

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE SISTEMAS MULTICAMADAS DE AGLOMERADO DE CORTIÇA

Lorena Beatriz Costa Davantel

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:
Engenharia da Construção

Outubro de 2024

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE SISTEMAS MULTICAMADAS DE AGLOMERADO DE CORTIÇA

LORENA BEATRIZ COSTA DAVANTEL

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do **Grau de Mestre em Engenharia da Construção** no âmbito da **Dupla Diplomação** com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora do Instituto Politécnico de Bragança:

Prof.^a Dra Débora Macanjo Ferreira

Orientadora da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro:

Prof.^a Dra Ana Cristina Briga de Sá

Coorientador da Universidade Tecnológica Federal do Paraná:

Prof.^o Dr Jorge Luís Nunes de Góes

Outubro de 2024

Dedico este trabalho a minha família.

Agradecimentos

A conclusão desta tese é fruto de uma caminhada longa e desafiadora, e nada disso seria possível sem o apoio e a presença de pessoas muito especiais.

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e fé que me guiaram em cada etapa deste processo. Sua presença foi minha luz nos momentos mais difíceis e me deu a coragem necessária para continuar.

Aos meus pais, Celma e Luiz, meu amor e eterna gratidão. Vocês foram e sempre serão minha base, me ensinando os valores da dedicação, paciência e resiliência. Tudo o que conquistei até aqui devo a vocês. Ao meu irmão Luiz, à minha tia Alaide e a toda minha família, agradeço o apoio incondicional e por estarem ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus orientadores, Profa. Dra. Débora Macanjo Ferreira, Profa. Dra. Ana Cristina Briga de Sá e Prof.º Dr. Jorge Luís Nunes de Góes, sou profundamente grato pela paciência, dedicação e orientação ao longo deste processo. Cada um de vocês, com suas contribuições valiosas, me ajudou a crescer academicamente e a enfrentar os desafios deste trabalho. Obrigado por acreditarem no meu potencial e me guiarem em direção ao melhor resultado possível. Estendo minha gratidão a todos os professores que contribuíram para minha formação.

Às minhas amigas Hellen e Beatriz, que foram como irmãs durante minha estadia em Portugal. Agradeço também aos meus amigos do Brasil, que me apoiaram e incentivaram desde o começo, sempre presentes em todos os momentos, mesmo à distância. Aos amigos de Portugal, que se tornaram minha casa e família ao longo desse período, sou imensamente grato por todo o apoio e conforto nos momentos difíceis, além de compartilharem comigo as alegrias e conquistas desta jornada. Cada palavra de incentivo foi essencial para que eu mantivesse o foco.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) por todo o suporte e oportunidades ao longo da minha trajetória acadêmica. As experiências e conhecimentos adquiridos nestas instituições foram fundamentais para meu desenvolvimento pessoal e profissional. Sou grato por cada aprendizado, que contribuiu para a realização desta tese e para minha formação como um todo.

A todos que acreditaram em mim e me proporcionaram a oportunidade de realizar este sonho, meu muito obrigado.

Resumo

A construção civil é responsável por cerca de 40% da energia consumida na Europa. Segundo a Diretiva 2018/844, aproximadamente 50% do consumo total de energia das habitações é resultante de aquecimento e resfriamento dos ambientes. Uma estratégia eficaz para reduzir esse consumo é o uso de elementos passivos que reduzem a demanda energética. O isolamento térmico é uma solução eficiente para melhorar o desempenho energético dos edifícios, bem como proporciona um melhor conforto térmico aos usuários.

Devido ao alto consumo do setor, o presente trabalho busca desenvolver e analisar o comportamento térmico de painéis de aglomerado de cortiça com incorporação de grafite expansível, destinados à aplicação como núcleo de portas interiores e painéis decorativos, formando um sistema multicamada a fim de melhorar o conforto térmico e promover uma melhor eficiência energética. A composição dos painéis foi previamente desenvolvida por Moia [ref], onde o aglomerado de cortiça com três concentrações diferentes (0%, 5% e 10%) de grafite expansível (EG) como aditivo retardador foi estudada no efeito da reação ao fogo. Os resultados obtidos mostraram que os aglomerados de cortiça desenvolvidos apresentavam bom desempenho ao fogo. O presente trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento térmico dos referidos painéis à temperaturas ambiente.

Foram fabricados seis painéis de aglomerados de cortiça com diferentes composições, variando o tipo de resina sendo MDI (Diisocianato de Metileno Diphenil) ou TDI (diisocianato de tolueno) e a quantidade de grafite expansível incorporada (0%, 5% ou 10%). A avaliação do comportamento térmico destes sistemas multicamada foi efetuada experimentalmente através da realização de dois ensaios: o método *Guarded Hot Plate (GHP)* e determinação do desempenho térmico de forma contínua. O método GHP permitiu determinar a condutividade térmica do material para três temperaturas diferentes. Já a determinação do desempenho térmico de forma contínua, forneceu dados sobre a temperatura superficial, fluxos de calor, coeficiente de transmissão térmica, resistência térmica e condutividade térmica.

Ao analisar os resultados dos dois ensaios, observou-se uma discrepância nos valores de condutividade térmica obtidos, com variações entre 0% e 30%. Essa variação pode ser atribuída ao período em que os ensaios foram realizados, uma vez que a umidade do ambiente pode ter influenciado os resultados de condutividade térmica.

Os resultados mostraram que os painéis com resina TDI tiveram um desempenho térmico melhor do que os painéis com resina MDI, embora a diferença não tenha sido

significativa. A variação observada foi de aproximadamente 8,88% no painel de TDI puro, 12% no painel com 5% de grafite expansível, e 8,51% no painel com 10% de grafite.

Ao analisar a condutividade térmica, os painéis apresentaram valores baixos, entre 0,041 W/mK e 0,045 W/mK para aqueles sem adição de grafite. A inclusão de grafite expansível não causou um aumento significativo na condutividade térmica, com valores entre 0,043 W/mK e 0,050 W/mK. O menor valor de condutividade (0,040 W/mK) foi encontrado em um painel com resina TDI, enquanto o maior valor (0,050 W/mK) foi registrado em um painel com 5% de grafite e resina MDI. Comparado a materiais disponíveis no mercado, que variam de 0,037 W/mK a 0,050 W/mK, os painéis desenvolvidos neste estudo demonstraram desempenho competitivo em termos de isolamento térmico.

Palavras Chave: *Sistemas multicamadas, aglomerado de cortiça, grafite expansível, comportamento térmico.*

Abstract

The construction industry is responsible for approximately 40% of the energy consumed in Europe. According to Directive 2018/844, approximately 50% of total energy consumption in homes comes from heating and cooling. An effective strategy to reduce this consumption is the use of passive elements that reduce energy demand. Thermal insulation is an efficient solution to improve the energy performance of buildings, as well as providing better thermal comfort for users.

Due to the high consumption in the sector, this study aims to develop and analyze the thermal behavior of cork agglomerate panels with incorporation of expandable graphite, intended for use as the core of interior doors and decorative panels, forming a multilayer system in order to improve thermal comfort and promote better energy efficiency. The composition of the panels was previously developed by Moia [ref], where the cork agglomerate with three different concentrations (0%, 5% and 10%) of expandable graphite (EG) as a fire retardant additive was studied in terms of its reaction to fire. The results obtained showed that the cork agglomerates developed presented good fire performance. The aim of this study is to study the thermal behavior of these panels at room temperature.

Six cork agglomerate panels with different compositions were manufactured, varying the type of resin (MDI (Methylene Diphenyl Diisocyanate) or TDI (Toluene Diisocyanate)) and the amount of expanded graphite incorporated (0%, 5% or 10%). The thermal behavior of these multilayer systems was evaluated experimentally by performing two tests: the Guarded Hot Plate (GHP) method and continuous thermal performance determination. The GHP method allowed the determination of the thermal conductivity of the material at three different temperatures. The continuous thermal performance determination provided data on surface temperature, heat fluxes, thermal transmission coefficient, thermal resistance and thermal conductivity. When analyzing the results of the two tests, a discrepancy was observed in the thermal conductivity values obtained, with variations between 0% and 30%. This variation can be attributed to the period in which the tests were performed, since the humidity of the environment may have influenced the thermal conductivity results.

The results showed that the panels with TDI resin had better thermal performance than the panels with MDI resin, although the difference was not significant. The variation observed was approximately 8.88% in the pure TDI panel, 12% in the panel with 5% expandable graphite, and 8.51% in the panel with 10% graphite.

When analyzing the thermal conductivity, the panels presented low values, between 0.041 W/mK and 0.045 W/mK for those without graphite addition. The inclusion of expandable graphite did not cause a significant increase in thermal conductivity, with values between 0.043 W/mK and 0.050 W/mK. The lowest conductivity value (0.040 W/mK) was found in a panel with TDI resin, while the highest value (0.050 W/mK) was recorded in a panel with 5% graphite and MDI resin. Compared to commercially available materials, which range from 0.037 W/mK to 0.050 W/mK, the panels developed in this study demonstrated competitive performance in terms of thermal insulation.

Keywords: Multilayer systems, cork agglomerate, expandable graphite, thermal behavior.

Índice

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELA	XV
LISTA DE GRÁFICOS	XVI
LISTA DE ABREVIACÕES	XVII
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS PROPOSTOS	2
1.3. CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA TESE	2
CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.2 CONSUMO ENERGÉTICO NOS EDIFÍCIOS	4
2.3 CONFORTO TÉRMICO.....	6
2.4 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	6
2.4.1 <i>Isolamento Térmico</i>	6
2.4.2 <i>Transferência de Calor</i>	7
2.4.3 <i>Condutividade térmica</i>	8
2.4.4 <i>Coefficiente de transmissão térmica</i>	8
2.4.5 <i>Resistência térmica</i>	9
2.5 MATERIAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO	9
2.6 CORTIÇA	11
2.6.1 <i>Importância em Portugal</i>	11
2.6.2 <i>Sustentabilidade e impacto ambiental</i>	12
2.6.3 <i>Principais características</i>	12
2.6.4 <i>Granulados de cortiça</i>	13
2.6.5 <i>Aglomerado de cortiça</i>	14
2.6.6 <i>Aplicações da cortiça no mercado da construção civil</i>	14
2.7 GRAFITE	16
2.7.1 <i>Propriedades</i>	16
2.7.2 <i>Grafite expansível</i>	18
2.8 RESINAS	18

2.9	SISTEMAS MULTICAMADAS, PORTAS INTERIORES E PAINÉIS DECORATIVOS	20
CAPÍTULO 3: PROGRAMA EXPERIMENTAL		23
3.1	INTRODUÇÃO	23
3.2	PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DE AGLOMERADO DE CORTIÇA COM GRAFITE EXPANSÍVEL 23	
3.3	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	32
3.3.1	<i>Introdução</i>	32
3.3.2	<i>Guarded Hot Plate</i>	32
3.3.3	<i>Avaliação do desempenho térmico em contínuo</i>	34
3.3.3.1	Cálculo do coeficiente de transmissão térmica.....	39
3.3.3.2	Cálculo da resistência térmica.....	39
3.3.3.3	Cálculo da Condutividade Térmica	40
CAPÍTULO 4: ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....		41
4.1	GUARDED HOT PLATE	41
4.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO EM CONTÍNUO.....	44
4.2.1	<i>1ª fase: Resina MDI</i>	45
4.2.1.1	Temperaturas do ar interior	45
4.2.1.2	Temperaturas Superficiais	46
4.2.1.3	Fluxos de calor	48
4.2.1.4	Coeficiente de transmissão térmica	50
4.2.1.5	Resistência Térmica	52
4.2.1.6	Condutividade térmica	52
4.2.2	<i>Fase 2: Resina TDI</i>	53
4.2.2.1	Temperaturas do ar interior	53
4.2.2.2	Temperaturas superficiais	54
4.2.2.3	Fluxos de calor	56
4.2.2.4	Coeficiente de transmissão térmica	58
4.2.2.5	Resistência térmica.....	60
4.2.2.6	Condutividade Térmica	60
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS		66
5.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	66
5.2	TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS		68

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Mecanismos de transmissão de calor em edifícios [18].</i>	7
<i>Figura 2 – Árvore de sobreiro(Quercus suber) [29].</i>	13
<i>Figura 3 - Granulado de cortiça.</i>	14
<i>Figura 4 - Painel de piso flutuante de cortiça[32].</i>	15
<i>Figura 5 - Aglomerado de cortiça expandida aplicado em fachada externa[33].</i>	15
<i>Figura 6 - Cortiça utilizada como junta de dilatação em barragem de concreto[34].</i>	16
<i>Figura 7 – Grafite natural.</i>	17
<i>Figura 8 - Esquema da produção de diferentes tipos de grafite [36].</i>	17
<i>Figura 9 - Processo de obtenção do TDI, MDI e Poliois[40]</i>	20
<i>Figura 10 - Esquema de um sistema multicamadas.</i>	21
<i>Figura 11 – Grânulo de cortiça 3-4 mm.</i>	24
<i>Figura 12 – Grânulo de cortiça 0,2-0,5 mm.</i>	24
<i>Figura 13 - Grafite expansível.</i>	24
<i>Figura 14 - Resina MDI.</i>	25
<i>Figura 15 - Resina TDI.</i>	25
<i>Figura 16 - Pesagem dos materiais para a fabricação dos painéis.</i>	26
<i>Figura 17 - Mistura dos materiais para a fabricação do aglomerado.</i>	27
<i>Figura 18 - Molde revestido por papel vegetal.</i>	27
<i>Figura 19 - Distribuição do material no molde.</i>	27
<i>Figura 20 - Revestimento superior de papel vegetal e molde fechado.</i>	27
<i>Figura 21 - Processo de prensagem na Prensa Laboratorial MonTech LP3000.</i>	28
<i>Figura 22 – Amostra resfriando com o peso adicional.</i>	29
<i>Figura 23 - a) amostra MDI; b) Amostra MDI5%; c) Amostra MDI10%; d) grafite expansível na amostra MDI10%.</i>	30
<i>Figura 24 - a) amostra TDI; b) amostra TDI5%; c) amostra TDI10%.</i>	30
<i>Figura 25 - Utilização da serra circular para o corte das amostras.</i>	31
<i>Figura 26 – Equipamento λ-Meter EP500e.</i>	33
<i>Figura 27 - Interface do Software computacional do λ-Meter EP500e.</i>	33
<i>Figura 28 – Projeto da sala de teste.</i>	34
<i>Figura 29 – Exemplo da amostra final.</i>	35
<i>Figura 30 - Aplicação da espuma de poliuretano.</i>	35
<i>Figura 31 – Colagem da amostra finalizada.</i>	36
<i>Figura 32 – a) Vista interior da sala 1; b) Vista interior da sala 2.</i>	36
<i>Figura 33 - Painéis MDI com os sensores de fluxo de calor e temperatura instalados.</i>	37

<i>Figura 34 – Sensores de fluxo e de temperatura instalados nos painéis.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 35 - a) Sonda de temperatura, b) sonda de umidade.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 36 - Datalogger</i>	<i>38</i>

Lista de Tabela

<i>Tabela 1 - Materiais de isolamento térmico mais utilizados na construção[23], [24], [27]</i>	10
<i>Tabela 2 – Denominação e composição dos painéis de aglomerado de cortiça fabricados</i>	25
<i>Tabela 3 - Quantidade de material utilizada para a produção cada amostra.</i>	26
<i>Tabela 4 -Espessura, massa e densidade dos painéis fabricados.</i>	31
<i>Tabela 5 - Resultados da condutividade térmica λ (W/mK) obtidos no teste do GHP.</i>	41
<i>Tabela 6 - Porcentagem de aumento da condutividade térmica nas amostras MDI5% e MDI10% em relação a amostra MDI.</i>	43
<i>Tabela 7 -Porcentagem de aumento da condutividade térmica nas amostras TDI5% e TDI10% em relação a amostra TDI.</i>	44
<i>Tabela 8 - Temperaturas mínimas, medias e máximas das salas 1 e 2 (°C) na primeira fase.</i>	46
<i>Tabela 9 - Valores máximos, médios e mínimos de temperatura superficial registrada por Ts11 e Ts21 em cada amostra MDI (°C).</i>	48
<i>Tabela 10 - Valor médio de temperatura superficial das amostras MDI.</i>	48
<i>Tabela 11 - Valores, Máximo, Média e Mínimo dos fluxos de calor nas amostras com resina MDI (W/m²).</i>	49
<i>Tabela 12 - Valores médios de fluxo de calor em cada amostra com resina MDI.</i>	50
<i>Tabela 13 - Valores de Coeficiente de transmissão térmica nas amostras com resina MDI.</i>	52
<i>Tabela 14 - Valores da resistência térmica das amostras com resina MDI.</i>	52
<i>Tabela 15 – Valores da espessura, resistência térmica e condutividade térmica das amostras com resina MDI.</i>	52
<i>Tabela 16 - Temperaturas mínimas, medias e máximas das salas 1 e 2 (°C) na segunda fase.</i>	54
<i>Tabela 17 - Valores máximos, médios e mínimos de temperatura superficial registrada por Ts11 e Ts21 em cada amostra TDI (°C).</i>	56
<i>Tabela 18 – Valor médio da temperatura superficial das amostras TDI.</i>	56
<i>Tabela 19 - Valores, Máximo, Média e Mínimo dos fluxos de calor nas amostras com resina TDI (W/m²).</i>	58
<i>Tabela 20 - Valores médios de fluxo de calor de cada amostra TDI.</i>	58
<i>Tabela 21 - Valores médios do coeficiente de transmissão térmica das amostras com resina TDI.</i>	59
<i>Tabela 22 - Valores de resistência térmica das amostras com resina TDI.</i>	60
<i>Tabela 23 - Valores da espessura, resistência térmica e condutividade térmica das amostras com resina TDI.</i> ..	60
<i>Tabela 24 - Resultados obtidos nos ensaios GHP e avaliação do desempenho térmico em contínuo.</i>	62
<i>Tabela 25 - Média dos valores de condutividade térmica obtidas nos ensaios.</i>	62
<i>Tabela 26 - Comparação dos valores de condutibilidade térmica e de resistência térmica com outros materiais[27], [37], [44], [48], [63], [64], [65]</i>	64

Lista de Gráficos

<i>Gráfico.1 – Valores de condutividade térmica (λ) das amostras obtidos no ensaio GHP.</i>	<i>42</i>
<i>Gráfico 2 – Valores de condutividade térmica (λ) das amostras a 10°C, 30°C e 50°C.</i>	<i>43</i>
<i>Gráfico 3 – Variação da temperatura interior nas salas de ensaio 1 e 2 na primeira fase.</i>	<i>46</i>
<i>Gráfico 4 – Variação dos valores de temperaturas superficiais nas amostras com a resina MDI.</i>	<i>46</i>
<i>Gráfico 5 – Variação de temperaturas e fluxos de calor das amostras com resina MDI.</i>	<i>49</i>
<i>Gráfico 6 - Coeficiente de transmissão térmica U referente as amostras com resina MDI.</i>	<i>51</i>
<i>Gráfico 7 - Variação da temperatura interior nas salas de ensaio 1 e 2 na segunda fase.</i>	<i>54</i>
<i>Gráfico 8 - Variação dos valores de temperaturas superficiais nas amostras com a resina TDI.</i>	<i>55</i>
<i>Gráfico 9 – Variação de temperaturas e fluxos de calor das amostras com resina TDI.</i>	<i>57</i>
<i>Gráfico 10 - Coeficiente de transmissão térmica U referente as amostras com resina TDI.</i>	<i>59</i>

Lista de Abreviações

ADENE - Agência para a Energia

λ - Condutividade térmica

CO₂ - Dióxido de carbono

DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia

ELPRE - Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios

EPS - Poliestireno expandido moldado

GE – Grafite Expansível

GC – Granulado de Cortiça

GHP – Guarded Hot Plate

HDF - *High Density Fibreboard*),

MDI - Diisocianato de Metileno Diphenil

MDF - Medium Density Fiberboard

nZEB - near Zero Energy Building

OMS - Organização Mundial da Saúde

OSB - Oriented Strand Board

PNEC - Plano Nacional de Energia e Clima

RPC - Regulamento Europeu de Produtos de Construção

R – Resistência térmica

SCE - Sistema de Certificação Energética

TDI - diisocianato de tolueno

U - Coeficiente de transmissão térmica

XPS - Poliestireno expandido extrudido

Capítulo 1: Introdução

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) a maior parte dos habitantes da sociedade contemporânea, na Europa, passa aproximadamente 90% de seu tempo dentro de edifícios, sendo que dois terços desse período ocorrem dentro de suas residências [1].

Cerca de 40% da energia consumida na Europa é utilizada na construção, utilização e renovação de edifícios. O aquecimento e resfriamento dos ambientes consomem 50% da energia final [2]. Muitos estudos mostram que cerca de 85-95% do consumo total de energia nas habitações provém da energia operacional[3].

Em Portugal, assim como em outros países do sul da Europa, devido às suas características climáticas específicas, fatores culturais (hábitos e comportamentos) e condições econômicas (baixos rendimentos e altos custos de energia), não é comum a adoção de aquecimento contínuo].

A seleção dos materiais utilizados na construção é de suma importância, pois essas escolhas contribuem para a criação de edifícios com baixo consumo energético. Tal abordagem resulta na redução da energia operacional ao longo da vida útil do edifício, mesmo que a energia necessária para a construção inicial seja maior

É fundamental que as medidas para melhorar o desempenho energético dos edifícios abranjam todos os elementos e sistemas técnicos. Isso inclui elementos passivos que reduzem a demanda de energia para aquecimento, resfriamento, iluminação e ventilação, melhorando o conforto térmico e visual dos usuários [2].

Um dos elementos passivos que pode ser empregado é a porta interior composta por um sistema multicamadas, cujo núcleo é constituído por um material de elevado desempenho térmico, contribuindo para o aumento do conforto térmico no interior das residências e redução do consumo energético.

Em trabalhos de investigação anteriores [4] foram estudadas e criadas composições ótimas para painéis de cortiça, visando sua aplicação como núcleo em sistemas multicamadas, como em portas e painéis decorativos, e foi avaliado seu desempenho a temperaturas elevadas. Um dos objetivos do presente trabalho é avaliar o desempenho dessa composição à temperatura ambiente.

1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS

O presente trabalho de investigação visa analisar o desempenho térmico de painéis de aglomerado de cortiça com incorporação de grafite expansível, cujo comportamento ao fogo foi estudado previamente[4], com o propósito de sua aplicação em portas de madeira decorativas para compartimentação interior de habitações, bem como em painéis de revestimento interior.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar o comportamento do aglomerado de cortiça com adição de grafite: investigar se a adição de grafite expansível influencia as propriedades térmicas do aglomerado de cortiça.
- Analisar as resinas MDI (Diisocianato de Metileno Diphenil) e TDI (diisocianato de tolueno): Identificar a influência dos dois tipos de resina no desempenho térmico dos painéis quando utilizadas como agentes de ligação.
- Determinar o coeficiente de transmissão térmica e a condutividade térmica: Medir e comparar o coeficiente de transmissão térmica dos painéis com diferentes composições de aglomerado de cortiça, grafite expansível e resinas.

1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos.

No capítulo um, é apresentada a introdução do tema do trabalho, seguida do contexto e motivação para o desenvolvimento da pesquisa, além dos objetivos propostos e organização da tese.

O capítulo dois, apresenta o estado da arte, abordando os principais tópicos relacionados à energia consumida na construção, conforto térmico e mecanismos de transferência de calor. Em seguida, aborda os isolamentos térmicos mais utilizados, características da cortiça, grafite e das resinas MDI e TDI, que foram os materiais empregados na fabricação dos painéis. Por fim, explora os sistemas multicamadas, considerados ideais para a aplicação dos painéis desenvolvidos neste estudo.

O capítulo três apresenta a metodologia e materiais utilizados para o desenvolvimento experimental da pesquisa no que respeita à análise do comportamento térmico. Também são apresentados os procedimentos para fabricação das diferentes amostras de painéis.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos e a respectiva discussão.

No capítulo cinco, e último, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho desenvolvido e propostos trabalhos futuros.

Capítulo 2: Estado da Arte

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, realiza-se uma pesquisa sobre o consumo de energia nos edifícios, destacando a importância de reduzir esse consumo nos dias de hoje. Assim, é importante que novos materiais, energeticamente eficientes, sejam utilizados, contribuindo simultaneamente para a redução do consumo energético e para o conforto térmico dos edifícios.

Compreender os mecanismos de transferência de calor é fundamental, uma vez que esses princípios serão empregados nos testes realizados nos painéis. Este estudo busca aprofundar o conhecimento sobre as principais propriedades da cortiça, grafite expansível e das resinas MDI e TDI, materiais utilizados na fabricação dos painéis que serão testados termicamente.

2.2 CONSUMO ENERGÉTICO NOS EDIFÍCIOS

Na Europa, o setor da construção civil é responsável por 40% da demanda energética total, sendo que aproximadamente 27% desse consumo é atribuído aos edifícios residenciais e 13% aos edifícios de serviços. Esse setor representa a maior fração de consumo de energia entre todos os setores de atividade econômica. Além disso, o setor de edifícios contribui com 36% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) [5].

Em Portugal, no ano de 2020, o setor dos edifícios consumiu cerca de 32,9% de energia total. Diante disso, a eficiência energética dos edifícios é um elemento central na política de eficiência energética da União Europeia. De acordo com o Decreto-Lei n.º 101-D/2020 [6], os edifícios novos devem ser edifícios com necessidades quase nulas de energia, podendo recorrer-se para isso à integração de fontes de energias renováveis. O objetivo é que os edifícios sejam capazes de produzir a energia necessária ao consumo e reduzir a dependência energética, contribuindo assim para diminuição do consumo energético dos edifícios.

Nos últimos anos foi registrada uma redução no consumo primário de energia e nas emissões de CO₂, mas ainda são necessários mais investimentos e melhorias até 2050. Em 2022, foi publicado o 5º Relatório de Progresso de Monitorização da Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios (ELPRE). O relatório mostra uma redução de cerca de 4,2% no consumo de energia primária e uma diminuição de 44,1% nas emissões de CO₂.

O ciclo de vida de uma construção abrange a produção de materiais, o transporte, os processos de construção, a operação e a manutenção. Muitos estudos indicam que a energia operacional é responsável por aproximadamente 85% a 95% do consumo total de energia em edifícios residenciais ao longo de uma vida útil de 50 anos [3].

A pobreza energética é uma questão complexa e multifacetada que afeta profundamente o bem-estar social, a qualidade de vida, a saúde e a produtividade das famílias. Está associada a carência de serviços energéticos essenciais, como aquecimento, água quente, resfriamento, iluminação e energia para eletrodomésticos. Suas causas estão relacionadas a fatores como a falta de acessibilidade econômica, altos custos energéticos e a baixa eficiência energética dos edifícios [7].

A União Europeia e seus Estados-Membros vêm desenvolvendo nos últimos anos, um quadro legislativo robusto e abrangente para promover a eficiência energética e combater a pobreza energética e incentivar o uso de fontes renováveis. Em Portugal, diversas iniciativas estratégicas e entidades reguladoras, como a ADENE (Agência para a Energia) e a DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia), são fundamentais para a aplicação e fiscalização dessas políticas. O Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC 2030) e o Sistema de Certificação Energética (SCE) são alguns dos principais instrumentos de execução dessas diretrizes no país.

O PNEC 2030 estabelece uma estratégia de longo prazo para enfrentar a pobreza energética, tratando-a como uma prioridade política essencial. Seu objetivo é assegurar um nível de vida digno para todos, promovendo uma transformação estrutural com foco na erradicação desse problema [8].

O SCE é gerido em Portugal pela ADENE e fiscalizado pela DGEG. Os certificados são emitidos após uma avaliação e classificação do desempenho energético dos edifícios, em uma escala de 8 classes, sendo A+ muito eficiente e F muito pouco eficiente. Já foram emitidos mais de 2.163.437 certificados desde o ano de 2014 [9].

Os edifícios novos, desde julho de 2021, devem ser edifícios com necessidades quase nulas de energia [6]. São os edifícios nZEB (*near Zero Energy Building*) na qual a necessidade energética muito baixa é quase toda produzida pelo próprio edifício, com um sistema de energia renováveis que são captadas no edifício ou no terreno em que está construído, tendo um balanço energético anual quase nulo, possuindo uma elevada eficiência energética [10].

2.3 CONFORTO TÉRMICO

Conforto térmico é a condição em que o ambiente proporciona ao usuário bem-estar físico e emocional, conforto e produtividade [11]. Estudos mostram que o clima externo é o principal fator que influencia as condições internas de conforto, através do equilíbrio das trocas térmicas entre o ambiente externo e interno. Nos países europeus, onde os invernos são rigorosos e os verões moderados, há uma alta demanda por energia para manter o conforto térmico durante a maior parte do ano [12]. A OMS estabeleceu intervalos de temperatura ideais para esse conforto: entre 18°C e 21°C no inverno, e entre 19°C e 23°C no verão.

É importante conhecer os limites de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, pois esses dados facilitam a escolha de materiais que favoreçam as trocas térmicas, melhorando assim o conforto térmico [13].

O professor alemão Wolfgang Feist desenvolveu o conceito de *Passive House*, que se baseia no aquecimento passivo, utilizando materiais da própria construção, sem a necessidade de equipamentos para aquecimento. Esse tipo de edifício mantém o clima interno sem sistemas ativos de aquecimento e resfriamento, sendo muito comum em países de clima mais frio, como os do centro e norte da Europa, onde o consumo de energia para aquecimento é maior. Para que uma casa seja considerada uma *Passive House*, são empregadas estratégias como aproveitamento solar passivo, janelas de alto desempenho, boa vedação do edifício, sistema de ventilação com recuperação de calor, sistemas eficientes de geração de calor e frio, e um alto nível de isolamento térmico nos elementos construtivos [10].

2.4 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.4.1 Isolamento Térmico

O isolamento térmico tem como principal objetivo aumentar a resistência térmica da envolvente do edifício, de modo a minimizar as trocas de calor entre o interior do edifício e o exterior. Isso contribui para a redução das necessidades de aquecimento e resfriamento [14].

É crucial que os materiais de isolamento térmico reduzam a taxa de fluxo de calor por condução, convecção e radiação, retardando a transferência de calor entre o interior e o

exterior dos edifícios devido à sua resistência térmica[15]. A propriedade mais importante de um material de isolamento térmico é sua condutividade térmica, que deve ser a menor possível para garantir sua eficiência como isolante[16].

2.4.2 Transferência de Calor

As transferências de calor ocorrem geralmente nas superfícies envolventes do edifício e entre os compartimentos internos que apresentam diferentes temperaturas[17], essas trocas podem ocorrer de três modos: condução, convecção e radiação, conforme a Figura 1.



Figura 1 - Mecanismos de transmissão de calor em edifícios [18].

Na convecção, a troca de energia acontece por meio do movimento de matéria, com o deslocamento de partículas, sendo um processo que ocorre principalmente em fluidos (líquidos e gases). É responsável pela troca entre superfícies sólidas e gases ou líquidos [17], [18].

Na radiação, a transferência de energia ocorre através da emissão de ondas eletromagnéticas a partir da superfície de um corpo, sem a necessidade de um meio material, permitindo a propagação no vácuo ou em meios transparentes[17], [18]. Todos os corpos, sejam sólidos, líquidos ou gasosos, têm a capacidade de emitir, absorver e transmitir radiação. Cada superfície possui um grau específico de emissão, denominado emissividade (ϵ). Teoricamente, os valores de emissividade variam de 0, indicando que o corpo não emite energia, até 1, indicando que o corpo emite toda a energia[14].

A condução, por sua vez, ocorre predominantemente em sólidos, resultando das colisões entre moléculas e da transferência de energia cinética. Para que esse processo aconteça, é necessário que as partículas do material estejam muito próximas umas das outras, permitindo

a transmissão de energia das partículas de maior temperatura para aquelas de temperatura mais baixa[17], [18].

2.4.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica (λ) é muito importante pois determina o fluxo de calor por condução através de uma espessura unitária e uma área definida do material, durante uma unidade de tempo, em resposta a um gradiente de temperatura.

A condutividade térmica revela a capacidade de um material transmitir calor, variando conforme o tipo de material, sua temperatura e pureza. Em termos gerais, com o aumento da temperatura, os materiais tendem a conduzir calor de maneira mais eficiente. Conhecendo os valores de condutividade térmica dos materiais, é possível comparar a eficácia deles em termos de capacidade de isolamento térmico ou dissipação térmica[14].

A condução de calor em sólidos pode ocorrer de duas maneiras: a) pelas ondas de energia, que ocorre pelas interações moleculares, conhecidas como ondas de rede; e b) pelo movimento livre dos elétrons, que estão presentes em metais e semicondutores[19].

A equação de condução de Fourier calcula as taxas de troca de calor por condução, conforme a Equação 1.

$$q = -\lambda \cdot A \cdot \nabla T \quad (\text{W/mK}) \quad (1)$$

Onde temos o fluxo de calor (q), a área da seção transversal (A) em m^2 , a condutividade térmica do material (λ) e o gradiente de temperatura (∇T).

2.4.4 Coeficiente de transmissão térmica

O coeficiente de transmissão térmica (U) avalia a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície entre as temperaturas dos ambientes. Quanto menor é o valor de U , melhor será o desempenho de isolamento do material[20].

Para obter o valor de U é necessário ter a valor da resistência térmica das camadas e fazer o inverso da somatória dos valores de resistência térmica, conforme a equação 2 . Também é considerado as resistências consoantes a posição dos elementos construtivos, denominadas por resistência térmica superficial interior e exterior, respectivamente R_{se} e R_{si} [21].

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum R_j + R_{si}} \quad \left(\frac{W}{m^2} \cdot ^\circ C \right) \quad (2)$$

2.4.5 Resistência térmica

A resistência térmica representa a dificuldade que um material apresenta para permitir a passagem do calor, resultante da redução da condução, convecção e radiação. Depende da capacidade do material em conduzir calor, da sua espessura e densidade. A unidade de medida da resistência térmica, R, é expressa em metros quadrados por kelvin por watt ($m^2 \cdot K/W$)[14]. A resistência térmica é calculada dividindo-se a espessura do material (E) pela sua condutividade térmica (λ), conforme a equação 3:

$$R = \frac{E}{\lambda} \quad (m^2 \cdot K/W) \quad (3)$$

Quanto menos capaz o material for de conduzir calor e quanto mais espesso ele for, maior será a resistência térmica, o que resultará em um isolamento térmico mais eficaz.

2.5 MATERIAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

Na década de 20, as construções eram predominantemente realizadas com materiais pesados, resultando em paredes mais espessas e maior resistência a mudanças de temperatura. Hoje em dia, materiais mais leves são cada vez mais utilizados, o que requer maior atenção ao isolamento térmico. Para garantir uma melhor eficiência energética muitas vezes é necessário adicionar um material extra que assegure um isolamento mais eficaz [22].

Os materiais de isolamento térmico são a solução mais comumente empregue para alcançar valores adequados de condutividade térmica, compensando assim a baixa inércia térmica dos sistemas construtivos convencionais [14]. Os materiais isolantes precisam assegurar um desempenho adequado ao longo de toda a vida útil do edifício[23]. Esses materiais podem ser classificados segundo diversos critérios, como o método de produção, a estrutura, a apresentação e a natureza da matéria-prima [15]. Na construção civil, a classificação mais comum é baseada na natureza do material, que pode ser mineral, sintética, vegetal ou animal.

A seguir, são apresentados os isolantes térmicos mais utilizados no setor da construção civil[24], [25], [26]. Todos esses materiais possuem características que já foram estudadas,

como sua condutividade térmica, reação ao fogo, energia incorporada, emissões de CO₂, reciclabilidade, custos e período de vida útil. As características físicas mais importantes desses materiais são a densidade e o valor de condutividade térmica, que estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Materiais de isolamento térmico mais utilizados na construção[23], [24], [27]

Material	Natureza	Densidade ρ (kg/m ³)	Condutividade térmica λ (W/m. °C)
Poliestireno expandido moldado (EPS)	Sintética	15-20	0,031-0,040
Poliestireno expandido extrudido (XPS)	Sintética	25-40	0,032-0,037
Poliuretano	Sintética	20-50	0,022-0,040
Argila expandida	Mineral	290-700	0,103- 0,160
Lã de rocha	Mineral	35-180	0,033-0,040
Lã de vidro	Mineral	15-100	0,034-0,040
Cortiça	Vegetal	100-120	0,037-0,050
Lã de coco	Vegetal	20-90	0,040-0,050
Fibra de madeira	Vegetal	50-270	0,038-0,050
Lã de ovelha	Animal	10-25	0,038-0,054

Os materiais sintéticos, como o EPS e o XPS, apresentam várias vantagens. Eles são de fácil aplicação, muito utilizados em placas, possuem boa resistência à compressão e ao vapor de água, além de serem leves e de fácil manuseio. No entanto, o EPS tem a desvantagem de ser altamente inflamável e de liberar gases tóxicos em caso de incêndio. O XPS, por sua vez, é um isolante acústico ineficiente e emite gases tóxicos em situações de incêndio. O poliuretano, por outro lado, oferece um bom isolamento, resistência à compressão e é impermeável ao vapor de água. No entanto, também libera gases tóxicos em caso de incêndio e não é reciclável [26].

Sobre os materiais minerais, a lã de vidro é um material composto por cacos de vidro reciclado e areia. Ela apresenta um bom desempenho durante os primeiros dez anos, mas sua eficácia diminui com o tempo. Suas desvantagens incluem baixo desempenho mecânico e térmico em ambientes úmidos, além de ser um recurso não renovável. A lã de rocha, feita a partir da fusão de rochas vulcânicas, é permeável ao ar e ao vapor de água, mas não absorve água. No entanto, é perigosa para a saúde, sendo necessária proteção adequada durante sua instalação para evitar o contato direto. Além disso, é um material inflamável. A argila expandida, por sua vez, é impermeável, possui alta resistência à compressão e é amplamente utilizada em telhados planos. Embora seja insolúvel em água e tenha boa resistência à umidade, seu desempenho térmico é limitado[26].

A fibra de madeira é obtida a partir dos resíduos da serragem, sendo compactada com sua própria lignina. Esse material oferece um bom controle de umidade, é um recurso renovável e amplamente disponível, com um balanço de CO₂ positivo. A lã de ovelha é um isolante altamente eficaz contra o frio e o calor, além de ser não inflamável e não liberar emissões tóxicas em caso de incêndio, tem boa capacidade higroscópica, é renovável e reciclável, mas possui pouca durabilidade e necessita de aditivos para garantir sua coesão. A lã de coco apresenta elevada resistência à umidade, sendo muito utilizada em ambientes como cozinhas e banheiros, além de ser um material renovável com boa capacidade de isolamento acústico. A cortiça, material em estudo neste trabalho, será utilizada nos testes e será abordada com mais detalhes na secção seguinte [26].

2.6 CORTIÇA

2.6.1 Importância em Portugal

Portugal é o principal produtor de cortiça, apresentando-se como líder mundial na produção, transformação e comercialização desse material. Sua exportação representa cerca de 2% das exportações de bens portugueses, o que resulta em um saldo de 938 milhões de euros em 2023. Portugal possui cerca de 720 mil hectares de sobreiro, a árvore da qual é extraída a cortiça (34% do total mundial) e produz mais de 85 mil toneladas de cortiça (46% do total mundial), o que representa 7.796 empregos diretos e milhares de empregos indiretos. Portugal também possui um centro de formação profissional da indústria da cortiça, que em 30 anos já formou mais de 36 mil pessoas[28].

Além da cortiça ter um impacto na economia do país, as florestas também têm importância ambiental ao controlar a desertificação, pois formam sistemas ecológicos e economicamente sustentáveis, preservando a biodiversidade e regulando o ciclo hidrológico, reduzindo as emissões de carbono e conservação da biodiversidade. Essas florestas representam cerca de 22% da área florestal nacional do país e têm a capacidade de absorver CO₂ da atmosfera. Elas também funcionam como sumidouros de carbono, contribuindo para mitigar os efeitos das emissões de gases de efeito estufa, capturando mais de 4 milhões de toneladas de CO₂ anualmente [28].

2.6.2 Sustentabilidade e impacto ambiental

As florestas de sobreiro desempenham um papel fundamental na preservação da biodiversidade, no sequestro de carbono e na conservação da água. Elas sustentam uma rica diversidade biológica, abrigando mais de 350 espécies de plantas e animais [29]. A preservação dos bosques de sobreiros é fundamental para o equilíbrio ecológico e a promoção da biodiversidade, tornando essas florestas essenciais para a saúde ambiental global, comparáveis às florestas tropicais da Amazônia e da Indonésia [29].

O sobreiro possui a capacidade de sequestrar quantidades substanciais de dióxido de carbono atmosférico, posicionando-se entre os sumidouros de carbono mais eficientes a nível global. Também desempenham um papel essencial na retenção hídrica e conservação do solo, funcionando como bacias hidrográficas naturais que absorvem a água das chuvas e liberam de forma gradual. Esse processo contribui para a prevenção da erosão do solo e para a mitigação dos riscos de inundação [30].

2.6.3 Principais características

A cortiça é extraída do sobreiro (*Quercus suber* L.), representado na Figura 2, uma espécie de carvalho. Essa árvore pode viver entre 250 e 300 anos, e sua primeira extração é feita quando a árvore atinge um perímetro de 70 cm, com uma altura de 1,30 m, isso corresponde de 20 a 25 anos de vida da árvore, depois é realizado em ciclos de 9 anos, normalmente entre maio e agosto. A cada extração, a casca do sobreiro é capaz de se regenerar, com um crescimento completo da casca e uma textura mais macia, sem prejudicar seu desenvolvimento [29]. A cortiça é aproveitada em 100% da sua extração, sendo utilizada para a finalidade destinada ou reciclada através de um processo de trituração, como na produção de aglomerados de cortiça ou como combustível [28].



Figura 2 – Árvore de sobreiro(Quercus suber) [29].

A cortiça exhibe notáveis propriedades isolantes, tanto em termos térmicos quanto acústicos e vibratórios. Além disso, caracteriza-se por sua leveza, com uma densidade variando aproximadamente entre 120 e 200 kg/m³, elasticidade, compressibilidade, significativa impermeabilidade a líquidos e gases, excelente resistência ao fogo e elevada resistência ao atrito [30]. Sua estrutura microscópica apresenta-se em forma de prisma e assemelha-se à configuração de uma colmeia [31]. Possui cerca de 40 milhões de células em cada centímetro cúbico, que estão agrupadas em uma estrutura alveolar característica, similar a uma colmeia. Essa configuração permite que o material absorva e retenha calor por longos períodos, além de absorver sons, tornando-o um excelente isolante térmico e acústico. Todas as células são preenchidas por uma mistura de gases semelhantes ao ar [28].

2.6.4 Granulados de cortiça

Os granulados de cortiça (GC), representados na Figura 3, são produzidos a partir da moagem de subprodutos gerados durante o processo de transformação da cortiça, como sobras, fragmentos, aparas e outros materiais de qualidade inferior. Inicialmente, os resíduos de cortiça são triturados, resultando na formação de grânulos, cujo tamanho é ajustado

conforme necessário, e em seguida, os grânulos de cortiça de qualidade inferior são separados. Durante esse processo, o pó de cortiça é removido por meio da aspiração dos grânulos menores. Posteriormente, os grânulos são secos com ar quente para alcançar o nível ideal de umidade [31].



Figura 3 - Granulado de cortiça.

2.6.5 Aglomerado de cortiça

O aglomerado de cortiça é uma mistura de grânulos de cortiça em diversos tamanhos, acompanhada de um aglutinante, normalmente uma resina termoendurecível. A técnica mais efetiva para a produção do aglomerado é a compressão, devido à sua elevada taxa de produção e reprodutibilidade [33]. Este material é muito utilizado como revestimento de paredes e pisos e isolamento térmico, principalmente como painéis multicamadas, pois possui baixa densidade, alta absorção de energia e é um bom isolante térmico e acústico. A produção do aglomerado de cortiça é realizada em um molde, normalmente confeccionado em aço, onde os grânulos de cortiça e a resina são colocados. Posteriormente, o material é comprimido no molde por uma pressão hidráulica, aplicando-se pressão e aquecimento moderado, promovendo a cura e a adesão do polímero agregado [34].

2.6.6 Aplicações da cortiça no mercado da construção civil

A cortiça é amplamente utilizada na construção civil, principalmente por ser um material muito sustentável e versátil, podendo ser encontrada em forma de granulados ou de placas, utilizando partes diferentes da cortiça, junto com outros materiais, como resinas, argamassas e aglutinantes [30].

Ela pode ser aplicada de várias formas, como, por exemplo, em tetos falsos, revestimentos de paredes e pisos, granulados para enchimento de espaços e mistura com

argamassas, painéis de pisos flutuantes, aglomerado expandido, juntas isolantes e de dilatação ou compressão, e linóleo.

Os painéis de pisos flutuantes, ilustrados na Figura 4, são compostos por uma camada inferior de aglomerado de cortiça, uma camada intermediária de MDF (Medium Density Fiberboard) ou HDF (High Density Fibreboard), que são painéis compostos por fibras finas de madeira, e uma camada superior de cortiça decorativa de alta densidade. Esses painéis são amplamente utilizados em quartos e salas, podendo também ser aplicados em cozinhas devido à sua resistência à umidade. A instalação é simples, não requerendo o uso de cola. Além disso, trata-se de um piso agradável, que mantém uma temperatura ideal e absorve impactos [30], [35].



Figura 4 - Pannel de piso flutuante de cortiça[32].

O aglomerado de cortiça expandida, ilustrado na Figura 5, é um material composto inteiramente de cortiça, sendo excelente para isolamento térmico, acústico e anti vibratório. É amplamente utilizado em paredes externas e internas, lajes, pisos, coberturas e tetos[33].



Figura 5 - Aglomerado de cortiça expandida aplicado em fachada externa[33].

Como mostrado na Figura 6, a cortiça é um excelente material para uso como junta de dilatação. Quando colocada entre lajes de concreto ou na conexão entre outros materiais,

a cortiça absorve movimentos causados por vibrações, dilatações e contrações, graças ao seu elevado fator de recuperação. Dessa forma, ajuda a evitar danos à estrutura, como fendas ou fissuras [34].



Figura 6 - Cortiça utilizada como junta de dilatação em barragem de concreto[34].

2.7 GRAFITE

A grafite é amplamente reconhecida por suas propriedades de retardamento de chamas. Seu uso é especialmente interessante porque, embora a cortiça possua boas propriedades de resistência ao fogo, as resinas utilizadas normalmente são materiais combustíveis. Assim, a adição de grafite contribui significativamente para melhorar o desempenho dos painéis em relação ao comportamento diante do fogo.

2.7.1 Propriedades

A grafite natural, como mostra na figura 7, é representada pela estrutura cristalina do carbono, composta por anéis hexagonais, formando finas placas paralelas, conhecidas como grafeno. Possui condutividade elétrica, que é causada pelo quarto elétron de valência que não participa das ligações covalente, e tem um deslocamento facilitado pela camada eletrônica sob um campo elétrico[35] [19].



Figura 7 – Grafite natural

As ligações entre os grafenos são estabelecidas por forças fracas de Van der Waals. Como possui uma estrutura em camadas, ocorre deslizamento das placas paralelas de grafeno[35]. A fraca ligação entre as placas confere à grafite suas propriedades de suavidade e auto lubrificação, facilitando também a introdução de uma vasta gama de átomos, moléculas e íons entre as folhas de grafite [36].

A grafite apresenta três formas: natural, intercalado (expansível) e expandido. O grafite natural é extraído diretamente da mina, sem qualquer modificação química ou física. O grafite expansível contém moléculas e íons de intercalante entre as camadas do grafite natural. Já o grafite expandido passou por um processo de choque térmico de 1000 °C em que suas folhas são separadas randomicamente, sem a presença de intercalantes[36]. A Figura 8 representa essa produção de diferentes tipos de grafite.

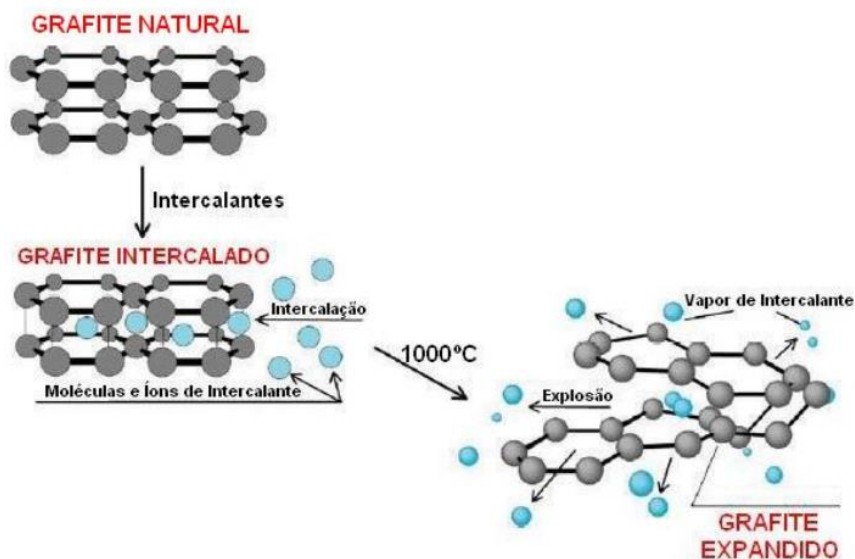


Figura 8 - Esquema da produção de diferentes tipos de grafite [36].

A grafite é comumente incorporada em diversos materiais, como no ESP Grafito. Nesse composto, a presença de grafite reduz a radiação, refletindo calor e diminuindo a condutividade térmica para aproximadamente 0,031 W/mK. Esse material é amplamente empregado em sistemas ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems), permitindo uma menor espessura de isolamento. Comparado ao EPS branco, o ESP Grafito oferece cerca de 20% a mais de capacidade de isolamento térmico [37].

2.7.2 Grafite expansível

A grafite expansível (GE) foi mencionado pela primeira vez na literatura em 1841 por Schafhautl, durante sua análise de flocos de cristal de grafite em uma solução de ácido sulfúrico [38].

A grafite expansível apresenta-se na forma de flocos, junto com moléculas inseridas entre as estruturas dos planos basais, normalmente compostas por enxofre ou nitrogênio. Com a influência do calor, as camadas se separam por meio de termólise, adotando uma disposição em forma de “sanfona”, onde os flocos do composto intercalado de grafite se expandem, dando origem ao grafite expandida [19]. O processo de expansão pode ser iniciado em temperaturas a partir de 150 °C, e seu volume final pode aumentar em 100% em relação ao volume inicial [19].

A GE é bastante utilizada como retardante de chamas, tem uma propriedade expansível significativa. Durante a expansão, forma-se uma barreira física porosa entre o material a ser protegido e a chama[39]. Moia [4] estudou sua aplicação em placas de cortiça, realizando testes de resistência ao fogo, e comprovando sua eficácia na proteção contra incêndios. Dada a importância desse material, neste trabalho serão realizados testes de comportamento térmico usando os mesmos materiais, mas agora em temperaturas ambiente, para verificar se o grafite também é eficaz no isolamento térmico em condições normais.

2.8 RESINAS

O polímero MDI é constituído por isocianatos poliaromáticos e exibe uma tonalidade marrom [40], [41] Já o polímero TDI exibe um líquido transparente, incolor ou ligeiramente amarelado [42].

O TDI é obtido por meio da combinação de recursos como óleo bruto e gás natural. O processo de produção compreende a nitração do tolueno, seguida por uma etapa de hidrogenação para produzir o tolueno diamina (TDA). Posteriormente, o TDA é submetido a uma reação de condensação com formaldeído, resultando na obtenção do TDI (toluene diisocyanate).

O MDI é derivado de uma síntese que envolve uma combinação de recursos como petróleo, gás natural e tolueno. A produção de MDI pela empresa BASF, conforme mostra a figura 9, segue um processo que inicialmente consiste na nitração do benzeno e sua subsequente hidrogenação para obtenção de anilina. A anilina é então submetida a uma condensação com formaldeído, resultando na formação de metileno dianilina (MDA), que por sua vez é reagido com fosgênio (uma combinação de gás cloro e monóxido de carbono) para gerar o MDI [43].

O MDI também demonstra capacidade de suportar elevadas temperaturas e é reconhecido por sua baixa suscetibilidade à inflamabilidade, atribuída ao seu ponto de inflamação que excede os 200 °C. A decomposição do MDI se inicia em temperaturas superiores a 230 °C[40] Ele encontra sua principal aplicação na fabricação de espumas rígidas de poliuretano, as quais são altamente eficientes como isolantes térmicos. Estas espumas são extensivamente empregadas em aparelhos como freezers, refrigeradores e na construção civil [40]

Os poliuretanos TDI demonstram maior flexibilidade em comparação aos poliuretanos baseados em MDI. Esta distinção é atribuída à presença de um menor número de anéis aromáticos no isocianato utilizado na síntese do primeiro mencionado, conferindo-lhe propriedades mais flexíveis[43].

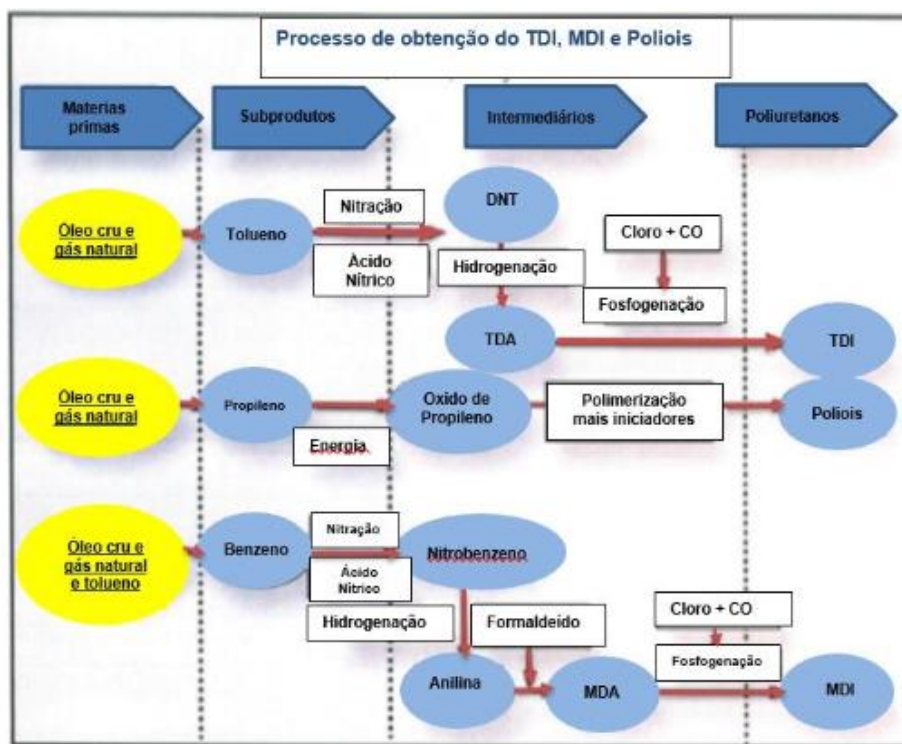


Figura 9 - Processo de obtenção do TDI, MDI e Poliois[40]

2.9 SISTEMAS MULTICAMADAS, PORTAS INTERIORES E PAINÉIS DECORATIVOS

Cada vez mais, sistemas multicamadas vêm sendo utilizados como componentes estruturais e não estruturais na construção, sendo muito utilizado nas envolturas de edifícios novos e de reabilitação. Essa preferência se deve à combinação de alta rigidez e resistência com propriedades de isolamento e leveza do núcleo, o que resulta em uma excelente relação rigidez/peso [47]. Por ter a opção de variar tanto os materiais quanto suas espessuras, é possível ter diferentes combinações com variação das propriedades, de acordo com o uso final desejado [47]. São constituídos por pelo menos dois materiais, podendo incluir três camadas externas (pele) e dois núcleos, dispostos de forma sobreposta, conforme ilustrado na Figura 10. As camadas de pele são mais finas e possuem uma elevada rigidez mecânica, enquanto a camada de núcleo, com maior espessura, tem menor rigidez e densidade. A união das camadas é feita por meio de adesivos [44].

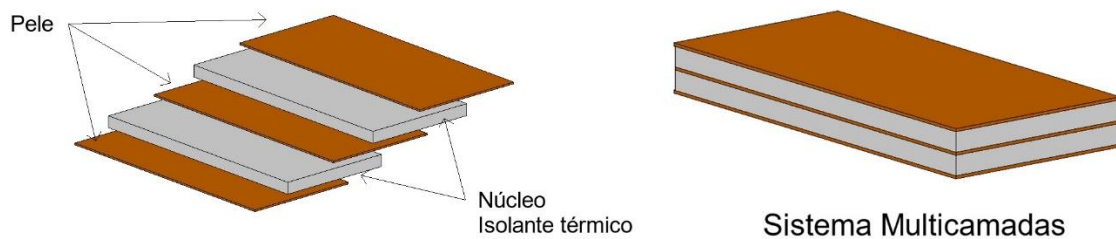


Figura 10 - Esquema de um sistema multicamadas.

Para a parte externa desse sistema, a madeira é muito utilizada, principalmente os painéis de MDF e OSB, devido a serem materiais renováveis, a baixo custo e a baixa densidade. Também são muito utilizados materiais metálicos, como ligas de alumínio e aços inoxidáveis, que possuem boa resistência à umidade e corrosão, e elevada resistência mecânica [44].

Diversos materiais celulares sintéticos são empregados nos núcleos dos sistemas multicamadas devido à sua elevada capacidade de absorção de energia. Entre os mais utilizados destacam-se o poliuretano (PU), o poliestireno (PE), o policloreto de vinila (PVC) e o polipropileno (PP). No entanto, apesar de seu desempenho satisfatório, esses materiais apresentam problemas ambientais, tornando-se imperativo buscar e investigar novas alternativas sustentáveis [45]. Também é muito utilizado espumas, cortiça, madeira de balsa [44].

Estudos realizados por Ribas et al. [50] mostram que, em um teste de desempenho térmico, onde o ambiente externo estava com temperatura máxima de 27,5 °C, obtiveram resultados de 19,1 °C na parte interna, utilizando uma parede sanduíche de EPS e lã de vidro com uma camada de ar. Os autores concluem que sistemas multicamadas com camada de ar junto com um material isolante são uma solução eficiente para o conforto térmico.

A cortiça é um material altamente adequado para utilização no núcleo, devido à sua base biológica, que permite a redução da pegada de carbono, das emissões de gases de efeito estufa e do consumo de energia e produtos químicos. Além disso, a cortiça possibilita a biodegradação total ou parcial da estrutura ao final de seu ciclo de vida, contribuindo para a sustentabilidade. Adicionalmente, a cortiça oferece excelente isolamento térmico e acústico, tornando-a uma escolha vantajosa para aplicações em sistemas multicamadas [46].

Estudos mostram que painéis multicamadas, usando cortiça no interior, são ótimas opções para utilizar em painéis ou divisórias interiores, pois o aglomerado de cortiça

apresenta um alto desempenho sob compressão perpendicular e as camadas externas de madeira aumentam sua resistência mecânica [47].

Castro et al[48] conduziu um estudo das propriedades de painéis multicamadas com o núcleo de grânulos de cortiça junto com resina epóxi como elemento adesivo. Foram realizados ensaios de flexão em três pontos e de condutividade térmica. Os resultados obtidos mostraram que o painel por eles fabricado apresenta uma maior tensão de cisalhamento quando comparado com os aglomerados de cortiça disponíveis no mercado. Já em relação ao teste de condutividade térmica, a cortiça junto com a resina epóxi obteve um valor de 0,045 W/mK.

Os painéis oferecem vantagens como rápida instalação, redução no peso da construção e permitem soluções arquitetônicas inovadoras, além de uma redução do consumo energético durante seu ciclo de vida [48]. Para que sejam eficientes, é importante considerar os detalhes construtivos e o desempenho térmico e acústico desses materiais [50]. Sua maior desvantagem é a complexidade dos elementos, resultando em maior custo para fabricação e instalação, o que é um dos principais motivos para não serem muito utilizados[44].

Esses painéis também podem ser utilizados como portas, e quando apresentam baixa condutividade térmica, contribuem para a redução da formação de pontes térmicas, prevenindo problemas como condensação e bolor. Além disso, reduzem a troca de calor entre ambientes, resultando em economia de energia com aquecimento ou resfriamento.

Capítulo 3: Programa experimental

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentada a parte experimental do trabalho, detalhando os materiais utilizados, suas quantidades e características para a formação dos painéis de cortiça com grafite expansível. Serão explicados também os ensaios experimentais para avaliação do comportamento térmico dos painéis, descrevendo o processo de montagem e os equipamentos utilizados.

3.2 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DE AGLOMERADO DE CORTIÇA COM GRAFITE EXPANSÍVEL

No mercado atual, são comercializados inúmeros aglomerados de cortiça. Contudo, para o presente estudo, será produzido um aglomerado próprio, dando continuidade ao trabalho já desenvolvido anteriormente por Moia [4]. Este aglomerado consiste em um material que incorpora diversas partículas de cortiça unidas por uma resina. Além disso, algumas amostras serão enriquecidas com grafite expansível, com o intuito de possibilitar comparações em análises futuras.

O painel de aglomerado de cortiça será constituído por duas granulometrias distintas de GC, nomeadamente 3-4 mm e 0,2-0,5 mm, ambas fornecidas pela empresa Granorte e representadas respectivamente nas Figura 11 e Figura 12. A proporção adotada consistiu em 96% de grãos de maior dimensão e 6% de grãos menores, sendo estes últimos empregados para envolver os grãos maiores e proporcionar uma aderência mais eficaz [4]. A cortiça de 3-4 mm possui densidade de 50/55 Kg/m³ e um teor de umidade menor de 8% [49]. A de granulometria de 0,2-0,5 mm tem densidade de 45/50 Kg/m³ e um teor de umidade menor de 8%, conforme o fornecedor [50].



Figura 11 – Grânulo de cortiça 3-4 mm.



Figura 12 – Grânulo de cortiça 0,2-0,5 mm.

O grafite expansível utilizado, GHL PX 95 LT, fornecido pela empresa Georg H. Luh GmbH e representado na Figura 13, é um material que, quando submetidos a altas temperaturas, sofre um processo de expansão, aumentando cerca de 100 vezes o seu volume. Este grafite apresenta uma composição mínima de 95% de carbono, com um teor máximo de 5% de cinzas, e 1% de umidade [51]. Além disso, destaca-se por sua elevada condutividade térmica [52].



Figura 13 - Grafite expansível.

Adicionalmente ao GC, foram utilizados ligantes fornecidos pela empresa Flexpur. Os aglutinantes empregados foram as resinas MDI e TDI. A quantidade de resina aplicada correspondeu a aproximadamente 10% em peso da quantidade total de cortiça. A resina MDI, Figura 14, possui uma densidade de $1,18 \text{ g/cm}^3$ e uma viscosidade de 1200 a 1800 cP a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [53]. A resina TDI, Figura 15, apresenta uma densidade de $1,048 \text{ g/cm}^3$ e uma viscosidade de 3000 a 6000 cP a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [42].



Figura 14 - Resina MDI.

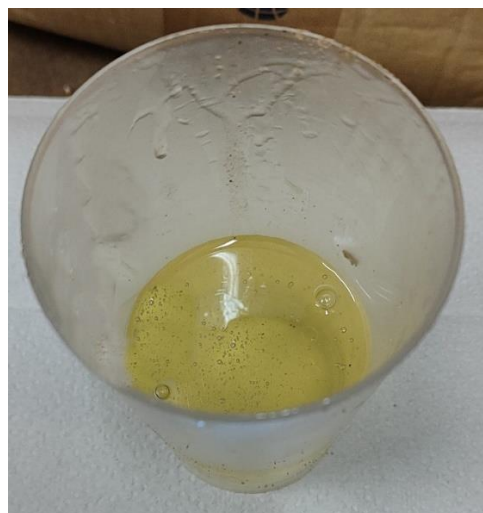


Figura 15 - Resina TDI.

Na Tabela 2 é apresentada a composição adotada para a elaboração dos painéis de aglomerado de cortiça, baseado em estudos prévios [4].

Foram preparadas duas amostras de base, uma utilizando a resina MDI e outra com resina TDI. Nas amostras subsequentes, foram adicionadas percentagem de grafite de 5% e 10%, em relação ao peso da cortiça, resultando então na amostra denominadas MDI5% e MDI10%, bem como TDI5% e TDI10%, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Denominação e composição dos painéis de aglomerado de cortiça fabricados.

Sigla	Composição
MDI	Granulado de Cortiça + MDI
MDI5%	Granulado de Cortiça + MDI + 5% de grafite expansivo
MDI10%	Granulado de Cortiça + MDI + 10% de grafite expansivo
TDI	Granulado de Cortiça + TDI
TDI5%	Granulado de Cortiça + TDI + 5% de grafite expansivo
TDI10%	Granulado de Cortiça + TDI + 10% de grafite expansivo

A determinação da quantidade necessária de cada material para a produção de uma amostra final com dimensões de 550 mm × 550 mm × 19 mm envolveu a implementação de um código no ambiente Matlab [4]. Nesse código, foram inseridos parâmetros como a área do molde, a espessura final da amostra e a densidade final desejada. Com essas informações, o código calculou a quantidade exigida de cada material, bem como a pressão necessária para o processo de prensagem, conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de material utilizada para a produção cada amostra.

Material	Quantidade(g)
Granulado de Cortiça 3-4 mm	792,28
Granulado de Cortiça 0,2 - 0,5 mm	47,22
Resina TDI	83,95
Resina MDI	83,95
Água MDI	193,93
Água TDI	129,28
Grafite 5%	41,97
Grafite 10%	83,95

No processo de fabricação dos painéis, todos os materiais foram pesados de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo código. Nesse contexto, a balança foi calibrada com o recipiente destinado ao material e a quantidade requerida de cada matéria foi aferida, conforme indicado na Figura 16.



Figura 16 - Pesagem dos materiais para a fabricação dos painéis.

Inicialmente, procedeu-se à introdução das duas granulometrias de GC, as quais foram misturadas com auxílio de um agitador acoplado a uma furadeira manual, mostrado na Figura 17. Em seguida, a resina diluída na água morna foi adicionada, sendo a grafite expansível incorporada posteriormente, nas amostras correspondentes.

Após a homogeneização do material e a aplicação do revestimento de papel vegetal no molde, como mostra a Figura 18, o composto foi distribuído no interior do molde, seguido por um nivelamento manual para assegurar uma distribuição uniforme, conforme a Figura 19. Este procedimento foi executado de forma rápida, uma vez que, após a mistura da resina com água, o processo de reação e cura do material é iniciado.



Figura 17 - Mistura dos materiais para a fabricação do aglomerado.



Figura 18 - Molde revestido por papel vegetal.



Figura 19 - Distribuição do material no molde.

Após espalhada a mistura de GC com resina, foi colocada por cima mais uma camada de papel vegetal, para facilitar a retirada do molde, e em seguida o molde foi fechado, conforme mostra a Figura 20.

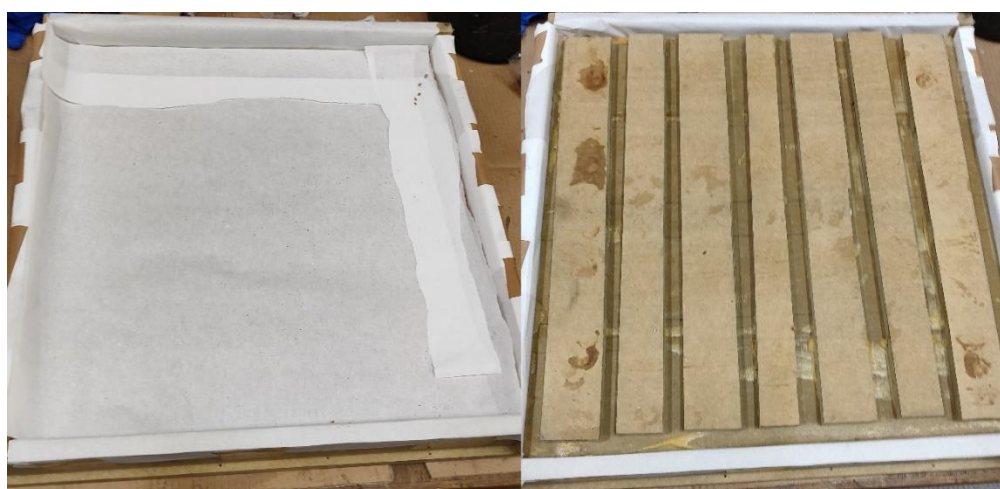


Figura 20 - Revestimento superior de papel vegetal e molde fechado.

O molde foi colocado na prensa, como mostra a Figura 21, previamente configurada, para comprimir a mistura, formar o aglomerado e curar a resina. Para realizar esse processo

foi utilizada a Prensa Laboratorial MonTech LP3000. A força de compactação aplicado foi de 11,42 kN durante 135 minutos a 140 °C para a resina MDI e a 125 °C para a resina TDI[4].



Figura 21 - Processo de prensagem na Prensa Laboratorial MonTech LP3000.

Após o término do período de prensagem, o molde foi removido da prensa e submetido a um peso adicional, a fim de evitar possíveis deformações na amostra, conforme a Figura 22. O conjunto foi então deixado a resfriar por um período mínimo de 15 horas, sendo retirado do molde após esse intervalo.



Figura 22 – Amostra resfriando com o peso adicional.

A Figura 23 apresenta as amostras contendo resina MDI prontas para ser ensaiadas. Na imagem b) e c), podem ser observados pontos brancos, que correspondem a fragmentos do papel vegetal que não puderam ser removidos, pois ficaram aderidos a resina. Na imagem d) mostra um detalhamento do grafite expansível na amostra. Durante os ensaios percebeu-se que as partículas de grafite expansível localizadas nas superfícies das amostras se desprendiam com facilidade.

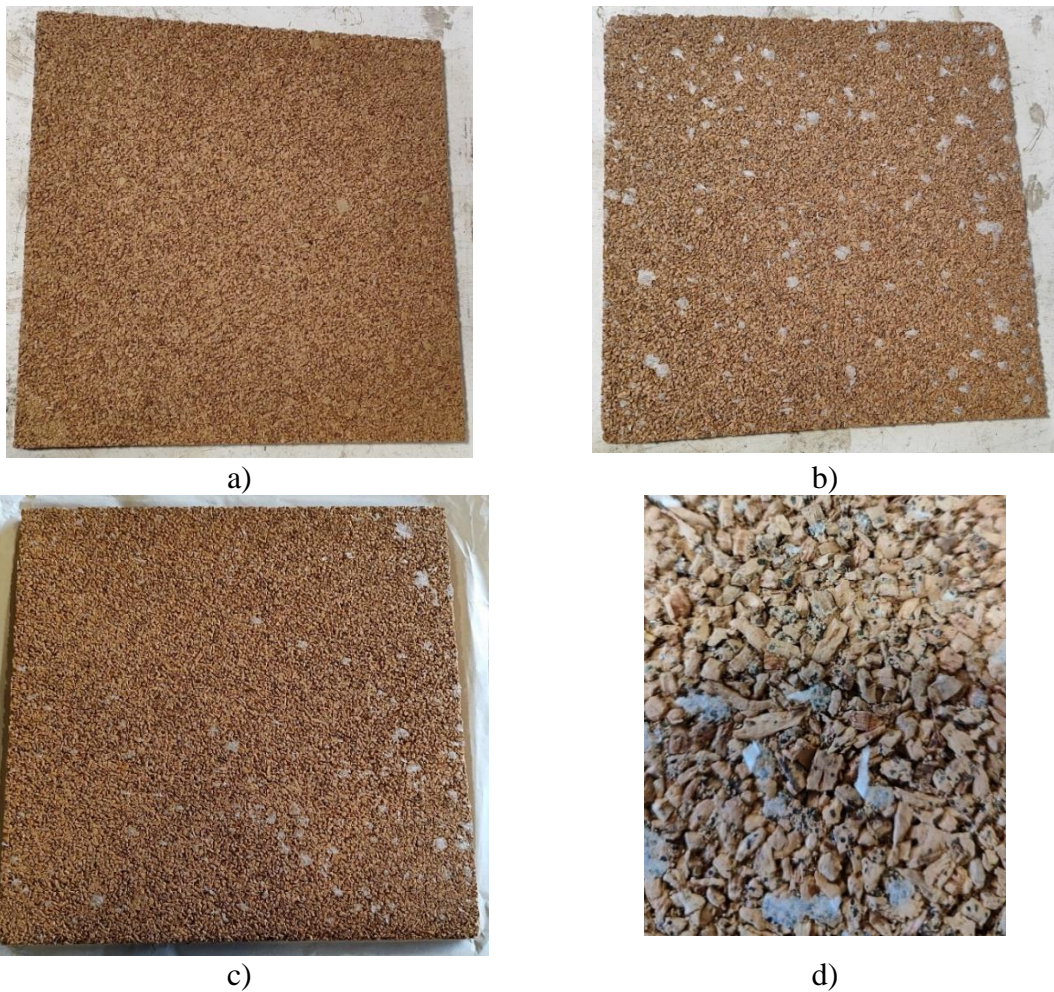


Figura 23 - a) amostra MDI; b) Amostra MDI5%; c) Amostra MDI10%; d) grafite expansível na amostra MDI10%.

Na Figura 24 estão as amostras com a resina TDI, podemos observar que elas possuem menos resquícios do papel vegetal, por ser uma resina diferente, a remoção foi facilitada.

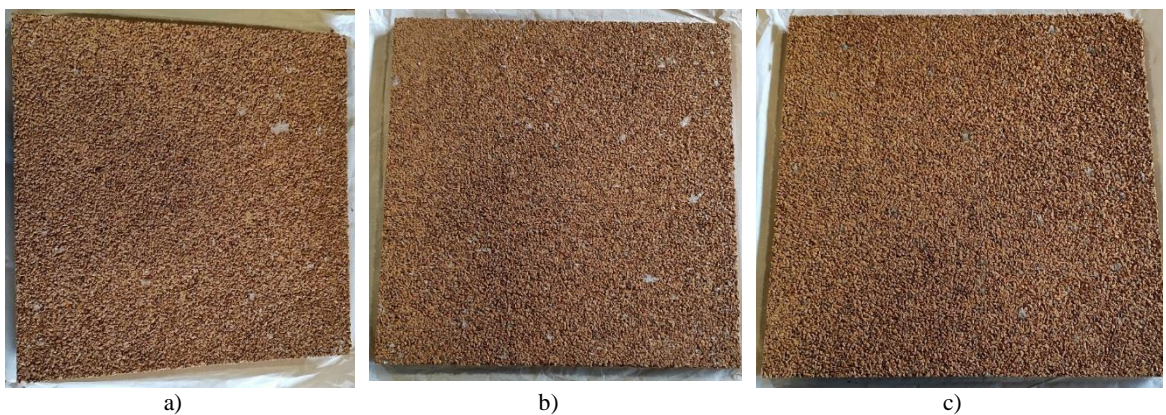


Figura 24 - a) amostra TDI; b) amostra TDI5%; c) amostra TDI10%.

Com as amostras prontas, foi realizado a pesagem e medido sua espessura para o cálculo da densidade de cada painel, conforme a Tabela 4. A amostra possui uma área transversal de 0,2916 m² e uma espessura em média de 0,02 m.

Tabela 4 -Espessura, massa e densidade dos painéis fabricados.

Amostra	Espessura(m)	Massa(g)	Densidade(kg/m ³)
MDI	0,02002	917,4	157,147
MDI5%	0,02012	968,2	165,025
MDI10%	0,02037	1012,7	170,491
TDI	0,02015	935,2	159,163
TDI5%	0,02082	974,5	160,514
TDI10%	0,02096	1014,7	166,019

Para os ensaios de determinação da condutividade térmica realizados no GHP a amostra deve apresentar dimensões de 500 mm × 500 mm. Posteriormente, para o ensaio de avaliação do desempenho térmico em contínuo dos painéis através do sistema de termofluxímetro, as dimensões requeridas são de 400 mm × 400 mm. Para isso foi utilizada uma serra circular para fazer os cortes necessários, conforme mostra a Figura 25.



Figura 25 - Utilização da serra circular para o corte das amostras.

3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.3.1 Introdução

Para avaliar o comportamento térmico das amostras analisadas, foram adotados dois procedimentos de ensaio, cujos resultados foram posteriormente comparados. Através do método *Guarded Hot Plate*, foi determinado o valor da condutividade térmica em diferentes níveis de temperatura. Na avaliação do desempenho térmico em contínuo através de sensores de fluxo de calor, foi realizada uma análise contínua ao longo de um período de medição, permitindo determinar o fluxo de calor e as temperaturas superficiais. Posteriormente, foi possível estimar o coeficiente de transmissão térmica, a resistência térmica e a condutividade térmica das diferentes amostras de painel em estudo.

3.3.2 *Guarded Hot Plate*

Os testes de condutividade térmica, realizados no *Guarded Hot Plate*, λ -Meter EP500e, seguem as normas internacionais ISO 8302[54], DIN EN 1946-2[55], DIN EN 12667[56] e ASTM C177[57].

Para medir a condutividade térmica é utilizada a equação 4[58]:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{\Delta T \cdot A} = \frac{U \cdot I \cdot d}{\Delta T \cdot A} \quad (W/mK) \quad (4)$$

O equipamento tem a capacidade de mensurar a espessura (d) da amostra, a discrepância de temperatura (ΔT) e o fluxo de calor (Q), o qual é equiparado à potência elétrica do processo de aquecimento de medição ($P = U \cdot I$). Para estabelecer um gradiente de temperatura através da amostra, uma diferença de temperatura é aplicada entre a placa quente e as placas de guarda, sendo a placa quente a superior e a de guarda a inferior do equipamento, e essa potência é regulada para manter a temperatura em um estado constante. O dispositivo está equipado com múltiplos sensores de temperatura que monitoram as temperaturas nas placas quente e de guarda, bem como na própria amostra. Juntamente com a área de medição (A), é possível calcular a condutividade térmica [65].

A Figura 28 representa o equipamento utilizado, no qual a amostra é posicionada no espaço designado como "Specimen", situado entre o sensor superior e o sensor inferior. A seção transversal é quadrada, com o tamanho ideal de 500 mm x 500 mm, embora amostras de menor tamanho também possam ser utilizadas, como 150 mm x 150 mm. A dimensão das

amostras utilizada é de 500 mm x 500 mm, com aproximadamente 20 mm de espessura. Este equipamento é capaz de testar qualquer sólido, desde que apresente uma condutividade térmica compreendida entre 0,003 e 2 W/mK. Os dados e resultados obtidos são registrados e armazenados em um computador que está integrado ao sistema do equipamento [59].

A amostra foi posicionada no centro do equipamento, conforme mostra a Figura 26. A placa superior desceu gradualmente até que a pressão especificada de 1000 Pa fosse alcançada, assegurando, assim, um contato térmico adequado entre os conjuntos superiores quente e frio e a amostra[60].

Posteriormente, os parâmetros foram configurados no software computacional, conforme a Figura 27, incluindo a dimensão da amostra, o número de temperaturas de teste, a temperatura do teste, a diferença de temperatura entre as placas sensoras e o critério de fim de ensaio. Este último é atingido quando a variação da condutividade térmica é inferior a um percentual predeterminado após um intervalo de tempo definido. O teste foi realizado para as temperaturas de 10 °C, 30 °C e 50 °C em cada amostra. O ensaio foi concluído quando a variação percentual da condutividade térmica permaneceu abaixo de 1% durante um período de 360 minutos. Com esses parâmetros devidamente inseridos, o teste foi iniciado.



Figura 26 – Equipamento λ-Meter EP500e

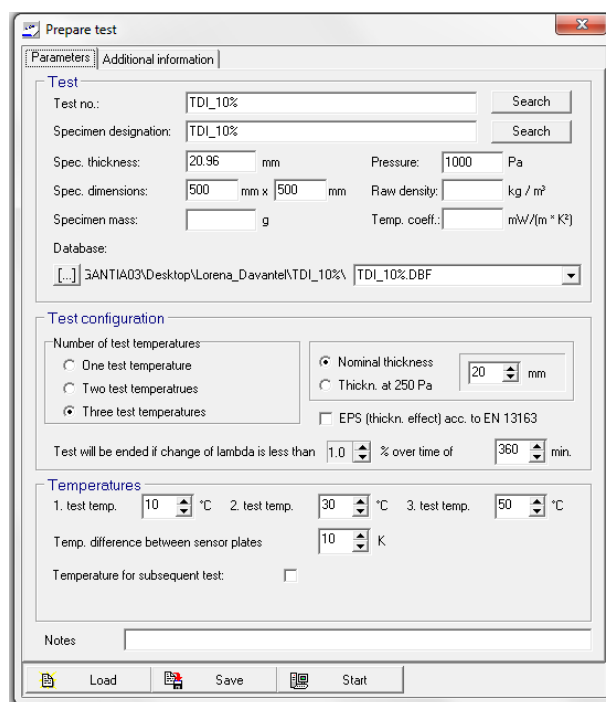


Figura 27 - Interface do Software computacional do λ-Meter EP500e.

3.3.3 Avaliação do desempenho térmico em contínuo

As amostras previamente produzidas, designadas como MDI, MDI5%, MDI10%, TDI, TDI5% e TDI10%, foram submetidas a um ensaio contínuo para determinação do comportamento térmico, com duração mínima de sete dias. Esse ensaio permitiu a análise da variação de temperatura superficial e do fluxo de calor, além de possibilitar a estimativa do coeficiente de transmissão térmica, seguido pela determinação da condutividade térmica de cada amostra.

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, em uma sala isolada, cujas paredes, piso e teto são revestidos com aglomerado negro de cortiça de 12 cm de espessura, conforme ilustrado na Figura 28. Esse compartimento de teste é dividido em duas áreas, denominadas sala 1 e sala 2. Na sala 1 se manteve a temperatura ambiente e na sala 2 foi ligado o ar-condicionado a 16°C. Com isso foi possível garantir que o fluxo de calor ocorresse em apenas uma direção, neste caso, da sala 1, com valores de temperatura superiores, para a sala 2.

A divisória que separa essas salas é onde as amostras a serem testadas são instaladas. Essa divisória é composta por seis vãos, cada um com dimensões de 450 mm x 900 mm.

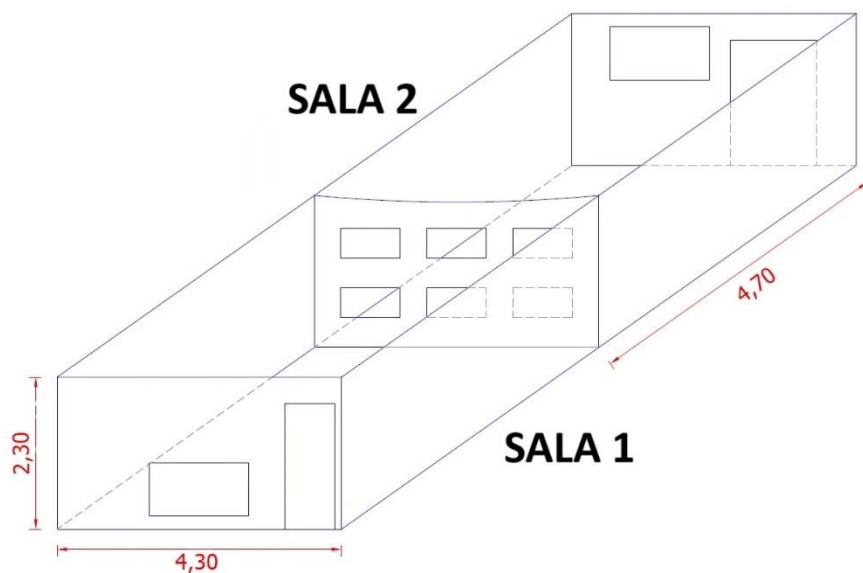


Figura 28 – Projeto da sala de teste.

As amostras, com dimensões de 400 mm x 400 mm, precisaram ser acopladas a placas de aglomerado de cortiça negra para serem adequadamente inseridas nos vãos da divisória. A Figura 29 mostra como se deve ficar a amostra final.



Figura 29 – Exemplo da amostra final.

Primeiro foi cortado as placas de aglomerado negro de cortiça, e em seguida coladas ao painel que sera testado com espuma de poliuretano, aplicando conforme mostra a Figura 30, e esperou 24 horas para a secagem completa. A Figura 31 mostra como ficou a amostra pronta para ser ensaiada.

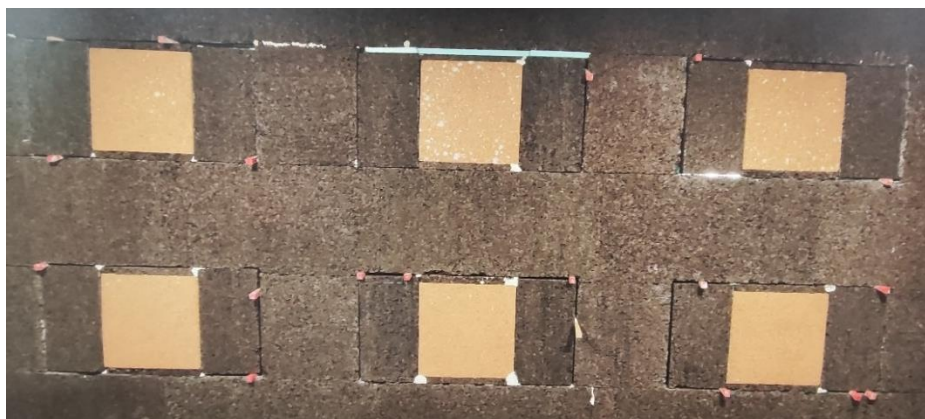


Figura 30 - Aplicação da espuma de poliuretano.



Figura 31 – Colagem da amostra finalizada.

Após a preparação das amostras, foi realizado a colocação nos vãos da divisória, para garantir a vedação completa, foram utilizadas placas de XPS e cola quente para selar os espaços necessários, conforme a imagem b) na Figura 32.



a)



b)

Figura 32 – a) Vista interior da sala 1; b) Vista interior da sala 2.

Observando a imagem a), na Figura 33, as amostras da primeira linha, correspondem da direita para a esquerda as amostras MDI, MDI5% e MDI10% e na segunda linha as amostras TDI, TDI10% e TDI5%.

O ensaio foi realizado em duas etapas, sendo testados três amostras simultaneamente em cada etapa. Na primeira etapa, foram testados os painéis de MDI e, na segunda, os de TDI. De um lado foi mantido a temperatura ambiente (sala 1) e do outro lado um sistema de resfriamento (ar-condicionado) (sala 2), com temperatura programada para os 16 °C no sentido de reduzir as flutuações de temperatura e garantir que o fluxo de calor ocorresse sempre no mesmo sentido. O sistema de medição foi instalado em cada um dos três painéis, permitindo assim o início do teste, conforme ilustrado na Figura 33.



Figura 33 - Painéis MDI com os sensores de fluxo de calor e temperatura instalados.

Para a medição do fluxo de calor, foram utilizados três sistemas de medições em cada painel, cujos dados são obtidos a cada 10 minutos, utilizados para determinar o valor experimental do coeficiente de condutividade térmica (U). Em cada painel foram aplicados dois sensores de fluxo de calor, identificados como $HF1$ e $HF2$, e quatro sensores de temperatura superficial. Próximos ao $HF1$ estão os sensores de medição de temperatura superficial $Ts1,1$ e $Ts1,2$, enquanto próximos ao $HF2$ estão os sensores $Ts2,1$ e $Ts2,2$. Na análise dos resultados, os sensores $HF1$ e $HF2$ forneceram os valores de $q1$ e $q2$. Os quais foram posicionados sobre os painéis na superfície voltada para o lado da sala 1, como mostra a Figura 34.

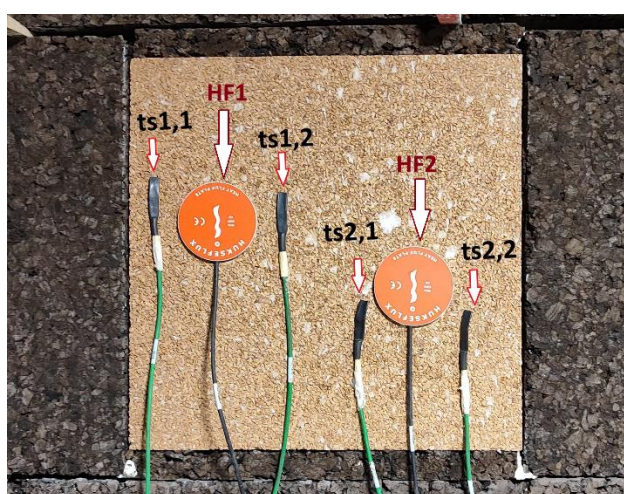


Figura 34 – Sensores de fluxo e de temperatura instalados nos painéis.

O sensor de fluxo de calor (HF) é um transdutor que transmite um sinal elétrico, que não é mais que uma função direta do fluxo de calor transmitido por ele [67], [68]. Ele é composto por placas finas, caracterizadas pela sua termorresistência, nas quais múltiplos sensores de temperatura estão distribuídos ao longo da superfície. Esta disposição visa garantir que o sinal elétrico gerado pelos referidos sensores esteja diretamente correlacionado com o fluxo de calor que passa pela placa [61].

As características fundamentais de um sensor de fluxo de calor incluem uma resistência térmica reduzida, visando mitigar as interferências geradas pelo dispositivo em si, e uma sensibilidade adequada para a transmissão de um sinal facilmente analisável, capaz de abranger uma ampla gama de variações no fluxo de calor, mesmo em níveis mais baixos. Estes dispositivos são compostos por um corpo heterogêneo de material cerâmico ou plástico, projetado para manter a baixa resistência térmica, e que envolve a área de medição do sensor de fluxo de calor[62].

Os sensores de temperatura superficial são dispositivos transdutores que convertem a temperatura em um sinal elétrico, cuja magnitude é determinada pela temperatura de contato com o elemento em teste[62]

O termohigrômetro é constituído por três componentes distintos: um registrador de dados, uma sonda de temperatura e uma sonda de umidade, conforme ilustrado na Figura 35. No presente experimento, dois termohigrômetros foram empregados, cada um instalado em uma das salas de teste, os quais registravam os valores a cada 10 minutos. Esses dados de temperatura obtidos foram utilizados para calcular o valor de U de cada painel.



Figura 35 - a) Sonda de temperatura, b) sonda de umidade.



Figura 36 - Datalogger

O datalogger, representado na Figura 36, é um dispositivo portátil que possui a capacidade de registrar digitalmente e de forma autônoma a temperatura em intervalos definidos de tempo. Os dados registrados podem ser posteriormente extraídos e avaliados. Embora os dados de umidade coletados não sejam diretamente utilizados no cálculo da resistência térmica, eles são valiosos para a interpretação de determinados resultados obtidos.

O software utilizado para a coleta dos dados foi o LoggerNet. Este software serve de apoio ao datalogger e é conhecido como “*full-featured*”, permitindo efetuar quase todas as tarefas essenciais para concluir o uso dos termohigrômetros, sensor de fluxo de calor e sensores de temperatura superficial[62].

3.3.3.1 Cálculo do coeficiente de transmissão térmica

Os valores de fluxo de calor e temperatura superficial obtidos pelos sensores instalados permitiram, com o auxílio de uma planilha de cálculos, estimar o coeficiente de transmissão térmica (U), o qual é calculado através da Equação 5, a qual utiliza a metodologia para análise do desempenho de isolamento térmico dos painéis “*in-situ*” de acordo com a norma ISO 9869.

$$U_{n\ total} = \frac{\sum_{n=1}^{n\ total} q(n)}{\sum_{n=1}^{n\ total} (Ti(n) - Te(n))} \quad (w/m^2oC) \quad (5)$$

Neste caso, como não há uma temperatura externa, mas sim duas temperaturas internas, uma em cada sala, o valor de Ti corresponde à medição na sala 1, referenciada como $Ti1$, enquanto Te corresponde à medição na sala 2, referenciada como $Ti2$. Eles são as temperaturas registradas nos termohigrômetros instalados em cada uma, em cada instante n , e $q(n)$ é o fluxo de calor medido no fluxímetro, no instante n [62].

Como cada amostra possui dois sensores de fluxo, a partir dos quais são obtidos os valores de $U1$ e $U2$. Em seguida, será realizado uma média entre esses dois valores para calcular o valor final de U para cada amostra.

3.3.3.2 Cálculo da resistência térmica

Com o valor de U , é feito o cálculo da resistência térmica (R), através da Equação 6.

$$R = \frac{1}{U} \quad (m^2oC/w) \quad (6)$$

Onde R é a resistência e U o coeficiente de transmissão térmica. Após o cálculo da resistência, temos que calcular a resistência dos painéis, onde são consideradas as resistências superficiais interna e externa, segundo a Equação 7.

$$R_T = \sum R_i + R_{Si} + R_{Se} \quad (7)$$

R_t é a resistência calculada anteriormente, $\sum R_i$ é o valor da resistência dos painéis estudados, R_{Si} é a resistência superficial interna, que vale $0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$ e R_{Se} é a resistência superficial externa com o valor de $0,04 \text{ m}^2\text{C/W}$.

3.3.3.3 Cálculo da Condutividade Térmica

A condutividade térmica também pode ser calculada dividindo-se a espessura do material (E) pela sua resistência térmica (R), conforme a equação 8:

$$\lambda = \frac{E}{R} \text{ (W/mK)} \quad (8)$$

Uma vez que foi possível determinar o valor da resistência de cada painel, torna-se viável calcular a condutividade térmica correspondente.

Capítulo 4: Análise e discussão de resultados

Nesse capítulo será analisado o comportamento térmico das amostras, a influência da resina incorporada e do acréscimo da grafite expansível.

Essa análise de comportamento térmico terá como base a discussão dos resultados relativos à condutividade térmica, coeficiente de transmissão térmica, variação das temperaturas superficiais e fluxo de calor.

4.1 GUARDED HOT PLATE

Informações significativas sobre a condutividade térmica (λ) foram obtidas a partir dos ensaios realizados com a técnica *Guarded Hot Plate*, testando-se três temperaturas diferentes para cada amostra. A Tabela 5 apresenta os resultados desses ensaios. No Gráfico 1, é possível observar a variação e o aumento dos valores de condutividade térmica à medida que a temperatura se eleva, com cada linha representando uma amostra. Esse aumento ocorre devido ao incremento na energia cinética das partículas com o aumento da temperatura, o que resulta em uma maior transferência de calor. Esse aumento de energia leva a um maior número de colisões entre as moléculas, resultando em uma condutividade térmica mais alta.

Tabela 5 - Resultados da condutividade térmica λ (W/mK) obtidos no teste do GHP.

Amostra	10°C	30°C	50°C
MDI	0,0442	0,0477	0,0497
MDI5%	0,0469	0,0500	0,0533
MDI10%	0,0483	0,0514	0,0549
TDI	0,0431	0,0460	0,0489
TDI5%	0,0453	0,0484	0,0516
TDI10%	0,0478	0,0511	0,0545

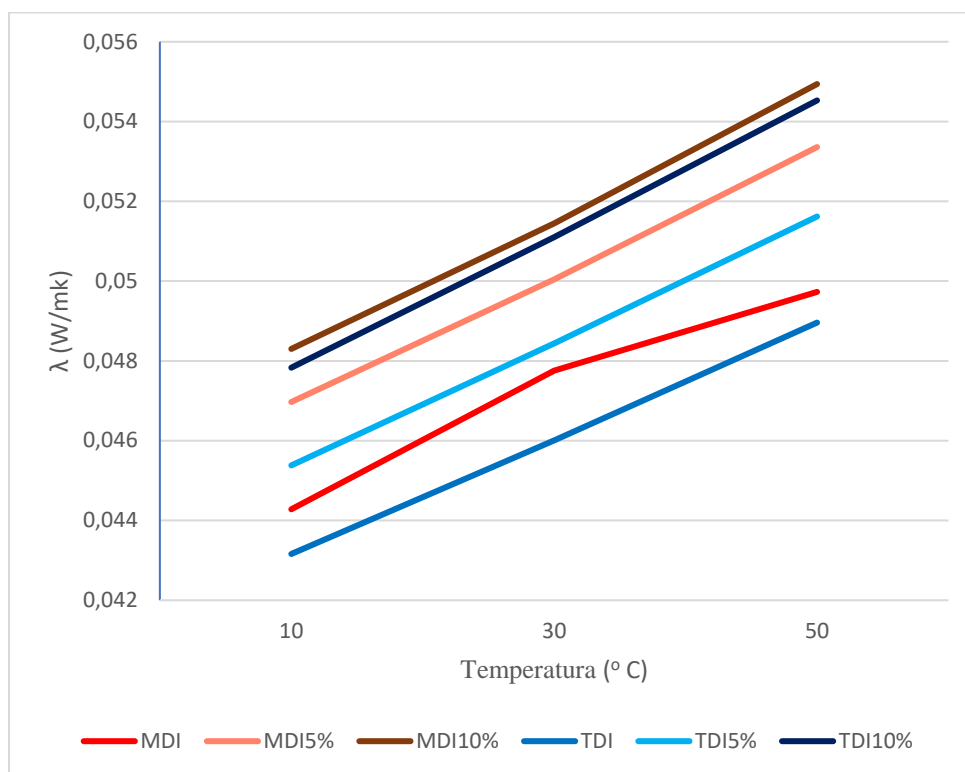


Gráfico.1 – Valores de condutividade térmica (λ) das amostras obtidos no ensaio GHP.

Primeiramente, analisaremos as amostras de MDI e TDI. Com base nos valores observados, é possível concluir que a resina MDI apresenta um desempenho inferior em comparação à resina TDI, uma vez que sua condutividade térmica é maior em todas as temperaturas analisadas. Por exemplo, a 30°C, a condutividade térmica da resina MDI é de 0,0477 W/mK, enquanto a da resina TDI é de 0,0460 W/mK. Dessa forma, a resina MDI apresenta uma condutividade térmica 1,57% superior a 10°C, 3,80% superior a 30°C e 2,59% superior a 50°C.

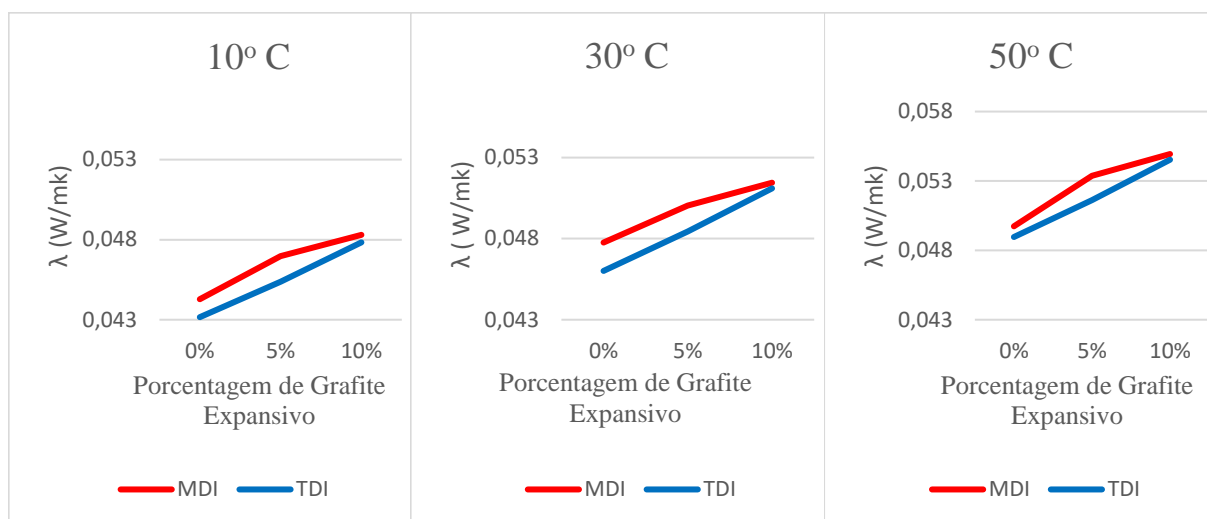


Gráfico 2 – Valores de condutividade térmica (λ) das amostras a 10°C, 30°C e 50°C.

O gráfico 2 apresenta os valores de condutividade térmica em cada temperatura, 10 °C, 30 °C e 50 °C, respectivamente. É possível observar a variação linear verificada nos valores de condutividade com o aumento da temperatura das amostras com a resina TDI, o que não ocorre com a resina MDI, tendo uma variação menor entre as amostras MDI5% e MDI10%.

Ao analisar as amostras com resina MDI, sendo elas a MDI, MDI5% e MDI10%, podemos perceber que, conforme é adicionado o grafite expansível, o valor da condutividade térmica tende a aumentar; porém, esse valor não é proporcional à quantidade de grafite adicionada, como ocorre com as amostras de resina TDI, o que será explicado posteriormente. A tabela 6 apresenta o valor de porcentagem em que a condutividade térmica aumenta nas amostras MDI5% e MDI10% em relação à amostra MDI. Com a adição de 5% de grafite expansível, o valor de λ aumentou entre 4,77% e 7,30%. Ao dobrar a quantidade de grafite para 10%, o aumento de λ não dobrou, variou entre 7,73% e 10,48%, representando um incremento adicional de aproximadamente 3% em relação à amostra MDI5%.

Tabela 6 - Porcentagem de aumento da condutividade térmica nas amostras MDI5% e MDI10% em relação a amostra MDI.

Amostra	10°C	30°C	50°C
MDI	-	-	-
MDI5%	6,07%	4,77%	7,30%
MDI10%	9,08%	7,73%	10,48%

Analisando as amostras com a resina TDI, sendo elas TDI, TDI5% e TDI10%, também temos um aumento no valor da condutividade térmica, porém esse valor é mais proporcional. A tabela 7, está apresentado o valor de porcentagem em que a condutividade térmica aumenta nas amostras TDI5% e TDI10% em relação a amostra TDI. Na amostra TDI5%, a porcentagem de aumento é de 5,14% em 10°C, depois 5,28% em 30°C e 5,43% em 50°C. Quando foi adicionado 10% de grafite, a porcentagem de aumento foi superior ao dobro em comparação a amostra TDI5%, variando de 10,82% a 11,06% e, em seguida, para 11,38%, nas temperaturas 10°C, 30°C e 50°C, respectivamente.

Tabela 7 -Porcentagem de aumento da condutividade térmica nas amostras TDI5% e TDI10% em relação a amostra TDI.

Amostra	10°C	30°C	50°C
TDI	-	-	-
TDI5%	5,14%	5,28%	5,43%
TDI10%	10,82%	11,06%	11,38%

Mesmo com o aumento em porcentagem sendo maior na resina TDI, ela tem um comportamento melhor em relação às amostras com a resina MDI, mostrando ser um isolante térmico melhor. Porém, vale ressaltar que a diferença entre as duas resinas apresenta um valor pouco expressivo.

O aumento da condutividade térmica está relacionado ao aumento da concentração de grafite, sendo este um material com alta condutividade térmica. Entretanto, esse valor aumentado é pouco expressivo, pois a quantidade de grafite expansível utilizada é pequena.

O valor da condutividade térmica de um aglomerado de cortiça comercial é, em média, de 0,040 a 0,050 W/mK [27]; isso mostra que os valores atingidos pelo aglomerado fabricado estão dentro do esperado.

4.2 Avaliação do desempenho térmico em contínuo

Os resultados mostram o desempenho térmico dos seis diferentes tipos de painéis quando sujeito à avaliação em contínuo decorrente da utilização de sistema de termofluxímetro seguindo o exposto na norma ISO 9869 -1 (2014). Serão apresentadas e analisadas as temperaturas nas duas salas de teste, os fluxos de calor de cada painel, as temperaturas superficiais e estimados os coeficientes de transmissão térmica. Sendo posteriormente calculado os valores de resistência térmica e de condutividade térmica.

O ensaio foi realizado em duas fases, sendo dividida as amostras de acordo com sua resina, a primeira sendo com os painéis MDI, MDI5% e MDI10%. E a segunda fase com os painéis TDI, TDI5% e TDI10%. Posteriormente serão comparados os resultados obtidos nas duas fases, analisando qual será a melhor resina a ser utilizada.

4.2.1 1ª fase: Resina MDI

Como já foi referido, nessa primeira fase de estudos, foram analisados três painéis, sendo eles MDI, MDI5% e MDI10%. Essa primeira fase ocorreu entre os dias 1º e 8 de agosto de 2024.

4.2.1.1 Temperaturas do ar interior

O Gráfico 3 apresenta a variação dos valores da temperatura do ar interior nas salas 1 e 2 registradas ao longo do ensaio. Sendo $Ti1$ os valores da sala 1, e $Ti2$, os valores da sala 2.

Pode-se observar que a temperatura $Ti1$ teve uma menor variação, chegando ao máximo de 0,47°C, e $Ti2$, apresentou uma maior variação de temperatura ao longo do período de teste, com uma variação entre o valor máximo e mínimo de 0,78 °C.

A temperatura média de $Ti1$ foi de 23,49 °C, enquanto $Ti2$ apresentou uma média de 14,34°C. A temperatura máxima, de 23,7 °C, foi registrada na sala 1 no dia 7 de agosto, às 16h20. A menor temperatura, de 13,92 °C, ocorreu na sala 2 no dia 7 de agosto, às 21h20.

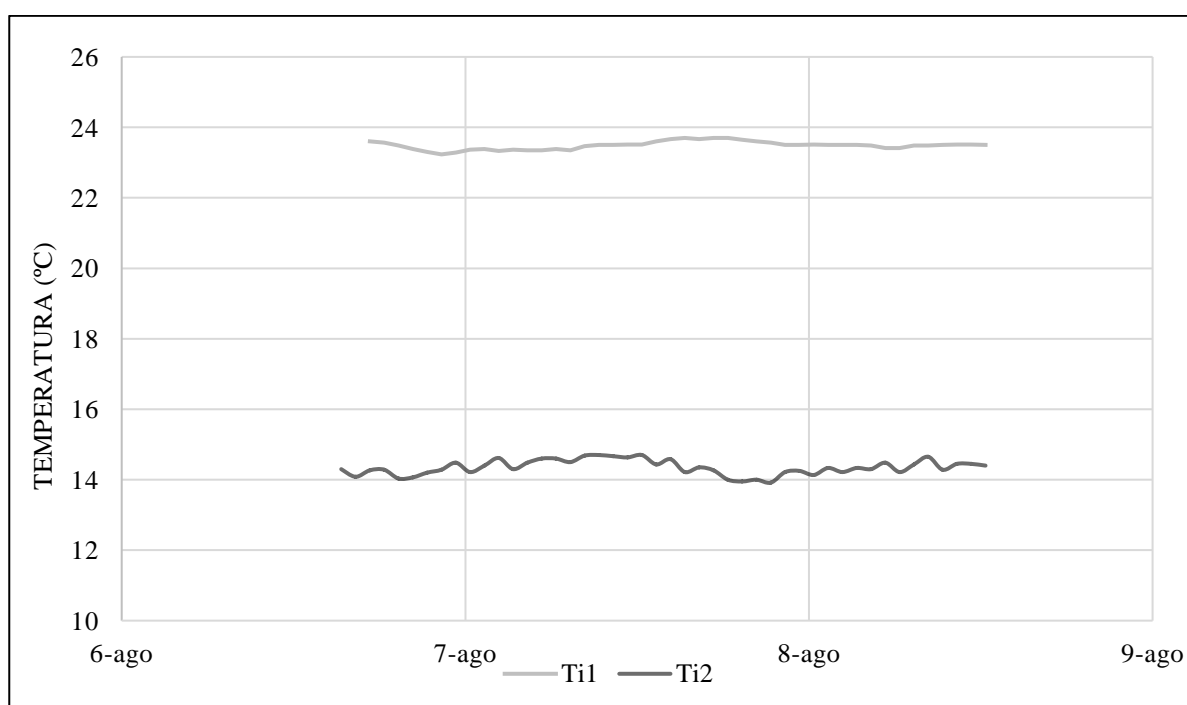


Gráfico 3 – Variação da temperatura interior nas salas de ensaio 1 e 2 na primeira fase.

A Tabela 8 apresenta os valores mínimos, médios e máximos das temperaturas nas salas 1 e 2 durante o ensaio. Observa-se que, quase na totalidade do teste, a diferença de temperaturas entre as salas manteve-se em torno de 10 °C. As condições de estabilidade de temperatura foram mantidas, assegurando a confiabilidade dos testes obtidos.

Tabela 8 - Temperaturas mínimas, médias e máximas das salas 1 e 2 (°C) na primeira fase.

Sala	Mínima	Média	Máxima
Sala 1	23,23	23,49	23,7
Sala 2	13,92	14,34	14,7

4.2.1.2 Temperaturas Superficiais

Cada painel possuía quatro sensores de temperatura, responsáveis pela medição da temperatura superficial em quatro zonas de medição. No Gráfico 4 estão representados os valores de T_{s11} e T_{s21} das amostras MDI, MDI5% e MDI10%, bem como os valores da temperatura do ar interior da sala 1

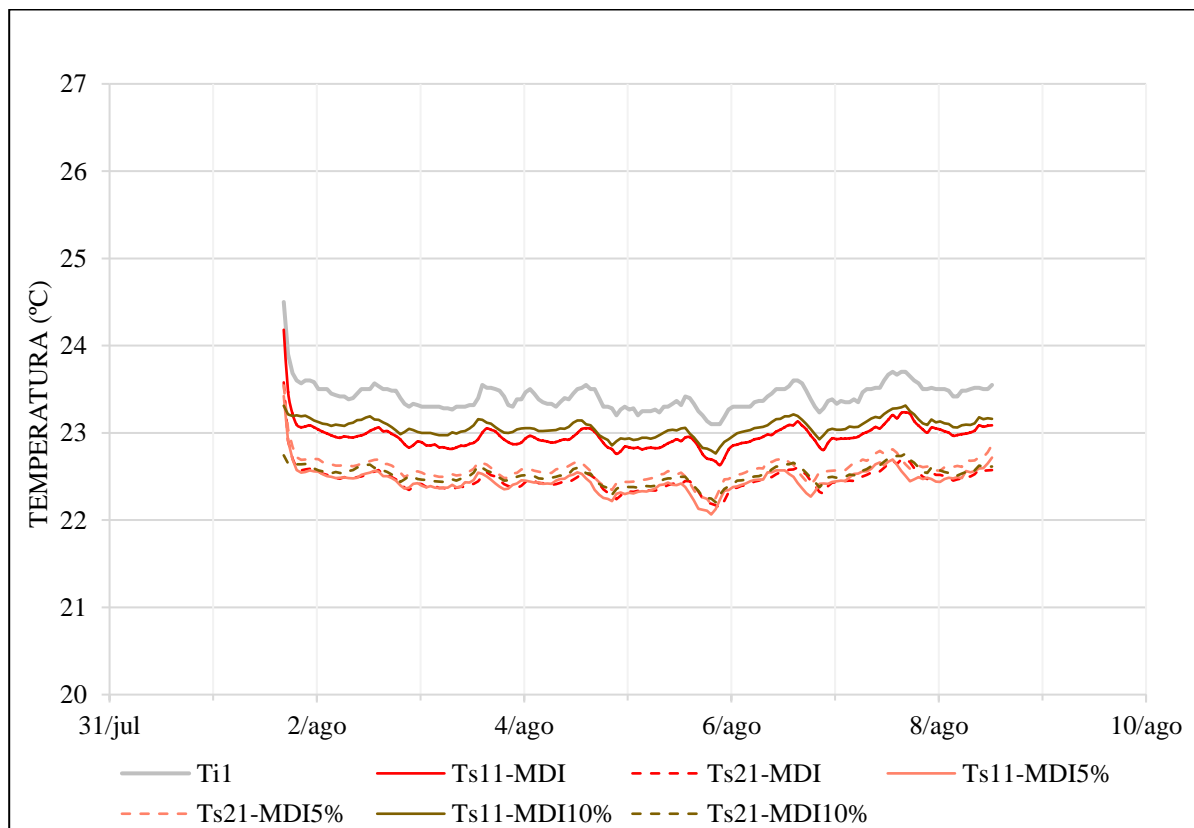


Gráfico 4 – Variação dos valores de temperaturas superficiais nas amostras com a resina MDI.

Como esperado, as temperaturas superficiais das amostras foram inferiores e seguiram o padrão da temperatura da sala 1, e entre as amostras, o comportamento é semelhante.

Na amostra MDI, o valor médio da temperatura superficial foi de 22,96 °C no sensor *Ts11* e de 22,46 °C no sensor *Ts21*, com um valor máximo de 24,18 °C em *Ts11*, sendo o maior valor registrado entre as três amostras, e um mínimo de 22,14 °C em *Ts21*. A diferença média entre os sensores foi de 0,50 °C. Comparando com as outras amostras, a diferença média foi de 0,19 °C (aproximadamente 0,84%) em relação à amostra MDI5% e de 0,078 °C (aproximadamente 0,35%) em relação à amostra MDI10%. Com esses dados, é possível observar que mesmo com a adição do grafite, os valores de temperatura superficiais continuaram parecidos em relação a amostra MDI, tendo uma variação pouco significativa.

Na amostra MDI5%, os valores máximos registrado foram semelhantes em *Ts11* e *Ts21*, sendo 23,42 °C e 23,54 °C, respectivamente. O valor mínimo foi de 22,07 °C no sensor *Ts11*, com médias de 22,45 °C e 22,59 °C nos sensores *Ts11* e *Ts21*, respectivamente. A diferença média entre *Ts11* e *Ts21* foi de -0,13 °C, indicando que *Ts21* apresentou uma temperatura superior a *Ts11*. A amostra MDI5% apresentou o menor diferencial médio entre as amostras. Comparada à amostra MDI10%, o diferencial médio foi de -0,27 °C (aproximadamente -1,20%), indicando que MDI5% teve as menores temperaturas superficiais.

Em relação a amostra MDI10%, o valor máximo foi de 23,31 °C no sensor *Ts11* e 22,76 °C no sensor *Ts21*. O valor mínimo foi 22,21 no sensor *Ts21*, e as médias obtida foram de 23,06 °C em *Ts11* e 22,52°C em *Ts21*. O seu diferencial médio foi de 0,55 °C, sendo a maior entre as três amostras e bastante próximo a amostra MDI.

Além disso, note-se que os valores máximos ocorreram no início do teste, em decorrência do fato de a sala estar aberta, permitindo a entrada de calor no ambiente do laboratório. Na Tabela 9 estão os valores mínimos, médios e máximos nos sensores *Ts11* e *Ts21* de cada amostra.

Tabela 9 - Valores máximos, médios e mínimos de temperatura superficial registrada por Ts11 e Ts21 em cada amostra MDI (°C).

Amostra		Mínima	Média	Máxima
MDI	Ts11	22,63	22,96	24,18
	Ts21	22,14	22,46	23,58
MDI5%	Ts11	22,07	22,45	23,42
	Ts21	22,18	22,59	23,54
MDI10%	Ts11	22,76	23,06	23,31
	Ts21	22,21	22,52	22,76

A Tabela 10 apresenta o valor médio de temperatura superficial de cada amostra, sendo possível observar que a amostra MDI10% teve o maior valor médio de temperatura superficial, e a amostra MDI5%, o menor.

Tabela 10 - Valor médio de temperatura superficial das amostras MDI.

Amostra	Ts (°C)
MDI	22,71
MDI5%	22,52
MDI10%	22,79

4.2.1.3 Fluxos de calor

O Gráfico 5 apresenta a variação dos valores de fluxo de calor, os quais foram registrados pelos sensores de fluxo de calor, *HF1* e *HF2*, instalados nos painéis, bem como as temperaturas das salas, Ts1 e Ts2. Os valores $q1$ e $q2$, são os dados obtidos pelos sensores *HF1* e *HF2*, respectivamente. Conforme o esperado, os valores mais elevados de fluxo de calor ocorrem quando a temperatura da sala 2 diminui, fazendo com que ocorra uma maior transferência de calor da sala 1 para a 2.

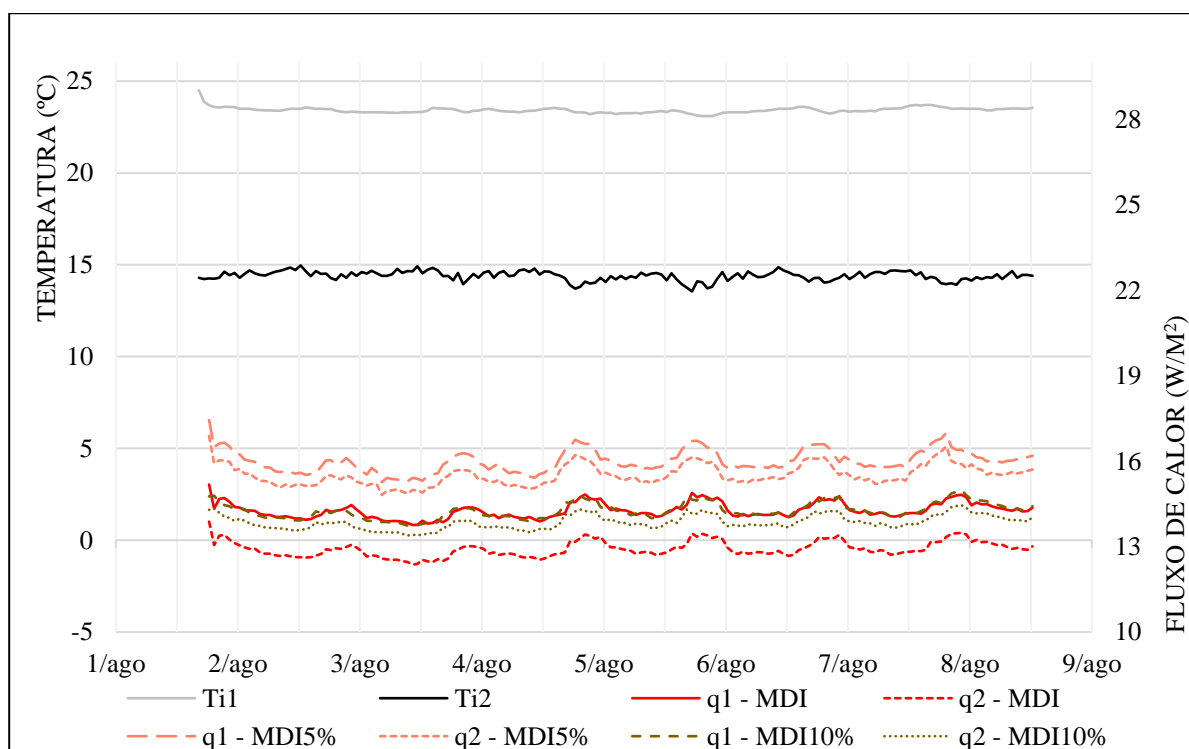


Gráfico 5 – Variação de temperaturas e fluxos de calor das amostras com resina MDI.

Nota-se pelo Gráfico 5, que as oscilações do fluxo de calor são bastante similares nos três painéis, observa-se que na amostra MDI, a amplitude entre $q1$ e $q2$ é superior à das outras amostras, com um diferencial médio de aproximadamente $1,35 \text{ W/m}^2$, enquanto o diferencial médio da amostra MDI5% foi de $0,48 \text{ W/m}^2$ e da amostra MDI10% foi de $0,40 \text{ W/m}^2$. O diferencial médio dentro da própria amostra ocorre devido à localização distinta dos sensores, que estão posicionados em diferentes áreas da amostra. Isso pode refletir possíveis heterogeneidade na superfície de contato da amostra com o sensor de fluxo de calor, resultando na obtenção de dois valores distintos.

Na tabela 11, está representado os valores máximos, médios e mínimos dos fluxos de calor de cada painel.

Tabela 11 - Valores, Máximo, Média e Mínimo dos fluxos de calor nas amostras com resina MDI (W/m^2).

Amostra		Mínima	Média	Máxima
MDI	q1	13,76	14,27	15,18
	q2	12,37	12,92	13,88
MDI5%	q1	15,26	16,01	17,45
	q2	14,82	15,52	16,89
MDI10%	q1	13,74	14,26	14,99
	q2	13,39	13,86	14,46

A amostra MDI atingiu o valor mínimo no sensor q_2 , com o valor de $12,37 \text{ W/m}^2$ e o máximo no sensor q_1 , com o valor de $15,18 \text{ W/m}^2$. Teve uma média de $14,27 \text{ W/m}^2$ em q_1 e de $12,92 \text{ W/m}^2$ em q_2 , apresenta o menor valor de fluxo de calor médio, entre q_1 e q_2 , de $13,60 \text{ W/m}^2$.

Verificou-se que a amostra MDI5% apresentou valores maiores ao longo do tempo, especialmente em q_1 alcançando um valor máximo de $17,45 \text{ W/m}^2$ em q_1 , com uma média de $15,52 \text{ W/m}^2$ em q_1 e $16,01 \text{ W/m}^2$ em q_2 , tendo assim a maior média de fluxo de calor entre q_1 e q_2 de $15,77 \text{ W/m}^2$.

Por outro lado, a amostra MDI10% apresentou o menor valor de $13,39 \text{ W/m}^2$ e uma média de $13,86$ em q_2 . O seu valor de q_1 apresentou valores bastante similar ao de q_1 da amostra MDI, ficando sobrepostas no gráfico, com medias de $14,27$ para a amostra MDI e de $14,27$ para a amostra MDI10%. A amostra MDI10% apresenta um valor de fluxo de calor médio, entre q_1 e q_2 , de $14,06 \text{ W/m}^2$.

Ao analisar a diferença média entre as três amostras, observa-se que a maior diferença é entre a amostra MDI e MDI5%, sendo os valores de MDI em média $15,97\%$ menores os da amostra MDI5%. A amostra MDI tem uma média de $3,30\%$ inferior à da amostra MDI10%. Por fim, comparando as amostras MDI5% e MD10%, verifica-se que MDI apresentou um fluxo de calor, em média, $10,84\%$ inferior ao da amostra MDI5%.

Tabela 12 - Valores médios de fluxo de calor em cada amostra com resina MDI.

Amostra	q (W/m ²)
MDI	13,60
MDI5%	15,77
MDI10%	14,06

Analisando a tabela 12, onde está apresentado os valores médios de fluxo de calor de cada amostra, é possível concluir que a amostra MDI5% é a que apresenta o maior valor de fluxo de calor e a amostra MDI, o menor, mostrando um melhor comportamento em relação ao fluxo de calor.

4.2.1.4 Coeficiente de transmissão térmica

Foi utilizado a metodologia mencionada em 3.3.2.1 para calcular o coeficiente de transmissão térmica (U), utilizando os valores de fluxo de calor e o diferencial de temperatura da sala 1 e 2.

Ao analisar o Gráfico 6, conclui-se que a amostra MDI5%, apresentou o maior valor do coeficiente U , enquanto a amostra MDI apresentou o menor.

No painel MDI o diferencial entre $U1$ e $U2$ foi de $0,15 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo o $U1$ superior a $U2$. verificou-se o menor valor de coeficiente de transmissão térmica, com $U= 1,51 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Em relação ao MDI5%, observa-se que o maior valor também foi registrado para $U1$, com um diferencial entre $U1$ e $U2$ igual a $0,05 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Com um valor médio de coeficiente de transmissão térmica de $U= 1,75 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Observando os valores do painel MDI10%, seu valor médio do coeficiente de transmissão térmica é de $U= 1,55 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Novamente, $U1$ foi superior a $U2$ e a diferença entre eles é a maior entre as amostras, atingindo $0,04 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

O aumento percentual entre o valor de U da amostra MDI e MDI5% é de aproximadamente 15,89%. Já a variação entre MDI5% e MDI10% representa uma redução de cerca de 10,86%.

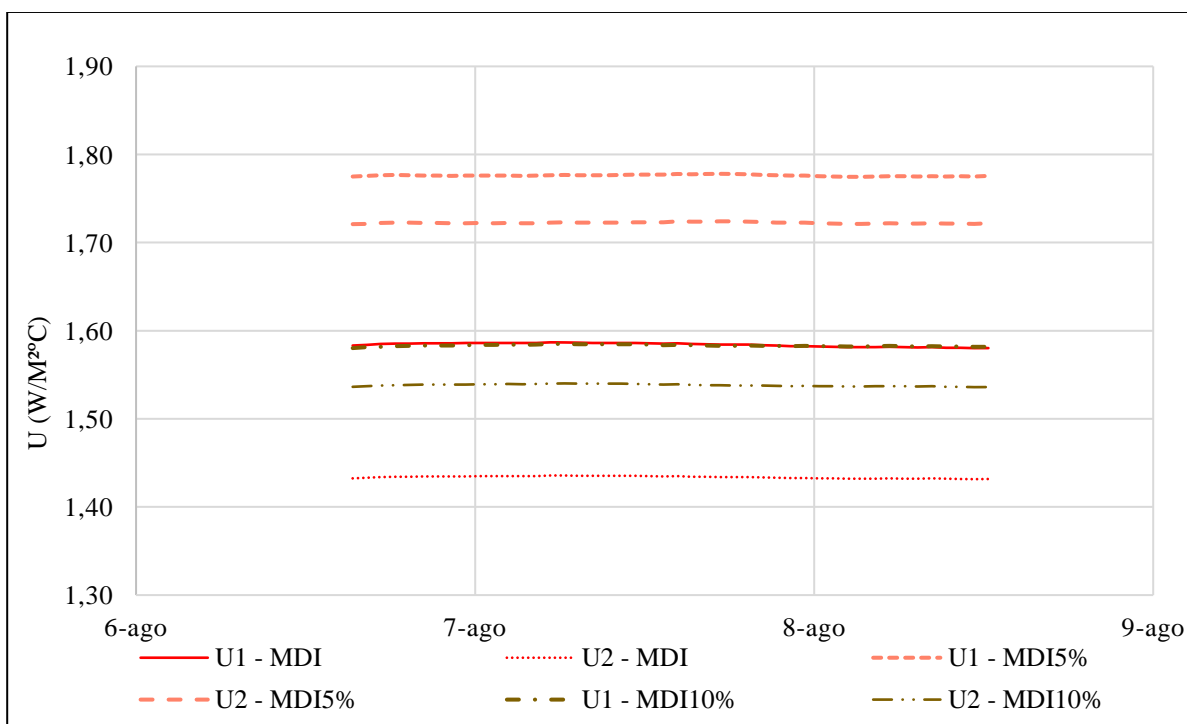


Gráfico 6 - Coeficiente de transmissão térmica U referente as amostras com resina MDI.

Na tabela 13, está representado os valores médios de coeficiente de transmissão térmica de cada amostra. A amostra MDI possui o melhor comportamento, obtendo o menor valor de coeficiente de transmissão térmica.

Tabela 13 - Valores de Coeficiente de transmissão térmica nas amostras com resina MDI.

Amostra	U (w/m ² °C)
MDI	1,51
MDI5%	1,75
MDI10%	1,56

4.2.1.5 Resistência Térmica

Com os valores de coeficiente de transmissão térmica, foi possível calcular os valores de resistência térmica de cada painel, conforme descrito em 3.3.2.1. Os resultados são apresentados na tabela 14.

A amostra MDI apresentou o maior valor de resistência térmica, $R=0,49(\text{m}^2\text{C}/\text{w})$, valor próximo ao da amostra MDI10%, que apresenta $R=0,47(\text{m}^2\text{C}/\text{w})$. A amostra MDI5%, por sua vez, apresentou o menor valor, atingindo $R=0,40(\text{m}^2\text{C}/\text{w})$.

Entre as amostras MDI e MDI5% houve uma redução de aproximadamente 18,37%, e entre MDI5% e MDI10% houve um aumento de cerca de 17,5%.

Tabela 14 - Valores da resistência térmica das amostras com resina MDI.

Amostra	R (m ² C/w)
MDI	0,49
MDI5%	0,40
MDI10%	0,47

4.2.1.6 Condutividade térmica

Com os valores de U obtidos no ensaio e o valor de R calculado, também é possível calcular o valor da condutividade térmica λ . Utilizando o método de cálculo descrito em 2.4.5. O resultado está na tabela 15.

Tabela 15 – Valores da espessura, resistência térmica e condutividade térmica das amostras com resina MDI.

Amostra	Espessura (m)	R (m ² C/w)	λ (W/mK)
MDI	0,0200	0,49	0,041
MDI5%	0,0201	0,40	0,050
MDI10%	0,0204	0,47	0,043

Os valores obtidos para a condutividade térmica revelam que a amostra MDI apresentou o menor valor, muito próximo a de aglomerados de cortiça comerciais, que é de 0,045 W/mK[27], atingindo as expectativas iniciais. O valor de MDI10% foi divergente do esperado, pois está menor do que a amostra MDI5%. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de o sensor não ter coberto toda a superfície da amostra. A posição em que o sensor foi colocado pode ter coincidido com uma área de menor concentração de grafite expansível, o que resultou em um valor de condutividade térmica mais próximo a amostra MDI, que não possui grafite expansível. Apesar de a amostra conter a maior quantidade de grafite, o resultado foi inferior ao esperado,

4.2.2 Fase 2: Resina TDI

Como já foi referido, nessa segunda fase de estudos, foram analisados três painéis, sendo eles TDI, TDI5% e TDI10%. Essa fase ocorreu entre os dias 27 de setembro e 4 de outubro de 2024.

4.2.2.1 *Temperaturas do ar interior*

A temperatura do ar interior da sala foi medida por uma sonda de temperatura. No Gráfico 7, estão representadas as temperaturas $Ti1$, correspondente a sala 1, e $Ti2$, a sala 2.

Observa-se que a temperatura $Ti1$ manteve-se praticamente constante durante o período de teste. A temperatura máxima foi atingida no dia 4 de outubro atingindo 20,47°C, enquanto a mínima ocorreu no dia 2 de outubro, atingindo 20,2°C. A média da temperatura foi de 20,36°C, com uma variação máxima de 0,27°C.

Por outro lado, a temperatura $Ti2$ apresentou maiores variações. O valor máximo registrado foi de 15,47°C no dia 3 de setembro, enquanto a temperatura mínima foi de 14,75°C no dia 9 de setembro. A temperatura média foi de 15,09°C, resultando em uma variação máxima de 0,72 °C.

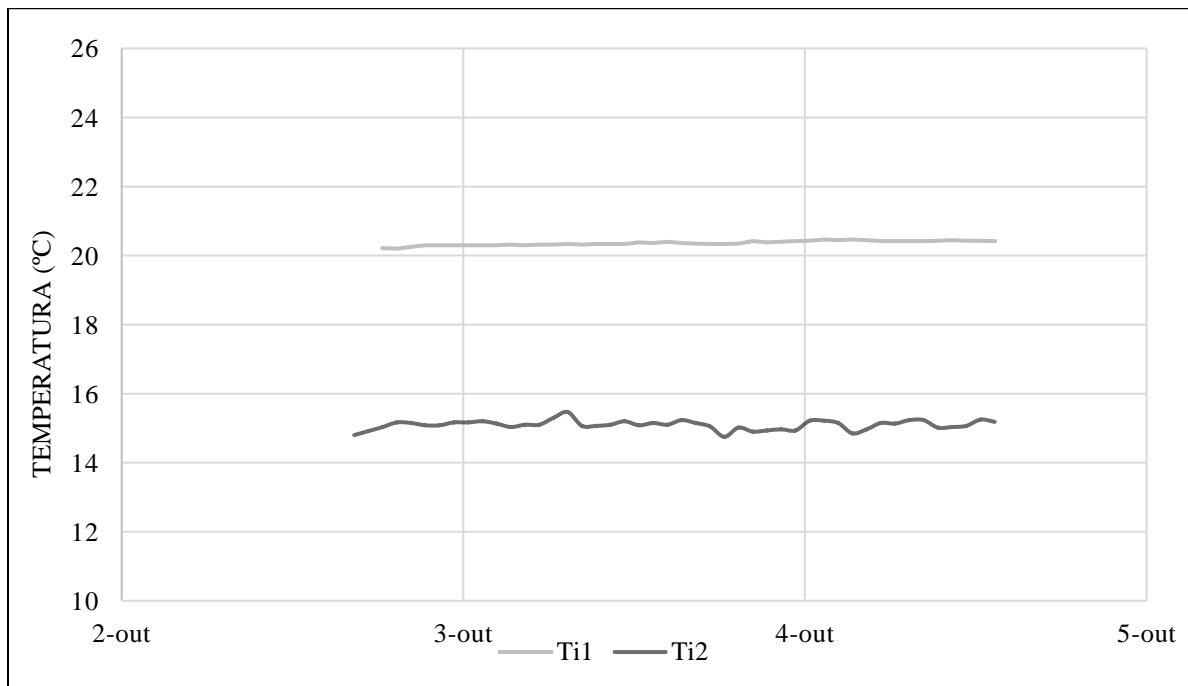


Gráfico 7 - Variação da temperatura interior nas salas de ensaio 1 e 2 na segunda fase.

As temperaturas máximas, médias e mínimas das duas salas estão apresentadas na Tabela 16. A variação média entre a temperatura das duas salas foi de 5,27 °C, com isso as condições de estabilidade de temperatura foram mantidas, assegurando a confiabilidade dos testes obtidos.

Tabela 16 - Temperaturas mínimas, médias e máximas das salas 1 e 2 (°C) na segunda fase.

Sala	Mínima	Média	Máxima
Sala 1	20,20	20,36	20,47
Sala 2	14,75	15,09	15,47

4.2.2.2 *Temperaturas superficiais*

As temperaturas superficiais foram medidas por quadro sensores de temperatura, posicionados em cada painel, cujos resultados estão apresentados no Gráfico 9. Podemos analisar que as temperaturas superficiais tiveram o mesmo comportamento das temperaturas da sala.

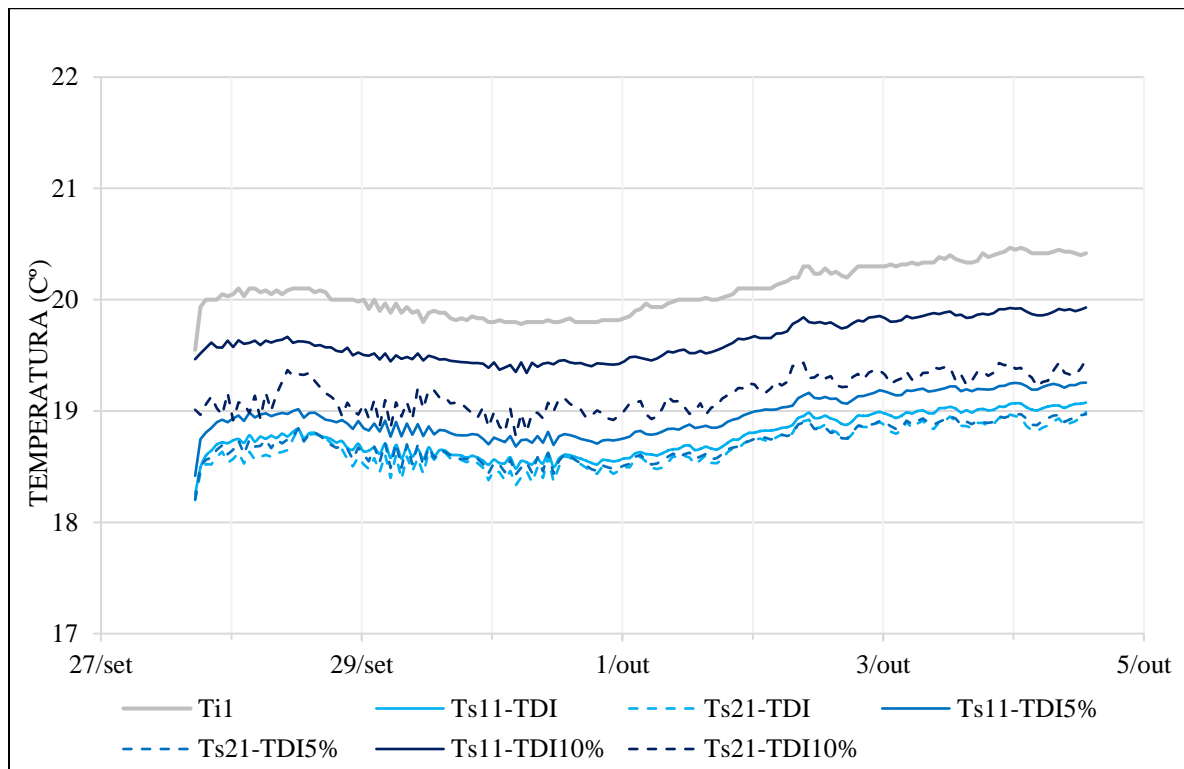


Gráfico 8 - Variação dos valores de temperaturas superficiais nas amostras com a resina TDI.

Ao analisar a amostra TDI, constatou-se que a temperatura máxima registrada foi de 19,08°C no sensor *Ts11* e 18,46°C no sensor *Ts21*. A menor temperatura foi de 18,20°C, registrada no sensor *Ts21*. A média das temperaturas foi de 18,77°C no *Ts11* e 18,67°C no *Ts21* com uma diferença média entre os dois sensores de 0,10°C, sendo a menor entre as três amostras analisadas. Comparando as amostras, a diferença média foi de 0,11°C, representando um acréscimo de aproximadamente 0,60% em relação à amostra TDI5%, e de 0,67°C em relação à amostra TDI10%, o que equivale a cerca de 3,46%.

Na amostra TDI5%, a temperatura média registrada foi de 18,89°C no sensor *Ts11* e 18,70°C no sensor *Ts21*. A temperatura máxima registrada foi de 19,26°C no *Ts11*, enquanto a mínima foi de 18,21°C no *Ts21*. A diferença média entre os sensores foi de 0,19°C. Comparando com a amostra TDI10%, essa diferença foi de 0,55°C, o representando uma redução de 2,97% para a amostra TDI10%. Os valores de *Ts21* nas amostras TDI5% e TDI10% são bastante próximos, como demonstrado no Gráfico 9, onde os dados quase se sobrepõem.

A amostra TDI10% apresentou a maior média de temperatura, de 19,63°C no sensor *Ts11*. O valor máximo registrado foi 19,93°C no sensor *Ts11*, enquanto o valor mínimo foi de 18,78°C no sensor *Ts21*. Sua diferença média entre os sensores foi de 0,48°C, a maior entre as três amostras analisadas.

A tabela 17 mostra os valores máximos, médios e mínimos das temperaturas superficiais para cada amostra.

Tabela 17 - Valores máximos, médios e mínimos de temperatura superficial registrada por Ts11 e Ts21 em cada amostra TDI (°C).

Amostra		Mínima	Média	Máxima
TDI	Ts11	18,25	18,77	19,08
	Ts21	18,20	18,67	18,99
TDI5%	Ts11	18,42	18,89	19,26
	Ts21	18,21	18,70	18,97
TDI10%	Ts11	19,34	19,63	19,93
	Ts21	18,78	19,15	19,46

Na Tabela 18, são mostrados os valores médios da temperatura superficial de cada amostra, onde se nota que a amostra TDI10% registrou a maior temperatura superficial média, enquanto a amostra TDI apresentou a menor.

Tabela 18 – Valor médio da temperatura superficial das amostras TDI.

Amostra	Ts (°C)
TDI	18,72
TDI5%	18,80
TDI10%	19,39

4.2.2.3 Fluxos de calor

O Gráfico 11 apresenta os valores de fluxo de calor, os quais foram registrados pelos sensores de fluxo de calor instalados nos painéis, e as temperaturas das salas. Ao analisar o gráfico é difícil de saber qual amostra teve a maior amplitude entre $q1$ e $q2$. No entanto, é possível afirmar que a amostra TDI apresentou a menor amplitude, tendo o diferencial médio de $0,26 \text{ W/m}^2$. Já as amostras TDI5% e TDI10% tiveram um diferencial muito próximo, sendo $0,66 \text{ W/m}^2$ e $0,63 \text{ W/m}^2$, respectivamente.

A amostra TDI alcançou um valor máximo de $7,64 \text{ W/m}^2$ em $q1$ e o valor mínimo de $5,58 \text{ W/m}^2$ em $q2$. A sua média foi de $6,87 \text{ W/m}^2$ em $q1$ e $6,61 \text{ W/m}^2$ em $q2$, resultando em um fluxo de calor médio entre $q1$ e $q2$ de $6,74 \text{ W/m}^2$.

Verificou-se que a amostra TDI5% apresentou o maior valor de fluxo de calor entre as três amostras, com um pico de $8,15 \text{ W/m}^2$ em $q1$, apresentando também a maior média,

de 7,35 W/m² em $q1$ e 6,69 W/m² em $q2$. O seu valor mínimo foi de 5,74 W/m² em $q2$. A média de fluxo de calor entre $q1$ e $q2$ foi de 7,02 W/m², a mais elevada entre as três amostras.

Analisando a amostra TDI10%, ela foi a única entre as três, em que o valor de $q2$ foi maior que $q1$. O maior e menor fluxo de calor ocorreram em $q2$, atingindo 7,61 W/m², e o mínimo foi 5,15 W/m². A média de fluxo de calor foi de 6,10 W/m² em $q1$ e de 6,74 W/m² em $q2$, resultando em uma média geral de 6,42 W/m², sendo a menor média entre as três amostras.

Analisando a diferença média entre as três amostras, verificou-se que entre as amostras TDI e TDI5%, a variação foi de 4,22%, sendo TDI5% superior a TDI. A maior variação ocorre entre as amostras TDI5% e TDI10%, onde a média de TDI5% sendo cerca de 8,55% superior a TDI. A amostra TDI10% apresenta uma média inferior a TDI, com uma diferença de aproximadamente 5,01%.

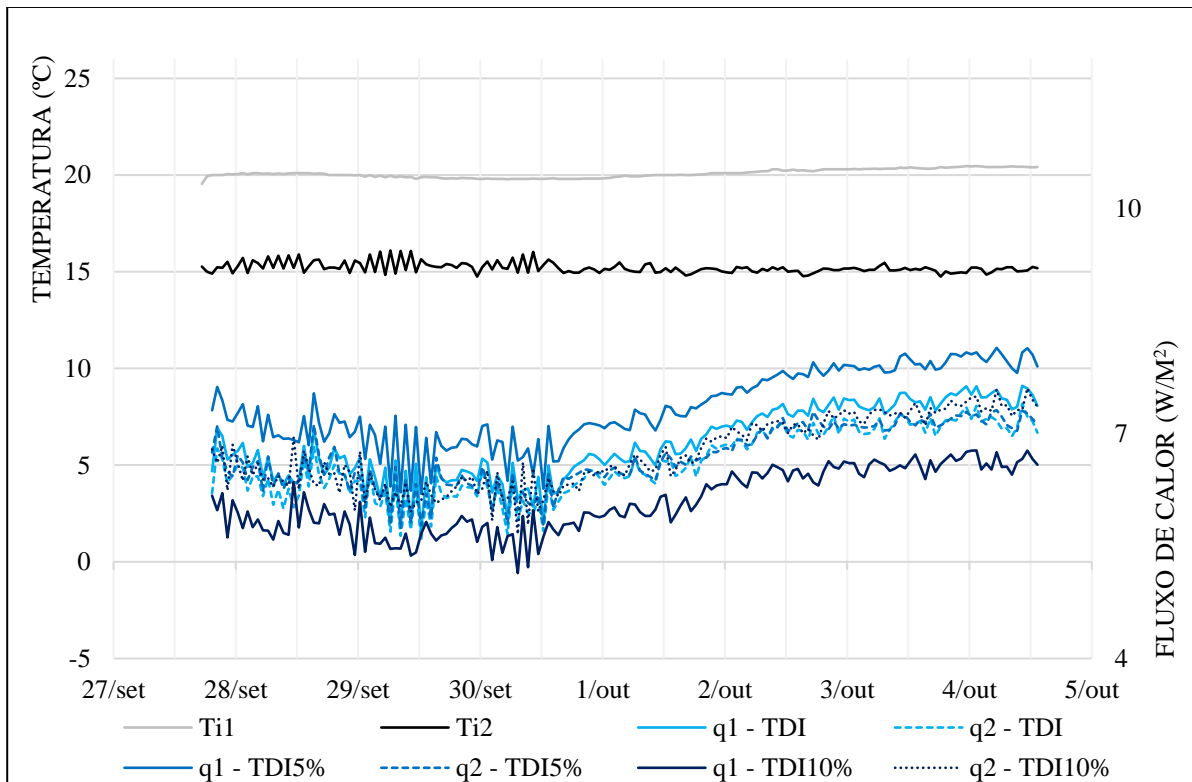


Gráfico 9 – Variação de temperaturas e fluxos de calor das amostras com resina TDI.

A tabela 19 apresenta os valores máximos, médios e mínimos do fluxo de calor de cada amostra.

Tabela 19 - Valores, Máximo, Média e Mínimo dos fluxos de calor nas amostras com resina TDI (W/m²).

Amostra		Mínima	Média	Máxima
TDI	q1	5,72	6,87	7,64
	q2	5,58	6,61	7,40
TDI5%	q1	6,20	7,35	8,15
	q2	5,74	6,69	7,37
TDI10%	q1	5,14	6,10	6,86
	q2	5,66	6,74	7,61

A diferença média observada dentro da amostra se deve ao posicionamento distinto dos sensores, que estão localizados em áreas diferentes da amostra. Isso pode indicar a presença de possíveis heterogeneidades na interface entre a amostra e o sensor de fluxo de calor, resultando em dois valores distintos.

Tabela 20 - Valores médios de fluxo de calor de cada amostra TDI.

Amostra	q (W/m ²)
TDI	6,74
TDI5%	7,02
TDI10%	6,42

Ao examinar a tabela 20, que apresenta os valores médios de fluxo de calor para cada amostra, pode-se concluir que a amostra TDI5% exibe o maior valor de fluxo de calor, enquanto a amostra TDI10% apresenta o menor valor. Isso indica que a amostra TDI10% tem um desempenho superior em termos de fluxo de calor.

4.2.2.4 Coeficiente de transmissão térmica

Utilizando os valores de fluxo de calor e o diferencial de temperaturas entre as salas 1 e 2, apresentados anteriormente, foi possível determinar o valor do coeficiente de transmissão térmica (U).

O gráfico 10 ilustra esses valores, permitindo concluir que a amostra TDI5% apresentou o maior coeficiente de transmissão térmica, enquanto a amostra TDI10% apresentou o menor valor.

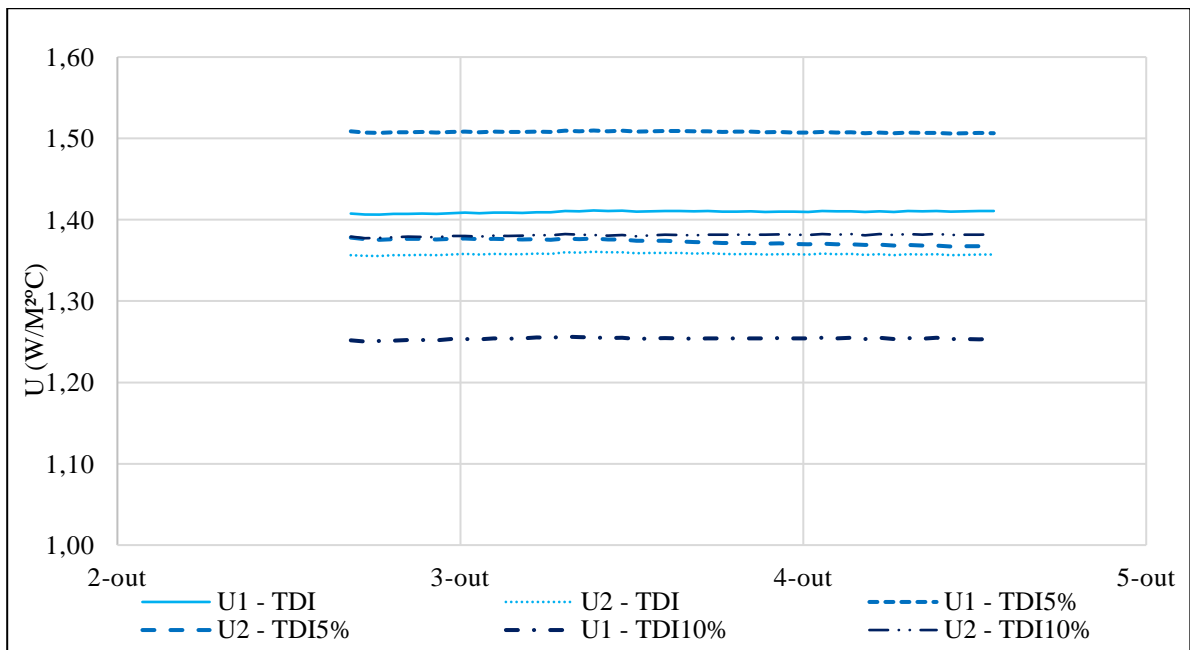


Gráfico 10 - Coeficiente de transmissão térmica U referente as amostras com resina TDI.

O painel TDI, apresentou o menor diferencial entre $U1$ e $U2$ de $0,05 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo $U1$ superior a $U2$. O valor médio de coeficiente de transmissão térmica U foi de $1,38 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Em relação a amostra TDI5%, o maior valor foi observado em $U1$, com $1,51 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, e o menor em $U2$, com $1,37 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, resultando em uma diferença média de $0,14 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, e um coeficiente de transmissão térmico médio de $1,44 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Já a amostra TDI10%, o diferencial entre $U1$ e $U2$, é de $0,13 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, o maior valor foi em $U2$, com $1,38 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ e o menor foi em $U1$, com $1,25 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. O valor médio de coeficiente de transmissão térmica foi de $1,32 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, o mais baixo entre as três amostras.

Observou-se um aumento percentual de 3,60 % entre o valor de U da amostra TDI e TDI5%, enquanto a variação entre TDI5% e TDI10% indicou uma redução de aproximadamente 8,33%.

A tabela 21 apresenta os valores médios de U para cada amostra. A amostra TDI10% possui o melhor comportamento, obtendo o menor valor de coeficiente de transmissão térmica.

Tabela 21 - Valores médios do coeficiente de transmissão térmica das amostras com resina TDI.

Amostra	U (w/m ² °C)
TDI	1,39
TDI5%	1,44
TDI10%	1,32

4.2.2.5 Resistência térmica

Os valores de resistência térmica (R) foram calculados utilizando a metodologia descrita em 3.3.2.1. A tabela 22 representa os valores obtidos.

Os resultados obtidos foram relativamente próximos entre as três amostras, o maior foi da amostra TDI10%, sendo $R=0,59 \text{ m}^2\text{C/w}$, e o menor da amostra TDI5%, sendo $R=0,53 \text{ m}^2\text{C/w}$. A amostra TDI apresentou um valor intermediário, com $R=0,55 \text{ m}^2\text{C/w}$.

Entre as amostras TDI e TDI5% houve uma redução de cerca 3,64%, e entre TDI5% e TDI10% houve um aumento de aproximadamente 11,32%.

Tabela 22 - Valores de resistência térmica das amostras com resina TDI.

Amostra	R ($\text{m}^2\text{C/w}$)
TDI	0,55
TDI5%	0,53
TDI10%	0,59

4.2.2.6 Condutividade Térmica

A tabela 23 mostra os valores de condutividade térmica, que foi calculado utilizando os valores de resistência térmica e o método de cálculo descrito em 2.4.5.

Tabela 23 - Valores da espessura, resistência térmica e condutividade térmica das amostras com resina TDI.

Amostra	Espessura(m)	R ($\text{m}^2\text{C/w}$)	$\lambda(\text{W/mK})$
TDI	0,02015	0,55	0,037
TDI5%	0,02082	0,53	0,040
TDI10%	0,02096	0,59	0,036

A amostra que apresentou o menor valor de condutividade térmica foi a TDI10%. Ao adicionar 5% de grafite, o valor de λ aumentou em aproximadamente 0,03 W/mK, o que corresponde a um incremento de 8,10%. Com a adição de 10% de grafite, houve uma diminuição de 0,01 W/mK, equivalente 2,70 %, em relação a TDI, e um decréscimo de 0,04 W/mK, cerca de 10%, em relação a TDI5%.

4.3 Considerações finais

A tabela 24 mostra um resumo dos resultados obtidos nos dois ensaios realizados neste trabalho: o Guarded Hot Plate e a determinação do desempenho térmico de forma contínua. A análise desses dados revela que, enquanto alguns valores são semelhantes ou até idênticos, outros apresentam divergências. Somente a amostra MDI5% obteve resultados idênticos nos dois ensaios. Em comparação, as demais amostras tiveram uma redução de valores no teste de desempenho térmico em contínuo em relação ao teste no GHP. As amostras com a resina TDI demonstraram a maior discrepância, chegando a mais de 20% na amostra TDI e 30% na amostra TDI10%. Essa variação nos valores pode ser atribuída ao fato de que, no teste de análise contínua, o sensor não está abrangendo toda a amostra, podendo ter sido colocado em uma região com menor concentração de grafite expansível, fazendo com que o resultado da condutividade térmica fosse menor, mesmo com a adição do grafite expansível

A época em que foi realizado o teste é outro fator que pode explicar as discrepâncias entre os ensaios, o teste GHP foi realizado em janeiro de 2024, uma época mais úmida do que setembro e outubro, quando foi realizado o teste de desempenho térmico em contínuo. A metodologia utilizada nos dois métodos de ensaio para determinar o valor dos parâmetros térmicos, nomeadamente o valor da condutibilidade térmica pode também ter contribuído para a discrepância de valores verificada. No entanto, a variação nos valores obtidos para as diferentes amostras submetidas a uma análise em regime contínuo demonstra coerência nos resultados para ambos os períodos de medição.

Ao comparar as amostras de igual concentração de grafite, mas de resinas distintas, podemos observar que a condutividade térmica da amostra TDI5% é inferior à da amostra MDI5%, com diferenças de 4% no teste GHP e 20% no teste de desempenho térmico em contínuo. A amostra TDI10% também é inferior à MDI10%, com variação de 1,92% no teste GHP e 12,19% no teste contínuo.

Tabela 24 - Resultados obtidos nos ensaios GHP e avaliação do desempenho térmico em contínuo.

Testes	<i>Guarded Hot Plate</i>	Avaliação do desempenho térmico em contínuo			
Amostras	Condutividade térmica λ (W/mK)	Coefficiente de transmissão térmica U(w/m ² °C)	Resistencia térmica R(m ² °C/W)	Condutividade térmica λ (W/mK)	% de diferença de λ (W/mK)
MDI	0,047	1,510	0,492	0,041	-12,76%
MDI5%	0,050	1,750	0,402	0,050	0%
MDI10%	0,052	1,560	0,471	0,043	-17,31%
TDI	0,046	1,320	0,588	0,037	-20,35%
TDI5%	0,048	1,440	0,524	0,040	-18,41%
TDI10%	0,051	1,390	0,549	0,036	-30,26%

Tabela 25 - Média dos valores de condutividade térmica obtidas nos ensaios.

Amostras	Média dos valores de condutividade térmica λ (W/mK)
MDI	0,044
MDI5%	0,050
MDI10%	0,047
TDI	0,041
TDI5%	0,044
TDI10%	0,043

Analisando a tabela 25, que apresenta as médias da condutividade térmica para ambos os testes, constatou-se que, no caso da resina MDI, a amostra que apresentou o desempenho mais eficiente foi a MDI, enquanto a MDI5% demonstrou o pior comportamento. Para a resina TDI, os resultados foram semelhantes, com a amostra TDI exibindo o melhor desempenho e a TDI5% o menor rendimento.

Comparando a melhor opção entre as duas resinas, concluiu-se que a resina TDI possui um melhor desempenho térmico, quando comparado com a resina MDI. Nas amostras sem GE, o painel TDI obteve um valor 6,81% menor do que o painel MDI. A adição do grafite faz com que a condutividade aumente, embora de forma não muito significativa, indicando que, em temperaturas ambientes, o uso do grafite não afeta consideravelmente o desempenho térmico.

Em relação às variações específicas de condutividade térmica com diferentes percentuais de grafite: na resina MDI, quando é acrescentado 5% GE, a um aumento de 13% na condutividade térmica, enquanto a adição de 10% GE, um aumento de 6,81%, em relação

a amostra MDI. Na resina TDI, quando acrescentado 5%GE, o aumento é de 7,31% na condutividade térmica, e quando acrescentado 10%GE, o aumento é de 4,88%.

Com o acréscimo de 5% GE, ambas as amostras mostram um comportamento similar, com uma diferença de apenas 3,8% no aumento da condutividade térmica. No entanto, com o acréscimo de 10%GE, as amostras tiveram comportamento não esperado, ocorrendo uma redução no valor final da condutividade térmica quando comparado a amostra com 5%GE.

As diferenças entre os testes, foi possível justificar pela época do ano e por serem utilizados equipamentos diferentes, porém a diferença ocorrida no mesmo teste não foi possível atribuir a nenhuma característica. Pesquisas indicam que, em altas temperaturas, após o processo de expansão, o grafite contribui para a redução da condutividade térmica, devido à formação de uma camada de ar que atua como uma barreira térmica [20]. No entanto, há uma escassez de estudos que investiguem as propriedades de condutividade térmica do grafite em baixas temperaturas, sem que o material passe pelo processo de expansão.

A tabela 26 faz uma comparação entre a condutibilidade térmica e a resistência térmica dos materiais testados neste trabalho, com trabalhos desenvolvidos por outros autores e com produtos disponíveis no mercado.

Caatinga e Manilkara são madeiras utilizadas na construção civil, foram feitos painéis com resíduos dessas madeiras junto com adesivo PVA[63]. P03, P04 e P05 são painéis na estrutura sanduiche, formados por cortiça em seu núcleo e peles de folhas de alumínio. Nas amostras P04 e P05 tem uma camada a mais de ACM15 e ACM89 respectivamente[44].

Rohacell 71 WF, Klegecell R 260 e Divinycell H250 são isolantes existentes no mercado, que no estudo de Castro e etal[48] foi comparado junto com painéis fabricados de 2/3 de cortiça e um mixed de 2/3 com 3/4, junto com resina epóxi.

Tabela 26 - Comparação dos valores de condutibilidade térmica e de resistência térmica com outros materiais[27], [37], [44], [48], [63], [64], [65]

Isolantes Térmicos	Condutividade térmica λ (W/mK)	Resistencia térmica R (m ² °C/W)
Caatinga	0,180	-
Manilkara	0,110	-
Painel P03	0,065	0,308
Painel P04	0,058	0,344
Painel P05	0,055	0,360
Rohacell 71 WF	0,030	-
Klegecell R 260	0,042	-
Divinycell H250	0,049	-
Mixed de cortiça 2/3 e 3/4 (tamanho grande) com resina epóxi	0,045	-
2/3- Tamanho de grânulos pequenos de cortiça com resina epóxi	0,047	-
Lã de vidro	0,040-0,045	-
Lã de rocha	0,040-0,045	-
Poliestireno expandido	0,037	-
EPS Grafite	0,031	-
MDI	0,042-0,047	0,49
MDI5%	0,050	0,40
MDI10%	0,041-0,052	0,47
TDI	0,037-0,046	0,55
TDI5%	0,040-0,048	0,53
TDI10%	0,036-0,051	0,59

Ao comparar os resultados obtidos nos testes realizados com os valores apresentados na tabela, observa-se que os resultados, variando entre 0,036 W/mK e 0,051 W/mK, estão dentro da faixa observada para materiais similares. Esses resultados indicam um desempenho térmico satisfatório, evidenciando a adequação das amostras como material de isolamento térmico.

Considerando que os testes realizados foram uma complementação aos ensaios de resistência ao fogo realizados por Moia[4]. Seus resultados mostraram que a melhor resina é a MDI e acrescentar o grafite é a escolha mais adequada para aplicações onde a resistência

ao fogo é essencial. Com os resultados obtidos no trabalho desenvolvido nesta dissertação foi possível concluir que todas as composições demonstram um bom desempenho térmico em condições de ambientes, porém, para um comportamento otimizado em situações de incêndio, a combinação de MDI com 10% de grafite expansível é a mais recomendada, como concluído por Moia[4].

Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

O presente estudo teve como objetivo fabricar e investigar o comportamento térmico de painéis de aglomerado de cortiça, com diferentes porcentagens de grafite expansível, para a utilização como núcleo de portas interiores e painéis decorativos. Os resultados fornecem informações relevantes sobre a condutividade térmica dessas composições.

O comportamento térmico foi avaliado por meio de dois ensaios diferentes: o primeiro utilizando o método *Guarded Hot plate*, que forneceu os dados de condutividade térmica, e o segundo por meio da avaliação contínua do desempenho térmico usando o sistema de sensores de fluxo de calor, que forneceu os valores de temperatura do ambiente, temperatura superficial e fluxo de calor, sendo possível calcular o coeficiente de transmissão térmica, resistência térmica e a condutividade térmica de cada amostra ensaiada.

Os resultados obtidos permitiram avaliar a influência do grafite nas propriedades térmicas do aglomerado de cortiça, fazer uma comparação entre o uso da resina MDI e TDI e determinar o coeficiente de transmissão térmica e a condutividade térmica de cada amostra.

Ao comparar as resinas utilizadas, a resina TDI apresentou os melhores resultados de condutividade térmica, obtendo valores entre 0,040W/mK e 0,045 W/mK, ligeiramente inferiores aos obtidos com a resina MDI, que variam de 0,045W/mK e 0,050 W/mK.

Ao analisar a influência do grafite expansível, na resina TDI, o melhor resultado ocorreu com a adição de 10% de GE, com condutividade térmica média de 0,043 W/mK, e na resina MDI, também com a adição de 10% de GE, com o valor médio de 0,047 W/mK, representando, em ambas as amostras, um aumento de cerca de 4% em relação às amostras MDI e TDI.

Todos os painéis apresentaram excelente desempenho como isolamento térmico em condições de temperatura ambiente. Para efeito comparativo, outros materiais utilizados como isolantes térmicos, como lã de rocha e lã de vidro, possuem valores de condutividade térmica variando entre 0,040 W/mK e 0,045 W/mK [27]. Já os aglomerados de cortiça disponíveis no mercado possuem valores de condutividade térmica entre 0,037 W/mK e 0,050 W/mK [66], [67].

Sendo a cortiça considerada um isolante térmico melhor quando comparada ao grafite expansível, que possui propriedades de condutividade térmica mais elevadas. Os resultados tiveram uma maior influência da cortiça, pois utilizou-se uma quantidade muito maior em relação ao GE. Sendo assim, os dados indicam que o emprego do grafite não exerce uma influência considerável sobre o resultado da temperatura ambiente.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros, sugere-se a realização de novos ensaios de comportamento térmico nos mesmos painéis, empregando metodologias distintas, a fim de obter um conjunto de dados mais amplo para análise e comparação.

Além disso, no âmbito térmico, seria pertinente utilizar o aglomerado produzido neste estudo como núcleo de um painel multicamadas, recomendando-se o uso de MDF como camada externa.

Analisar o impacto econômico e ambiental da produção desses painéis e a realizar uma escala tamanho real.

Complementarmente, a condução de testes mecânicos nesses painéis seria igualmente interessante, proporcionando uma análise mais abrangente do material.

Referências

- [1] Dimosthenis A. Sarigiannis, “Combined or multiple exposure to health stressors in indoor built environments”, 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.euro.who.int/pubrequest>
- [2] Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, “Diretiva (UE) 2018/844”, 2018.
- [3] C. Thormark, “Energy and resources, material choice and recycling potential in low energy buildings”, *CIB Conference*, vol. 7, 2007.
- [4] M. de M. Moia, “Analysis of thermal performance of multilayer systems for fire doors”, 2022.
- [5] “Diretiva da Eficiência Energética”, Direção geral de energia e geologia. Acessado: 15 de agosto de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/diretiva-da-eficiencia-energetica/>
- [6] Diária da República, “Decreto- Lei n 101-D/2020”, dez. 2020.
- [7] Jornal Oficial da União Europeia, “Diretiva (UE) 2023/1791”, set. 2023.
- [8] Diário da República, “Resolução do Conselho de Ministros n.º 11/2024”, 2024.
- [9] SCE, “Estatística do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios ”. Acessado: 22 de agosto de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.sce.pt/estatisticas/>
- [10] F. Alexandre Oliveira da Cunha, “Estudo de estratégias e tecnologias de climatização para atingir Edifícios nZEB”, Faculdade de Engenharia Universidade de Porto, Porto, 2015.
- [11] Laboratório de eficiência energética em edificações, “Conforto térmico ”. Acessado: 9 de agosto de 2024. [Online]. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/pt-br/linhas-de-pesquisa/conforto-termico>
- [12] S. A. de M. Barbosa, “Comparação do índice de desconforto passivo com a classe energética de edifícios de habitação reabilitados do sul da Europa”, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 2020.
- [13] L. A. de Oliveira, “Conforto térmico em edificações”, 2003.
- [14] M. Da *et al.*, “Desenvolvimento de estruturas multicamada para revestimento de paredes interiores na reabilitação de edifícios”, Universidade da Beira interior, 2014.
- [15] M. S. Al-Homoud, “Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials”, *Build Environ*, vol. 40, n° 3, p. 353–366, mar. 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.05.013.

- [16] M. O. B. C. Melo, L. B. Da Silva, A. S. Coutinho, V. Sousa, e N. Perazzo, “Energy efficiency in building installations using thermal insulating materials in northeast Brazil”, *Energy Build*, vol. 47, p. 35–43, abr. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.11.021.
- [17] P. Filipe e S. Mendes, “Isolamentos Térmicos em Edifícios e seu Contributo para a Eficiência Energética”.
- [18] U. Caso De Estudo, J. Filipe, S. Afonso, e D. Aelenei, “Estudo do Comportamento Térmico de Edifícios Antigos”, 2009.
- [19] V. C. Corcuera, ; L C Pardini, ; E C Garcia, e ; A C Prado, “Caracterização térmica de materiais obtidos por compactação de grafite expandida”, 2010.
- [20] I. C. Araujo, “Caracterização do desempenho térmico de paredes de taipa de pilão não estabilizadas”, Instituto politécnico de Bragança, 2021.
- [21] ADENE, “Guia SCE-Parâmetros de Cálculo”, 2020.
- [22] B. Thomaz e L. Ishioka, “Materiais de Construção - Isolamento Termico”, 2011.
- [23] S. Schiavoni, F. D’Alessandro, F. Bianchi, e F. Asdrubali, “Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis”, 1º de setembro de 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.045.
- [24] O. A. Carlos, B. Luís, e A. Manuela, “Materiais de isolamento térmico para além da energia operacional”, *Hábitat Sustentable*, p. 30–39, 2016.
- [25] M. A. P. da Silva, *Metodologia para a definição exigencial de isolantes termicos*. Porto, 1996.
- [26] F. Manuel, F. Silva, P. Doutora, M. Helena, e P. Corvacho, “Estudo de materiais de isolamento térmico inovadores”, 2013. [Online]. Disponível em: <http://www.fe.up.pt>
- [27] C. A. P. dos Santos e L. Matias, “ITE 50 - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edificios”, 2006, *Lisboa*.
- [28] “Associação Portuguesa da Cortiça - APCOR”. Acessado: 3 de julho de 2024. [Online]. Disponível em: <https://apcor.pt/>
- [29] Cork Forest Conservation Alliance, “History of Cork”. Acessado: 28 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://corkforest.org/history-of-cork/>
- [30] Natural Cork Council, “Industry Statistics”. Acessado: 28 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: [naturalcorkcouncil](http://naturalcorkcouncil.com)
- [31] S. F. C. Moreira, “Melhoria do desempenho de revestimento exterior com placas de cortiça natural”, 2016.

- [32] Corkway, “Pavimentos de cortiça: uma escolha sustentável para a sua casa”. Acessado: 27 de agosto de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.corkway.pt/artigos/pavimentos-de-cortica/>
- [33] Isocor, “Aglomerado de Cortiça Expandida”. Acessado: 28 de agosto de 2024. [Online]. Disponível em: <https://isocor.pt/produto/aglomerado-cortica-expandida/>
- [34] Amorim Cork Composites, “Cortiça: sustentabilidade e desempenho técnico em juntas de expansão”. Acessado: 28 de agosto de 2024. [Online]. Disponível em: <https://amorimcorkcomposites.com/pt/materiais-aplicacoes/construcao/artigos/cortiça-sustentabilidade-e-desempenho-técnico-em-juntas-de-expansão/>
- [35] Subtech Substances & Technologies, “Graphite”, 2017. Acessado: 28 de março de 2024. [Online]. Disponível em: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=graphite#graphite_structure
- [36] C. I. Ferreira, “Nanocompósitos pp/ grafite: obtenção e propriedades”, 2008.
- [37] BEWI, “EPS Grafite”. Acessado: 29 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://bewi.com/material/eps-grafite?lang=pt-pt>
- [38] J. M. A. Melillo, “Filamentos antichama poli(ácido láctico) / grafite expansível (pla / eg) para impressão 3D”, 2021.
- [39] B. Mazela, A. Batista, e W. Grześkowiak, “Expandable Graphite as a Fire Retardant for Cellulosic Materials—A Review”, *Forests*, vol. 11, nº 7, p. 755, jul. 2020, doi: 10.3390/f11070755.
- [40] B. Rynehvee Tan, “The Use of p-MDI Resin in MDF Manufacture”, 2012.
- [41] A. N. Papadopoulos, C. A. S. Hill, E. Traboulay, e J. R. B. Hague, “Isocyanate resins for particleboard: PMDI vs EMDI”, *Holz als Roh - und Werkstoff*, vol. 60, nº 2, p. 81–83, 2002, doi: 10.1007/s00107-001-0275-8.
- [42] Flexpur - Polímeros de Poliuretano, “Flexpur 160 - Ficha técnica”, 2016.
- [43] P. T. Santos, S. Pinto, P. A. A. P. Marques, A. B. Pereira, e R. J. Alves de Sousa, “Agglomerated cork: A way to tailor its mechanical properties”, *Compos Struct*, vol. 178, p. 277–287, out. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.07.035.
- [44] M. Alexandre Nogueira Veras, “Estudo, Fabrico e Caracterização de Painéis Sanduíche com Núcleos em Materiais Compósitos de Cortiça”, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- [45] F. Sarasini *et al.*, “Static and dynamic characterization of agglomerated cork and related sandwich structures”, *Compos Struct*, vol. 212, p. 439–451, mar. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.01.054.

- [46] H. Lopes, S. P. Silva, J. P. Carvalho, e J. Machado, “The influence of cork and manufacturing parameters on the properties of cork–rubber composites for vibration isolation applications”, *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, n° 20, out. 2021, doi: 10.3390/su132011240.
- [47] N. Lakreb, B. Bezzazi, e H. Pereira, “Mechanical behavior of multilayered sandwich panels of wood veneer and a core of cork agglomerates”, *Mater Des*, vol. 65, p. 627–636, jan. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.09.059.
- [48] O. Castro, J. M. Silva, T. Devezas, A. Silva, e L. Gil, “Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures”, *Mater Des*, vol. 31, n° 1, p. 425–432, jan. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.039.
- [49] Granorte, “Granulated cork 3-4 50/55 Technical specification”, 2011.
- [50] Granorte, “Granulated cork 0,2-0,5 45/50 Technical specification”, fevereiro de 2011.
- [51] Georg H. Luh GmbH, “Ficha técnica - Expandable Graphite GHL PX 95 LT”.
- [52] K. Chun, J. Kim, e D. Rie, “Thermal characteristics of expandable graphite-wood particle composites”, *Materials*, vol. 13, n° 12, p. 1–18, jun. 2020, doi: 10.3390/ma13122732.
- [53] Flexpur - Polímeros de poliuretano, “Flexpur 151 - Ficha técnica”, 2016.
- [54] International Organization for Standardization, “Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus”, 1991. [Online]. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/71d81056-a403-4317-be82->
- [55] Deutsches Institut für Normung, “Thermal performance of building products and building components - Specific criteria for the assessment of laboratories measuring heat”, Berlin, Germany, 2013.
- [56] Deutsches Institut für Normung., *Thermal performance of building materials and products : determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods : products of high and medium thermal resistance*. British Standards Institution, 2001.
- [57] ASTM International., “Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus”, doi: 10.1520/C0177-1.
- [58] Lambda-Meßtechnik GmbH Dresden, “Manual de Instruções do Thermal Conductivity Test Tool -Meter EP500e”, 2022.
- [59] Lambda-messtechnik, “Design and Function of the Guarded Hot Plate Apparatus”. Acessado: 17 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.lambda->

messtechnik.de/en/thermal-conductivity-test-tool-ep500e/guarded-hot-plate-apparatus-lambda-meter-ep500e-design-and-function

- [60] N. Mazutti, “Caracterização do comportamento térmico e ao fogo de misturas à base de argila e lã de ovelha”, 2023.
- [61] L. J. R. Magalhães, “Estudo do potencial de aplicação de resíduos têxteis em elementos de betão leve”, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2017.
- [62] B. D. S. Paulo, “Avaliação de Sustentabilidade da Utilização de Resíduos de Garrafas PET Enquanto Material de Construção”, 2016.
- [63] B. C. Alexandre e V. G. de Castro, “Painéis aglomerados de baixa densidade para isolamento térmico produzido com resíduo de marcenaria”, *Revista do Instituto Florestal*, vol. 34, nº 1, p. 75–80, jun. 2022, doi: 10.24278/2178-5031.202234106.
- [64] MatWeb Material Property Data, “DIAB Klegecell® R 260 Rigid, Closed Cell PVC Foam Core Material”. Acessado: 15 de setembro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=6a3c1888e753419a8702aaab9c6e04c3&ckck=1>
- [65] C. Strength, “Mechanical properties Divinycell ® H Property Test Procedure Unit H45 H60 H80 H100 H130 H160 H200 H250”, 2018.
- [66] S. A. Amorim Isolamentos, “Porque é que devemos utilizar a cortiça na construção?”
- [67] L. Gil, “Manual Técnico - A cortiça como material de construção”. [Online]. Disponível em: www.realcork.org

