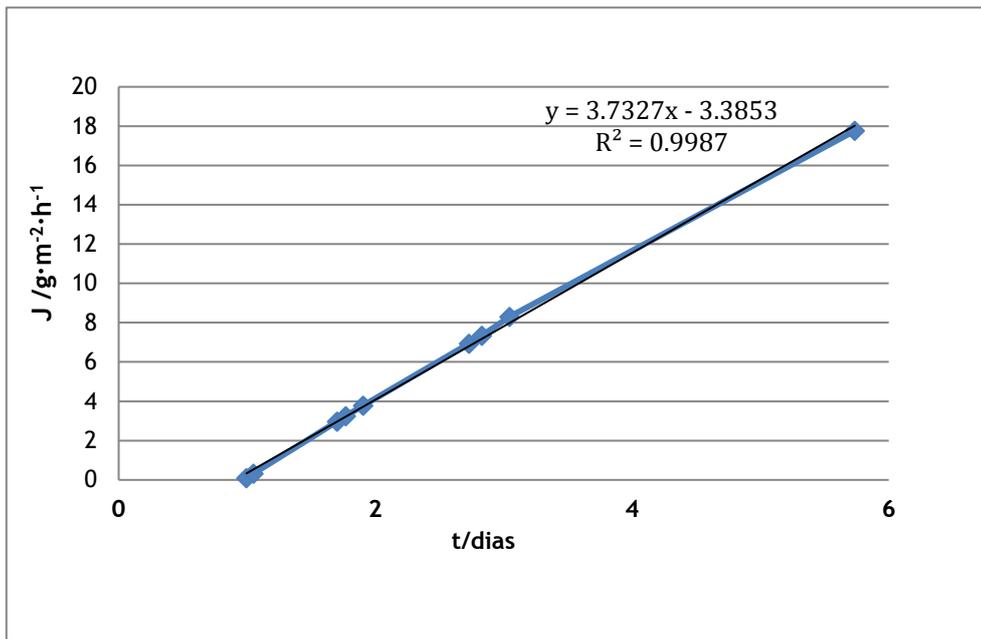


Figura 23 - Fluxo de vapor de água ao longo dos dias pelo painel à espessura em caixa de enchimento (PCE-2).

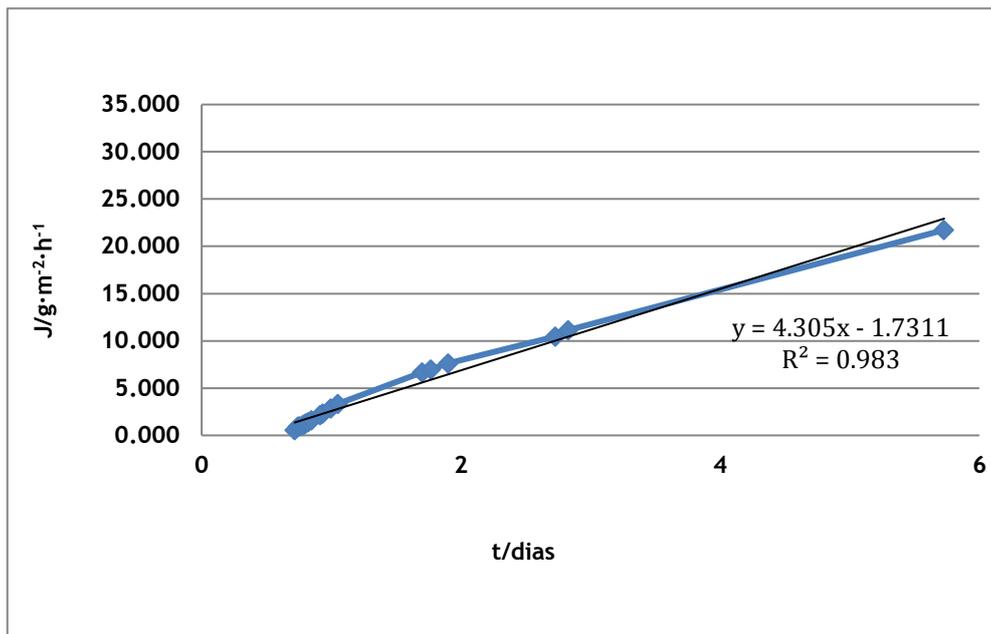


Figura 24 - Fluxo de vapor de água ao longo dos dias por uma manta de aerogel.

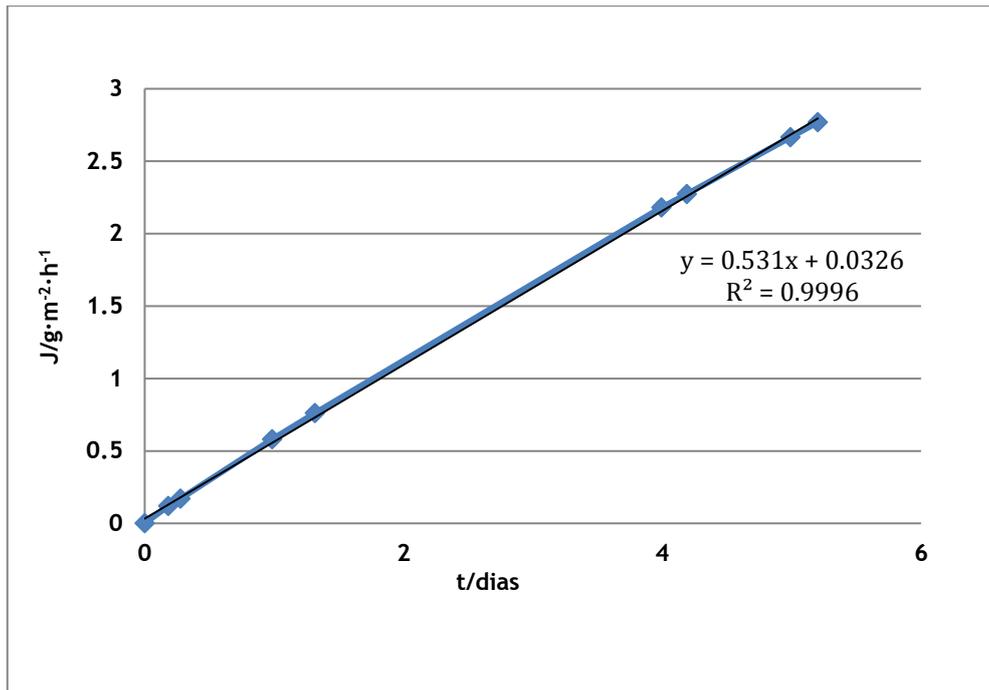


Figura 25 - Fluxo de vapor de água ao longo dos dias pelo painel sanduiche PS-1.2.

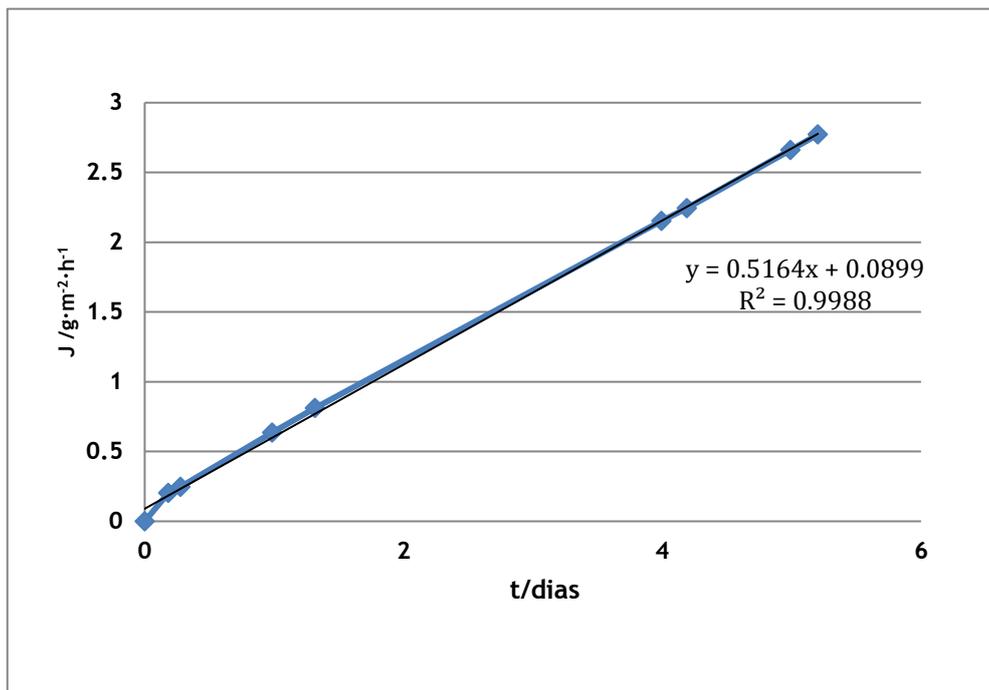


Figura 26 - Fluxo de vapor de água ao longo dos dias pelo painel sanduiche PS-2.2.

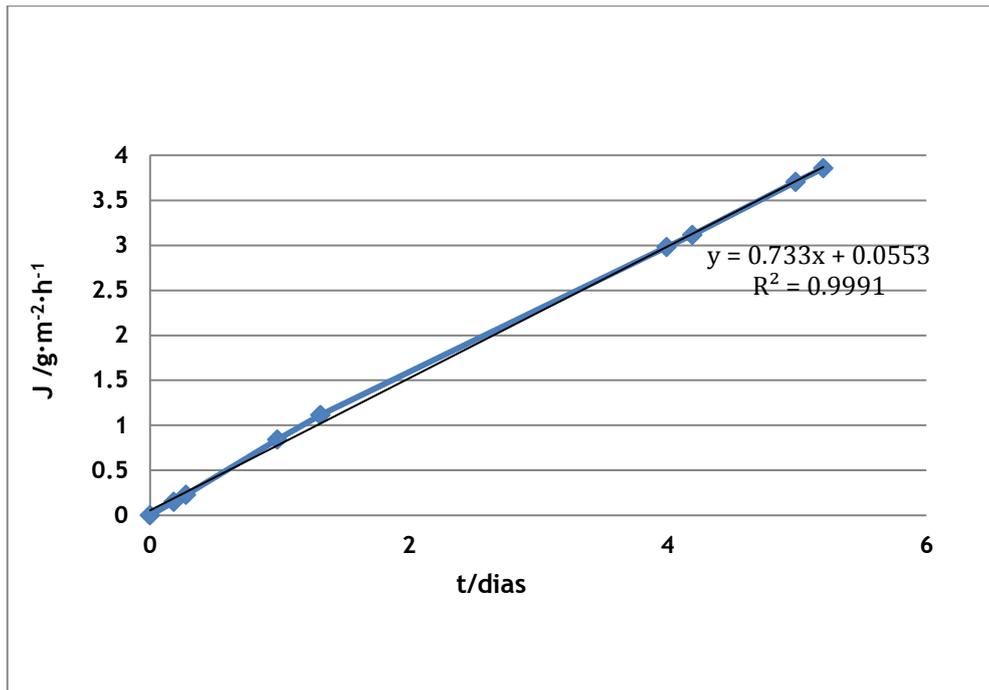


Figura 27 - Fluxo de vapor de água ao longo dos dias pelo painel sanduiche PS-2.3.

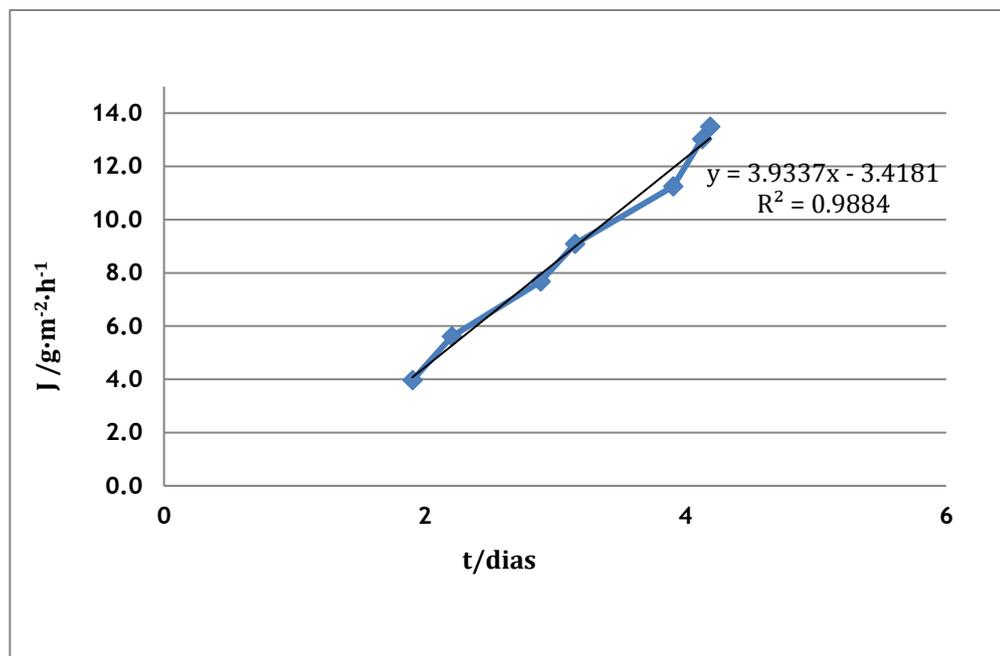


Figura 28 - Fluxo de vapor de água ao longo dos dias pelo revestimento R1.

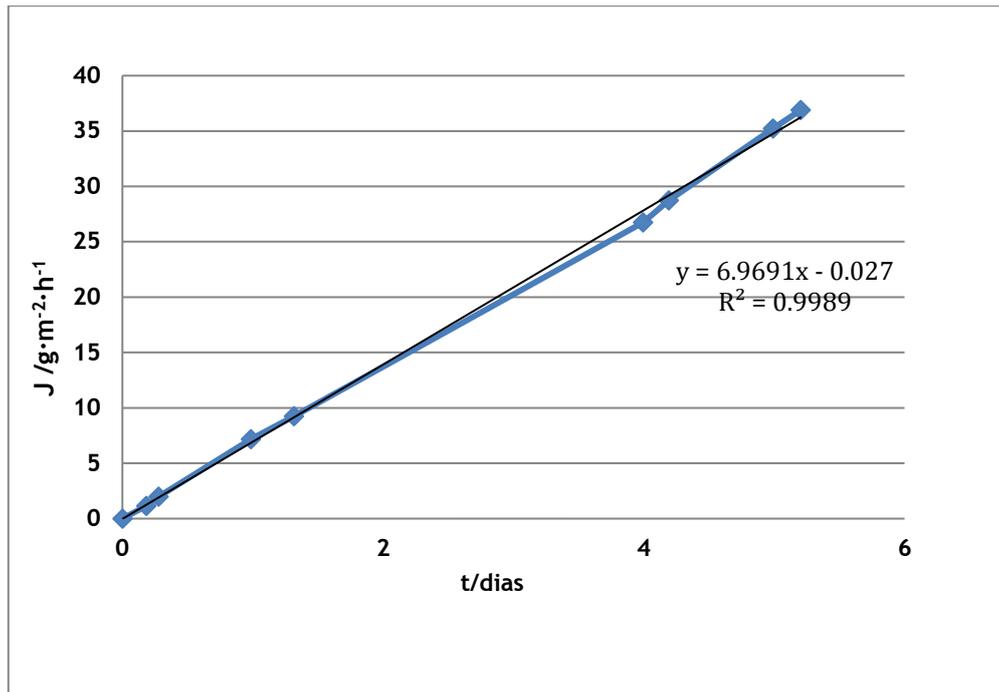


Figura 29 -Fluxo de vapor de água ao longo dos dias pelo revestimento R3.

O cálculo da permeabilidade ao vapor de água foi feito com base na lei da difusão de Fick que diz que o fluxo de vapor de água ( $J$  em  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) através de um elemento de espessura  $L$  é função do coeficiente de permeabilidade ( $\pi$ ,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ) e do gradiente de pressões ( $\Delta P$ ) de acordo com a Eq. (17).

$$J = \pi \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (17)$$

Para este ensaio o fluxo de vapor de água foi calculado de acordo com a Eq. (18).

$$J = \frac{m_f - m_i}{t \cdot A} \quad (18)$$

Em que  $m_f$  e  $m_i$  são a massa de água na camara 1 no final e no início do teste, respetivamente;  $t$  é o período de tempo de ensaio;  $A$  é a área efetiva de permeação.

A permeabilidade ao vapor de água é calculada através da permeância. Esta última obtida pela Eq. (19).

$$\text{Permeância} = \frac{J}{3600 \cdot p^{vap}} \cdot (H_{HR2} - H_{HR1}), \text{ em } \text{g} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (19)$$

Em que  $HR_1$  e  $HR_2$  são a humidade relativa na camara 1 e 2, respetivamente, e  $p^{vap}$  é a pressão de vapor à temperatura de teste.

Com isto a permeabilidade ao vapor de água é obtida pela Eq. (20).

$$\pi = \text{Permeância} \cdot L, \text{ em } \text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \quad (20)$$

A medição da espessura foi feita através de um comparador de espessuras digital da marca *Wallace* e resolução  $10^{-2}$  mm.

Calculou-se ainda o fator de resistência ao vapor de água,  $\mu$ , e a espessura da camada de ar com difusão equivalente,  $S_d$ . Estes valores foram obtidos pelas Eq. (21) e Eq. (22), respectivamente.

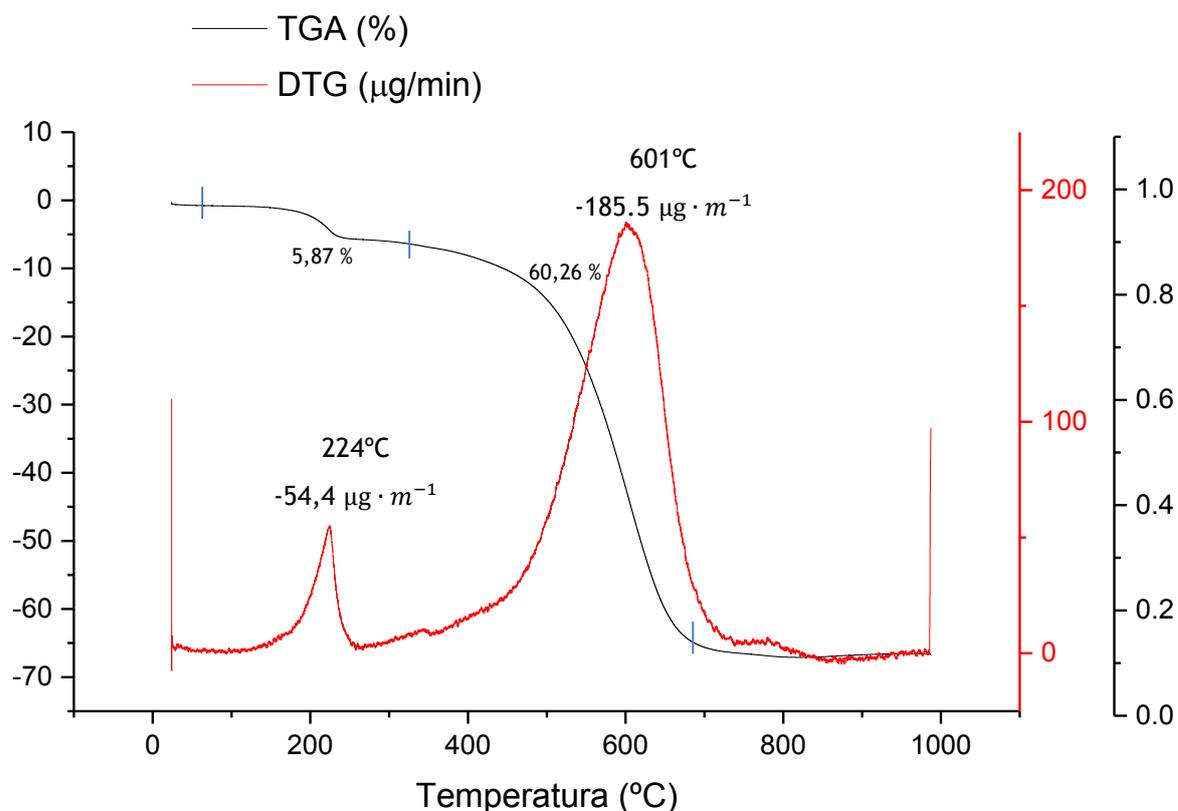
$$\mu = \frac{\pi_{ar}}{\pi_{amostra}}, \text{ com } \pi_{ar} \text{ igual a } 1,86 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \quad (21)$$

$$S_d = \mu \cdot L \quad (22)$$

## Anexo 4 Análise termogavimétrica

A análise térmica do aerogel teve como propósito averiguar a sua estabilidade térmica em termos de retenção da sua hidrofobicidade e verificar a perda de massa da amostra quando exposta a um programa de temperaturas controlado, de modo a avaliar a sua degradação em função da temperatura.

Na Figura 30 estão retratadas as curvas TG/DTG (a preto e vermelho, respetivamente) obtidas em atmosfera inerte para a amostra de aerogel de sílica em pó.



**Figura 30** - Curvas TG-DTG obtidas para uma amostra de aerogel de sílica hidrofóbica.

Observando a Figura 30, verifica-se pela curva DTG que existem essencialmente duas perdas de massa, uma aos 224 °C e outra aos 601 °C, esta última com uma taxa de degradação maior.

Analisando a curva de TGA é possível ver que dos 25 °C até aos 350 °C, aproximadamente, ocorre perda de massa de cerca de 5,87 % que estará associada à volatilização de solventes residuais e de água. A curva DTG indica que aos 224 °C a taxa de degradação foi superior e, pela curva TGA, percebe-se que se perde uma massa de aproximadamente 4,34 % causada pela evaporação dos compostos orgânicos. Portanto, uma massa de menos de 1% corresponderá à perda de água.

A outra perda de massa de cerca de 60.26 % sucede no intervalo de temperaturas de 350 °C a 700 °C, aproximadamente. Aos 480 °C, aproximadamente, existe uma redução acentuada na massa da amostra e verifica-se uma taxa de degradação máxima aos 601 °C. Estas perdas estão associadas à oxidação dos grupos metilo (CH<sub>3</sub>) presentes na superfície do aerogel e também à perda da estabilidade das ligações Si-C (a ocorrer aos 500 °C). Uma vez que são os grupos metilo que conferem caráter hidrofóbico ao aerogel, após aquecimento até aos 500 °C este passa a ter natureza hidrofílica.

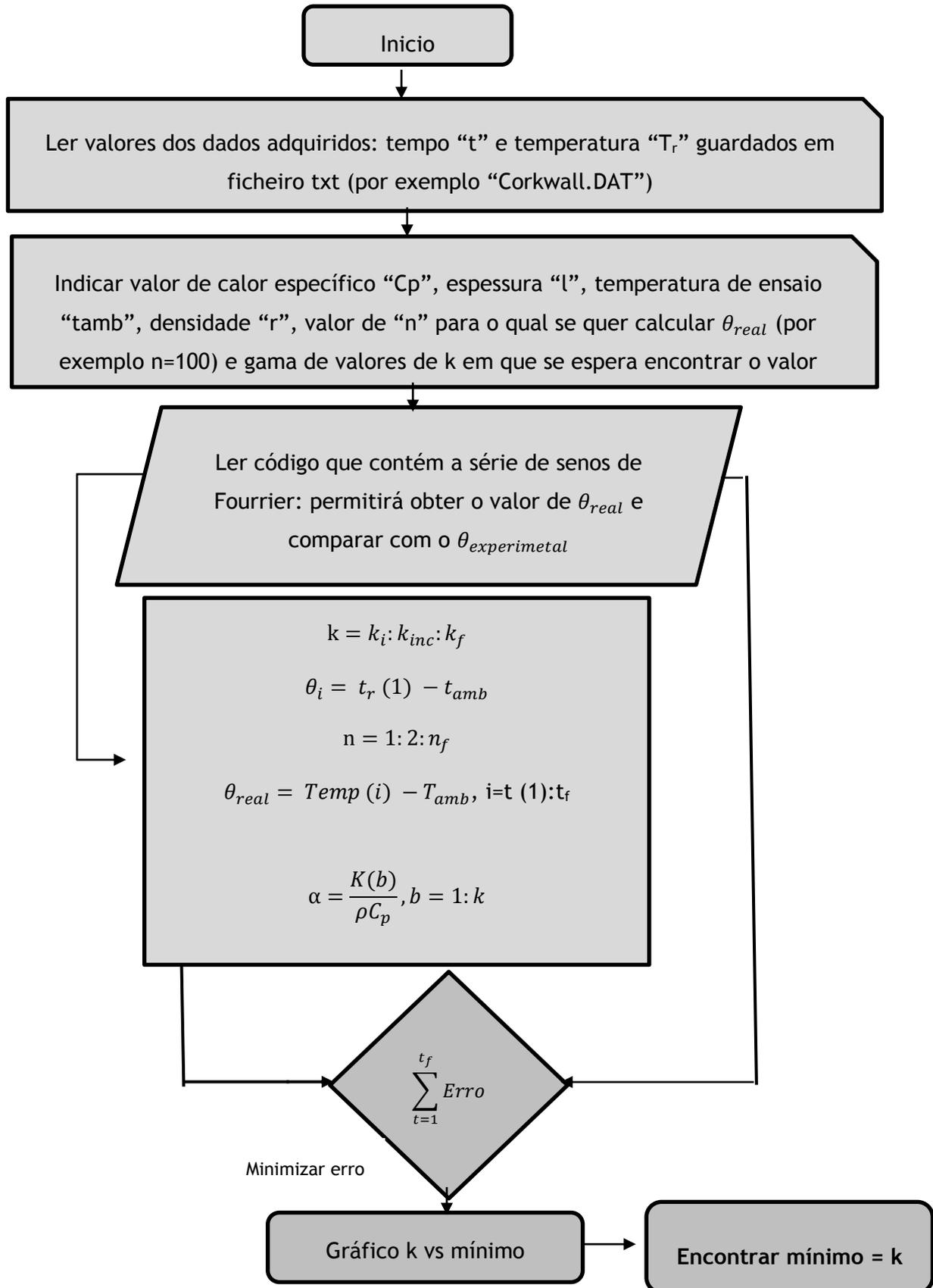
O material residual que se obtém no final do ensaio, cerca de 33,2 % da massa inicial da amostra, resiste à degradação térmica e, portanto, corresponderá aos compostos inorgânicos (essencialmente sílica) já que a sua temperatura de degradação está entre os 1999 °C e os 2032 °C [54].

## Anexo 5 Capacidade calorífica dos materiais desenvolvidos

Tabela 9- Capacidade calorífica dos materiais desenvolvidos obtidos por DSC.

Capacidade calorífica ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )		
Protótipo	30 °C	60 °C
Aerogel	1442	1613
PCE-1	2404	2773
PCE-2	1455	2055
Espuma	1792	2554
C1	1984	2411
C2	1586	1935
C3	2524	2860
PS-1.1	1529	1975
PS-2.1	1890	2330
PS-1.2	1500	1875
PS-2.2	1450	1785
PS-2.3	1515	1724
B01	1794	2199
B02	1505	1721
B03	1893	2092
B04	1928	2163
B06	2156	2462
R1	1506	1705
R2	1617	1774
R3	1751	2145
R4	1680	1900
R5	1797	1909

## Anexo 6 Fluxograma Matlab



## Anexo 7 Formulações testadas para os painéis à espessura em caixa de enchimento

Tabela 10 - Formulações tentadas para obtenção de painéis em caixa de enchimento.

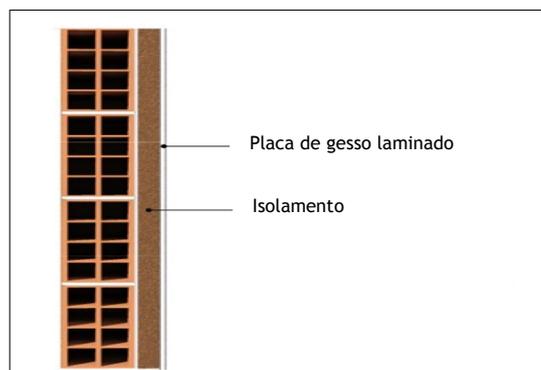
Protótipo	% Cortiça	% Aerogel	Ligante	% Ligante	Notas
P1	16,7	66,7	PU	16,7	
P2	16,7	66,7	PU	16,7	Mudança na ordem de mistura
P3	16,7	66,7	PU	16,7	Aumento da densidade
P4	10,4	42	PU	15,6	+ Fibra de madeira: 32 %
P5	16,7	66,7	EVA	16,7	
P6 (PCE-1)	10	40	EVA	50	
P7	14,2	56,7	EVA	46	Parafina: 3,5 %
P8	9,1	36,4	EVA	54,5	
P9	14,7	58,8	Melamina	26,5	
P10	14,7	58,8	Melamina	26,5	Rede de fibra de vidro
P11 (PCE-2)	10	40	Melamina	50	Rede de fibra de vidro
P12	14,7	58,8	Resina Acrílica	26,5	
P13	9,1	36,4	rHPE+CaCO <sub>3</sub>	54,5	
P14	14,7	58,8	MUF	26,5	



## Anexo 8 Comparação com os isolamentos concorrentes

### 8.1 Desempenho térmico

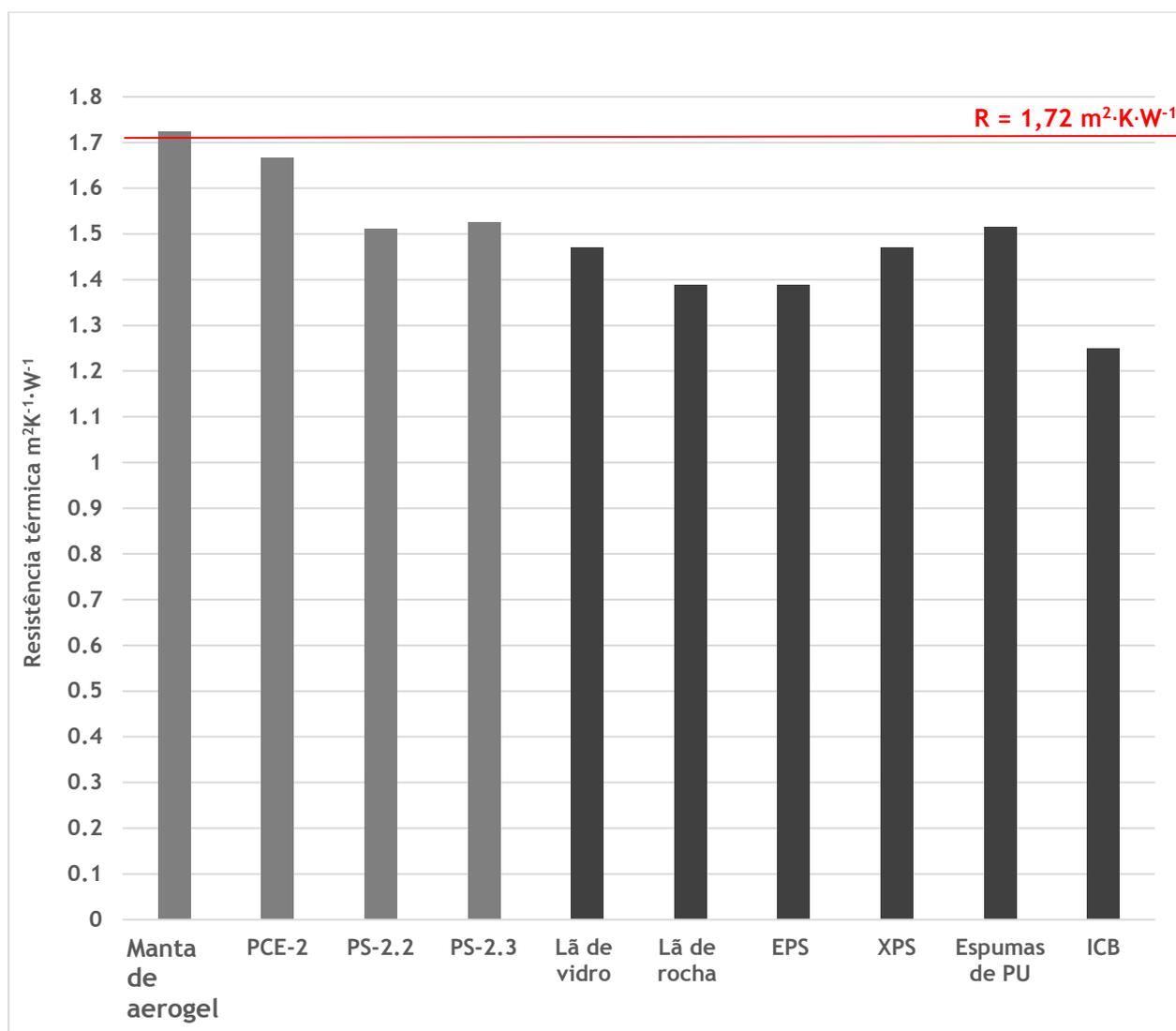
Atualmente a reabilitação ou construção de novos edifícios implica, por lei, que a obra seja feita por forma a minimizar os consumos energéticos. Isto significa que os elementos construtivos de um edifício, como o caso das fachadas, sigam os padrões impostos pelo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), que fixam os requisitos mínimos a cumprir [55]. Nesse sentido deve-se, sempre que possível, isolar as fachadas de modo a obter um coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) entre os  $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  e  $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  [55].



*Figura 31 - Imagem ilustrativa de uma parede de pano simples com isolamento pelo interior (extraído de [55]).*

Considere-se que o envelope de um edifício é composto por uma parede simples (parede de tijolo com dimensões de  $30 \times 20 \times 22 \text{ mm}$ ) com placa de gesso no interior (Figura 31). Com este sistema consegue-se um valor de  $U$  de  $1,29 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  [55]. Sendo que o ideal seria atingir um valor de  $U$  de  $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , então a fachada deveria ter um isolamento com um material cujo coeficiente de transferência de calor fosse de  $0,78 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Desta forma, e sabendo que a resistência à transferência de calor é inversamente proporcional ao valor de  $U$ , a fachada deveria ser isolada com um componente com resistência térmica de  $1,72 \text{ m}^2\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ .

No sentido de perceber qual o material que melhor conseguiria esse desempenho térmico estudou-se qual seria a resistência térmica que cada um fornecia se fosse aplicado com  $50 \text{ mm}$  de espessura numa parede de pano simples. Os resultados estão expressos na Figura 32.



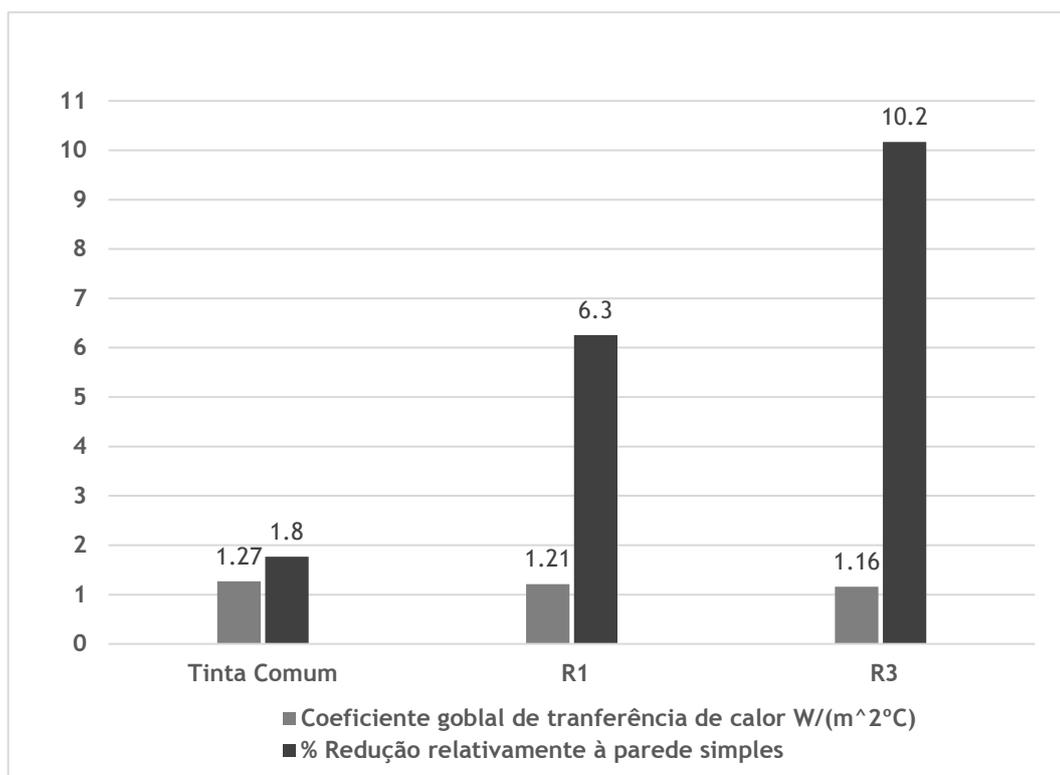
**Figura 32** - Resistência térmica dos materiais desenvolvidos quando aplicados com 50 mm de espessura em parede de pano simples.

Por análise da Figura 32 verifica-se que o único material que consegue fornecer o nível de conforto térmico desejado é o painel de aerogel. No entanto painéis desenvolvidos ao longo deste projeto apresentam resultados bastante bons e melhores que os proporcionados pelos isolamentos concorrentes.

Se se comparar por exemplo o painel em caixa de enchimento PCE-2 ou o painel sanduíche PS-2.3 consegue-se ter uma melhoria no desempenho térmico em cerca de 17 % e 10 %, respetivamente, quando comparado por exemplo com o EPS. Se se fizer a comparação com a cortiça essa redução passa a ser de 25 % e 18 %, respetivamente.

Fez-se um raciocínio análogo para o Corkwall. Neste caso averiguou-se qual seria a redução do coeficiente global de transferência de calor na parede de pano simples se fosse aplicado uma camada com 3 mm de espessura de Corkwall sem aerogel e com 5 % de aerogel em massa. Além

disso comparou-se o desempenho térmico destes dois revestimentos com o de uma tinta comum. Os resultados estão apresentados na Figura 33.

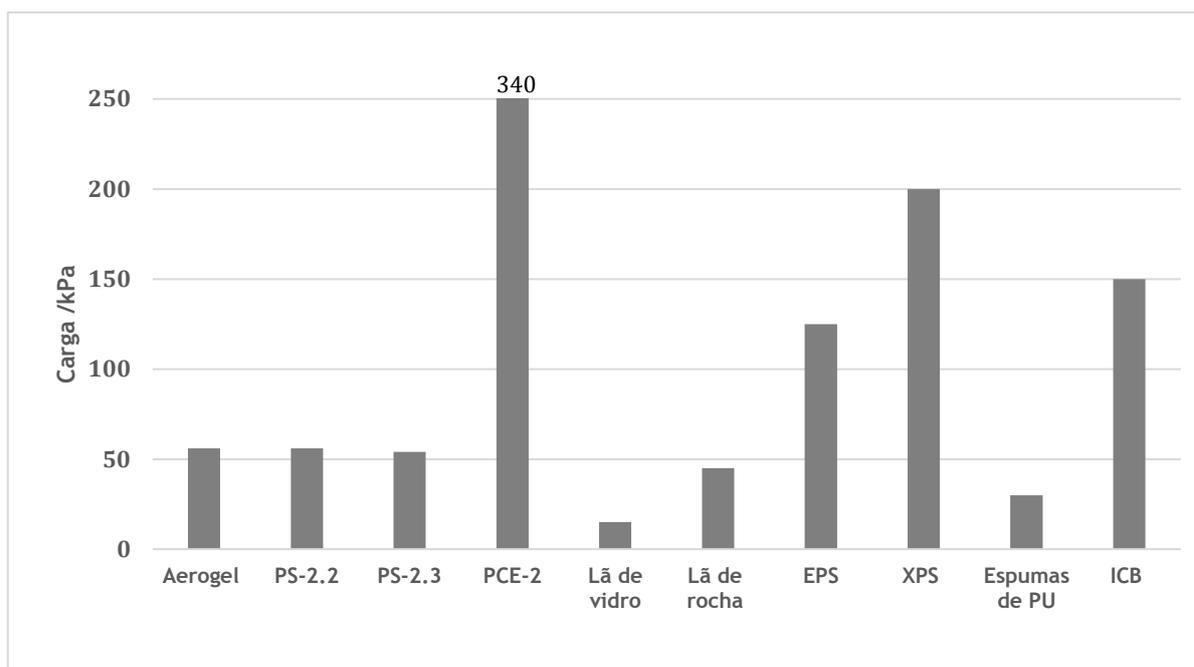


**Figura 33** - Redução do coeficiente global de transferência de calor pela incorporação de revestimento de 3 mm de espessura.

De facto, a incorporação de Corkwall sem aerogel (R1) consegue ter uma melhoria de 4,5 % em relação ao uso de uma tinta comum, sendo que se se colocar Corkwall com 5 % de aerogel (R2) tem-se uma redução no coeficiente global de transferência de calor de cerca de 8,4 %.

## 8.2. Resistência mecânica

A nível de desempenho mecânico apenas foram efetuadas comparações relativas à resistência à compressão a 10 % de deformação ( $\sigma_{10}$ ) de cada material já que é uma das características mais importantes num isolamento; os isolamentos térmicos estão sujeitos a ações de tensão permanente como por exemplo das coberturas. A Figura 34 revela os valores de resistência à compressão que cada isolamento apresenta.



**Figura 34** - Resistência à compressão a 10 % de deformação para os materiais desenvolvidos e isolamentos concorrentes.

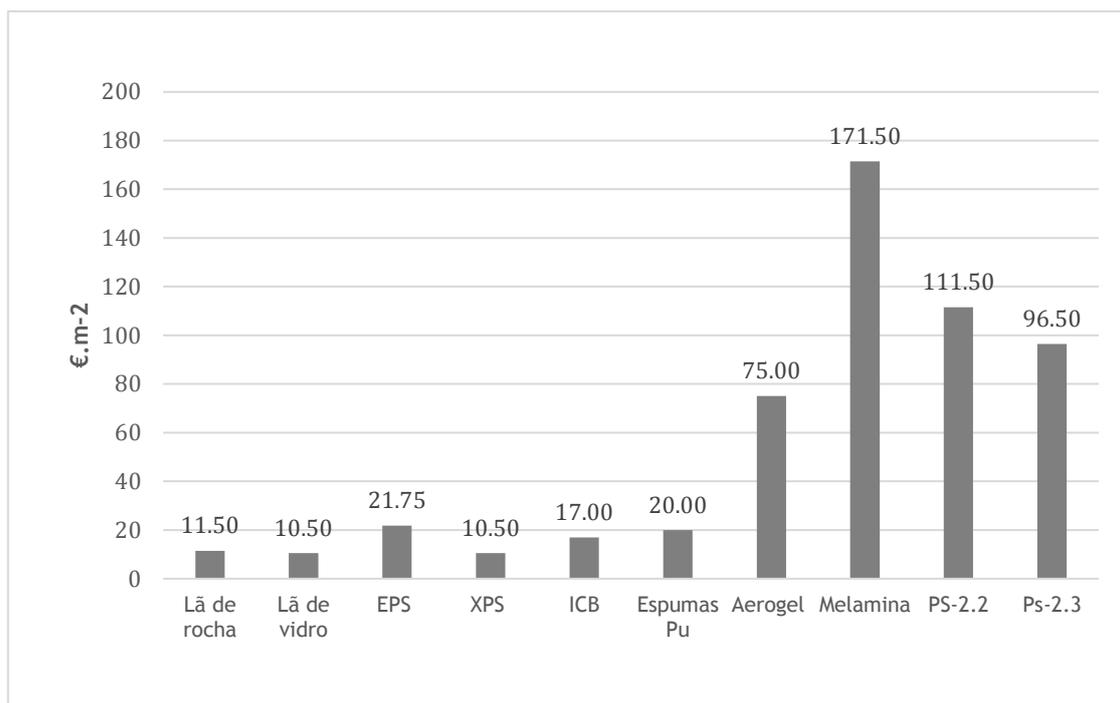
Analisando a Figura 34 verifica-se que o aglomerado PCE-2, desenvolvido ao longo deste projeto, se destaca positivamente sobre todos os outros, inclusive os isolamentos concorrentes. Por exemplo, quando se compara este material com o XPS (isolamento concorrente com maior resistência à compressão) consegue-se ter um material com mais 41 % de resistência à compressão a 10 % de deformação.

Os painéis tipo sanduiche desenvolvidos apresentam resistência mecânica à compressão significativamente superior à dos isolamentos minerais e das espumas de PU. No entanto, não conseguem ter valores para superar a resistência apresentada pelo ICB, EPS e XPS (isolamentos mais comercializados) devido à baixa resistência do núcleo de aerogel. A introdução de revestimento com folhas de cortiça no painel de aerogel induz a uma melhoria mínima na resistência à compressão do aerogel devido à baixa resistência do próprio aerogel.

### 8.3. Custo

O cálculo do custo dos painéis desenvolvidos ao longo deste projeto teve em consideração apenas o custo da matéria prima, o que significa que os preços de mercado serão significativamente superiores aos que serão apresentados. Estes custos foram calculados tendo em conta que o preço de aerogel, fornecido pela Activeaerogels, será mais baixo do que o atual já que a empresa se encontra num processo de aumento da produção.

Assim, os custos associados aos painéis desenvolvidos encontram-se na Figura 35 juntamente com o preço de mercado dos isolamentos concorrentes.



**Figura 35 - Custo dos isolamentos por m<sup>2</sup> para 50 mm de espessura.**

O custo a que o Corkwall está à venda no mercado atualmente é de 9,33 €·kg<sup>-1</sup>. A nova formulação, o Corkwall 5 % de aerogel em massa, tem um custo associado de 9,94 €·kg<sup>-1</sup>.

Como se pode verificar pela análise da Figura 35 o custo dos materiais com aerogel é bastante superior ao dos materiais concorrentes uma vez que o valor que o aerogel tem no mercado já é elevado. Estes materiais têm preços pouco acessíveis ao consumidor e, portanto, inoportáveis na área da construção.

Relativamente ao custo do novo Corkwall verifica-se que o incremento no custo não foi significativo, apenas de 6 %, o que é bastante positivo face à melhoria significativa no desempenho desta nova formulação.

## Anexo 9 Protótipos descartados

Dois dos protótipos que se desenvolveram na Activeaerogels não mostraram qualquer resultado positivo. Esses protótipos foram o painel tipo sanduíche obtido pelo procedimento #2 e a manta flexível de aerogel e cortiça. O objetivo destes procedimentos era obter um painel sanduiche com o núcleo com uma manta “fofa” semelhante à da Figura 10 apresentada no Subcapítulo 4.1.1 e uma manta flexível com granulado de cortiça disperso, semelhante à Figura 4A do Subcapítulo 3.1. No entanto o resultado foi totalmente diferente do esperado como se pode ver na Figura 36.

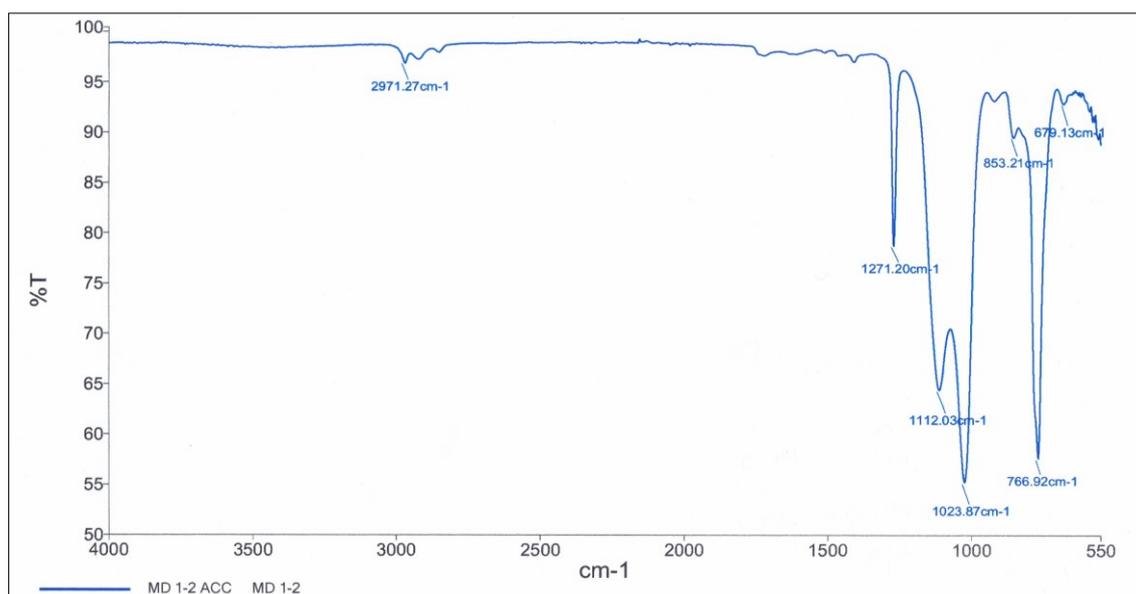


**Figura 36** - *Imagens representativas dos protótipos preparados: A- Manta de aerogel com cortiça; B- Painel sanduíche preparado pelo procedimento 2.*

Verifica-se que ambos os protótipos surgem com uma cor acastanhada em vez da cor branca comum dos aerogéis de sílica. Houve encolhimento dos produtos durante o processo de secagem, ou seja, houve redução do volume da passagem do gel para o produto final, não se obtendo um sólido nanoporoso de elevada porosidade característico de um aerogel. Observa-se ainda que no caso da manta flexível (Figura 36 A) o granulado de cortiça ficou todo condicionado na superfície, possivelmente por ser menos denso que a solução “sol”.

O desenvolvimento destes protótipos não foi bem conseguido pois é possível que tenham ocorrido algumas reações desenvolvidas pelo contacto entre os componentes da cortiça com reagentes presentes na solução “sol” que dão origem à manta de aerogel.

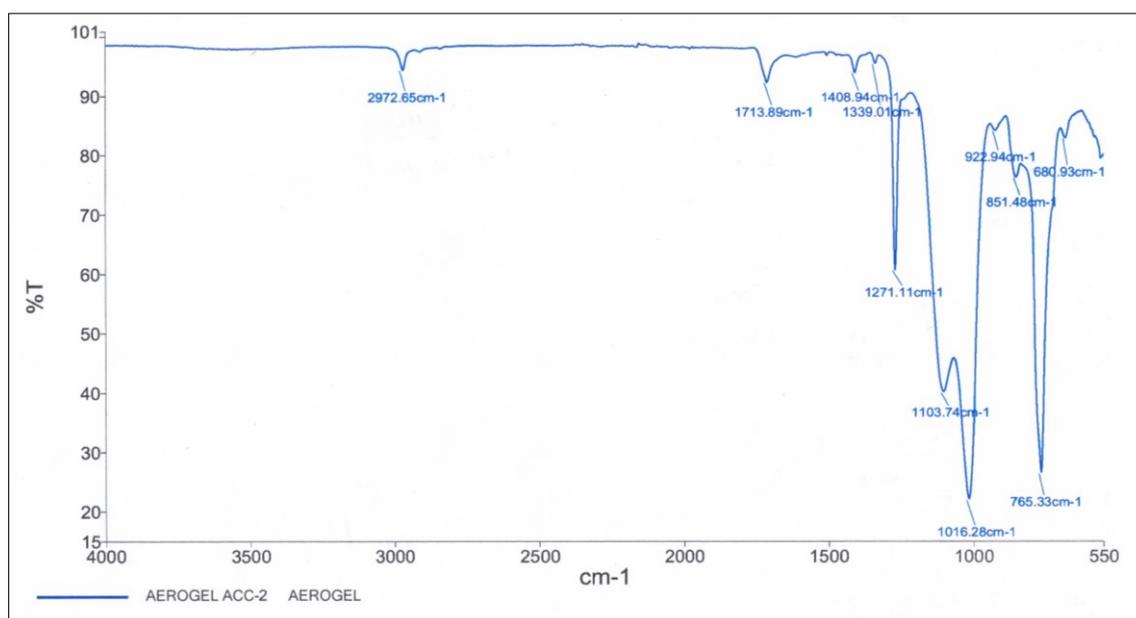
Para confirmar se de facto houve alguma reação entre a cortiça e a solução “sol” fez-se um FTIR-ATR a várias partes das amostras apresentadas na Figura 36 e também a uma amostra de uma manta de aerogel. As Figuras 37 e 38 apresentam os espectros de infravermelho que são representativos das amostras preparadas e do aerogel, respetivamente, e as Tabelas 11 e 12 a análise dos pontos mais relevantes.



**Figura 37 - Espectros de FTIR-ATR das amostras desenvolvidas**

**Tabela 11- Análise do espectro de FTIR-ATR das amostras desenvolvidas.**

Comprimento de onda (cm <sup>-1</sup> )	Ligação	
2971,27	CH <sub>3</sub> e CH <sub>2</sub> em compostos alifáticos	CH com distensão antissimétrica e simétrica
1271,20	Si-CH <sub>3</sub> em silanos	CH <sub>3</sub> com deformação simétrica
1112,03	Si-O-Si	Ligação silano
1023,87	Si-O	Distensão antissimétrica
853,21	Si-CH <sub>3</sub>	Em silanos
766,92	Benzeno monossustituído ou trissustituído	----



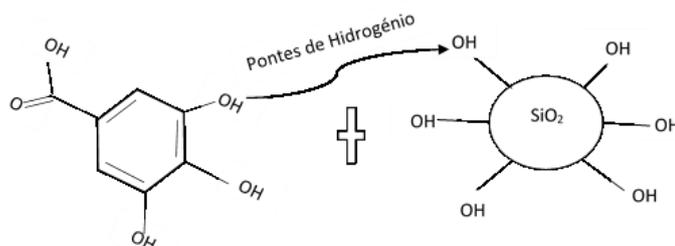
**Figura 38** - Espectro de FTIR-ATR de uma amostra de aerogel.

**Tabela 12** - Análise do espectro de FTIR-ATR da amostra de aerogel.

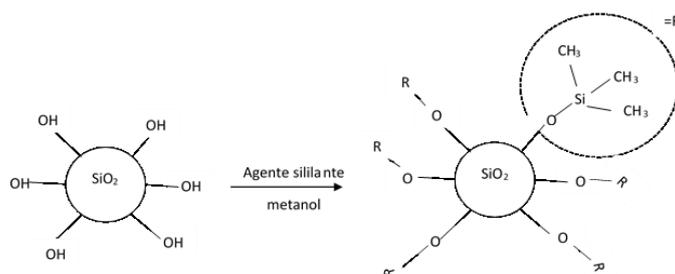
Comprimento de onda (cm <sup>-1</sup> )	Ligação	Nota
2972,65	CH <sub>3</sub> e CH <sub>2</sub> em compostos alifáticos	CH com distensão antissimétrica e simétrica
1713,89	C=O	Em cetonas
1271,11	Si-CH <sub>3</sub> em silanos	CH <sub>3</sub> com deformação simétrica
1103,74	Si-O-Si	Ligação silano
1016,28	Si-O	Distensão antissimétrica
851,48	Si-CH <sub>3</sub>	Em silanos
765,28	Benzeno monossustituído ou trissustituído	----

Como se pode verificar os espectros das duas amostras são praticamente sobreponíveis não se conseguindo identificar praticamente nenhuma diferença relevante. Verifica-se apenas que aparece um pico no espectro da manta de aerogel aos  $1713,89\text{ cm}^{-1}$  que não aparece no espectro da amostra. Este pico está associado a ligações C=O em cetonas que pode estar na origem do uso de acetona para limpeza do cristal ATR entre ensaios; nenhum outro pico de intensidade relevante aparece. Para uma melhor análise dos resultados do FTIR dever-se-ia observar a segunda derivada dos espectros, que daria melhor perceção da deslocação dos picos; esta análise não foi possível por falta de tempo.

No entanto, como já referido, verificou-se que os produtos adquiriram cor acastanhada, o que indica que possivelmente houve dissolução dos taninos da cortiça na solução “sol”. Esta solução é composta por água, por um solvente orgânico (muito provavelmente metanol) e por um catalisador (que pode ser um ácido, uma base ou ambos). Os taninos, divididos em hidrolisáveis e condensáveis, são substâncias fenólicas geralmente extraídos numa mistura de água e um solvente (que pode ser o metanol). Supõe-se que tenha ocorrido reação dos grupos fenólicos dos taninos com os grupos OH presentes no precursor de sílica utilizado, formando-se pontes de hidrogénio (Figura 39). Novas ligações ter-se-ão formado, levando a uma nova conformação da rede do aerogel, gerando o encolhimento do produto final. Isto é, o esqueleto sólido que se deveria obter (Figura 40) não se forma obtendo-se um produto menos hidrofóbico. Este facto contribui para que durante o processo de secagem a rede seja mais facilmente destruída devido ao gradiente de pressões capilares gerado pela volatilização do líquido no gel. Esta explicação é uma suposição e, portanto, carece de um estudo experimental mais aprofundado.



**Figura 39-** Reação possível entre um tanino hidrolisável (ácido gálico) com um alcóxido de silício (precursor).



**Figura 40-** Reação esperada a ocorrer com o precursor na solução “sol”.