

Avaliação da condutibilidade térmica de estruturas celulósicas ultra-porosas

Versão final após defesa

Joel Pais Martins

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Química Industrial

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutora Joana Magalhães Gonçalves Costa Vieira

Co-orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires

Co-orientador: Prof. Doutora Ana Paula Nunes de Almeida Alves da Costa

dezembro de 2024

Declaração de Integridade

Eu, Joel Pais Martins, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M12456 do 2^a Ciclo em Química Industrial da Faculdade de Ciências, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância a com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 20/12 /2024

Agradecimentos

Quero aproveitar para agradecer a todos aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho e a todos o que apoiaram durante o mesmo.

Começar por agradecer aos meus orientadores, a professora Doutora Joana Costa Vieira, a professora Doutora Ana Paula Costa e ao professor Doutor Luís Pires, por toda a ajuda e tempo disponibilizado para a realização deste trabalho e pela confiança para continuar a desenvolver um trabalho iniciado anteriormente.

Agradecer também ao mestre João Correia, do departamento de Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior pela preciosa ajuda para a construção do sistema de medição de condutibilidade térmica.

Agradecer também aos meus pais pelo apoio e pela oportunidade ao longo de todos estes anos de percurso académico, e também a todos os meus amigos pelo apoio e ajuda durante este tempo todo.

Resumo

Este estudo teve como objetivo o desenvolvimento de estruturas celulósicas de elevada porosidade, através do processo de espuma, para a introdução de ar nas mesmas, o que faz com que estas possam ter uma boa capacidade para criar resistência à passagem de calor, e consequentemente sejam bons isolantes térmicos. Para se fazer a avaliação da condutibilidade térmica, também foi necessário desenvolver um sistema para a medição desta propriedade que fosse flexível à espessura das estruturas celulósicas produzidas. Produziram-se três tipos de estruturas a partir de fibras obtidas de papel reciclado. A primeira, considerada a referência, composta apenas pelas fibras celulósicas tal qual, a segunda, onde se adicionou o aditivo de resistência, o amido catiónico, e finalmente, a terceira, que para além do aditivo de resistência, se procedeu a uma ligeira refinação das fibras recicladas.

Para a produção de cada uma das amostras, colocaram-se as fibras em suspensão e adicionou-se um surfactante, que permitiu criar espuma e assim introduzir ar dentro da rede fibrosa, fazendo assim, com que as estruturas obtidas apresentassem uma elevada porosidade. As amostras preparadas foram de seguida testadas para determinar a sua capacidade de isolamento térmico e as suas propriedades mecânicas.

Os ensaios das propriedades mecânicas permitiram verificar uma melhoria da resistência das estruturas quando se fez a refinação das fibras e ainda se adicionou o aditivo de resistência na preparação das amostras.

Os ensaios para determinação da condutibilidade térmica foram efetuados usando a sua espessura máxima, obtida logo após a secagem, e também realizados com uma compressão de 50%, para estudar o efeito da compressibilidade nesta propriedade. Os resultados obtidos permitiram verificar que estas estruturas têm uma capacidade enquanto isolantes térmicos que se aproxima dos materiais mais comuns usados no isolamento térmico de edifícios.

Palavras-chave

Condutibilidade térmica; economia circular; estruturas celulósicas ultra-porosas; isolamento térmico; reciclagem

Abstract

The objective of this study is, to develop cellulosic structures with high porosity, through the foam process, to introduce air into them, which means that they can have a good capacity to create resistance to the passage of heat, and consequently are good thermal insulators. To evaluate thermal conductivity, it was also necessary to develop a system for measuring this property that was flexible to the thickness of the cellulosic structures produced.

Three types of structures were produced from fibers obtained from recycled paper. The first, considered the reference, composed only of cellulosic fibers as is, the second, where the strength additive, cationic starch, was added, and finally, the third, which, in addition to the strength additive, underwent a slight refinement of recycled fibers.

To produce each of the samples, the fibers were placed in suspension and a surfactant was added, which allowed the creation of foam and thus introducing air into the fibrous network, thus making the structures obtained have a high porosity. The prepared samples were then tested to determine their thermal insulation capacity and mechanical properties.

The mechanical properties tests made it possible to verify an improvement in the resistance of the structures when the fibers were refined, and the resistance additive was added when preparing the samples.

The tests to determine thermal conductivity were carried out using its maximum thickness, obtained immediately after drying, and carried out with a compression of 50%, to study the effect of compressibility on this property. The results obtained made it possible to verify that these structures have a thermal insulating capacity that is close to the most common materials used in thermal insulation of buildings.

Keywords

Circular Economy; recycling; thermal conductivity; thermal insulation; ultra-porous cellulosic structures

Índice

1.	Enquadramento	1
1.1.	Enquadramento geral	1
1.2.	Objetivo e metodologia	1
1.3.	Organização da dissertação.....	2
2.	Introdução teórica.....	3
2.1.	Estruturas celulósicas obtidas pelo processo de espuma	3
2.2.	Economia Circular	4
2.3.	A reciclagem do papel	5
2.4.	Aditivos	7
2.4.1.	Agentes de resistência em seco	7
2.4.1.1.	Amido Catiónico.....	7
2.5.	Isolamento térmico	9
2.5.1.	Métodos laboratoriais para a avaliação do isolamento térmico	10
2.5.1.1.	Método de ensaio em caixa quente	10
2.5.1.2.	Métodos da placa quente protegida e fluxométrico.....	12
3.	Materiais e Métodos.....	15
3.1.	Preparação das estruturas celulósicas ultra-porosas.....	15
3.1.1.	Preparação da pasta de fibras recicladas	15
3.1.2.	Amostra de 100% de Fibra Reciclada	16
3.1.3.	Amostras de fibras reciclada com aditivo Amido Catiónico	16
3.1.3.1.	Preparação do amido catiónico.....	17
3.1.3.2.	Incorporação do aditivo à suspensão fibrosa.....	17
3.1.3.3.	Amostra de Fibra Reciclada Refinada com aditivo Amido Catiónico.....	18
3.2.	Caraterização das Estruturas Celulósicas Ultra-porosas.....	19
3.2.1.	Gramagem.....	19
3.2.2.	Espessura	20

3.2.3.	Resistência mecânica.....	20
3.3.	Sistema de medição da condutibilidade térmica.....	21
3.3.1.	Construção do sistema	22
3.3.1.1.	Placa fria	23
3.3.1.2.	Placa quente	24
3.3.1.3.	Montagem das duas caixas	26
3.3.1.4.	Preparação dos provetes de ensaio.....	28
3.3.1.5.	Ensaio dos provetes no sistema desenvolvido.....	30
3.3.2.	Cálculos da condutibilidade térmica dos provetes.....	32
4.	Resultados e discussão	35
4.1.	Estudo das propriedades das amostras celulósicas.....	35
4.1.1.	Propriedades estruturais	35
4.1.1.1.	Gramagem e Espessura	35
4.1.2.	Ensaio de resistência mecânica	36
4.1.2.1.	Índice de Tração e Força Máxima suportada	36
4.1.2.2.	Alongamento e Módulo de <i>Young</i>	37
4.2.	Ensaio de condutibilidade térmica	38
5.	Conclusão	43
	Referências bibliográficas	45
	Anexos	49
	Anexo A – Massa das amostras	51
	Anexo B – Espessura medida das amostras	52
	Anexo C – Ensaio feito para o cálculo da condutibilidade térmica	53

Lista de Figuras

Figura 1- Amostra celulósica obtida pelo processo de formação de espuma (Martins, 2022).....	3
Figura 2 - Economias linear vs Economia circular	5
Figura 3 - Variação da percentagem média de reciclagem de papel ao longo dos anos...	6
Figura 4 - Estrutura Química do Amido	8
Figura 5 - Estrutura química do Amido Catiónico	8
Figura 6 - Esquema simplificado de uma caixa quente calibrada	11
Figura 7 - Esquema simplificado de uma caixa quente calibrada	11
Figura 8- Esquema de montagem de um sistema do método da placa quente protegida	12
Figura 9 - Refinador/desintegrador Valley	15
Figura 10 - Amostra de FR no formador de folhas laboratorial	16
Figura 11 - Amostra de FRA no formador de folhas laboratorial	18
Figura 12 - Amostra de FRR no formador de folhas laboratorial.....	19
Figura 13 - Máquina de teste universal de tração Thwing-Albert®	20
Figura 14 - Provetes para o ensaio de tração das amostras a) FRA, b) FR, c) FRR.....	21
Figura 15 - Representação esquemática do sistema de medição da condutibilidade térmica construído.....	22
Figura 16 - Circuito realizado pela CNC para a circulação de água na placa fria	23
Figura 17 - Caixa da placa fria antes de ser fechada	24
Figura 18 - Circuito de resistências e termóstato da placa quente	25
Figura 19 - Isolamento feito na parte inferior da placa quente em volta do circuito realizado.....	26
Figura 20 - Representação esquemática dos termopares colocados no sistema.....	27
Figura 21 - Sistema de medição da condutibilidade térmica antes de iniciar um ensaio	28
Figura 22 - Proвете de FR cortado para o ensaio de condutibilidade térmica	29
Figura 23 - Sistema de medição da condutibilidade térmica em funcionamento.....	31
Figura 24 - Índice de Tração (N.m/g) das amostras preparadas	36
Figura 25 - Alongamento (%) suportado pelas amostras	37
Figura 26 - Módulo de Young (MPa) das amostras preparadas.....	38
Figura 27 - Variação da condutibilidade térmica (W/m.°C) dos provetes com a compactação	41
Figura 28 - Variação da Condutibilidade térmica (W/m.K) da lã mineral em função da densidade e temperatura	41

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Espessura das amostras testadas com e sem compactação	30
Tabela 2 - Gramagem média das amostras preparadas	35
Tabela 3 - Espessura média das amostras preparadas	35
Tabela 4 - Valores de Temperatura média (°C) medidos pelos termopares e valor médio de tensão (V) medidos para cada provete ensaiado	39
Tabela 5 - Valores da Condutibilidade térmica (W/m.°C) calculado para cada provete	40
Tabela 6 - Massa Volúmica aparente seca (kg/m ³) de cada provete com e sem compactação	40
Tabela 7 - Condutibilidade térmica (W/m.K) de materiais usados em isolamento térmico de edifícios	42
Tabela A1 - Valores pesados na balança analítica.....	51
Tabela B1 - Valores de espessura medidos com o paquímetro analógico.....	52
Tabela C1 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra A sem compactação...	53
Tabela C2 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra A com compactação.....	53
Tabela C3 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra B sem compactação	54
Tabela C4 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra B com compactação.....	54
Tabela C5 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra C sem compactação	55
Tabela C6 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra C com compactação.....	55
Tabela C7 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra D sem compactação	56
Tabela C8 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra D com compactação	56
Tabela C9 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra E sem compactação	57
Tabela C10 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra E com compactação	57
Tabela C11 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra F sem compactação	58
Tabela C12 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra F com compactação	58
Tabela C13 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra G.....	59
Tabela C14 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra H	59
Tabela C15 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra I.....	60

Lista de Acrónimos

AC – Amido Catiónico

CEPI – *Confederation of European Paper Industries*

FR – Fibras Recicladadas

FRA – Fibra Reciclada com Amido Catiónico

FRR – Fibra Refinada com Amido Catiónico

H₂O in – Termopar na entrada de água

H₂O out - Termopar na saída de água

MDF – *Medium Density Fiberboard*

PFC - Termopar da face inferior da placa fria

PFI - Termopar no isolamento caixa da placa fria

PFQ - Termopar da face superior da placa fria

PQC – Termopar na face inferior da placa quente

PQI - Termopar no isolamento da caixa quente

PQP – Termopar na face superior da placa quente

PVC – Policloreto de Vinilo

RPM – Rotações por minuto

SLS – Lauril Sulfato de Sódio

TMS – Teor de matéria seca

UBI – Universidade da Beira Interior

1. Enquadramento

Neste capítulo, pretende-se fazer um enquadramento do trabalho realizado, indicando a importância do tema, bem como a apresentação dos objetivos e da metodologia seguida para atingi-los, e por fim a apresentação da estrutura do trabalho.

1.1. Enquadramento geral

As crescentes preocupações da sociedade com o meio ambiente têm vindo a aumentar ao longo das últimas décadas. A procura por novos materiais provenientes de fontes renováveis, da reciclagem ou da reutilização de produtos para outros fins, tem-se expandido de forma considerável. Dada a preocupação ambiental por parte de governos e de organizações internacionais, surgiram diretivas e restrições para reduzir o uso de matérias-primas originárias de fontes não renováveis (Kamarudin, et al., 2022).

A reciclagem do papel é cada vez mais importante, não só para a sua reutilização, como a transformação em materiais para outras aplicações, reduzindo assim, os resíduos sólidos, e protegendo o meio ambiente (Senarathna, et al., 2023). Os materiais desenvolvidos através da introdução de espuma em estruturas celulósicas, têm atraído uma maior atenção nos últimos anos, principalmente onde as características ecológicas são importantes (Salim, et al., 2023). No isolamento térmico de edifícios, são geralmente usados materiais originários de fontes não renováveis, pelo que será útil a procura de soluções que possam vir de fontes mais sustentáveis.

1.2. Objetivo e metodologia

Este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade do uso de estruturas celulósicas ultra-porosas, obtidas a partir de papel reciclado, enquanto isolante térmico.

Para se realizar este estudo, começou-se por se preparar as fibras recicladas, obtidas a partir da reutilização de papel de impressão e escrita que se encontrava no papelão da Universidade da Beira Interior (UBI), de seguida procedeu-se à preparação destas estruturas pelo processo de espuma e por fim fez-se o estudo das propriedades mecânicas destas.

Para o estudo da capacidade de isolamento térmico destas estruturas celulósicas ultra-porosas, construiu-se um sistema laboratorial para avaliar a condutibilidade térmica e

indiretamente verificar a viabilidade destas estruturas para o uso em isolamento térmico de edifícios.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1 – Enquadramento geral, objetivos e organização do trabalho
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica do tema em estudo
- Capítulo 3 – Materiais e Métodos
- Capítulo 4 – Resultados e discussão dos mesmos
- Capítulo 5 – Conclusão e perspetivas futuras de trabalho
- Anexos:
 - Anexo A – Massa das amostras preparadas
 - Anexo B – Espessura das amostras preparadas
 - Anexo C – Ensaios para o cálculo da condutibilidade térmica

2. Introdução teórica

2.1. Estruturas celulósicas obtidas pelo processo de espuma

Nos últimos tempos tem existido uma tentativa para o desenvolvimento de novos produtos celulósicos de baixa densidade, ou de produtos desenvolvidos a partir do processo de formação espuma para aplicação em diversos ramos da engenharia, como por exemplo, para isolamento térmico, para suporte de catalisadores, ou como um produto para a redução de vibrações, entre outros (Madani, et al., 2014).

A utilização do processo de formação espuma a partir de fibras celulósicas, foi desenvolvida inicialmente nos anos de 1960 (Burke, et al., 2019), onde era adicionada a solução aquosa, que continha as fibras celulósicas, um surfactante, e de seguida era feita a agitação dessa amostra, para permitir produzir essa dispersão de espuma com as fibras de celulose (Burke, et al., 2019). Este processo foi introduzido inicialmente para permitir controlar a densidade numa folha de papel (Madani, et al., 2014). Durante a agitação da suspensão fibrosa existe a formação de bolhas, que vão servir como espaçadores de partículas entre as fibras, prevenindo a floculação (Burke, et al., 2019). Na Figura 1 é possível observar uma amostra húmida obtida através deste processo.



Figura 1- Amostra celulósica obtida pelo processo de formação de espuma (Martins, 2022)

Os materiais obtidos por este método contribuem para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis de baixa densidade, os quais são cada vez mais necessários para aplicações como o seu uso para embalagens e para o isolamento térmico e acústico (Năstac, et al., 2023).

O processo de formação espuma permite obter estruturas bastante porosas e de elevada espessura, utilizando matérias-primas virgens, ou uma combinação, através da reciclagem de produtos já utilizados, permitindo assim abrir novos mercados para a reutilização de papel. É esta elevada porosidade que lhe confere características de bom isolante (Nechita & Năstac, 2022).

Ao contrário do método convencional de produção de papel, em que são necessárias grandes quantidades de água e energia durante todo o processo, o método de formação de espuma necessita de uma quantidade substancialmente menor de água para a interligação e formação das redes fibrosas, permitindo também reduzir a presença de água na sua estrutura interna (Năstac, et al., 2023).

2.2. Economia Circular

O conceito de economia circular começou por surgir por volta dos anos de 1970, partindo da ideia de ser necessário reduzir o consumo de matérias-primas virgens para uso na produção industrial (Arruda, et al., 2021). A introdução deste conceito surgiu com a expectativa de transformar a relação entre os sistemas ecológico e económico (Oliveira, et al., 2021). O paradigma relativo à economia circular defende que os sistemas económicos têm de desempenhar um papel em que haja a redução na utilização de recursos virgens e atenuar os impactos ambientais resultantes das atividades económicas (Oliveira, et al., 2021).

A formulação do conceito de economia circular, foi desenvolvida por dois economistas, Pearce e Turner (Pearce & Turner 1990; Winans, et al., 2017), que verificaram que o modelo de economia implementado na altura não tinha em conta a reciclagem dos diversos produtos, o que colocava o ambiente em segundo plano. Não existe, no entanto, nos dias de hoje, uma definição universalmente aceite (Chizaryfard, et al., 2021), e na literatura foi nos anos mais recentes, que surgiu um grande aumento nas publicações relativas ao tema, cerca de 60% do total (Kirchherr, et al., 2023).

A economia circular é baseada na lógica cíclica da natureza extrair, produzir, reciclar e voltar a produzir a partir daquilo que é reciclado, recorrendo o mínimo possível à extração de novas matérias-primas, produzindo também o menor número de resíduos possível, uma vez que não é possível eliminá-los por completo. De um modo geral trata-se da conceção de produtos com valor acrescentado e permitir a máxima utilização em

ciclos de vida mais longos, criando produtos mais versáteis, com diferentes utilizações ao longo do seu ciclo de vida útil, garantindo assim a sua reutilização e transformação em produtos novos e utilizáveis, permitindo assim a sua reciclagem e reintrodução no mercado, reduzindo a necessidade de criação de novos produtos a partir da extração de matérias-primas novas (Arruda, et al., 2021).

Em contraste à filosofia cíclica da economia circular, da reutilização de produtos, o modelo de economia tradicional (economia linear) assenta apenas numa lógica de extração, produção e descarte dos produtos, não introduzindo aqui a reciclagem dos mesmos, num sistema aberta de economia, foi a partir disto que foi proposta a lógica cíclica e fechada (Reike, et al., 2018). Na Figura 2 é possível ver o contraste das filosofias aplicadas aos dois tipos de economia.

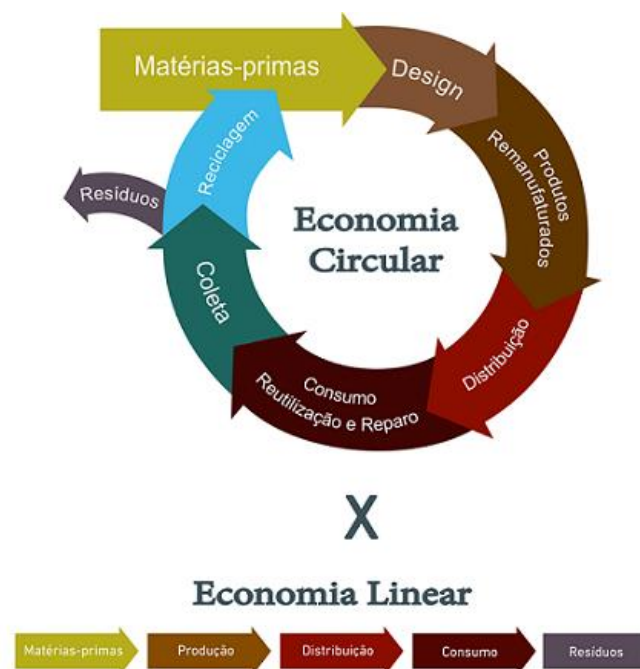


Figura 2 - Economias linear vs Economia circular (Direção-Geral das Atividades Económicas -DGAE))

Em países como Portugal, Reino Unido, Dinamarca e Suíça, o conceito de economia circular é principalmente aplicado para a gestão de resíduos, mas existem modelos de negócio onde se aplicam os conceitos de reutilização dos materiais com base no conceito circular de economia (Winans, et al., 2017).

2.3. A reciclagem do papel

A indústria da pasta e do papel contribui para a economia mundial, no entanto é ao mesmo tempo uma indústria que enfrenta uma pressão para que reduza as suas emissões

que causam poluição quer no ar, quer na água, e por outro lado, enfrenta também o desafio da desflorestação, uma vez que são necessárias vários milhões de árvores (cerca de 4 mil milhões) para a produção anual da matéria-prima virgem usada (Abushammala, et al., 2023).

Nos dias de hoje, a reciclagem, já é um processo bastante conhecido e estabelecido, na indústria da pasta e do papel. Na Europa, a reciclagem do papel já ocupa um espaço bastante significativo (Pivnenko, et al., 2015). Segundo os dados da *Confederation of European Paper Industries* (CEPI), que representa a indústria da pasta e do papel nos 27 países da União Europeia, aos quais se juntam a Noruega, Suíça e Reino Unido, o valor do papel reciclado, ao longo do ano, representa cerca de 70% (valor esse que aumentou cerca de 30% desde 1991) de todo o papel produzido ao longo do mesmo (Cepi statistics, 2023), com se verifica pelo gráfico da Figura 3.

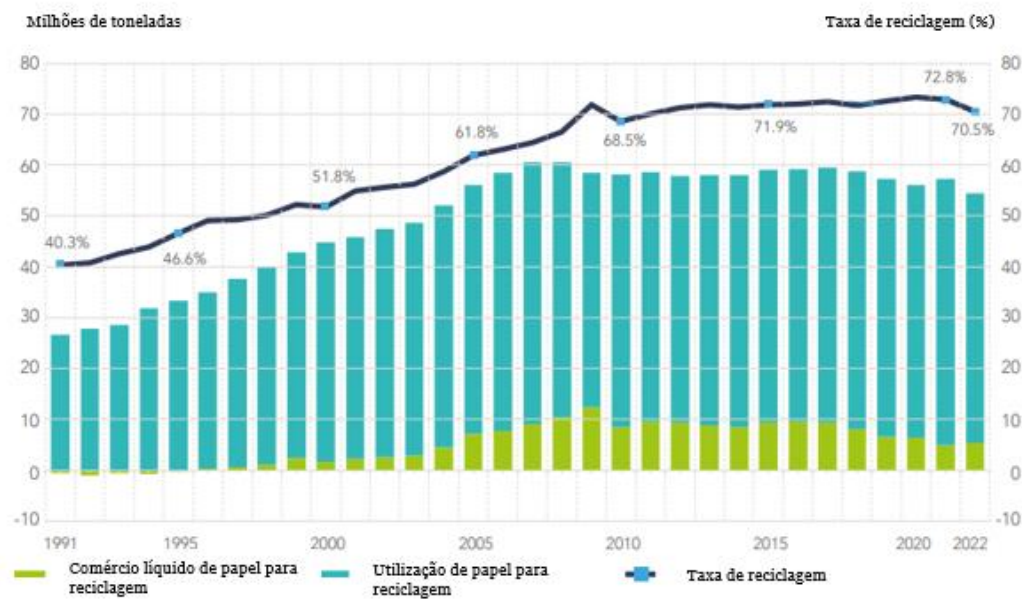


Figura 3 - Variação da percentagem média de reciclagem de papel ao longo dos anos (Adaptado de Cepi statistics, 2023)

A produção de papel, ou outros produtos derivados a partir de fibras recicladas permitem menor uso de energia e de água, assim como preservar a floresta, uma vez, que neste caso deixa de ser necessário recorrer a tanta quantidade de matéria-prima bruta para a produção, reduzindo assim a potencial desflorestação causada pelas necessidades da indústria (Čabalová, et al., 2011).

O grande desafio do uso de fibras obtidas a partir de papel reciclado é garantir que o que é produzido garante os requisitos e especificações que o consumidor procura, podendo ser necessário introduzir aditivos (Čabalová, et al., 2011).

2.4. Aditivos

Nos dias que correm, o papel e produtos à base de papel tornaram-se essenciais no quotidiano, e devido à sua importância e a uma necessidade maior para diferentes aplicações, têm surgido papéis de alta *performance*, que exigem propriedades melhoradas e distintas das originais. Por exemplo, o papel de embalagem, pode ser melhorado introduzindo aditivos que conferem resistência ao oxigénio, vapor de água, ou gordura, mas também que permitam melhorar a sua resistência mecânica (Seelinger & Biesalski, 2023).

De um modo geral, o papel é formado por uma rede de fibras de celulósicas que se interligam entre si através de diferentes mecanismos, que incluem ligações por pontes de hidrogénio, forças de Van der Waals, forças capilares e de interdifusão, mecanismos estes que são altamente sensíveis a alterações quando sujeitos há humidade (Seelinger & Biesalski, 2023).

2.4.1. Agentes de resistência em seco

A aplicação de aditivos de resistência a seco é uma forma eficaz de aumentar as propriedades de resistência mecânica de estruturas celulósicas. Os agentes de resistência a seco são geralmente solúveis em água, e podem ser aplicados na sua forma líquida, quer diretamente na suspensão fibrosa, quer na superfície húmida da folha após a sua formação (Lu, et al., 2020).

Quando adicionados por via húmida, estes agentes têm normalmente cargas iónicas. A interação destas cargas entre os agentes e a superfície das fibras de celulose é que os retém na folha de papel. Por outro lado, quando adicionados na superfície da folha a carga iónica não é fundamental para a retenção destes (Lu, et al., 2020).

2.4.1.1. Amido Catiónico

O amido (ver Figura 4) é um polímero de origem natural, biodegradável, com elevada disponibilidade, renovável e relativamente barato (Sharma, et al., 2020). Este é constituído por unidades de glucose, e é derivado de várias fontes vegetais, como o milho, o trigo e a batata, que é normalmente usado no fabrico do papel devido à sua capacidade de formar ligações por pontes de hidrogénio com as fibras de celulose, e acredita-se que a formação destas ligações seja o principal mecanismo para a ação do amido como agente de resistência em seco e em húmido (Francolini, et al., 2023).

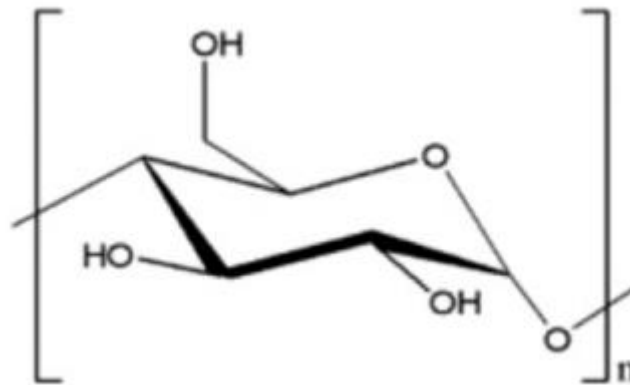


Figura 4 - Estrutura Química do Amido (Francolini, et al., 2023)

As propriedades de gelatinização, a capacidade de retrogradação, a sua cristalinidade e a sua estrutura química próxima da celulose fazem com que seja muito utilizado na indústria do papel (Pinto, et al., 2023; Sharma, et al., 2020). No entanto algumas das suas características fazem com que seja insolúvel na maior parte dos solventes à temperatura ambiente e instável a mudanças de pH, temperaturas e forças de corte, pelo que é necessário proceder a modificações químicas, incluindo a esterificação com grupos funcionais catiónicos, para obter o amido catiónico (AC) (ver Figura 5) (Sharma, et al., 2020).

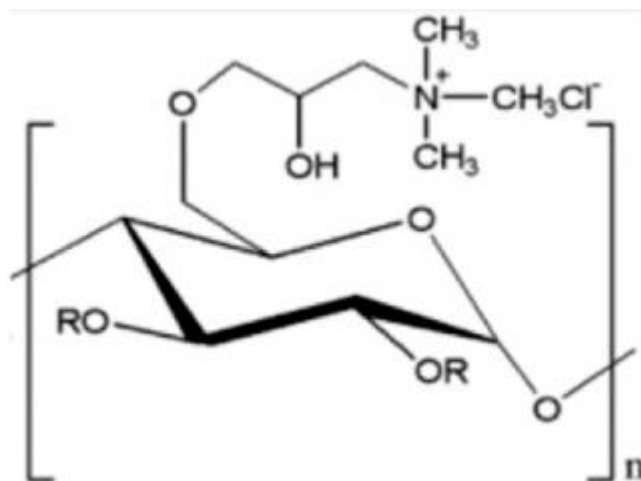


Figura 5 - Estrutura química do Amido Catiónico (Francolini, et al., 2023)

Para atingir os elevados níveis de retenção exigidos no fabrico do papel, esta modificação é necessária, através da reação com um agente de esterificação obtendo-se o AC positivamente carregado (Francolini, et al., 2023). Como resultado, consegue-se uma drenagem mais rápida na formação e uma melhor retenção dos finos e cargas

inorgânicas, o que se traduz numa melhoria das propriedades mecânicas do papel e uma menor poluição das águas residuais (Pinto, et al., 2023).

2.5. Isolamento térmico

A Agência Internacional de energia prevê um crescimento do consumo global de energia de cerca de 42% até 2050, o que se deve a inúmeros fatores, entre os quais, o rápido crescimento previsto da população até 2050 e, conseqüentemente, a este elevado aumento a necessária construção de habitações (Liuzzi, et al., 2023). Do lado das preocupações ambientais derivadas deste aumento da população está um maior aumento do consumo e conseqüente descarte dos produtos, mesmo antes do seu fim de vida (Islam & Bhat, 2019). A nível global estima-se que as habitações representem o consumo de 40% da energia, 25% da água e 40% dos recursos naturais mundiais e ainda que seja responsável por um terço da produção de dióxido de carbono, pelo que a redução do consumo de energia em edifícios tornou-se uma preocupação importante e constitui um desafio para as políticas no mundo atual (Islam & Bhat, 2019).

O isolamento térmico dos materiais de construção e o seu uso na construção de edifícios pode desempenhar um papel fundamental na redução do consumo de energia, estudos demonstram que o uso de materiais isolantes eficientes pode representar uma redução de até 65% do consumo de energia em edifícios domésticos, fruto da redução dos ganhos e perdas térmicas (Islam & Bhat, 2019).

Por outro lado, o crescimento da população leva a um inevitável aumento da urbanização e da industrialização, o que faz com que os níveis de poluição sonora aumentem, sendo esta responsável por vários problemas de saúde, entre os quais, o stress, a hipertensão arterial, doenças coronárias e acidentes vasculares cerebrais. Um estudo feito revelou que 65 % dos cidadãos europeus esteja exposto a este tipo de problemas, pelo que aplicação de leis para obrigar ao isolamento acústico de edifícios se tenha tornado fundamental (Islam & Bhat, 2019).

Considerando a atual necessidade de conversão e reaproveitamento de resíduos para a transformação em novos recursos e materiais, a reciclagem de papel e sua transformação em novos produtos, incluindo aquela obtida pelo método de espuma, apresentam um excelente potencial enquanto isolantes térmicos e acústicos (Miranda-Valdez, et al., 2023), enquanto se aplicam técnicas mais inovadoras e eficientes para a sua produção (Liuzzi, et al., 2023).

2.5.1. Métodos laboratoriais para a avaliação do isolamento térmico

Os materiais porosos para o isolamento térmico apresentam propriedades que lhes permitem a preservação de calor dentro de edifícios (Wang, et al., 2023). Isto deve-se ao facto de serem constituídos por uma matriz sólida com poros interligados, onde a baixa condutibilidade térmica do gás contido nestes lhe confere uma boa capacidade para este fim (Rashidi, et al., 2018; Wang, et al., 2023).

Existem diversas possibilidades para medir a condutibilidade térmica, cada uma delas adequadas a uma gama limitada de materiais, dependendo das propriedades térmicas e da temperatura média (Vimmrová, et al., 2002). De um modo geral existem duas técnicas básicas para a medição, a técnica de medição em estado estacionário e a técnica de medição em estado não estacionário. Em estado estacionário as medições são efetuadas quando o material está em completo equilíbrio, isto é, quando os valores estudados se encontram constantes, por outro lado em estado não estacionário a medição dos valores é feita durante o processo de aquecimento (Vimmrová, et al., 2002).

2.5.1.1. Método de ensaio em caixa quente

O principal objetivo deste método é medir propriedades térmicas dos materiais, tais como valores que permitem calcular o final a condutibilidade térmica de um material, em estado estacionário (Frawley & Kennedy, 2007).

No caso específico deste método existem dois tipos de caixas quentes que permitem executar os testes, uma chamada de caixas quentes calibradas e outro chamado caixas quentes vigiadas (Frawley & Kennedy, 2007). Para o primeiro caso, caixas quentes calibradas, a forma de testagem consiste em duas câmaras, em que um dos lados está quente e outro frio, cujas paredes de ambos os lados têm um revestimento com uma camada espessa de um material isolante, normalmente poliestireno expandido, que serve para reduzir ao mínimo possível as perdas de calor para o ambiente. O provete de ensaio é fixado num painel localizado entre as duas câmaras, painel esse também isolado. No lado quente é colocada uma fonte de calor, e como o ar para circular entre as duas câmaras tem de atravessar a amostra, as diferenças de temperaturas medidas em intervalos de tempo específicos, são medidas por termopares, permitindo assim no final dos ensaios calcular a condutibilidade térmica do material em estudo (Frawley & Kennedy, 2007). Na Figura 6 é possível ver o esquema simplificado deste tipo de caixa.

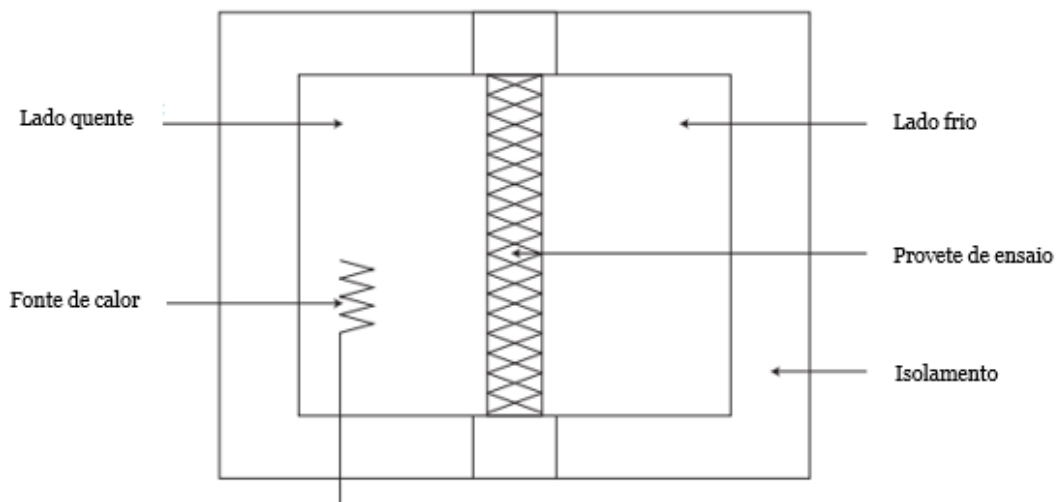


Figura 6 - Esquema simplificado de uma caixa quente calibrada (Adaptado de Frawley & Kennedy, 2007)

Por outro lado, numa caixa quente vigiada, a principal diferença em relação ao método anterior é que, no lado quente, existem duas câmaras, uma no interior da outra. Estes dois compartimentos do lado quente são mantidos à mesma temperatura, o que faz com que a perda de calor através das paredes seja quase nula, e aqui a velocidade do ar é controlada colocando um defletor de cada lado do provete. É ainda colocado um permutador de calor do lado frio para manter a temperatura constante, este método é geralmente mais preciso. Aqui o valor da condutibilidade térmica é calculado pelas diferenças de temperatura registadas entre a caixa fria e as duas câmaras da caixa quente. Uma das desvantagens deste método é que os provetes têm de ser de menores dimensões que o anterior (Frawley & Kennedy, 2007). Na Figura 7 é possível ver o esquema simplificado deste tipo de caixa.

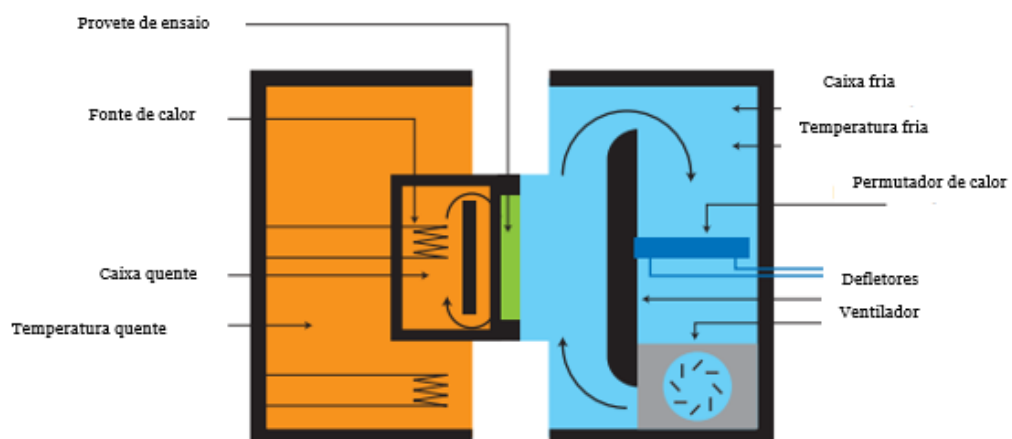


Figura 7 - Esquema simplificado de uma caixa quente calibrada (Adaptado de Frawley & Kennedy, 2007)

2.5.1.2. Métodos da placa quente protegida e fluxométrico

Os métodos da placa quente protegida e fluxométrico, têm como princípio a criação de um gradiente de temperatura através de duas placas, uma quente e outra fria, produzindo um fluxo de calor em condições de estado estacionário.

O princípio de funcionamento do método da placa quente protegida passa por criar uma diferença de temperatura através de duas placas, uma das quais quente e outra fria, o que permite produzir um fluxo de calor entre as duas até se atingir as condições de estado estacionário. As vantagens deste método é, por um lado, permitir que a condução de calor acontece de forma unidimensional pelo provete em teste, que é garantido pelo isolamento de todo o equipamento, como se vê pela Figura 8, onde o provete ou corpo de prova é colocado entre as duas placas e se procede ao isolamento, com algum material com boa capacidade para este fim, de todo o restante equipamento. A outra vantagem é a obtenção da condutibilidade térmica de provetes com valores inferiores a 0,1 W/m.K. (Murata, et al., 2018).



Figura 8- Esquema de montagem de um sistema do método da placa quente protegida (Murata, et al., 2018)

Por outro lado, o método fluxométrico vai medir temperaturas que vão permitir obter a resistência térmica, sendo que para o posterior cálculo da condutibilidade térmica é necessário fazer a sua dedução através da equação, segundo a lei de Fourier (ver equação 1):

$$\lambda = \frac{q}{\frac{\Delta T}{e}} \quad (1)$$

onde λ é condutibilidade térmica (W/m.K), ΔT é a diferença de temperatura entre as duas faces do provete medida em Kelvin (K), q é a densidade do fluxo de calor (W/m²), A é a área do provete (m²) e por fim e a espessura da parede de isolamento.

As vantagens deste método são a maior rapidez (o regime permanente é atingido mais rapidamente) e a simplicidade de medição (diferentes possibilidades de configuração do equipamento) (Murata, et al., 2018).

3. Materiais e Métodos

3.1. Preparação das estruturas celulósicas ultra-porosas

3.1.1. Preparação da pasta de fibras recicladas

Para se preparar a mistura de fibras 100% recicladas a partir de folhas impressas, obtidas no papelão da UBI, começou-se por determinar o teor de matéria seca (TMS) e posteriormente proceder à hidratação das mesmas. Para isso, foi necessário rasgar as folhas em pequenos pedaços e colocá-los num copo, previamente pesado, até se perfazer a massa pretendida, 360 g de massa seca. De seguida, neste copo, colocaram-se 4 L de água desmineralizada, durante 24 horas, para permitir humedecer as folhas, passado este tempo procedeu-se há desintegração refinador/desintegrador *Valley* (ver Figura 9).



Figura 9 - Refinador/desintegrador *Valley*

No refinador/desintegrador *Valley* foram colocados 16 L de água desmineralizada, ligando-se o equipamento de seguida. Para começar a desintegração, foi-se adicionando sucessivamente, a suspensão preparada anteriormente, e, perpez-se o volume total de 23 L com água desmineralizada, ficando a desintegrar durante 30 minutos.

3.1.2. Amostra de 100% de Fibra Reciclada

Num copo colocaram-se 500 mL da mistura das fibras recicladas (FR) preparadas, ao qual se adicionaram 200 mL de água desmineralizada e 16 mL do surfactante Lauril Sulfato de Sódio (SLS). Posteriormente agitou-se esta mistura durante 20 minutos a 1500 rotações por minuto (RPM). Passado este tempo transferiu-se para um formador de folhas laboratorial, previamente preparado com um mata-borrão sobre a teia (Martins, 2022). De seguida drenou-se a água da suspensão fibrosa, a vácuo, durante 4 minutos. Cada uma das amostras formadas (ver Figura 10) foi de seguida colocada, durante 24 horas, numa estufa à temperatura de 30 °C. Foram preparadas 3 provetes deste tipo de amostra.



Figura 10 - Amostra de FR no formador de folhas laboratorial

3.1.3. Amostras de fibras reciclada com aditivo Amido Catiónico

Para tentar melhorar as propriedades das amostras produzidas por este processo de espuma, procedeu-se à adição de um aditivo de resistência em seco, neste caso um de origem natural, o AC.

3.1.3.1. Preparação do amido catiónico

Antes de se poder incorporar o aditivo na pasta foi necessário preparar o cozimento do aditivo AC. Foi preparada uma solução de 3% em relação à massa de fibra em seco (Gaiolas, 2004). Esta foi preparada, colocando, num copo, 1 g de AC ao qual se adicionou 20 mL de água destilada e posteriormente colocou-se, com agitação, num banho de água previamente aquecido, numa placa de aquecimento, à temperatura de 95 °C e manteve-se assim durante 30 minutos e com agitação contínua. A solução, após passado este tempo, apresentou uma textura gelatinosa, à qual foi adicionada 80 mL de água destilada à temperatura ambiente, mantendo a agitação contínua.

3.1.3.2. Incorporação do aditivo à suspensão fibrosa

Para a preparação da amostra de 100% de fibra reciclada com Amido Catiónico (FRA), num copo colocaram-se 500 mL da pasta de fibras recicladas preparada, ao qual se adicionou 200 mL de água desmineralizada, e ainda 25 mL da solução de AC preparada de acordo com a secção anterior, sendo de seguida agitada, durante 10 minutos a 1500 RPM. Terminado este tempo, e mantendo a agitação, adicionaram-se 16 mL de SLS e deixou-se em agitação durante mais 20 minutos. De seguida transferiu-se a suspensão para o formador de folhas laboratorial, preparado com mata-borrão sobre teia, e drenou-se a água a vácuo durante 4 minutos. Cada uma das 3 amostras preparadas por este procedimento (ver Figura 11) foi colocada a secar em estufa a 30 °C durante 24 horas.



Figura 11 - Amostra de FRA no formador de folhas laboratorial

3.1.3.3. Amostra de Fibra Reciclada Refinada com aditivo Amido Catiónico

Para preparar as amostras com este procedimento foi necessário primeiro proceder à refinação das fibras recicladas preparadas anteriormente. Preparou-se, num refinador PFI, uma pasta de fibras refinadas com uma consistência de 10% e 500 revoluções PFI, seguindo a norma ISO 5264-2 (2011).

Para preparar a amostra de fibra refinada co Amido Catiónico (FRR), da fibra refinada, colocaram-se num copo 8 g, à qual se adicionam 200 mL de água desmineralizada e 25 mL da solução de AC preparado. Deixou-se esta suspensão em agitação durante 10 minutos a 1500 RPM, à qual, se adicionaram 16 mL de SLS e deixou-se agitar durante mais 20 minutos. De seguida transferiu-se a suspensão para o formador de folhas laboratorial, preparado com mata-borrão sobre teia, e deixou-se drenar a água a vácuo durante 4 minutos. Por fim, levou-se cada uma das 3 amostras produzidas (ver Figura 12) foram colocadas numa estufa durante 24 horas a uma temperatura de 30 °C.

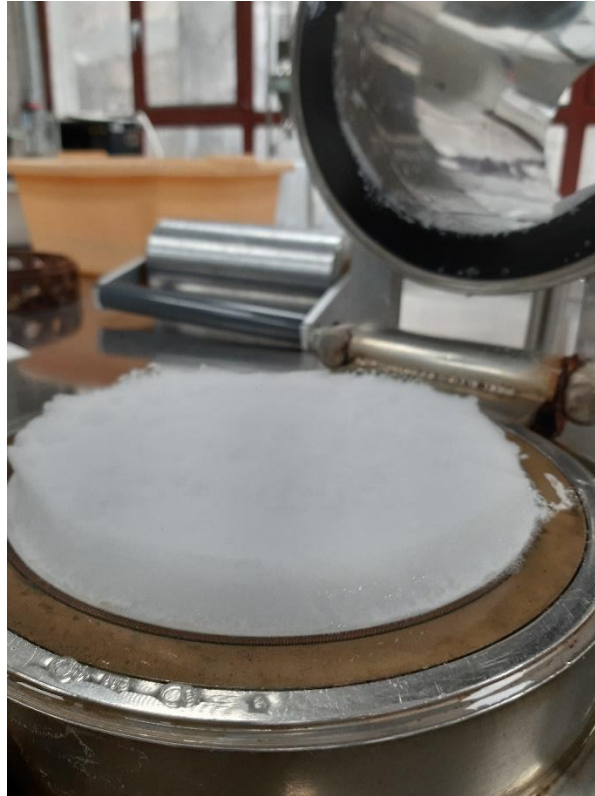


Figura 12 - Amostra de FRR no formador de folhas laboratorial

3.2. Caracterização das Estruturas Celulósicas Ultra-porosas

3.2.1. Gramagem

Para se determinar a gramagem das amostras obtidas é necessário aplicar a equação 2.

$$Gramagem = \frac{massa (g)}{área (m^2)} \quad (2)$$

Onde a massa de cada uma das amostras produzidas foi determinada pesando cada uma numa balança analítica (ver Anexo A), e a área de cada uma das amostras é a mesma do formador de folhas laboratorial (0,02138 m²).

3.2.2. Espessura

Para a determinação da espessura, em seco, de cada uma das amostras usou-se um paquímetro analógico e fizeram-se medidas em 5 zonas diferentes de cada um dos provetes circulares preparados, uma vez que, estas não são uniformes em toda a sua área, para assim se obter um valor médio desta propriedade, todos os valores medidos encontram-se no Anexo B.

Para os ensaios de condutibilidade térmica a espessura foi medida com o paquímetro analógico, já com as amostras preparadas para estes ensaios, no ponto onde esta apresenta o seu menor valor, de forma que a que as estruturas ocupem todo o volume entre as caixas usadas para o seu ensaio.

3.2.3. Resistência mecânica

Para o estudo das propriedades mecânicas das amostras, nomeadamente, o índice de tração (N.m/g), o módulo de Young (MPa) e o alongamento (%) usou-se a máquina de teste universal de tração Thwing-Albert® (ver Figura 13) em ambiente condicionado.



Figura 13 - Máquina de teste universal de tração Thwing-Albert®

Para o ensaio recortaram-se, com um bisturi, 5 provetes de 1,5 cm x 11 cm para as amostras de FR e FRR e 6 provetes do mesmo tamanho para a amostra de FRA (ver Figura 14), para manter ao máximo todas as suas propriedades, e posteriormente colocados na máquina de teste entre as duas garras, previamente afastadas 5 cm, e alinhadas na mesma direção e quando as amostras rompem os resultados são de seguida processados pelo próprio equipamento.



Figura 14 - Provetes para o ensaio de tração das amostras a) FRA, b) FR, c) FRR

3.3. Sistema de medição da condutibilidade térmica

Neste tópico vai fazer-se uma descrição detalhada do sistema construído para a medição da condutibilidade térmica das amostras celulósicas preparadas. Começando primeiro por fazer uma descrição geral do sistema e explicando o propósito do mesmo, e de seguida fazendo uma descrição detalhada da construção de cada uma das placas de alumínio que foram usadas e da forma como foram colocadas nas caixas de *Medium Density Fiberboard* (MDF). De seguida explica-se a colocação dos termopares usados para efetuar a medição das diversas temperaturas do sistema. Depois fez-se a descrição da preparação dos provetes para o ensaio no sistema construído e das diferentes espessuras em que estes foram ensaiados, e por fim a forma de cálculo da condutibilidade térmica de cada um dos provetes em ensaio.

3.3.1. Construção do sistema

Para se poder calcular a condutibilidade térmica das estruturas fibrosas obtidas, foi necessário construir um sistema para a realização dos ensaios para determinar o valor desta. O sistema construído teve por base a necessidade de se testarem provetes de diferentes espessuras, uma vez que o método usado para a produção das estruturas celulósicas não permite obter provetes de espessuras iguais, mesmo usando o mesmo método experimental. Tendo em conta este facto, de se obterem estruturas de espessuras diferentes, o sistema construído (ver Figura 15), teve a capacidade de se poder alterar a espessura dos provetes em ensaio.

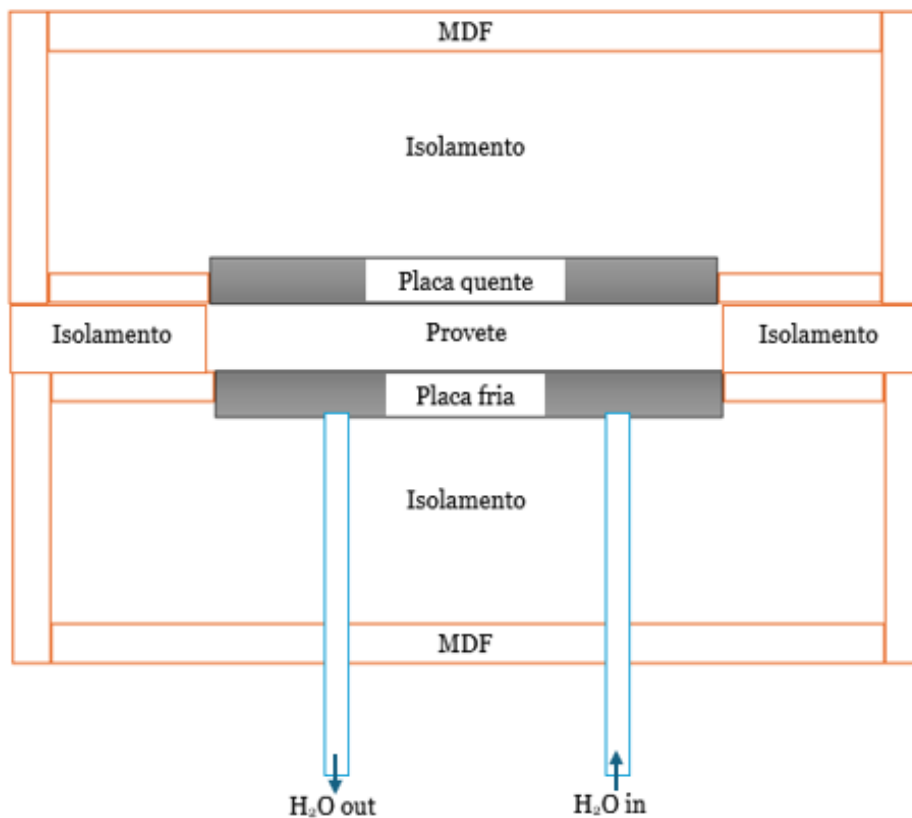


Figura 15 - Representação esquemática do sistema de medição da condutibilidade térmica construído

Como se vê na Figura 15, o sistema construído teve por base a construção de duas caixas de MDF fechadas em todos os lados, nas quais na parte superior de cada uma delas foi colocada uma placa de alumínio de 11x11 cm fixadas por parafusos na parte inferior de cada uma das caixas.

Em cada um dos cantos das caixas foi colocado um parafuso, de tamanho suficiente para atravessar as duas caixas, o qual na caixa da placa quente pudesse ser apertado. No espaço entre as duas caixas, onde vai ser colocado o provete, nesse mesmo parafuso foram colocadas porcas, que permitiam variar o espaço entre as duas caixas, espaço esse que corresponde a espessura de cada provete ensaiado.

Para minimizar quaisquer perdas que pudessem ocorrer no sistema, no interior das caixas e no espaço que existe entre as duas caixas, depois de colocado o provete entre elas, foi colocado isolamento, lã de rocha.

3.3.1.1. Placa fria

A placa fria do sistema, constituída por duas placas de alumínio, nas quais foi feito um circuito, por CNC, para permitir a circulação de água no seu interior, como demonstra a Figura 16.



Figura 16 - Circuito realizado pela CNC para a circulação de água na placa fria

Estas duas placas foram sobrepostas uma há outra, sendo aparafusadas em cada um dos quatro cantos, e ainda vedadas por silicone em volta de toda a placa, para evitar possíveis fugas de água que circula dentro da mesma. No final do circuito desenhado pela CNC, que se vê na Figura 16, colocou-se uns tubos cilíndricos de metal apertados e vedados por fita de teflon, e colocado isolamento em toda a sua volta, como se vê na Figura 17.



Figura 17 - Caixa da placa fria antes de ser fechada

Por fim conectaram-se uns tubos de Policloreto de Vinilo (PVC) aos tubos metálicos, um deles ligado a uma torneira de água corrente, que permite a água circular no circuito desenhado e no final desse circuito, o tubo vai permitir a saída da água. Por fim, a caixa que se vê na Figura 17 foi fechada com MDF.

3.3.1.2. Placa quente

Esta placa, também feita de alumínio, na qual na parte inferior foram colocadas 3 resistências ligadas em série, distribuídas de forma uniforme ao longo da placa, de forma a permitir uma boa distribuição do calor gerado por toda a placa, e no final do circuito adicionado um termóstato de 120 °C, como se vê na Figura 18.

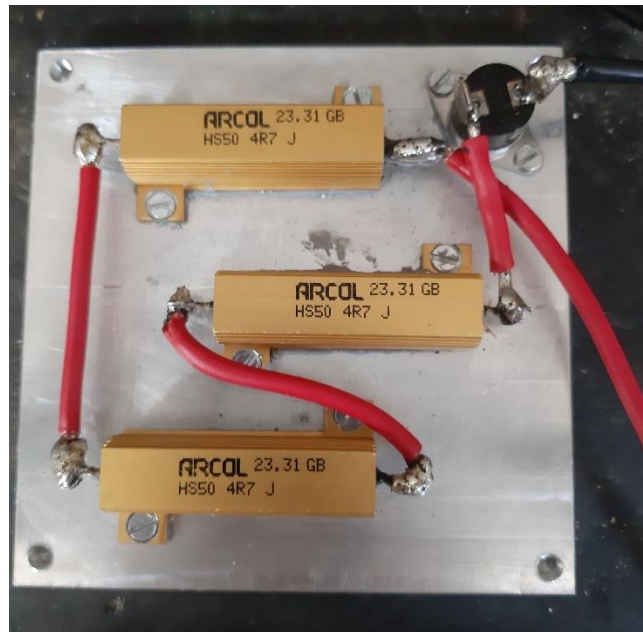


Figura 18 - Circuito de resistências e termóstato da placa quente

As resistências colocadas nesta placa vão permitir o aquecimento da mesma através do efeito de Joule, que é um processo que permite a transformação da energia elétrica em energia térmica (calor), quando uma corrente elétrica passa por um fio condutor. Este fenómeno acontece quando a corrente elétrica percorre um sólido ou líquido, com condutividade finita, a energia elétrica é convertida em calor através das perdas resistivas do material, sendo o calor gerado à medida que os eletrões de condução transferem essa energia para os átomos do material condutor, através de colisões entre eles. Quando uma corrente elétrica passa ao longo destes condutores, a resistência elétrica do material faz com que parte da energia seja dissipada na forma de calor, produzindo o efeito Joule (Jouhara, et al., 2021).

Na parte inferior da placa, onde foram colocadas as resistências, isolou-se todo o restante espaço, no qual onde não estavam as mesmas, isolou-se esse espaço com lã de rocha, como é possível de ver na Figura 19.

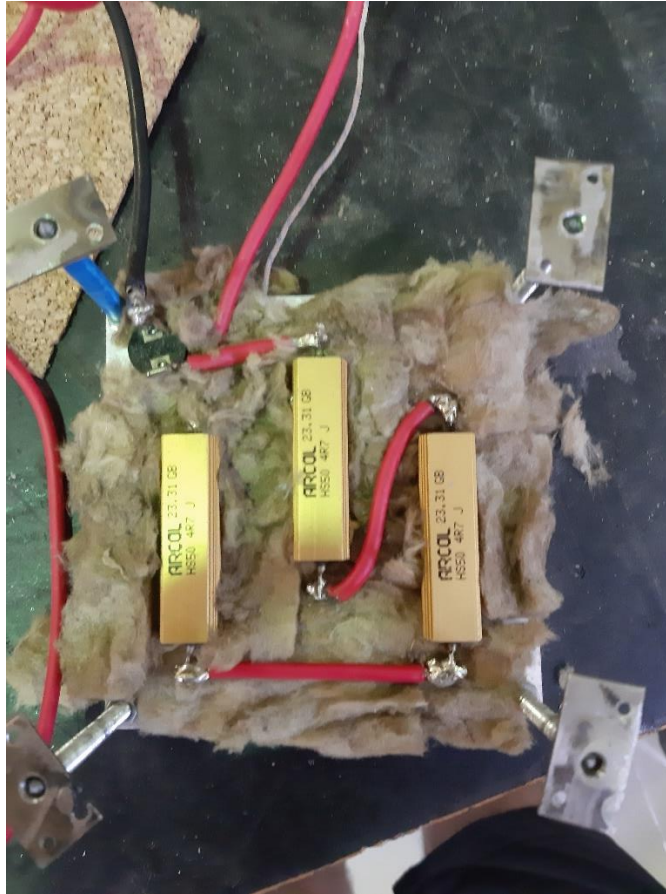


Figura 19 - Isolamento feito na parte inferior da placa quente em volta do circuito realizado

Depois ligadas, estas resistências foram alimentadas por uma fonte de tensão externa, que permitiu fornecer energia elétrica ao sistema, aquecendo assim a placa de alumínio.

3.3.1.3. Montagem das duas caixas

Depois de preparadas as duas placas, procedeu-se então há montagem das duas caixas, numa delas colocada a placa fria, e na outra a placa quente, em cada uma delas, para além do referido anteriormente, foram colocados termopares para permitir medir as diversas temperaturas de todo o sistema.

Termopares são dispositivos termoelétricos que podem medir continuamente mudanças de temperatura, e que consistem em dois condutores metálicos de materiais diferentes que são unidos numa das extremidades (Hu, et al., 2006). Dois metais diferentes, quando unidos, formam uma junção que permite produzir uma força eletromotriz, que varia com a temperatura à qual esta junção é exposta (Hathawy & Long, 2005).

Para este sistema de medição foram usados termopares do tipo T, constituídos por um fio de cobre e outro de constantan (liga metálica composta por 60% de cobre e 40% de níquel), colocou-se um termopar da face inferior da placa fria (PFC), aproximadamente

no centro da mesma, um termopar da face superior da placa fria (PFP), que ficou depois então junto ao provete, quando este foi colocado no sistema. Fez-se da mesma forma na placa quente, um termopar na face inferior da placa quente (PQC), e um termopar na face superior da placa quente (PQP). Na madeira, na parte interior da caixa, após todo o isolamento colocado entre as placas e a mesma no interior das caixas, colocou-se um termopar no isolamento caixa da placa fria (PFI), e um termopar no isolamento da caixa quente (PQI). Por fim colocou-se um termopar na entrada de água (H₂O in), e outro termopar na saída de água (H₂O out), da placa fria do sistema no interior dos tubos de PVC, para permitir medir a variação da temperatura da água. Na Figura 20 é possível ver uma representação esquemática da forma como foram colocados todos estes termopares.

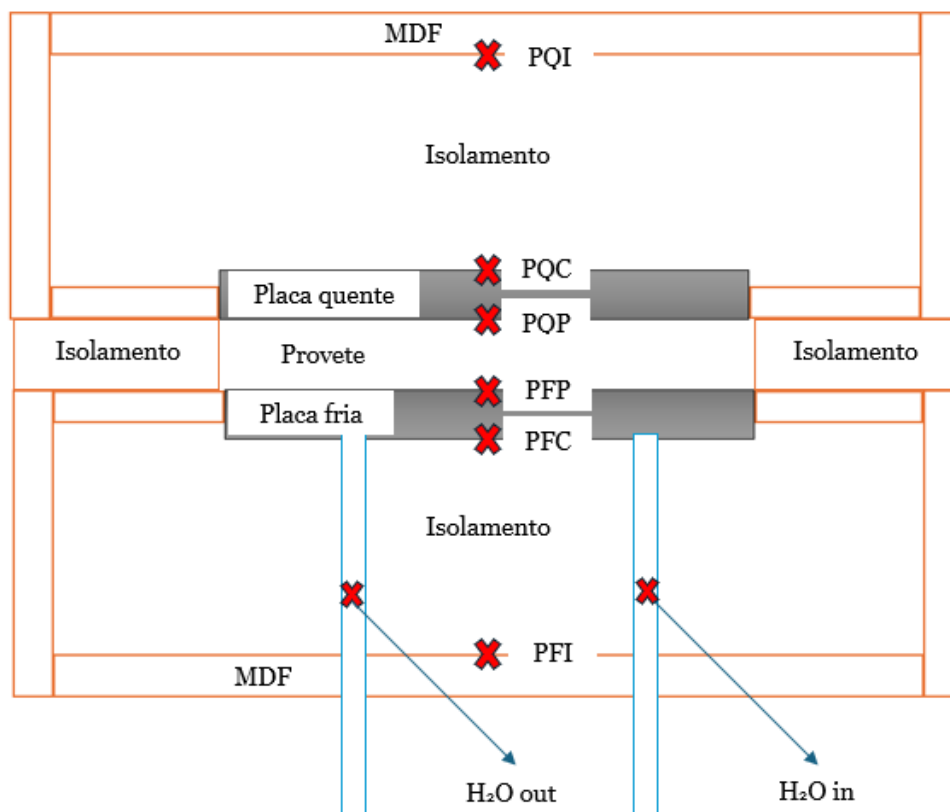


Figura 20 - Representação esquemática dos termopares colocados no sistema

Depois de preparado todo o sistema e colocados os termopares nas respetivas posições, foram então juntas as duas caixas, como referido anteriormente, com um sistema de ajuste com porcas, para permitir ajustar a separação entre as duas de acordo com a espessura dos provetes de ensaio, que foram colocados entre as duas placas e colocado isolamento em volta dos mesmos para cobrir o restante espaço, como se observa na Figura 21.

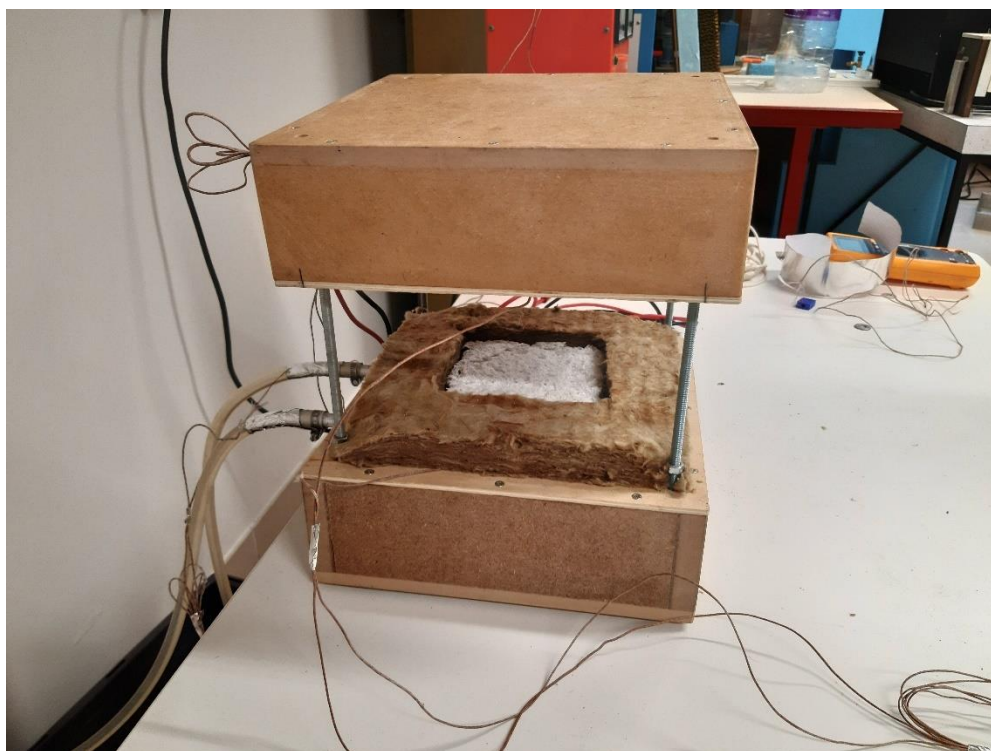


Figura 21 - Sistema de medição da condutibilidade térmica antes de iniciar um ensaio

3.3.1.4. Preparação dos provetes de ensaio

As amostras celulósicas obtidas no formador de folhas laboratorial apresentam uma forma circular e para a testagem no sistema preparado necessitam de ter uma forma quadrada, de 11x11 cm. Para isso as amostras preparadas depois de secas, foram então cortadas com um bisturi, para tentar minimizar qualquer deterioração das mesmas aquando do corte, para manter assim ao máximo todas as suas propriedades, na Figura 22 é possível ver essa preparação.



Figura 22 - Provete de FR cortado para o ensaio de condutibilidade térmica

Para ensaiar, foram preparados três provetes de cada tipo de amostra preparada (FR, FRA, FRR). Estes foram ensaiadas, na sua espessura máxima após a sua secagem, de forma a preencher todo o volume entre as duas placas. No caso dos provetes de FR e FRA, para além da sua espessura máxima, este foram também ensaiados com uma compactação de 50% relativamente à espessura inicial. Para as amostras de FRR, esta compactação não foi realizada, uma vez, estas, na sua espessura inicial já apresentarem uma espessura bastante reduzida. As amostras, ou provetes, testados e as suas respetivas espessuras e tipo de fibra, estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Espessura das amostras testadas com e sem compactação

Nome da Amostra	Tipo de fibra	Espessura inicial (mm)	Espessura compactada (mm)
A	FRA	16,0	8,0
B	FRA	16,0	8,0
C	FRA	15,0	7,5
D	FR	10,0	5,0
E	FR	15,0	7,5
F	FR	14,0	7,0
G	FRR	3,0	-
H	FRR	3,0	-
I	FRR	3,0	-

3.3.1.5. Ensaio dos provetes no sistema desenvolvido

Os provetes preparados anteriormente foram então colocados no sistema desenvolvido para a medição da sua condutibilidade térmica. Estes foram então colocados junto à placa fria, com o isolamento à sua volta (ver Figura 21), e fechado com a caixa da placa quente (ver Figura 23).

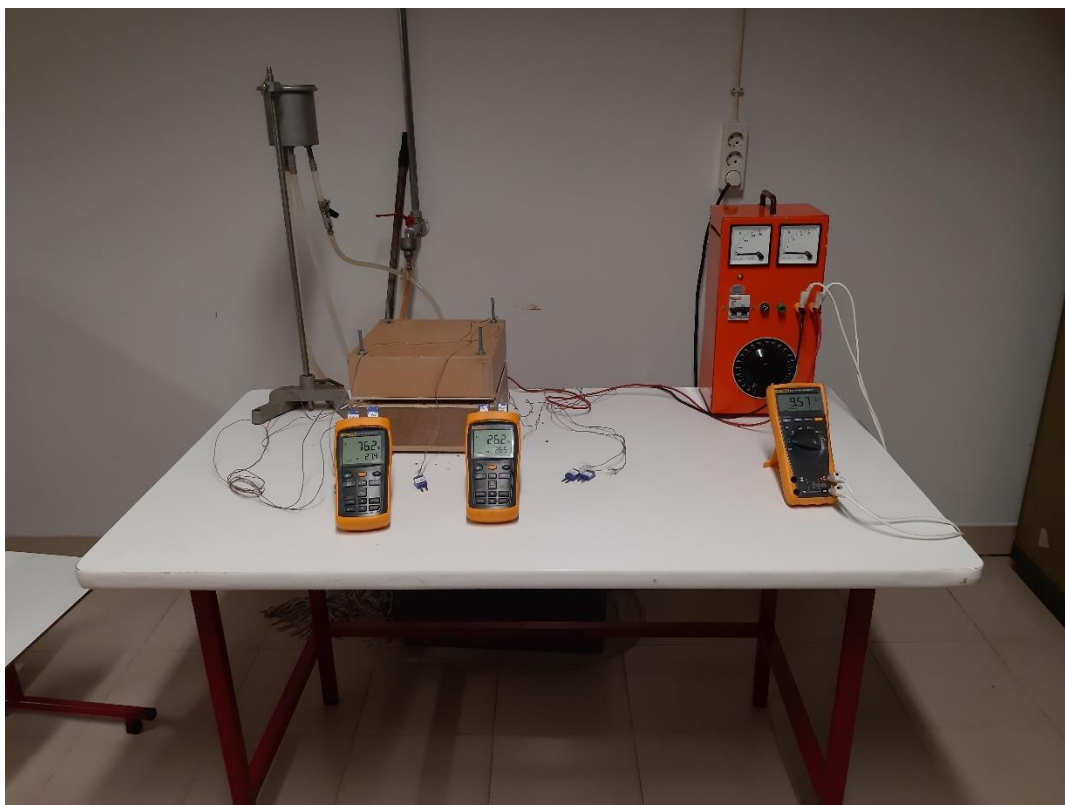


Figura 23 - Sistema de medição da condutibilidade térmica em funcionamento

Como se vê na Figura 25, usou-se uma fonte de tensão, para alimentar o circuito das resistências elétricas, medindo o valor de tensão a cada instante com um multímetro digital. Para a medição direta das temperaturas registadas pelos termopares usou-se *Dataloggers*, que apresentam diretamente no seu ecrã os valores de temperatura medidos pelos termopares.

De seguida procedeu-se, então, há ligação do sistema, em primeiro lugar, ligou-se a fonte de tensão, para permitir fornecer a energia elétrica às resistências, e de seguida procedeu-se à abertura da torneira de água, para permitir a sua circulação no circuito interior realizado na placa fria.

Depois do sistema estar em pleno funcionamento (ver Figura 25), foi-se medindo as temperaturas, através dos termopares, e foi necessário esperar que estas atingissem o regime permanente para se iniciar o registo dos valores. Este registo foi efetuado da seguinte forma: medindo os valores de temperatura de cada um dos termopares 5 vezes a cada 3 minutos, registando também a tensão que a fonte fornecia em cada um desses intervalos, e registando o volume de água que passava pela placa fria, todos os valores registados encontram-se no Anexo C. Este tipo de registo permitiu também verificar que o regime permanente foi atingido. Foram realizados 15 ensaios para determinar a condutibilidade de cada um dos provetes, quer na sua espessura inicial, quer quando estes foram compactados.

3.3.2. Cálculos da condutibilidade térmica dos provetes

Depois de testados os provetes no sistema preparado para o seu ensaio foi necessário proceder aos cálculos para determinar a condutibilidade térmica dos mesmos. Para isso vai usar-se a lei de Fourier, que diz que o fluxo de calor através de um material varia de forma proporcional à variação de temperatura, isto é, que o fluxo de calor flui de um corpo de maior temperatura para um corpo de menor temperatura. Para além disso, a quantidade de calor que flui é inversamente proporcional à espessura do condutor (Pifer & Aurani, 2015). A lei formulada por Fourier é dada matematicamente pela equação 3:

$$q = A * k * \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

onde q (W) é o calor que atravessa o provete por condução, A (m²) é a área da secção transversal do provete, k (W/m.K) é a condutibilidade térmica do provete em ensaio, Δx (m) é a espessura do provete e ΔT (K) a variação de temperatura entre a zona mais quente e a mais fria.

No caso específico dos provetes ensaiados neste sistema, e sendo o objetivo calcular a condutibilidade térmica das amostras celulósicas obtidas e rearranjando a equação 3 para o cálculo da condutibilidade térmica obtém-se com a equação 4:

$$k = \frac{q * \Delta x}{A * \Delta T} \quad (4)$$

onde Δx (m) vai ser dado pela espessura de cada um dos provetes ensaiados (ver tabela 1), ΔT (K) vai ser dada pela diferença entre PQP e PFP (PQP-PFP), A (m²) dada pela área dos provetes ensaiados (0,0121 m²) e por fim o calor q (W) vai ser dado pela equação 5:

$$q = P_{elétrica} - q_{perdas} \quad (5)$$

onde $P_{elétrica}$ (W) vai ser obtida através de uma derivação da primeira lei de Ohm, onde esta vai ser dada pelo quociente entre o quadrado da tensão fornecida pela fonte de tensão (V) e a resistência total do circuito de resistências colocado na placa quente (Ω), medida por um multímetro digital, com um valor de 14,1 Ω , como demonstrado pela equação 6:

$$P_{elétrica} = \frac{V^2}{R} \quad (6)$$

Por fim, o calor perdido pelo sistema (q_{perdas}) na equação 6, vai ser obtido aplicando novamente a lei de Fourier, neste caso para calcular as perdas de calor que acontecem na caixa da placa quente, que vai ser dado pela equação 7:

$$q_{perdas} = A * k_{isolante} * \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (7)$$

onde A (m^2) é a área da placa quente ($0,0121 m^2$), $k_{isolante}$ ($W/m.K$) é a condutibilidade térmica do material usado no isolamento da caixa (lã de rocha), que pode variar entre os $0,030$ e $0,040 W/m.K$ (Jelle, 2011), e por isso para este cálculo utilizou-se um valor intermédio de $0,035 W/m.K$, Δx (m) a espessura do isolamento usado na caixa, que está entre a face inferior da placa quente e o final da caixa, com $0,06 m$ e por fim ΔT a variação de temperatura neste mesmo espaço (PQI - PQC).

4. Resultados e discussão

4.1. Estudo das propriedades das amostras celulósicas

4.1.1. Propriedades estruturais

4.1.1.1. Gramagem e Espessura

Após produzidas as 3 amostras para cada tipo de procedimento feito, e ainda antes do recorte das mesmas para os ensaios de condutibilidade térmica, procedeu-se ao cálculo da gramagem através da equação 2, e mediu-se a sua espessura e retirou-se o seu valor médio para cada tipo de amostra preparada, e obtiveram-se os resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3 respetivamente.

Tabela 2 - Gramagem média das amostras preparadas

Amostra	Gramagem média (g/m²)	Desvio Padrão
FR	358	± 2, 4
FRA	424	± 3,7
FRR	51,0	± 2,3

Tabela 3 - Espessura média das amostras preparadas

Amostra	Espessura média (mm)	Desvio Padrão
FR	14,3	± 1,0
FRA	16, 7	± 1,5
FRR	6,8	± 1,0

Como se verifica pela análise da Tabela 2 as amostras de FR e FRA apresentam uma gramagem elevada. Quando comparadas as duas é possível ver que a gramagem da amostra à qual foi adicionado o aditivo é superior, o que indica que quando é adicionado o AC verificou-se uma maior retenção das fibras no mata-borrão, o que pode indicar que houve uma maior ligação entre as fibras. Já no caso da amostra refinada, FRR, mesmo com o aditivo, verificou-se que esta apresentou baixa gramagem quando comparada com as outras duas. Isto poderá dever-se ao facto de apesar de serem colocadas 8 gramas de fibra no início do procedimento, no final, a estrutura apenas apresenta uma massa média

1,091 g, como pode ser consultado no Anexo A, o que é indicativo que a refinação gerou bastantes finos, que poderão ter sido drenados através da teia.

Relativamente à espessura, e pela análise da Tabela 3, verificou-se que a adição do aditivo na amostra FRA permitiu o seu aumento quando comparado com o da amostra FR. No que diz respeito à amostra FRR esta propriedade diminuiu, sendo a menor dos três tipos de estruturas preparadas.

4.1.2. Ensaios de resistência mecânica

4.1.2.1. Índice de Tração e Força Máxima suportada

Após realizados os ensaios na máquina de teste obtiveram-se os resultados da Figura 24 para o índice de tração das amostras.

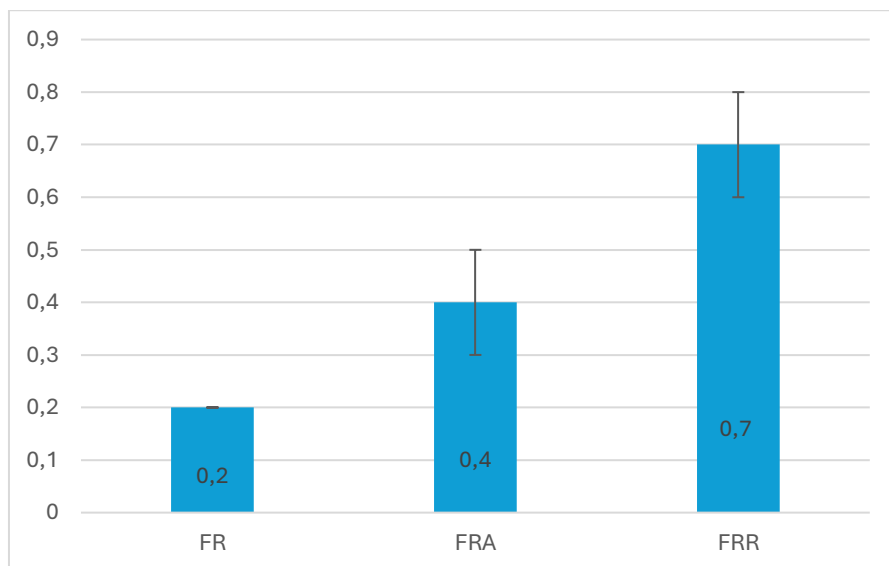


Figura 24 - Índice de Tração (N.m/g) das amostras preparadas

Pela análise da Figura 24 é possível verificar que a adição do aditivo à amostra de FR produzindo as amostras de FRA permitiu aumentar a resistência à tração da amostra, para o dobro do valor, o que era o pretendido com este agente de resistência em seco. Já quando as fibras recicladas foram refinadas antes de adicionar o AC (FRR), o valor do índice de tração aumentou relativamente à amostra de FR e é também superior ao da amostra de FRA, tendo esta obtido o maior valor nesta propriedade, indicando assim que esta foi a estrutura mais resistente à tração. No entanto, a amostra de FR apresenta o menor desvio padrão das três, o que quer dizer que esta é mais homogênea.

4.1.2.2. Alongamento e Módulo de *Young*

A partir dos ensaios de tração feitos na máquina de teste universal também é possível retirar outras propriedades das amostras testadas, entre as quais, o alongamento que cada uma é capaz de suportar e módulo de *Young*, que mede a flexibilidade das mesmas, em que quanto menor o seu valor maior é a flexibilidade das amostras.

Na Figura 25 é possível ver o alongamento (%) suportado por cada uma das amostras.

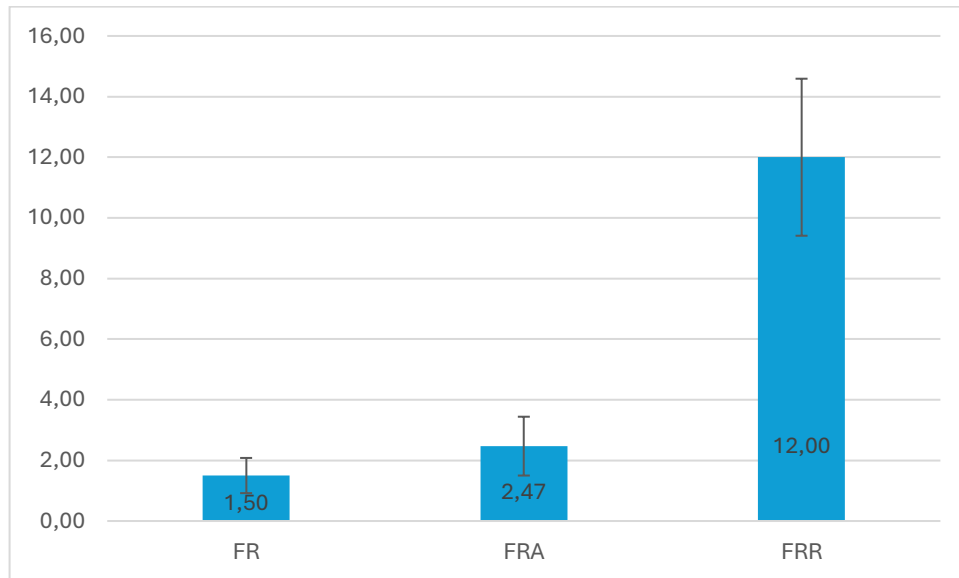


Figura 25 - Alongamento (%) suportado pelas amostras

Pela análise da Figura 25 é possível observar que o alongamento máximo suportado por cada uma das amostras é maior para a FRR, sendo bastante superior quando comparado com as outras duas FR e FRA, o que indica que a refinação das fibras aumentou a interligação entre elas, o que está em concordância com índice de tração obtido (ver Figura 26), mas à custa da perda de espessura (ver tabela 3).

Relativamente ao módulo de *Young*, (ver Figura 26), os resultados apresentados revelam como expectável, que a amostra FRR mostra o menor valor das três, o que significa que é a mais flexível, e que para a mesma amostra também apresenta o maior valor de resistência à tração. Por outro lado, a amostra que apresentou o menor valor de índice de tração, a de FR, têm uma flexibilidade intermédia em relação às outras duas amostras FRA e FRR, já a amostra FRA em que se melhorou a sua resistência, é a que apresenta uma menor flexibilidade, o que quer dizer, que é a amostra é a mais rígida, o que pode ser uma vantagem no seu manuseamento numa aplicação como isolante térmico.

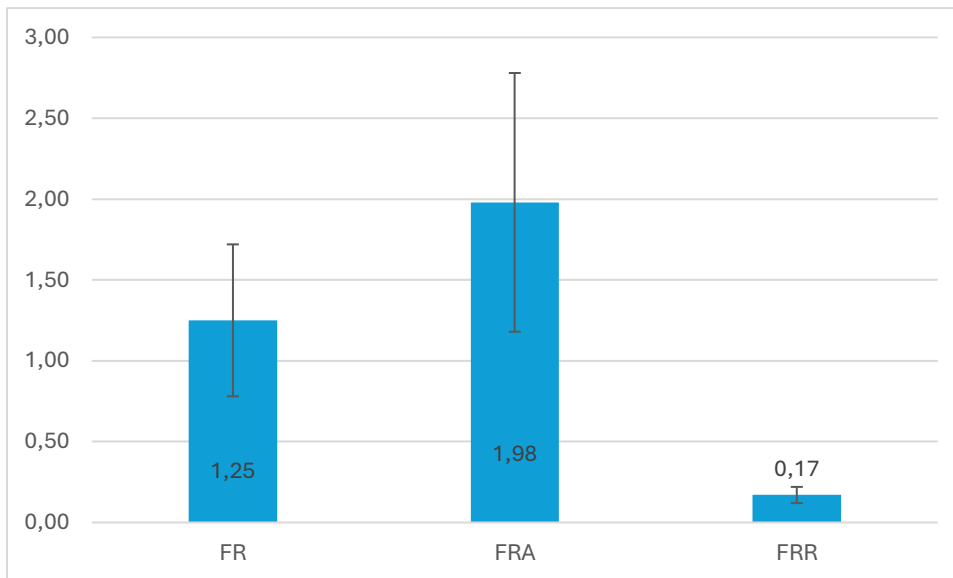


Figura 26 - Módulo de Young (MPa) das amostras preparadas

4.2. Ensaio de condutibilidade térmica

Depois de realizados cada um dos 15 ensaios (ver Anexo C), determinaram-se os valores médios de temperatura de cada um dos termopares e da tensão fornecida ao sistema (ver Tabela 4), e de seguida procedeu-se ao cálculo da condutibilidade térmica de cada um dos provetes e os resultados obtidos para esta propriedade estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 - Valores de Temperatura média (°C) medidos pelos termopares e valor médio de tensão (V) medidos para cada provete ensaiado

Provete	Espessura (mm)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
		PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
A	16,0	35,6	80,0	83,2	26,0	26,6	27,0	25,9	26,6	9,46
A (compactado)	8,0	32,9	63,6	67,5	25,8	26,4	26,8	25,6	26,3	9,42
B	16,0	36,6	82,5	85,7	26,4	27,4	28,1	26,3	27,3	9,54
B (compactado)	8,0	33,6	65,7	69,4	26,4	26,9	27,4	26,0	26,8	9,29
C	15,0	35,6	78,0	81,8	26,5	26,6	27,7	25,9	26,6	9,30
C (compactado)	7,5	33,5	65,0	68,8	26,1	26,6	27,3	26,2	26,5	9,55
D	10,0	35,0	72,2	76,2	26,3	26,6	27,4	26,2	26,5	9,56
D (compactado)	5,0	33,0	62,0	65,6	26,1	26,5	27,1	26,0	26,3	9,30
E	15,0	35,7	78,8	82,6	25,9	26,2	27,0	25,9	26,1	9,43
E (compactado)	7,5	33,8	64,4	68,2	26,2	26,6	27,3	26,1	26,5	9,56
F	14,0	35,0	75,0	78,7	25,9	26,4	27,4	26,0	26,3	9,41
F (compactado)	7,0	33,2	62,8	66,5	26,2	26,6	27,6	26,1	26,5	9,53
G	3,0	29,0	36,0	32,2	26,5	27,2	28,9	26,4	27,0	9,64
H	3,0	28,5	35,4	34,9	26,4	27,0	28,5	26,3	26,9	9,46
I	3,0	28,9	36,1	35,9	26,6	27,3	28,4	26,6	27,2	9,59

Tabela 5 - Valores da Condutibilidade térmica (W/m. °C) calculado para cada provete

Provete	Tipo de Fibra	Condutibilidade térmica (W/m. °C)	
		Sem compactação	Com 50% compactação
A	FRA	0,142	0,099
B	FRA	0,141	0,093
C	FRA	0,134	0,093
D	FR	0,105	0,064
E	FR	0,134	0,095
F	FR	0,135	0,093
G	FRR	0,498	-
H	FRR	0,245	-
I	FRR	0,215	-

Analisando os resultados obtidos na Tabela 5 relativamente à condutibilidade térmica calculada para cada um dos provetes, o que se verifica é que a amostra FRR é aquela que apresenta os piores resultados, evidenciando ser o material com um mau comportamento de isolante térmico.

Relativamente amostras E e F sem compactação, verifica-se que quando comparadas com a amostra D, houve uma densificação da estrutura em cerca de 33%, o que fez com que a condutibilidade térmica diminuísse em cerca de 22%.

Contrariamente ao esperado, o que se verificou foi que com a compactação das amostras e consequente aumento da densidade, ou massa volúmica aparente seca (kg/m³) (ver Tabela 6), o valor da condutibilidade térmica diminui em todas as amostras testadas (ver Figura 27), verificando-se uma melhoria da capacidade como isolante térmico destes materiais. No caso da amostra D compactada, vê-se que esta é a que apresenta o melhor valor de condutibilidade térmica, ou seja, o menor valor absoluto, o que significa que se trata da melhor isolante térmica, entre todas as estruturas que foram produzidas neste trabalho.

Tabela 6 - Massa Volúmica aparente seca (kg/m³) de cada provete com e sem compactação

Provete	Massa Volúmica aparente seca (kg/m ³)	
	Sem compactação	Com compactação
A	27	54
B	28	56
C	29	54
D	34	68
E	25	49
F	26	52

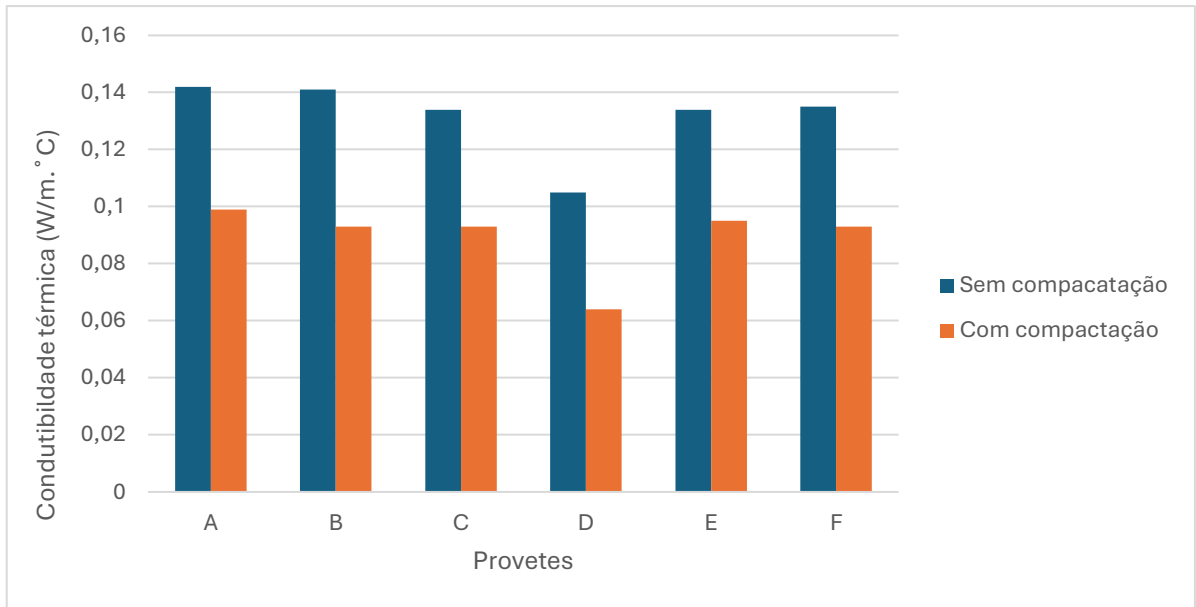


Figura 27 - Variação da condutibilidade térmica (W/m.°C) dos provetes com a compactação

Este tipo de resultados também é possível de ser observado para a lã mineral, na qual se incluem a lã de vidro e lã de rocha, como se vê na Figura 28 (Ablaoui, et al., 2023).

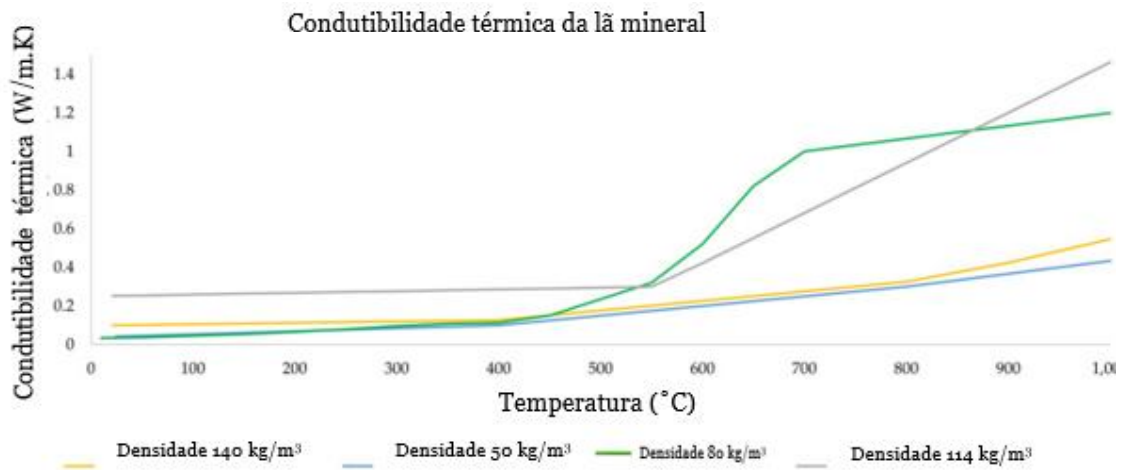


Figura 28 - Variação da Condutibilidade térmica (W/m.K) da lã mineral em função da densidade e temperatura (Adaptado de Ablaoui, et al., 2023)

Como se vê na Figura 28, para temperaturas inferiores a 100 °C a lã mineral quando a densidade é de 80 kg/m³, o valor da condutibilidade térmica é ligeiramente inferior a uma amostra de densidade 50 kg/m³, o que quando comparado com as amostras celulósicas estudadas foi possível observar o mesmo comportamento. No entanto, ainda para o caso da lã mineral, pode-se concluir que o valor da densidade de um material afeta o valor da condutibilidade térmica dos mesmos, pelo que para o caso em estudo, seria

necessário verificar o que aconteceria ao continuar a compactar as amostras, aumentando assim ainda mais a sua densidade.

Quando, por fim, se compara as amostras celulósicas estudadas, com alguns dos materiais mais utilizados em isolamento térmico de edifícios (ver Tabela 7), apesar destas sem compactação se terem revelado materiais isolantes aceitáveis, ainda apresentam valores ligeiramente superiores.

Tabela 7 - Condutibilidade térmica (W/m.K) de materiais usados em isolamento térmico de edifícios (Adaptado de Jelle, 2011)

Material	Condutibilidade térmica (W/m.K)
Lã mineral	0,030-0,040
Cortiça	0,040-0,050
Celulose de isolamento	0,040-0,050
Poliestireno expandido (EPS)	0,030-0,040
Poliestireno extrudido (XPS)	0,030-0,040
Poliuretano (PUR)	0,020-0,030

A amostra D, estudada, de 100% de fibra reciclada sem o aditivo e com compactação apresentou um valor de condutibilidade térmica de 0,064 W/m.°C, o que faz com que esta seja aquela que apresenta um valor próximo dos materiais mais comumente usados em isolamento térmico de edifícios. Uma vez que, para que um material seja considerado um bom isolante térmico deve ter um valor de condutibilidade térmica inferior a 0,070 W/m.K (Almusaed & Almssad, 2016) pode dizer-se que a amostra D é um bom isolante térmico. Todas as amostras FRA e FR compactadas a 50%, têm valores de condutibilidade térmica inferiores a 0.1 W/m.°C, apresentando resultados promissores para posteriores estudos de maior compactação e assim tentar melhorar a sua capacidade como isolante térmico.

5. Conclusão

A metodologia de produção usada neste estudo permitiu criar 3 amostras de composição diferente, com origem em fibras 100% recicladas, que através do processo de espuma atingissem elevada porosidade, conferida através da introdução de ar dentro das estruturas fibrosas, e baixa densidade.

Neste estudo foi realizada a construção de um sistema para a determinação da condutibilidade térmica de provetes de espessuras diferentes, permitindo fazer uma compactação controlada de acordo com as necessidades do trabalho.

Dos valores de condutibilidade térmica obtidos para todos os provetes preparados, verificou-se que a amostra de 100% fibra reciclada (FR) com compactação foi aquela que apresentou o menor valor, significando que esta terá maior capacidade como isolante térmico, por estar abaixo do valor limite para classificar um material como um bom isolante térmico.

Verificou-se também neste estudo, que quando se fez a compactação dos provetes, e conseqüente densificação, conduziu a um menor valor de condutibilidade térmica, melhorando a sua capacidade como isolante térmico.

A refinação das fibras recicladas antes da adição do AC, afetou negativamente a condutibilidade térmica, ao apresentarem os valores mais elevados. Por outro lado, estas estruturas refinadas foram as que obtiveram os melhores valores de caracterização mecânica.

Este estudo ainda permitiu verificar que a adição do AC, aumentou as propriedades mecânicas, nomeadamente o índice de tração, sendo os melhores resultados obtidos para as estruturas onde foi realizada a operação de refinação antes da incorporação do aditivo. Constatou-se ainda que a adição do AC não prejudicou a condutibilidade térmica das estruturas ultra-porosas.

Como trabalho futuro, seria interessante continuar a testar estas amostras celulósicas, de forma a verificar o efeito da compressão na condutibilidade térmica, tentando encontrar o nível de compactação ideal.

Referências bibliográficas

- Ablaoui, E. M., Malendowski, M., Szymkuc, W., Pozorski, Z. (2023), “Determination of Thermal Properties of Mineral Wool Required for the Safety Analysis of Sandwich Panels Subjected to Fire Loads”, *Materials*, 16(17), 5852
- Abushammala, H., Masood, M. A., Ghulam, S. T., Mao, J. (2023), “On the Conversion of Paper Waste and Rejects into High-Value Materials and Energy”, *Sustainability*, 15(8), 6915
- Almusaed, A., & Almssad, A. (Eds.). (2016), “Insulation Materials in Context of Sustainability”, InTech
- Arruda, E. H., Melatto, R. A. P. B., Levy, W., Conti, D. M. (2021), “Circular economy: A brief literature review (2015-2020)”, *Sustainable Operations and Computers*, 2, 79-86
- Burke, S. R., Möbius, M. E., Hjelt, T., Hutzler, S. (2019), “Proprieties of lightweight fibrous structures made by novel foam formig technique”, *Cellulose*, 26, 2529-2539
- Čabalová, I., Kačík, F., Geffert, A., Kačíková, D. (2011), “The Effects of Paper Recycling and its Environmental Impact”, *Environmental Management in Practice*, 17, 329-350
- Cepi (2023), “Key Statistics 2022”, [online], Disponível em: <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2023/07/2022-Key-Statistics-FINAL.pdf>, [acedido em 17 de janeiro 2024]
- Chizaryfard, A., Trucco, P., Nuur, C. (2021), “The transformation to a circular economy: framing na evolutionary view”, *Journal of Evolutionary Ecomics*, 31, 475-504
- Economia Circular, Direção-Geral das Atividades Económicas [online], Disponível em <https://www.dgae.gov.pt/servicos/sustentabilidade-empresarial/economia-circular.aspx> [Acedido em 17 janeiro 2024]
- Francolini, I., Galantini, L., Rea, F., Di Cosimo, C., Di Cosimo, P. (2023), “Polymeric Wet-Strenght Agents in the Paper Industry: An Overview of Mechanisms and Current Challenges”, *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9268
- Frawley, E., Kennedy, D. (2007), “Thermal Testing of Building Insulation Materials”, *Engineers Journal*, 61(9), 552-558

Gaiolas, C. S. C. (2004), “Efeito da adição de produtos auxiliares na qualidade do papel”, [Tese de Doutorado em Engenharia do Papel, Universidade da Beira Interior]

Hathaway, R., Long, K. W. (2005), “Transducers and Data Acquisition” *Fatigue Testing and Analysis*, 1–56

Hu, J.Y., Li, Y.I., & Yeung, K.W. (2006), “In vivo physiological measurements”, *Clothing Biosensory Engineering*, 285–300

Islam, S., Bhat, G. (2019), “Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials form recycled textiles”, *Journal of Environmental Management*, 251, 109536

ISO 5264-2, (2011). ISO 5264-2:2011 Pulps-Laboratory beating-Part 2: PFI mill method, International Standard Organization, Geneva, Switzerland

Jelle, B. P. (2011), “Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Proprieties, requirements and possibilities”, *Energy and Buildings*, 43(10), 2549-2563

Jouhara, H., Góra, A. Ž., Khordehghah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L., Axcell, B., Wrobel, L., Dai, S. (2021), “Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications”, *International Journal of Thermofluids*, 9, 100063

Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S., Norizan, M. N., Osman, S., Sarifuddin, N., Desa, M. S. Z. M., Abdullah, U. H., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Abdullah, L. C. (2022), “A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications”, *Polymers*, 14(17), 3698

Kirchherr, J., Yang, N. H. N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J., Hartley, K. (2023), “Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions”, *Resources, Conservation and Recycling*, 19, 107001

Liuzzi, S., Rubino, C., Martellotta, F., Stefanizzi, P. (2023), “Sustainable Materials form Waste Paper: Thermal and Acoustical Characterization”, *Applied Sciences*, 13(8), 4710

Lu, C., Rosencrance, S., Swales, D., Covarrubias, R., & Hubbe, M. A. (2020), “Dry strength: Strategies for stronger paper”, *Make Paper Products Stand Out, Strategic Use of Wet End Chemical Additives*, 155-196.

- Madani, A., Zeinoddini, S., Varahmi, S., Turnbull, H., Phillion, A. B., Olson, J. A., Martinez, D. M. (2014), "Ultra-lightweight paper foam: processing and properties", *Cellulose*, 21, 2023-2031
- Martins, J. (2022), "Estruturas celulósicas ultra-porosas: processo de espuma e suas propriedades termo-mecânicas", [Projeto de Licenciatura em Química Industrial, Universidade da Beira Interior]
- Miranda-Valdez, I. Y., Yazdani, M. R., Mäkinen, T., Coffeng, S., Viitanen, L., Koivisto, J., Alava, M. J. (2023), "Cellulose foams as scalable templates for phase change materials", *Journal of Energy Storage*, 73(B), 109036
- Murata, L. C. M., Silva Jr, O. P., Celente, D. G., L. O. (2018), "Construção e teste de um dispositivo para ensaio de condutividade térmica de novos materiais de construção", *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 17, 537-544, Foz do Iguaçu, Porto Alegre: ANTAC
- Năstac, S. M., Nechita, P., Guiman, M. V., Roman, M., Rosca, I. C. (2023), "Application of Xylan Derivatives to Improve Functional Properties of Cellulose Foams for Noise Insulation", *Polymers*, 15(24), 4648
- Nechita, P., Năstac, S.M. (2022), "Overview on Foam Forming Cellulose Materials for Cushioning Packing Applications", *Polymers*, 14(10), 1963
- Oliveira, M., Miguel, M., van Langen, S. K., Ncube, A., Zucaro, A., Fiorentino, G., Passaro, R., Santagat, R., Coleman, N., Lowe, B. H., Ulgiati, S., Genovese, A. (2021), "Circular Economy and the Transition to a Sustainable Society: Integrated Assessment Methods for a New Paradigm", *Circular Economy and Sustainability*, 1, 99-113
- Pearce, D. W., Turner, R. K. (1990), "Economics of Natural Resources and the Environment", Harvester Wheatsheaf, London
- Pifer, A., Aurani, K. M. (2015), "A teoria analítica do calor de Joseph Fourier: uma análise das bases conceituais e epistemológicas", *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37(1), 1603
- Pinto, P. I. F., Pinto, P. C. R., Evtuguin, D. V., & Liebner, F. (2023), "Partial Replacement of Cationic Starch by Cationic Hardwood Kraft Lignin Does Not Compromise Key Paper Properties", *Sustainability*, 15(6), 5493

Pivnenko, K., Eriksson, E., Astrup, T. F. (2015), "Waste paper for recycling: Overview and identification of potentially critical substances", *Waste Management*, 45, 134-142

Rashidi, S., Esfahani, J. A., Karimi, N. (2018), "Porous materials in building energy technologies – A review of applications, modelling and experiments", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 229-247

Reike, D., Vermeulen, W. J. V., Witjes, S. (2018), "The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? – Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options", *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 246–264

Salim, M. H., Kassab, Z., Ablouh, E.-h., Semlali Aouragh Hassani, F.-z., & El Achaby, M. (2023), "Cellulosic biocomposite foam papers impregnated by crosslinked starch/poly (vinyl alcohol) biopolymers", *Industrial Crops and Products*, 192, 116074

Seelinger, D., Biesalski, M. (2023), "Cross-Linking of Oxidized Hydroxypropyl Cellulose in Paper: Influence of Molecular Weight and Polymer Distribution on Paper Wet Strength Development", *Gels*, 9(3), 206

Senarathna, C., Sulaksha, T., Maneth, D., Weerasinghe, J., Gamage, M., Thennakoon, T., Hewage, H. T. M., Panagoda, S. S., Sandunika, Perera, D. (2023), "Paper Recycling for a Sustainable Future: Global Trends", *Journal of Research Technology and Engineering*, 4(3), 169-186

Sharma, M., Aguado, R., Murtinho, D., Valente, A. J. M., Mendes De Sousa, A. P., & Ferreira, P. J. T. (2020), "A review on cationic starch and nanocellulose as paper coating components", *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 578–598

Vimmrová, A., Výborný, J., & České vysoké učení technické v Praze Stavební fakulta (2002) "Building materials 10: materials and testing methods" (Ed. 1), Vydavatelství ČVUT

Wang, Z., Wang, C., Gao, Y., Li, Z., Shang, Y., Li, H. (2023), "Porous Thermal Insulation Polyurethane Foam Materials", *Polymers*, 15(18), 3818

Winans, K., Kendall, A., Deng, H. (2017), "The history and current applications of the circular economy concept", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 825-833

Anexos

Anexo A – Massa das amostras

Tabela A1 - Valores pesados na balança analítica

Tipo de Fibra	Massa (g) das Amostras		
	FR	FRA	FRR
	7,631	8,946	1,045
	7,715	9,109	1,157
	7,593	9,115	1,07
Média	7,646	9,057	1,091
Desvio Padrão	0,051	0,078	0,048

Anexo B – Espessura medida das amostras

Tabela B1 - Valores de espessura medidos com o paquímetro analógico

Tipo de Fibra	Espessura (mm) das Amostras								
	FR	FR	FR	FRA	FRA	FRA	FRR	FRR	FRR
	15,9	14,7	13,9	15,0	16,6	19,2	5,5	6,2	6,5
	15,8	13,7	14,6	18,0	15,1	17,8	7,7	6,1	8,7
	13,5	13,1	13,2	19,0	17,7	17,1	8,3	6,6	7,2
	13,7	13,1	13,7	14,7	14,7	17,6	5,6	5,1	6,7
	13,9	15,8	16,0	16,1	14,6	16,8	7,2	8,0	6,1
Média	14,307			16,667			6,767		
Desvio Padrão	1,043			1,520			1,030		

Anexo C – Ensaio feitos para o cálculo da condutibilidade térmica

Tabela C1 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra A sem compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
25/07/2024	26,5	850 mL em 600 s	0	35,6	80,0	83,1	26,0	26,7	27,2	25,9	26,8	9,50
			3	35,6	80,0	83,1	26,0	26,6	27,0	25,9	26,6	9,49
			6	35,6	80,0	83,2	26,0	26,6	27,0	25,9	26,5	9,48
			9	35,6	80,1	83,2	26,1	26,6	27,0	25,9	26,6	9,45
			12	35,6	80,1	83,2	26,1	26,5	26,8	25,9	26,4	9,40
			Média	35,6	80,0	83,2	26,0	26,6	27,0	25,9	26,6	9,46

Tabela C2 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra A com compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
26/07/2024	26,0	700 mL em 600 s	0	32,9	63,6	67,5	25,8	26,4	26,8	25,6	26,3	9,43
			3	32,9	63,6	67,5	25,8	26,4	26,8	25,6	26,3	9,41
			6	32,9	63,6	67,5	25,8	26,4	26,8	25,6	26,3	9,38
			9	33,0	63,6	67,5	25,8	26,4	26,8	25,6	26,3	9,39
			12	33,0	63,7	67,5	25,8	26,5	26,8	25,6	26,4	9,48
			Média	32,9	63,6	67,5	25,8	26,4	26,8	25,6	26,3	9,42

Tabela C3 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra B sem compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
26/07/2024	26,8	500 mL em 600 s	0	36,6	82,5	85,7	26,4	27,3	28,0	26,3	27,3	9,52
			3	36,6	82,5	85,7	26,4	27,4	28,0	26,3	27,2	9,54
			6	36,6	82,5	85,7	26,4	27,4	28,0	26,3	27,3	9,54
			9	36,6	82,5	85,7	26,4	27,5	28,2	26,3	27,4	9,54
			12	36,6	82,5	85,7	26,4	27,4	28,1	26,3	27,3	9,54
			Média	36,6	82,5	85,7	26,4	27,4	28,1	26,3	27,3	9,54

Tabela C4 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra B com compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
29/07/2024	26,5	600 mL em 600 s	0	33,6	65,8	69,4	26,4	26,9	27,3	26,1	26,8	9,27
			3	33,6	65,7	69,4	26,4	26,9	27,4	26,0	26,8	9,28
			6	33,6	65,7	69,3	26,4	26,9	27,4	26,0	26,8	9,29
			9	33,6	65,7	69,3	26,3	27,0	27,6	26,0	26,9	9,30
			12	33,6	65,7	69,4	26,4	26,9	27,5	26,0	26,9	9,30
			Média	33,6	65,7	69,4	26,4	26,9	27,4	26,0	26,8	9,29

Tabela C5 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra C sem compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
30/07/2024	26,2	550 mL em 600 s	0	35,6	78,0	81,8	26,5	26,5	27,6	25,9	26,5	9,29
			3	35,6	78,0	81,8	26,5	26,5	27,6	25,9	26,5	9,29
			6	35,6	78,0	81,8	26,4	26,6	27,7	25,9	26,6	9,27
			9	35,6	78,0	81,8	26,5	26,8	27,8	25,9	26,7	9,34
			12	35,6	78,0	81,8	26,4	26,6	27,7	25,9	26,6	9,33
			Média	35,6	78,0	81,8	26,5	26,6	27,7	25,9	26,6	9,30

Tabela C 6 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra C com compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
31/07/2024	26,3	1000 mL em 345 s	0	33,5	64,9	68,7	26,1	26,6	27,3	26,2	26,5	9,57
			3	33,5	64,9	68,8	26,1	26,6	27,3	26,2	26,5	9,55
			6	33,5	65,0	68,8	26,1	26,6	27,3	26,2	26,5	9,55
			9	33,5	65,0	68,9	26,1	26,5	27,3	26,2	26,5	9,55
			12	33,5	65,0	68,9	26,1	26,5	27,3	26,1	26,5	9,55
			Média	33,5	65,0	68,8	26,1	26,6	27,3	26,2	26,5	9,55

Tabela C7 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra D sem compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
31/07/2024	26,6	1000 mL em 350 s	0	35,0	72,2	76,2	26,3	26,6	27,4	26,2	26,5	9,54
			3	35,0	72,2	76,2	26,3	26,6	27,4	26,2	26,5	9,55
			6	35,0	72,2	76,2	26,3	26,6	27,4	26,2	26,5	9,56
			9	35,0	72,2	76,2	26,3	26,6	27,4	26,2	26,5	9,57
			12	35,0	72,2	76,2	26,3	26,6	27,4	26,2	26,5	9,57
			Média	35,0	72,2	76,2	26,3	26,6	27,4	26,2	26,5	9,56

Tabela C8 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra D com compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
01/08/2024	26,2	1000 mL em 350 s	0	33,0	62,1	65,6	26,1	26,5	27,1	26,0	26,3	9,30
			3	33,0	62,0	65,6	26,1	26,5	27,1	26,0	26,3	9,29
			6	33,0	62,0	65,6	26,0	26,5	27,1	26,0	26,3	9,29
			9	33,1	62,0	65,6	26,1	26,5	27,1	26,0	26,3	9,29
			12	33,1	62,1	65,6	26,1	26,5	27,1	26,0	26,3	9,34
			Média	33,0	62,0	65,6	26,1	26,5	27,1	26,0	26,3	9,30

Tabela C9 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra E sem compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
02/08/2024	26,1	1000 mL em 355 s	0	35,7	78,8	82,6	25,9	26,2	27,0	25,9	26,1	9,43
			3	35,7	78,8	82,6	25,9	26,2	27,0	25,9	26,1	9,41
			6	35,7	78,8	82,6	25,9	26,2	27,0	25,9	26,1	9,43
			9	35,7	78,8	82,6	25,9	26,2	27,0	25,9	26,1	9,42
			12	35,7	78,8	82,6	25,9	26,2	27,0	25,9	26,1	9,45
			Média	35,7	78,8	82,6	25,9	26,2	27,0	25,9	26,1	9,43

Tabela C10 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra E com compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
02/08/2024	26,4	1000 mL em 355 s	0	33,8	64,4	68,2	26,3	26,6	27,3	26,1	26,4	9,57
			3	33,8	64,4	68,2	26,2	26,6	27,3	26,1	26,4	9,55
			6	33,7	64,4	68,2	26,2	26,5	27,3	26,1	26,5	9,54
			9	33,7	64,3	68,1	26,2	26,5	27,3	26,1	26,5	9,57
			12	33,8	64,3	68,1	26,2	26,6	27,3	26,2	26,5	9,55
			Média	33,8	64,4	68,2	26,2	26,6	27,3	26,1	26,5	9,56

Tabela C 11 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra F sem compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
06/08/2024	26,3	1000 mL em 495 s	0	35,0	75,0	78,7	25,9	26,4	27,3	26,0	26,3	9,39
			3	35,0	75,0	78,7	25,9	26,3	27,4	26,0	26,3	9,40
			6	35,0	75,0	78,7	25,9	26,3	27,4	26,0	26,3	9,43
			9	35,0	75,0	78,8	26,0	26,4	27,4	26,0	26,3	9,39
			12	35,1	75,0	78,8	26,0	26,4	27,4	26,0	26,3	9,43
			Média	35,0	75,0	78,7	25,9	26,4	27,4	26,0	26,3	9,41

Tabela C12 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra F com compactação

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
07/08/2024	26,4	1000 mL em 490 s	0	33,2	62,8	66,4	26,2	26,6	27,6	26,1	26,5	9,52
			3	33,1	62,8	66,4	26,2	26,6	27,6	26,1	26,5	9,53
			6	33,1	62,8	66,5	26,2	26,6	27,6	26,1	26,5	9,54
			9	33,2	62,8	66,5	26,2	26,6	27,6	26,1	26,5	9,52
			12	33,2	62,8	66,5	26,2	26,6	27,6	26,1	26,5	9,53
			Média	33,2	62,8	66,5	26,2	26,6	27,6	26,1	26,5	9,53

Tabela C13 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra G

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
07/08/2024	26,9	1000 mL em 480 s	0	29,0	36,0	32,2	26,5	27,2	29,0	26,4	27,0	9,64
			3	29,0	35,9	32,2	26,5	27,2	28,9	26,4	27,0	9,64
			6	29,0	35,9	32,2	26,5	27,2	29,0	26,4	27,0	9,65
			9	29,0	36,0	32,2	26,5	27,2	28,9	26,4	27,1	9,63
			12	28,9	36,0	32,2	26,5	27,2	28,9	26,4	27,0	9,66
			Média	29,0	36,0	32,2	26,5	27,2	28,9	26,4	27,0	9,64

Tabela C14 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra H

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
08/08/2024	26,6	1000 mL em 505 s	0	28,5	35,4	34,9	26,4	26,9	28,5	26,3	26,8	9,41
			3	28,5	35,4	34,9	26,4	26,9	28,5	26,2	26,8	9,46
			6	28,5	35,4	34,9	26,4	27,0	28,5	26,3	26,9	9,46
			9	28,5	35,4	34,9	26,4	27,0	28,6	26,3	26,9	9,42
			12	28,5	35,5	34,9	26,4	27,0	28,5	26,3	26,9	9,54
			Média	28,5	35,4	34,9	26,4	27,0	28,5	26,3	26,9	9,46

Tabela C15 - Ensaio de condutibilidade térmico da amostra I

Data	Temperatura Ambiente (°C)	Volume H ₂ O	Tempo (min)	Temperatura (°C)								Tensão (V)
				PQI	PQC	PQP	PFI	PFC	PFP	H ₂ O in	H ₂ O out	
08/08/2024	27,1	1000 mL em 470 s	0	28,9	36,1	35,9	26,6	27,3	28,4	26,6	27,2	9,58
			3	28,9	36,1	35,9	26,6	27,3	28,4	26,6	27,2	9,60
			6	28,9	36,1	35,9	26,6	27,4	28,5	26,6	27,2	9,59
			9	28,9	36,1	35,9	26,6	27,3	28,5	26,6	27,2	9,58
			12	28,9	36,1	35,9	26,6	27,3	28,4	26,6	27,2	9,59
			Média	28,9	36,1	35,9	26,6	27,3	28,4	26,6	27,2	9,59