



VALORIZAÇÃO DA LÃ DE OVELHA: DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

CLAUDIA CAROLINA DE PAULA REIS PINTO

Tese final submetida a
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para o cumprimento do Mestrado em
Engenharia Civil

Junho 2026



VALORIZAÇÃO DA LÃ DE OVELHA: DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

CLAUDIA CAROLINA DE PAULA REIS PINTO

Tese final submetida a
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

Para o cumprimento do Mestrado em
Engenharia Civil

No âmbito de dupla diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Supervisores:
Prof^a Dra. Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira - IPB (PT)
Prof^a Dra. Adriana Macedo Patriota Faganello - UTFPR (BR)

Junho 2026

AGRADECIMENTOS

"Até aqui nos ajudou o Senhor." (1 Samuel 7:12)

Escrever estes agradecimentos é, sem dúvida, a parte mais especial e aguardada de todo este processo. Esta trajetória foi marcada por desafios, aprendizados, conquistas, emoções, lágrimas, alegrias e, acima de tudo, por muita fé e oração. Hoje, ao concluir esta etapa, percebo que estou vivendo muitas das bênçãos que um dia apresentei a Deus em minhas orações. Por isso, minha primeira e maior gratidão é direcionada a Ele, que guiou meus passos, fortaleceu meu coração nos momentos difíceis e tornou possível tudo aquilo que parecia distante.

Fui ensinada desde cedo que a gratidão é uma das formas mais bonitas de amor. Por isso, dedico estas palavras àqueles que fizeram parte desta caminhada e que, de diferentes maneiras, contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Agradeço, com todo o amor do meu coração, à minha família.

Ao meu pai, Claudenilson, por me ensinar desde criança a nunca desistir dos meus sonhos e daquilo que faz meus olhos brilharem. Obrigada por cada esforço silencioso, por cada dia de trabalho, mesmo diante do cansaço, para que eu tivesse oportunidades que muitas vezes lhe foram negadas. Seu exemplo de dedicação, honestidade e perseverança foi um dos pilares que sustentaram minha caminhada.

À minha mãe, Adriana, por representar diariamente o verdadeiro significado do amor, do cuidado e da fé. Mesmo distante, você sempre foi colo, abrigo e esperança. Obrigada por ser minha maior referência de força e por me mostrar que a fé pode transformar qualquer caminho.

A vocês dois, agradeço por terem me ensinado valores que ultrapassam qualquer formação acadêmica. Obrigada por me ensinarem honestidade, respeito, caráter, dedicação e gratidão. Obrigada por me permitirem voar em busca dos meus sonhos, mesmo quando muitas vezes precisaram abrir mão dos seus próprios. Vocês me deram asas, mesmo quando as suas foram cortadas pelas circunstâncias da vida.

Sob muito sol, fizeram com que eu chegasse até aqui na sombra. Aplaudiram minhas conquistas tão alto que eu nunca precisei me preocupar com quem não

aplaudiu. Trabalharam incansavelmente para que eu tivesse acesso à educação que sonhavam oferecer aos seus filhos.

Certa vez li uma frase que dizia: "Pais cujos pés foram impedidos de correr para o estudo costumam dar à luz filhos com asas para estudar." Ao longo da vida, percebi o quanto essa frase representa nossa história.

Vocês nunca me ensinaram a buscar aplausos, mas sim a construir uma trajetória digna. Nunca me mostraram o caminho mais fácil, mas sempre o caminho correto. Aprendi em casa que o caráter sustenta aquilo que o talento inicia; que o respeito abre portas que nenhuma força consegue abrir; e que acreditar em si mesmo é essencial. Antes desta formação acadêmica, vocês já haviam me proporcionado a maior formação que um ser humano pode receber: a formação do caráter.

Às minhas irmãs, Érica e Élica, e aos meus cunhados, Elielson e Marcelo, agradeço por serem companheiros de vida, parte fundamental da minha história e porto seguro em todos os momentos. Obrigada por acreditarem em mim, por celebrarem minhas conquistas e por me fazerem sentir, em todos os momentos, que eu jamais estaria sozinha.

À minha avó Ana (in memoriam) e à minha tia Roberta, minha eterna gratidão por sempre enxergarem em mim um futuro promissor, muitas vezes antes mesmo que eu fosse capaz de enxergá-lo. Obrigada por acreditarem no meu potencial, me incentivarem e me mostrarem que eu era capaz de conquistar o mundo.

Aos amigos que a vida colocou em meu caminho, agradeço por tornarem esta jornada mais leve, bonita e significativa. Em especial, ao Pedro Fischer, à Maria Eduarda e à Maria Sidor, por todo acolhimento, companheirismo e amizade. Obrigada por terem sido família quando a distância de casa e a saudade apertavam. Obrigada por transformarem datas comemorativas potencialmente solitárias em momentos de afeto, pertencimento e alegria. Levarei cada um de vocês para sempre em minha história e em meu coração.

À minha orientadora, Professora Dra. Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira, e à minha coorientadora, Professora Dra. Adriana Macedo Patriota Faganello, expresso minha sincera gratidão pela orientação, confiança, apoio acadêmico e pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo deste trabalho. Obrigada por aceitarem caminhar comigo nesta etapa e por contribuírem de forma tão significativa para minha formação profissional e pessoal.

Agradeço também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), instituição que foi minha casa durante tantos anos e que abriu portas para inúmeras oportunidades de crescimento, aprendizado e realização. Da mesma forma, agradeço ao Instituto Politécnico de Bragança pelo acolhimento, pelas oportunidades oferecidas e por todos os conhecimentos adquiridos durante esta experiência internacional tão transformadora. Estendo meu agradecimento aos laboratórios GICOS, LERM e Laboratório de Materiais do Instituto Politécnico de Bragança, pela disponibilização das instalações, equipamentos e suporte técnico necessários para a realização desta investigação. A possibilidade de utilizar esses espaços foi fundamental para o desenvolvimento experimental da dissertação e para a concretização dos ensaios que deram suporte aos resultados aqui apresentados.

Se hoje cheguei até aqui, é porque fui sustentada pelo amor de muitas mãos, guiada pela fé em Deus e impulsionada por pessoas que nunca me deixaram esquecer de onde vim e de tudo aquilo que sou capaz de alcançar.

Por fim, agradeço a todos aqueles que passaram pela minha vida e também àqueles que permaneceram. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio, cada oração e cada demonstração de carinho fizeram diferença nesta caminhada.

Esta conquista não pertence apenas a mim. Ela carrega um pouco de cada pessoa que acreditou, incentivou, apoiou e caminhou ao meu lado. Por isso, expresso minha mais profunda e sincera gratidão.

Muito obrigada.

RESUMO

O setor da construção civil busca continuamente soluções que promovam maior eficiência energética e menor impacto ambiental, tornando o desempenho térmico dos edifícios um requisito fundamental para a sustentabilidade do ambiente construído. Paralelamente, a lã de ovelha proveniente de raças autóctones portuguesas apresenta reduzido interesse para a indústria têxtil devido à elevada espessura das fibras, sendo frequentemente subvalorizada ou descartada como resíduo agropecuário. Neste contexto, a presente dissertação teve como objetivo desenvolver e caracterizar painéis compósitos bio-baseados para isolamento térmico, valorizando este recurso natural através da sua combinação com resina natural de pinheiro. O desenvolvimento experimental foi conduzido de forma iterativa, envolvendo sucessivos ajustes na composição do compósito e nos parâmetros de processamento. Os painéis foram produzidos através da organização ortogonal das fibras de lã em múltiplas camadas, seguida da aplicação do ligante e consolidação por prensagem térmica. Durante a fase de desenvolvimento, foram avaliadas diferentes formulações contendo resina natural de pinheiro, com e sem incorporação de óleo de linhaça, bem como diferentes condições de processamento, até à definição do protocolo de fabrico final. A caracterização térmica foi realizada pelo método da Placa Quente Protegida, utilizando o equipamento λ -Meter EP500e. Os ensaios foram conduzidos às temperaturas médias de 15 °C, 25 °C e 40 °C, permitindo avaliar o comportamento térmico das diferentes formulações desenvolvidas. Os resultados demonstraram que todas as amostras apresentaram valores de condutividade térmica compatíveis com materiais isolantes utilizados na construção civil. Verificou-se ainda que a incorporação de óleo de linhaça, inicialmente adotada para melhorar a trabalhabilidade da resina, comprometeu a cura do material e reduziu a sua estabilidade física. A formulação otimizada, constituída por lã de ovelha e resina natural de pinheiro sem adição de óleo de linhaça, apresentou densidade aparente de 163,6 kg/m³ e condutividade térmica de 0,0458 W/(m·K) a 15 °C, associando desempenho térmico competitivo a adequada integridade estrutural. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica preliminar do compósito desenvolvido como alternativa bio-baseada para aplicações de isolamento térmico em edifícios, contribuindo simultaneamente para a

valorização da lã de ovelha de baixo valor comercial e para o desenvolvimento de soluções alinhadas com os princípios da economia circular e da construção sustentável.

Palavras-chave: lã de ovelha; isolamento térmico; painéis compósitos; materiais bio-baseados; construção sustentável; economia circular.

ABSTRACT

The construction sector is continuously seeking solutions that promote greater energy efficiency and reduced environmental impact, making the thermal performance of buildings a fundamental requirement for the sustainability of the built environment. At the same time, sheep wool obtained from native Portuguese breeds has limited interest for the textile industry due to its coarse fiber diameter and is often undervalued or discarded as an agricultural by-product. In this context, the aim of this dissertation was to develop and characterize bio-based composite panels for thermal insulation, valorizing this natural resource through its combination with natural pine resin. The experimental development was conducted through an iterative approach involving successive adjustments to the composite formulation and processing parameters. The panels were manufactured by arranging sheep wool fibers in orthogonal layers, followed by the application of the binder and consolidation through thermal pressing. During the development phase, different formulations containing natural pine resin, with and without the incorporation of linseed oil, as well as different processing conditions, were evaluated until the final manufacturing protocol was established. Thermal characterization was carried out using the Guarded Hot Plate method with a λ -Meter EP500e apparatus. Tests were performed at mean temperatures of 15 °C, 25 °C, and 40 °C, allowing the thermal behavior of the different formulations to be assessed. The results demonstrated that all developed samples exhibited thermal conductivity values compatible with insulation materials commonly used in the construction industry. It was also observed that the incorporation of linseed oil, initially adopted to improve resin workability, impaired the curing process and reduced the physical stability of the material. The optimized formulation, consisting of sheep wool and natural pine resin without the addition of linseed oil, exhibited an apparent density of 163.6 kg/m³ and a thermal conductivity of 0.0458 W/(m·K) at 15 °C, combining competitive thermal performance with adequate structural integrity. The results demonstrate the preliminary technical feasibility of the developed composite as a bio-based alternative for thermal insulation applications in buildings, while simultaneously contributing to the valorization of low-value sheep wool and the development of

solutions aligned with the principles of the circular economy and sustainable construction.

Keywords: sheep wool; thermal insulation; composite panels; bio-based materials; sustainable construction; circular economy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento e Justificativa	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação.....	3
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1	O Setor da Construção Civil e a Sustentabilidade	5
2.2	Materiais Isolantes Térmicos de Referência e Análise de Mercado	6
2.3	Lã de Ovelha como Isolante Natural Endógeno	8
2.3.1	<i>Mecanismos Coletivos de Transferência de Calor em Meios Fibrosos</i> 10	
2.4	Matrizes Ligantes Naturais e Consolidação de Painéis	12
2.4.1	<i>Mecanismos Químicos de Polimerização Oxidativa do Sistema Ligante</i> 13	
2.5	Estudos e Aplicação Recente de Bioisolantes de Lã.....	15
2.6	Fundamentos Teóricos de Transferência de Calor em Regime Estacionário 17	
2.6.1	<i>Análise Comparativa de Métodos de Medição da Condutividade Térmica</i>	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	Matérias Primas e Processamento Inicial	20
3.1.1	<i>Lã de Ovelha</i>	20
3.1.2	<i>Resina Natural de Pinheiro e Óleo de Linhaça (Matriz Aglutinante)</i> .	22
3.2	Desenvolvimento e Fabricação dos Painéis Compósitos	23
3.3	Ensaio de Condutividade Térmica e Procedimentos Analíticos	36
3.3.1	<i>Equipamento e Princípio do Método</i>	36
3.4	Avaliação da Condutividade Térmica	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41

4.1	Caracterização Física e Densidade Aparente	41
4.2	Condutividade Térmica em Regime Estacionário.....	43
4.3	Validação Analítica Através de Modelos Preditivos de Mistura	46
4.4	Sensibilidade Térmica e Comportamento Transiente	48
4.5	Comparação com Materiais Isolantes Comerciais.....	52
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	54

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CONSUMO FINAL DE ENERGIA POR SETOR NA UNIÃO EUROPEIA (ADAPTADO DE EUROSTAT,2023).	6
FIGURA 2; ESTRUTURA DO AGLOMERADO DE CORTIÇA EXPANDIDA (ICB), EVIDENCIANDO AS CÉLULAS FECHADAS RESPONSÁVEIS PELO ISOLAMENTO (UNICORSTUDIO,2025)	8
FIGURA 3: FLUXO CONCEITUAL DA ECONOMIA CIRCULAR DA LÃ COMO MATERIAL DE ISOLAMENTO TÉRMICO	9
FIGURA 4: MICROGRAFIA ELETRÔNICA DE VARRIMENTO (SEM) DE UMA FIBRA DE LÃ, EVIDENCIANDO A ESTRUTURA DE ESCAMAS DA CUTÍCULA (ADAPTADO DE BRYSON,2005).....	10
FIGURA 5: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MICROESTRUTURA DA FIBRA DA LÃ, EVIDENCIANDO A ORGANIZAÇÃO BILATERAL DO ORTOCÓRTEX E PARACÓTEX (ADAPTADO DE BRITISH WOOL, S.D.).....	11
FIGURA 6: ESQUEMA DO PROCESSO DE AGULHAMENTO MECÂNICO(NEEDLE-PUNCHING) (ADAPTADO DE RUSSELL,2006).	12
FIGURA 7: PREPARAÇÃO MANUAL E CORTE DAS MANTAS DE LÃ DE OVELHA PARA A MONTAGEM EM CAMADAS.....	21
FIGURA 8: CONTROLE DE RIGOROSO DA MASSA DE CADA ESTRATO PARA HOMOGENEIDADE DAS AMOSTRAS.....	22
FIGURA 9: MATERIAIS UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DO SISTEMA LIGANTE EMPREGADO NA FABRICAÇÃO DOS PAINÉIS COMPÓSITOS.	23
FIGURA 10: ORGANIZAÇÃO ORTOGONAL DAS CAMADAS DE LÃ UTILIZANDO A TÉCNICA DE CROSS-LAPPING.....	23
FIGURA 11: MANTA DE LÃ SENDO IMPREGNADA COM RESINA NATURAL DE PINHEIRO DILUÍDA COM ÓLEO DE LINHAÇA USANDO PINCEL.....	26
FIGURA 12: AMOSTRA PRELIMINAR DA PRIMEIRA ETAPA APÓS A CURA, EVIDENCIANDO BAIXA RIGIDEZ E ELEVADA MALEABILIDADE	26
FIGURA 13: PRENSA LABORATORIAL MONTECH LABORATORY PRESS LP 3000 UTILIZADA NO PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS.	27
FIGURA 14: AMOSTRA PRELIMINAR POSICIONADA NA PRENSA, EXIBINDO A SOBREPOSIÇÃO DE CAMADAS E A INTERFACE DE MONITORAMENTO DE PARÂMETROS.....	28
FIGURA 15: AMOSTRA PRELIMINAR OBTIDA NA TERCEIRA ETAPA EXPERIMENTAL, EXIBINDO EVOLUÇÃO NA RETENÇÃO DA FORMA E COMPACIDADE ESTRUTURAL.	29
FIGURA 16: PESAGEM DA RESINA NATURAL DE PINHEIRO NA FORMA SÓLIDA UTILIZADA NA COMPOSIÇÃO.....	30
FIGURA 17: DISTRIBUIÇÃO DA RESINA GRANULADA SOBRE A MANTA DE LÃ ANTES DA PRENSAGEM.	30
FIGURA 18: DOSAGEM DE RESINA NATURAL DE PINHEIRO AJUSTADA PARA EVITAR O TRANSBORDAMENTO SUPERFICIAL	31
FIGURA 19: MONTAGEM DAS CAMADAS DE LÃ, EVIDENCIANDO A DISTRIBUIÇÃO UNIFORME DO AGLUTINANTE E A AUSÊNCIA DE ADITIVOS LÍQUIDOS.	31

FIGURA 20: INSERÇÃO DO TERMOPAR NO CENTRO DAS CAMADAS PARA MEDIÇÃO DA INÉRCIA TÉRMICA.	33
FIGURA 21: GRÁFICO DE MONITORAMENTO VIA SOFTWARE EVIDENCIANDO A ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DO NÚCLEO EM 61 °C APÓS O CICLO INICIAL DE 20 MINUTOS).....	34
FIGURA 22:INTERFACE DE MONITORAMENTO DA PRENSA MONTECH, EVIDENCIANDO A ESTABILIDADE DA FORÇA DE COMPRESSÃO (30 kN) E A CURVA DE TEMPERATURA DO NÚCLEO ATINGINDO O EQUILÍBRIO EM 137,7 °C	35
FIGURA 23 : EQUIPAMENTO Λ -METER EP500E.....	37
FIGURA 24: INTERFACE DE CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO NO SOFTWARE DO EQUIPAMENTO .	38
FIGURA 25: ASPECTO VISUAL DAS AMOSTRAS DESENVOLVIDAS APÓS A PRENSAGEM E CURA.	42
FIGURA 26: EVOLUÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DE ENSAIO.....	45
FIGURA 27: INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE RESINA NATURAL NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA A 15 °C.....	45
FIGURA 28: CURVA DE ESTABILIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DURANTE O ENSAIO. .	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: MATRIZ COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E AMBIENTAIS DE ISOLANTES TÉRMICOS COMERCIAIS.....	14
TABELA 2: SÍNTESE DE ESTUDOS CIENTÍFICOS ACERCA DA APLICAÇÃO DA LÃ DE OVELHA NO ISOLAMENTO TÉRMICO.....	16
TABELA 3: MATRIZ EXPERIMENTAL DEFINITIVA PARA OS ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA.	31
TABELA 4: MASSA E DENSIDADE APARENTE DAS FORMULAÇÕES DO COMPÓSITO.....	41
TABELA 5: RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DAS AMOSTRAS DESENVOLVIDAS.	43
TABELA 6: POROSIDADE VOLUMÉTRICA ESTIMADA DAS FORMULAÇÕES DESENVOLVIDAS ...	47
TABELA 7: SENSIBILIDADE TÉRMICA DAS FORMULAÇÕES DESENVOLVIDAS	49
TABELA 8: COMPARATIVO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA ENTRE A AMOSTRA 3 E MATERIAIS ISOLANTES COMERCIAIS.....	52

ACRONIMOS

ACV *Análise do Ciclo de Vida*

ASTM *Sociedade Americana para Ensaios e Materiais*

DIN *Instituto Alemão de Normalização*

EPBD *Diretiva sobre o Desempenho Energético dos Edifícios*

ETICS *Sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior*

GEE *Gases com Efeito de Estufa*

GHP *Placa Quente Guardada*

ICB *Aglomerado de Cortiça Expandida*

ISO *Organização Internacional de Normalização*

LOI *Índice Limite de Oxigénio*

nZEB *Edifício com Necessidades Quase Nulas de Energia*

SEM *Microscopia Eletrónica de Varrimento*

UE *União Europeia*

TPS *Fonte Plana Transiente*

XPS *Poliestireno Extrudido*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Justificativa

Nas últimas décadas, a preocupação com a sustentabilidade e a eficiência energética no setor da construção civil intensificou-se significativamente, impulsionada pelas diretrizes regulamentares da União Europeia, como a Diretiva (UE) 2018/844. Este cenário exige a transição para uma economia circular, fomentando o desenvolvimento de materiais que reduzam a pegada de carbono incorporada nos edifícios e minimizem o consumo de energia associado à climatização dos espaços habitacionais (Papadopoulos, 2005; Schiavoni et al., 2016).

No entanto, o mercado de isolamento térmico ainda é amplamente dominado por produtos de matriz mineral ou sintética, cuja produção acarreta elevado consumo energético e impactos ambientais consideráveis.

Como alternativa ecoeficiente, os recursos naturais e os subprodutos de atividades agropecuárias têm despertado grande interesse científico para a manufatura de bioisolantes. Entre esses recursos, destaca-se a lã de ovelha residual.

Historicamente valorizada pela indústria têxtil, as frações de lã de menor qualidade, frequentemente provenientes de raças autóctones e de sistemas de pastoreio regional, perderam espaço no mercado, passando a ser encaradas como um resíduo de difícil gestão e com elevado custo de descarte para os produtores locais (Moisés, 2013; Pennacchio et al., 2017). A acumulação ou queima inadequada desse material gera impactos ambientais significativos, negligenciando uma fibra natural dotada de propriedades térmicas favoráveis, tais como baixa condutividade térmica e capacidade de regulação higratérmica.

Apesar do elevado potencial isolante da lã de ovelha pura, sua aplicação prática na envoltória dos edifícios sob a forma de painéis de isolamento exige integridade física e coesão fibrosa ao longo do tempo. De forma a superar as limitações relacionadas ao manuseio e ao colapso volumétrico das fibras soltas, a literatura científica aponta para a necessidade da incorporação de matrizes ligantes

(Russell, 2006). Todavia, o uso de resinas puramente sintéticas contraria as premissas da construção sustentável.

É neste contexto que este trabalho se justifica, propondo o desenvolvimento de um painel compósito que alia fibras residuais de lã de ovelha a um sistema aglutinante de base natural, composto por resina de pinheiro e aditivado com óleo de linhaça. Esta investigação concentra-se na caracterização laboratorial do coeficiente de condutividade térmica (λ) desse material por meio do método da placa quente protegida (*Guarded Hot Plate*). Ao investigar de forma sistemática diferentes dosagens e combinações desses elementos naturais, este estudo busca contribuir para a literatura sobre biocompósitos, avaliando uma alternativa de isolamento térmico local, circular e de menor impacto ambiental.

1.2 Objetivos

O objetivo central deste trabalho consiste em desenvolver e caracterizar painéis isolantes biosustentáveis produzidos a partir de fibras residuais de lã de ovelha aglutinadas com uma matriz ligante natural à base de resina de pinheiro, avaliando a influência de diferentes formulações e aditivos no desempenho térmico do material para aplicação na envoltória dos edifícios.

Para alcançar esse objetivo geral, definiram-se as seguintes metas específicas:

- Estabelecer as diretrizes de dosagem e o procedimento de moldagem física dos painéis, determinando as proporções de ligante por interface para assegurar a integridade física e a coesão das fibras de lã;
- Determinar experimentalmente o coeficiente de condutividade térmica (λ) dos painéis desenvolvido por meio do método da placa quente protegida (*Guarded Hot Plate*), utilizando o equipamento λ -Meter EP500e em conformidade com as diretrizes das normas ASTM C177, ISO 8302, DIN EN 1946-2 e DIN EN 12667;
- Avaliar de forma comparativa a influência da fração de massa de resina natural e da incorporação de óleo de linhaça no comportamento térmico das amostras, isolando o efeito de cada constituinte no fluxo de calor;

- Confrontar os coeficientes de condutividade térmica obtidos nos ensaios laboratoriais com os dados reportados na literatura para isolantes térmicos convencionais e comerciais (como a lã de rocha), validando o potencial de aplicabilidade técnica do compósito proposto.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos principais, estruturados de forma a apresentar o enquadramento teórico, a metodologia experimental adotada, os resultados obtidos e as conclusões provenientes do desenvolvimento do trabalho.

O primeiro capítulo apresenta o enquadramento geral da investigação, abordando a importância da sustentabilidade no setor da construção civil, a necessidade de desenvolvimento de materiais isolantes de menor impacto ambiental e o potencial da utilização da lã residual de ovelha como matéria-prima para a produção de biocompósitos aplicados ao isolamento térmico.

O segundo capítulo corresponde à revisão bibliográfica, contemplando os principais conceitos relacionados aos materiais isolantes térmicos, às fibras naturais aplicadas na construção civil, às propriedades da lã de ovelha e aos fundamentos associados à transferência de calor em materiais porosos. Além disso, são apresentados estudos científicos relacionados ao desenvolvimento de bioisolantes e compósitos à base de fibras naturais.

O terceiro capítulo descreve os materiais utilizados e os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento dos painéis compósitos, incluindo a preparação das matérias-primas, a formulação das amostras, o processo de fabricação e a metodologia utilizada para a caracterização térmica dos materiais desenvolvidos.

O quarto capítulo apresenta e discute os resultados experimentais obtidos, analisando a influência das diferentes formulações no comportamento térmico dos painéis, bem como a comparação dos valores de condutividade térmica obtidos com dados reportados na literatura.

Por fim, o quinto capítulo reúne as principais conclusões do trabalho, destacando os resultados mais relevantes da investigação, as limitações

identificadas e possíveis perspectivas para estudos futuros relacionados ao desenvolvimento de materiais isolantes sustentáveis.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Setor da Construção Civil e a Sustentabilidade

A indústria da construção civil assume, na atualidade, um papel central no debate sobre a sustentabilidade global, sendo apontada como uma das principais responsáveis pelo consumo de recursos naturais e pelas emissões antrópicas de gases com efeito de estufa (GEE). No âmbito da União Europeia, o setor edificado é responsável por cerca de 40% do consumo final de energia e por aproximadamente 36% das emissões de gases poluentes, conforme reportado pela Comissão Europeia (European Commission, 2023).

Para além da fase operacional dos edifícios, associada fundamentalmente às necessidades de climatização e iluminação, o impacto ambiental estende-se a todo o ciclo de vida das construções. Este ciclo compreende as etapas de extração de matérias-primas, processamento industrial, transporte, aplicação em obra e, eventualmente, a demolição e fim de vida. Estudos baseados na metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV) evidenciam que a maior parte dos materiais de construção tradicionais possui uma elevada energia incorporada, agravando o balanço ecológico das edificações antes mesmo do início da sua exploração (Cabeza et al., 2014; Asdrubali et al., 2015).

Diante dessa realidade, a Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios (*Energy Performance of Buildings Directive – EPBD*) estabeleceu metas progressivas para a descarbonização do parque edificado europeu. O principal vetor desta política assenta na promoção de edifícios com necessidades quase nulas de energia (*nearly Zero Energy Buildings – nZEB*). Neste paradigma construtivo, a envolvente térmica assume uma função determinante na prevenção dos fluxos térmicos entre o ambiente interior e o exterior, reduzindo de forma passiva as necessidades de sistemas mecânicos de aquecimento e arrefecimento (European Commission, 2018).

A urgência desta transição é corroborada pelos indicadores estatísticos publicados pelo Eurostat (2023), que demonstram o peso preponderante dos setores residencial e de serviços no panorama energético europeu, superando os segmentos industrial e de transportes. Os dados macro energéticos que

fundamentam esta necessidade de intervenção térmica encontram-se sistematizados na figura 1.

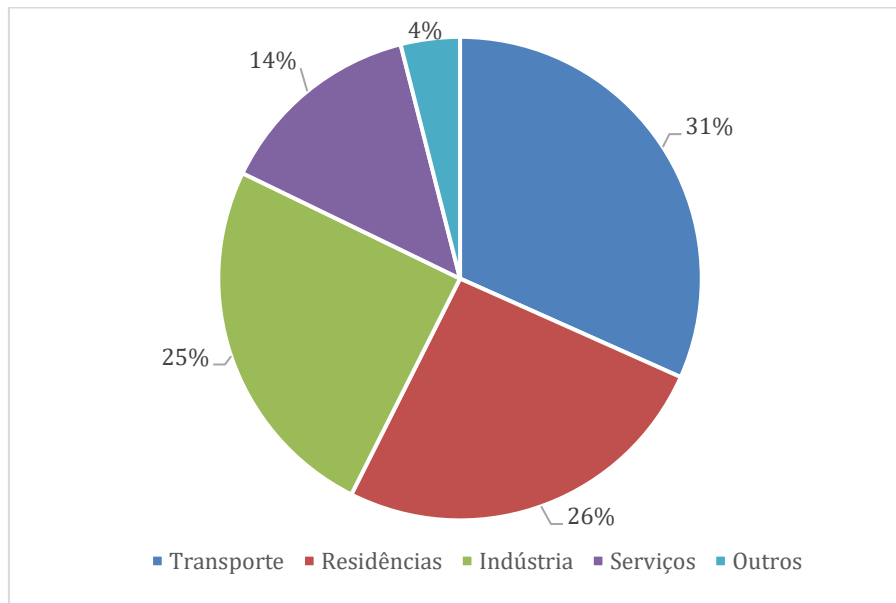


Figura 1: Consumo final de energia por setor na União Europeia (Adaptado de Eurostat, 2023).

Face a este cenário, a integração de soluções de isolamento térmico eficiente surge como o mecanismo mais célere e eficaz para a mitigação das perdas de calor. Todavia, a seleção contemporânea dos materiais isolantes ultrapassou a perspectiva clássica, anteriormente focada exclusivamente na minimização do coeficiente de condutividade térmica (λ), passando a considerar uma abordagem mais ampla, que engloba aspectos relacionados ao desempenho térmico, impacto ambiental e sustentabilidade ao longo do ciclo de vida dos materiais. Atualmente, a avaliação técnica desses materiais considera não apenas suas propriedades térmicas intrínsecas, mas também os impactos associados à sua produção, utilização e descarte, impulsionando a investigação científica em torno de subprodutos e recursos de base biológica provenientes de fontes renováveis (Papadopoulos, 2005; Asdrubali et al., 2015; Schiavoni et al., 2016).

2.2 Materiais Isolantes Térmicos de Referência e Análise de Mercado

O contraste rigoroso com o mercado atual, apontando as desvantagens ecológicas do EPS, da Lã de Rocha e o custo da Cortiça. A validação de novos materiais destinados ao isolamento térmico na construção civil requer o seu enquadramento analítico face às soluções tecnológicas consolidadas no mercado. A seleção das soluções de referência para este estudo baseou-se na

representatividade das principais classes de isolantes térmicos comercialmente disponíveis: os materiais inorgânicos minerais, representados pela lã de rocha; os materiais sintéticos derivados de polímeros petroquímicos, representados pelo poliestireno extrudido (XPS); e os materiais naturais de base biológica, representados pelo aglomerado de cortiça expandida (ICB).

Esta abordagem permite estabelecer um referencial técnico comparativo, considerando parâmetros fundamentais como a condutividade térmica, o comportamento ao fogo, a permeabilidade ao vapor de água e o impacto ecológico (Papadopoulos, 2005; Asdrubali et al., 2015).

A lã de rocha constitui uma das soluções minerais mais difundidas, sendo frequentemente aplicada em sistemas de isolamento pelo exterior (ETICS) e fachadas ventiladas. O seu processo produtivo baseia-se na fusão de rochas basálticas a temperaturas superiores a 1400 °C, seguida de fibragem e estabilização com ligantes orgânicos (Papadopoulos, 2005).

Do ponto de vista termo físico, apresenta um coeficiente de condutividade térmica (λ) compreendido entre 0,034 e 0,040 W/(m·K). A sua estrutura fibrosa aberta confere-lhe uma elevada permeabilidade ao vapor de água, com um fator de resistência à difusão do vapor (μ) próximo da unidade, minimizando o risco de condensações intersticiais. Embora exiba um excelente comportamento ao fogo, sendo classificada como incombustível (Euroclasse A1), a sua produção acarreta uma elevada energia incorporada e pegada de carbono, além de demandar cuidados no manuseamento devido à libertação de partículas finas irritantes (Papadopoulos, 2005; Asdrubali et al., 2015).

No segmento dos isolantes sintéticos, o poliestireno extrudado (XPS) destaca-se pelas suas propriedades hidrofóbicas. Produzido por meio da extrusão do poliestireno com agentes expansores, o XPS desenvolve uma estrutura celular fechada e homogênea, que lhe confere uma condutividade térmica reduzida, tipicamente entre 0,033 e 0,036 W/(m·K), e uma absorção de água praticamente nula. Contudo, esta impermeabilidade resulta numa baixa permeabilidade ao vapor de água ($\mu > 100$), o que restringe a capacidade de transpirabilidade das paredes e pode induzir patologias higrotérmicas envoltória. Sob a ótica ambiental, o XPS apresenta uma energia incorporada criticamente elevada, dependendo estritamente de recursos fósseis não renováveis e gerando passivos complexos no fim de vida útil (Papadopoulos, 2005; Asdrubali et al., 2015).

Como contrapartida sustentável de base natural, o Aglomerado de Cortiça Expandida (ICB) assume papel de relevo no panorama construtivo. O ICB é manufaturado através da expansão térmica de grânulos de cortiça a temperaturas que variam entre 300 e 370 °C, processo no qual a própria suberina atua como ligante natural, eliminando a necessidade de aditivos sintéticos (Gil, 2015).

O ICB exibe uma condutividade térmica na ordem de 0,037 a 0,040 W/(m·K), associada a uma elevada estabilidade dimensional e resistência à degradação biológica. O seu balanço de carbono é considerado negativo, uma vez que o volume de dióxido de carbono sequestrado durante o ciclo de vida do sobreiro supera as emissões do processamento industrial. Todavia, a sua aplicação em larga escala encontra limitações na disponibilidade restrita da matéria-prima e no seu elevado custo de aquisição no mercado (Gil, 2015).



Figura 2; Estrutura do Aglomerado de Cortiça Expandida (ICB), evidenciando as células fechadas responsáveis pelo isolamento (Unicorstudio,2025)

2.3 Lã de Ovelha como Isolante Natural Endógeno

A lã de ovelha surge no contexto dos bioisolantes como um recurso endógeno com elevado potencial de valorização circular. Em regiões de forte economia agropecuária, como Trás-os-Montes, a ovinocultura está focada na produção de carne e leite, transformando a lã num subproduto de escasso valor

comercial. As raças autóctones geram fibras grosseiras, com diâmetros superiores a 30 μm e elevados teores de impurezas, sendo rejeitadas pela indústria têxtil tradicional (Russel, 2006).

A ausência de cadeias de processamento locais transforma este recurso num passivo económico e ambiental para os produtores, resultando frequentemente em descartes inadequados, como a queima a céu aberto ou deposição em aterros, negligenciando uma matéria rica em queratina (European Commission, 2018).



Figura 3: Fluxo conceitual da economia circular da lã como material de isolamento térmico

A morfologia da fibra de lã governa o seu comportamento térmico e o seu potencial de aglutinação. Superficialmente, a fibra possui uma cutícula escamosa formada por células sobrepostas, que incrementa o atrito interfibras e facilita a sua consolidação física (Morton & Hearle, 2008).

Geometricamente, destaca-se a sua ondulação tridimensional (*crimp*), decorrente da estrutura bilateral do córtex, dividido entre o ortocórtex e o paracórtex. Esta configuração helicoidal atua impedindo o empacotamento denso, originando uma matriz de elevada porosidade que aprisiona o ar em estado quase estagnado. Dado que a condutividade térmica do ar em repouso é de aproximadamente 0,026 W/(m·K), este mecanismo torna-se o principal responsável pela capacidade isolante do material, posicionando o seu λ teórico entre 0,032 e 0,045 W/(m·K) (Korjenic et al., 2011; Volf et al., 2015).

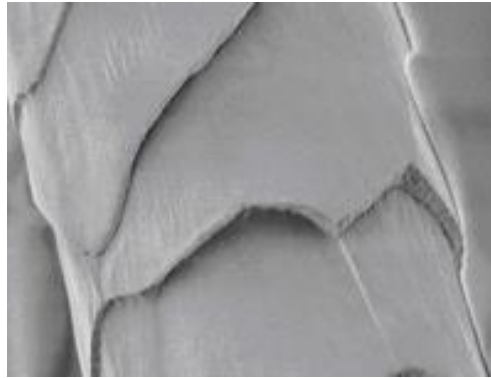


Figura 4: Micrografia eletrônica de varrimento (SEM) de uma fibra de lã, evidenciando a estrutura de escamas da cutícula (Adaptado de Bryson, 2005).

Adicionalmente, a lã de ovelha destaca-se pelo seu comportamento higroscópico anfifílico, apresentando uma cutícula exterior hidrofóbica e um córtex interior hidrofílico. Esta propriedade permite ao material absorver até 35% da sua massa seca em umidade sem que ocorra uma degradação severa do seu desempenho térmico. Este processo de sorção é acompanhado por trocas térmicas de natureza exotérmica e endotérmica, permitindo que o material atue como um regulador higrotérmico passivo (*moisture buffer*) nos ambientes interiores (Rode et al., 2005; Korjenic et al., 2011).

No que concerne à segurança ao fogo, a elevada presença de azoto e a humidade intrínseca conferem à fibra um ponto de ignição elevado (entre 570 e 600 °C) e um Índice Limite de Oxigénio (LOI) superior a 25%, promovendo a carbonização superficial sem a libertação de gotas incandescentes (Horrocks & Anand, 2000). No domínio acústico, a interconexão dos poros e a resiliência elástica das fibras favorecem a dissipação da energia sonora por atrito viscoso, alcançando coeficientes de absorção elevados

2.3.1 Mecanismos Coletivos de Transferência de Calor em Meios Fibrosos

A avaliação da condutividade térmica aparente (λ_{eq}) de um bioisolante fibroso não pode ser dissociada da análise dos mecanismos simultâneos de transporte de energia que ocorrem no interior da sua matriz porosa. Em materiais de elevada porosidade intrínseca, como os painéis de lã de ovelha, a transferência de calor processa-se por meio de quatro componentes distintos: a condução térmica através das fibras sólidas de queratina (λ_{sol}), a condução térmica através do ar estagnado nos poros (λ_{gas}), a radiação térmica entre as superfícies das fibras constitutivas

(λ_{rad}) e a convecção térmica natural do fluido intersticial (λ_{conv}). O somatório destas parcelas define o comportamento termo físico global do compósito, conforme expresso na equação 1 (Papadopoulos, 2005; Schiavoni et al., 2016).:

$$\lambda_{eq} = \lambda_{sol} + \lambda_{gas} + \lambda_{rad} + \lambda_{conv} \quad (1)$$

A microestrutura fibrosa da lã influencia diretamente os mecanismos de transporte de calor no interior do material, conforme ilustrado na Figura 5.

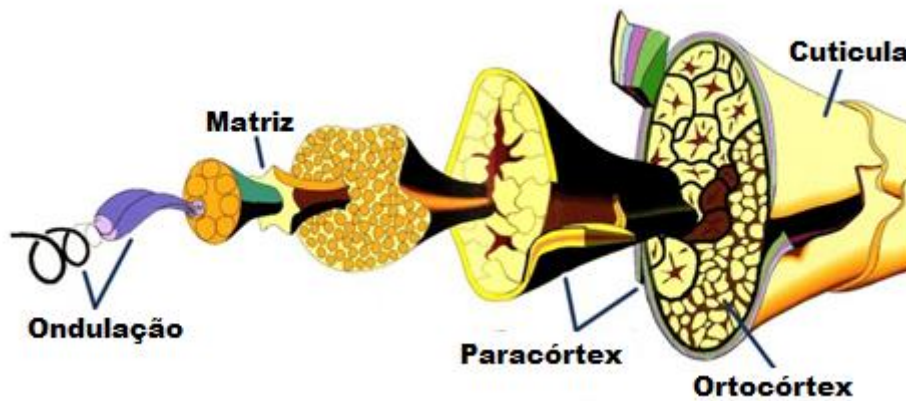


Figura 5: Representação esquemática da microestrutura da fibra da lã, evidenciando a organização bilateral do ortocórtex e paracórtex (Adaptado de British Wool, s.d.).

A condução sólida (λ_{sol}) ocorre ao longo do esqueleto fibroso e está diretamente ligada à densidade aparente (p) do painel. Em densidades excessivamente elevadas, o incremento dos pontos de contato entre as fibras pode favorecer a formação de pontes térmicas sólidas, elevando a condutividade térmica global do material. Por sua vez, a condução gasosa (λ_{gas}) representa uma das parcelas mais relevantes do isolamento térmico em materiais de baixa densidade, sendo influenciada pelo aprisionamento das moléculas de ar nos espaços porosos. Quando as dimensões dos poros são reduzidas, inferiores ao livre percurso médio das moléculas de ar, ocorre uma redução das colisões moleculares e, conseqüentemente, uma limitação da transferência de energia térmica por condução gasosa (Papadopoulos, 2005; Asdrubali et al., 2015).

A radiação interna (λ_{rad}) assume papel relevante em matrizes de baixa densidade e elevada porosidade, nas quais a radiação infravermelha pode se propagar com menor atenuação através dos vazios existentes na estrutura fibrosa. Com o aumento da densidade do painel, ocorre maior opacidade do meio poroso, reduzindo a transferência de calor por radiação devido aos múltiplos processos de

espalhamento e absorção promovidos pelas fibras constituintes. Por fim, a componente convectiva (λ_{conv}) é geralmente considerada desprezível em materiais isolantes fibrosos com dimensões reduzidas de poros, uma vez que as forças viscosas do ar confinado superam as forças associadas à movimentação natural do fluido, restringindo a formação de correntes convectivas internas (Papadopoulos, 2005; Schiavoni et al., 2016).

2.4 Matrizes Ligantes Naturais e Consolidação de Painéis

Apesar das propriedades intrínsecas da lã em estado solto, sua aplicação prática em painéis de isolamento requer técnicas de consolidação física capazes de evitar o colapso volumétrico e assegurar a estabilidade dimensional ao longo do tempo (Korjenic et al., 2011).

Entre as técnicas mecânicas, o processo de agulhamento (*needle-punching*) promove o entrelaçamento tridimensional das fibras por meio da penetração de agulhas farpadas, aproveitando a morfologia escamosa da cutícula da lã para gerar mantas coesas sem a utilização de aditivos químicos (Russell, 2006). A Figura 6 apresenta uma representação esquemática do processo de agulhamento mecânico, evidenciando o princípio de entrelaçamento das fibras durante o processo de consolidação).

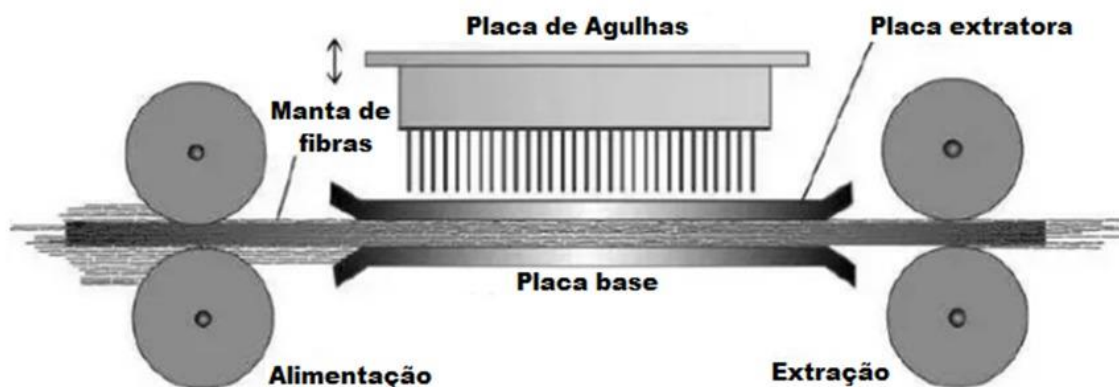


Figura 6: Esquema do processo de agulhamento mecânico (needle-punching) (Adaptado de Russell, 2006).

Além da ação mecânica, a introdução de matrizes ligantes torna-se importante quando se pretende obter painéis com maior estabilidade estrutural e integridade física. As resinas naturais extraídas do pinheiro, constituídas principalmente por ácidos resínicos e compostos terpênicos, apresentam

propriedades adesivas e hidrofóbicas características desses compostos. Quando combinadas com óleo de linhaça, composto rico em ácidos graxos insaturados, pode ocorrer um processo de polimerização oxidativa, resultando na formação de uma matriz ligante capaz de envolver e fixar as fibras (Belgacem & Gandini, 2008).

Essa matriz biopolimérica mantém determinada flexibilidade, reduzindo a possibilidade de fissuração, ao mesmo tempo que preserva parte da porosidade do compósito. Consequentemente, favorece-se a manutenção da permeabilidade ao vapor de água, característica importante para o equilíbrio higrotérmico da envoltória dos edifícios (Palumbo et al., 2015). Da mesma forma, a substituição de polímeros sintéticos derivados do petróleo por sistemas ligantes de origem natural pode contribuir para a redução da energia incorporada e dos impactos ambientais associados ao produto final, alinhando-se aos princípios da economia circular.

2.4.1 Mecanismos Químicos de Polimerização Oxidativa do Sistema Ligante

A transformação de uma mistura fluida composta por resina natural de pinheiro e óleo de linhaça em uma matriz aglutinante sólida e coesa ocorre por meio de um processo de polimerização oxidativa e reticulação macromolecular.

O óleo de linhaça atua como um agente secante devido à elevada concentração de ácidos graxos poli-insaturados, com destaque para o ácido α -linolênico, caracterizado pela presença de ligações duplas reativas em sua cadeia carbônica. Quando exposto ao oxigênio atmosférico e submetido às condições adequadas de temperatura durante a moldagem do painel, ocorre um processo de oxidação que conduz à formação de hidroperóxidos orgânicos, iniciando as reações responsáveis pela reticulação da matriz polimérica (Belgacem & Gandini, 2008).

A decomposição subsequente desses peróxidos gera radicais livres capazes de reagir com ligações duplas presentes nas cadeias dos ácidos graxos, promovendo processos de reticulação (*cross-linking*) e formando uma rede polimérica tridimensional mais estável. A resina de pinheiro, composta principalmente por ácidos resínicos, participa dessa rede em formação, contribuindo para as propriedades adesivas e estruturais do sistema ligante (Belgacem & Gandini, 2008).

Esse mecanismo de cura termoquímica permite a ligação entre a matriz polimérica e as fibras de lã de ovelha, favorecendo a estabilidade dimensional do compósito sem comprometer completamente a microestrutura porosa responsável pelo desempenho térmico do material (Belgacem & Gandini, 2008).

Como síntese das características analisadas, a Tabela 1 apresenta uma comparação entre propriedades físicas e ambientais de materiais isolantes comerciais e da lã de ovelha comercial, permitindo estabelecer uma referência comparativa para o compósito desenvolvido nesta investigação.

Tabela 1: Matriz comparativa das propriedades físicas e ambientais de isolantes térmicos comerciais.

Propriedade Técnica	Lã de Rocha (Mineral)	Cortiça – ICB (Natural)	XPS (Sintético)	Lã de Ovelha Comercial (Literatura)
Origem da Matéria Prima	Rocha Basáltica	Quercus Suber	Petróleo	Queratina Animal
Estrutura Interna	Fibrosa Aberta	Celular Fechada	Celular Fechada	Fibrosa Aberta
Condutividade (λ) [W/(m·K)]	0,034 – 0,040	0,037 – 0,040	0,033 – 0,036	0,032 - 0,045
Densidade (ρ) [kg/m³]	30 - 150	110 - 120	30 – 45	20 – 40
Reação ao Fogo	A1 (Incombustível)	E (Combustível)	E (Inflamável)	Autoextinguível
Fator de Resistência ao Vapor (μ)	≈1 (Permeável)	5 – 30	80 – 250 (Impermeável)	1 – 2 (Permeável)
Energia Incorporada	Alta (>15 MJ/kg)	Muito Baixa (<4 MJ/kg)	Muito Alta (>80 MJ/kg)	Baixa (<10 MJ/kg)
Fim da Vida Útil	Aterro Coletivo	Reutilizável	Aterro / Incineração	Compostável

Fonte: Elaboração própria com base em dados de Papadopoulos (2005), Korjenic et al. (2011), Gil (2015) e Volf et al. (2015)

Observa-se que a lã de ovelha comercial apresenta valores de condutividade térmica comparáveis aos isolantes convencionais, destacando-se pela baixa densidade, elevada permeabilidade ao vapor de água e menor energia incorporada quando comparada aos materiais sintéticos. Entretanto, a utilização de fibras residuais de lã exige estratégias de consolidação que permitam melhorar sua estabilidade estrutural, justificando a incorporação de uma matriz ligante natural no desenvolvimento do compósito proposto.

2.5 Estudos e Aplicação Recente de Bioisolantes de Lã

A utilização da lã de ovelha como matéria-prima no setor da construção civil tem despertado interesse crescente devido ao potencial de aplicação em soluções de isolamento térmico de base natural. Estudos de revisão indicam que as fibras de origem animal apresentam propriedades térmicas e higroscópicas favoráveis, destacando-se em aplicações de envoltória térmica nas quais o controle da umidade influencia o desempenho e a durabilidade dos materiais (Asdrubali et al., 2015).

Na literatura técnica, a lã de ovelha tem sido investigada sob diferentes configurações de processamento, abrangendo desde mantas flexíveis não tecidas até painéis aglomerados e compósitos híbridos.

A manufatura de mantas não tecidas por meio do agulhamento mecânico permite aumentar a coesão interna e melhorar a estabilidade dimensional do material, preservando sua estrutura porosa característica (Russell, 2007). Paralelamente, a incorporação de matrizes ligantes, naturais ou sintéticas, tem sido estudada como estratégia para reduzir a tendência ao colapso volumétrico das fibras soltas e melhorar a durabilidade dos painéis isolantes (Dénes et al., 2019).

Os estudos disponíveis na literatura demonstram que o desempenho térmico dos materiais à base de lã está relacionado às características da fibra utilizada, à densidade aparente, ao processamento e à configuração final do painel.

Nesse contexto, torna-se importante diferenciar a lã comercial da lã residual. A lã comercial é geralmente selecionada para aplicações têxteis devido às suas características de finura e uniformidade. Por outro lado, a lã residual corresponde às frações de menor aproveitamento industrial, apresentando maior variabilidade nas suas características físicas e morfológicas.

Apesar dessas diferenças, ambas apresentam potencial para utilização como materiais isolantes devido à estrutura fibrosa e à capacidade de retenção de ar em sua matriz porosa (Volf et al., 2015; Vêjelis et al., 2024).

Além do comportamento térmico, a lã apresenta capacidade higroscópica associada à estrutura da queratina, permitindo a interação com a umidade presente no ambiente. Essa característica contribui para o equilíbrio higrotérmico dos materiais, embora seu efeito dependa das condições de aplicação e da composição final do compósito (Briga-Sá et al., 2013).

Apesar dos resultados promissores e da versatilidade de aplicação em paredes, coberturas e divisórias, o desenvolvimento de painéis isolantes à base de lã de ovelha ainda apresenta desafios relacionados à variabilidade da matéria-prima, resistência à biodegradação e necessidade de estabilização física por meio de matrizes ligantes compatíveis com os princípios da economia circular (Asdrubali et al., 2015; Dénes et al., 2019).

De forma a organizar os principais estudos encontrados na literatura, a Tabela 2 apresenta uma síntese das investigações relacionadas à aplicação da lã de ovelha em materiais de isolamento térmico.

Tabela 2: Síntese de estudos científicos acerca da aplicação da lã de ovelha no isolamento térmico

Autor (Ano)	Tipo de Material Analisado	Faixa de λ [W/(m·K)]	Densidade [kg/m³]	Principal Conclusão do Estudo
Asdrubali et al. (2015)	Revisão global de fibras naturais	0,035 – 0,050	Variável	Desempenho térmico equivalente ao dos isolantes convencionais.
Volf et al. (2015)	Matrizes de lã pura	0,032 – 0,044	20 - 40	Elevada capacidade isolante em baixas densidades aparentes.
Briga-Sá et al. (2013)	Aplicação de lã na envolvente	≈ 0,040	—	Elevado Framework de regulação hidrotérmica passiva em edifícios.
Dénes et al. (2019)	Compósitos com matrizes ligantes	≈ 0,036 – 0,050	20- 60	Incremento da coesão física e durabilidade através de ligantes.

Véjelis et al. (2024)	Blendas de lã e fibras vegetais	0,032 – 0,045	30 - 50	Viabilidade técnica e sustentabilidade de painéis híbridos naturais.
--------------------------	------------------------------------	------------------	---------	--

2.6 Fundamentos Teóricos de Transferência de Calor em Regime Estacionário

A compreensão do desempenho térmico de painéis compósitos requer a análise dos mecanismos físicos que regem a transferência de energia em meios porosos. No âmbito dos materiais de isolamento térmico, o fluxo de calor ocorre predominantemente por condução através da matriz sólida e do fluido contido nos poros, complementado por fenómenos locais de convecção e radiação interna (Papadopoulos, 2005). Para a caracterização laboratorial destes materiais, assume-se o princípio do fluxo unidimensional de calor em regime estacionário, onde as propriedades térmicas são independentes do tempo e o gradiente de temperatura é estabelecido ao longo de um único eixo perpendicular às faces da amostra.

O modelo matemático que fundamenta esse comportamento baseia-se na Lei de Fourier, amplamente utilizada para descrever a transferência de calor por condução em meios sólidos homogêneos (Incropera et al., 2011; Çengel & Ghajar, 2015). Para uma geometria plana e homogênea, o fluxo de calor por condução é diretamente proporcional à área da seção transversal e ao gradiente de temperatura, e inversamente proporcional à espessura do meio material. A expressão matemática que descreve essa relação é apresentada na Equação (2).

$$q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Onde q representa a taxa de fluxo de calor (W), A corresponde à área da seção transversal à direção do fluxo (m^2), dT/dx exprime o gradiente de temperatura na direção do fluxo (K/m) e λ define o coeficiente de condutividade térmica do material, expresso em $W / (m \cdot K)$ (Incropera et al., 2011).

O coeficiente de condutividade térmica constitui a propriedade intrínseca que quantifica a capacidade de um material conduzir energia térmica. No caso de isolantes fibrosos e porosos, como os compósitos à base de lã de ovelha e resina natural, esse parâmetro assume a designação de condutividade térmica aparente ou equivalente. Isso ocorre porque o valor medido engloba o efeito combinado da

condução térmica através das fibras de queratina e da matriz ligante polimerizada, bem como a condução do ar confinado nos interstícios macroestruturais do painel (Korjenic et al., 2011; Asdrubali et al., 2015).

A determinação experimental desse coeficiente em laboratório, realizada por meio do método da placa quente protegida (*Guarded Hot Plate – GHP*), apoia-se diretamente na aplicação da Lei de Fourier sob condições controladas de regime estacionário. Ao estabelecer uma diferença de temperatura constante (ΔT) entre a placa quente e a placa fria do equipamento, garantindo simultaneamente um fluxo unidimensional na zona central de medição, a condutividade térmica aparente (λ) pode ser determinada pela relação entre a potência térmica dissipada (P), a espessura da amostra (d) e a área efetiva de medição (A), conforme apresentado na Equação (3) (ISO 8302, 1991; ASTM C177, 2019).

$$\lambda = \frac{P \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad (3)$$

Onde P representa a potência térmica dissipada (W), d corresponde à espessura da amostra (m), A representa a área efetiva de medição (m²) e ΔT corresponde à diferença de temperatura entre as superfícies da amostra (K).

A resistência térmica corresponde à capacidade de um material resistir à passagem do fluxo de calor, sendo diretamente proporcional à espessura e inversamente proporcional à sua condutividade térmica, conforme apresentado na Equação (4) (ISO 6946, 2017).

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (4)$$

Onde R representa a resistência térmica expressa em (m² · K) / W e d corresponde à espessura da amostra expressa em metros (m) e λ representa a condutividade térmica do material (W/(m·K)).

2.6.1 Análise Comparativa de Métodos de Medição da Condutividade Térmica

A seleção do método experimental para a determinação do coeficiente de condutividade térmica é um fator determinante para garantir a precisão e a reprodutibilidade dos resultados obtidos em materiais isolantes. De acordo com He

(2014), os métodos de caracterização térmica podem ser agrupados em duas categorias principais: métodos de regime transiente e métodos de regime estacionário.

Os métodos transientes, como o método do fio quente (*Hot Wire*) e a técnica da fonte plana transiente (*Transient Plane Source – TPS*), baseiam-se na aplicação de um impulso térmico e na medição da resposta térmica do material ao longo do tempo. Embora apresentem a vantagem de tempos de ensaio reduzidos, esses métodos podem ser sensíveis a heterogeneidades locais e variações de densidade, especialmente quando aplicados a materiais fibrosos ou compósitos porosos de estrutura complexa (Log & Gustafsson, 1995; He, 2014).

Em contrapartida, os métodos de regime estacionário, entre os quais se destaca o método da placa quente protegida (*Guarded Hot Plate – GHP*), operam através do estabelecimento de um gradiente térmico constante entre as faces da amostra. Esse método é amplamente reconhecido como uma das principais técnicas de referência para a determinação da condutividade térmica de materiais isolantes em regime estacionário, sendo normalizado pelas normas ISO 8302 e ASTM C177 (ISO 8302, 1991; ASTM C177, 2019).

O sistema de medição utiliza anéis de guarda térmicos que circundam a placa central, mantendo-a à mesma temperatura e reduzindo as perdas laterais de calor. Dessa forma, assegura-se o desenvolvimento de um fluxo térmico predominantemente unidimensional através da amostra.

Para materiais como os compósitos à base de lã de ovelha e resina natural, a estabilização em regime permanente proporcionada pelo método GHP permite obter valores representativos da condutividade térmica aparente do sistema poroso, minimizando os efeitos associados à capacidade térmica do material e aos gradientes térmicos transitórios (Papadopoulos, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo descreve os materiais utilizados, os procedimentos experimentais adotados e as metodologias aplicadas no desenvolvimento dos painéis compósitos à base de lã de ovelha e resina natural de pinheiro. A investigação foi conduzida com o objetivo de desenvolver um material de base biológica com potencial aplicação como isolante térmico na construção civil, buscando simultaneamente desempenho térmico, estabilidade dimensional e viabilidade de fabricação.

A metodologia experimental foi estruturada em três etapas principais: seleção dos materiais constituintes, desenvolvimento e fabricação das amostras compósitas e caracterização experimental da condutividade térmica. O processo de formulação ocorreu de maneira progressiva e iterativa, permitindo ajustar os parâmetros de composição, prensagem e consolidação até a definição da matriz experimental definitiva.

3.1 Matérias Primas e Processamento Inicial

A qualidade e a reprodutibilidade dos painéis isolantes dependem diretamente da correta seleção e preparação das suas matérias-primas. Este compósito foi formulado a partir de dois componentes principais: a fibra de lã de ovelha, que atua como o material base para o isolamento térmico, e a resina natural, que funciona como o agente aglutinante responsável por manter as fibras unidas

Para garantir que a resina consiga envolver bem as fibras e formar um painel dimensionamento estável, é fundamental controlar as condições iniciais de ambos os materiais. Por isso, esta seção detalha a origem de cada matéria-prima e os processos de limpeza e preparação realizados em laboratório antes de se iniciar a fase de prensagem térmica.

3.1.1 Lã de Ovelha

A lã de ovelha foi selecionada devido ao seu potencial como matéria-prima renovável, biodegradável e de baixa condutividade térmica (Asdrubali et al., 2015;

Volf et al., 2015), além de representar um subproduto agropecuário com reduzido aproveitamento industrial. A matéria-prima foi fornecida previamente lavada e desengordurada por colaboradores do projeto. De acordo com as informações fornecidas pelos responsáveis pelo material, o processo de higienização foi realizado em lavanderia antes do seu fornecimento para utilização experimental.

A lã foi submetida à preparação manual em laboratório, consistindo na abertura dos flocos fibrosos e separação dos aglomerados mais compactos, de forma a promover maior homogeneidade estrutural do material. Em seguida, as mantas foram cortadas nas dimensões estabelecidas para cada etapa experimental.

A Figura 7 apresenta as etapas de preparação manual e corte das mantas de lã utilizadas na montagem das amostras.



a) Preparação da lã



b) Corte

Figura 7: Preparação manual e corte das mantas de lã de ovelha para a montagem em camadas.

Com o objetivo de garantir a repetibilidade experimental e o controle da densidade aparente, todas as massas de lã utilizadas nas amostras foram previamente determinadas em balança de precisão. A quantidade de lã empregada em cada painel foi definida durante a fase de desenvolvimento experimental, por meio de ensaios preliminares que permitiram ajustar a massa necessária para o preenchimento do molde e obtenção da espessura pretendida após a prensagem. Como resultado desse processo, as amostras definitivas destinadas aos ensaios térmicos apresentaram massas totais compreendidas entre 250 g e 300 g por painel.

A Figura 8 apresenta o procedimento de pesagem realizado para o controle

da massa utilizada em cada camada das amostras



Figura 8: Controle de rigoroso da massa de cada estrato para homogeneidade das amostras.

3.1.2 Resina Natural de Pinheiro e Óleo de Linhaça (Matriz Aglutinante)

A resina natural de pinheiro foi empregada como matriz aglutinante do compósito, sendo responsável pela união das fibras e pela estabilização estrutural dos painéis após a prensagem térmica. Trata-se de uma resina de origem natural, composta predominantemente por compostos resínicos provenientes do pinheiro, utilizada neste trabalho como principal componente ligante da matriz.

Nas etapas iniciais do desenvolvimento experimental, observou-se que a utilização da resina pura apresentava limitações operacionais relacionadas ao seu rápido endurecimento após aquecimento, dificultando a distribuição homogênea do ligante entre as camadas fibrosas.

Com o objetivo de aumentar a trabalhabilidade da mistura, incorporou-se óleo de linhaça em determinadas formulações. O óleo de linhaça é um produto de origem vegetal obtido a partir das sementes de linho (*Linum usitatissimum*) e foi utilizado como aditivo da matriz ligante. Sua incorporação promoveu redução da viscosidade da mistura e retardamento parcial do processo de solidificação, permitindo maior tempo de aplicação manual da resina sobre as fibras.

A Figura 9 apresenta os materiais utilizados na preparação do sistema ligante empregado na fabricação dos painéis compósitos.



Figura 9: Materiais utilizados na preparação do sistema ligante empregado na fabricação dos painéis compósitos.

3.2 Desenvolvimento e Fabricação dos Painéis Compósitos

A fabricação dos painéis compósitos foi realizada por meio da combinação entre deposição manual do ligante e prensagem térmica controlada. Para promover maior estabilidade dimensional e melhor distribuição das fibras, as mantas de lã foram organizadas em camadas ortogonais, utilizando a técnica de *cross-lapping*, com alternância das orientações das fibras entre 0° e 90°.

A Figura 10 apresenta a organização ortogonal das camadas de lã empregada na montagem dos painéis compósitos.



Figura 10: Organização ortogonal das camadas de lã utilizando a técnica de *cross-lapping*

A resina natural de pinheiro foi previamente aquecida até atingir o estado líquido e, posteriormente, aplicada manualmente sobre as mantas de lã com auxílio de pincel. Após a impregnação das camadas, os conjuntos foram submetidos à prensagem térmica utilizando a prensa laboratorial MonTech LP 3000.

A definição da formulação e das condições de fabricação dos painéis foi conduzida por meio de um desenvolvimento experimental iterativo. Nesse processo, foram ajustados progressivamente a proporção de resina natural de pinheiro, a incorporação ou não de óleo de linhaça, o número de camadas, as dimensões de corte da lã e os parâmetros operacionais da prensa térmica.

Essa abordagem permitiu estabelecer, de forma gradual, as condições de fabricação mais adequadas para obtenção de amostras com espessura nominal de 80 mm, estabilidade dimensional e coesão estrutural compatíveis com a aplicação proposta em isolamento térmico.

Antes da definição da matriz experimental definitiva, foram realizadas sucessivas etapas preliminares de desenvolvimento com o objetivo de ajustar a composição do compósito e os parâmetros de fabricação. A Tabela 3 apresenta um resumo das principais abordagens adotadas durante essa fase exploratória.

Tabela 3- Resumo das etapas preliminares de desenvolvimento dos painéis compósitos.

Etapas	Principais características	Objetivo	Resultado observado
1ª abordagem	Aplicação manual de resina natural de pinheiro e óleo de linhaça sobre mantas de lã. Cura à temperatura ambiente.	Avaliar a interação inicial entre os materiais e a viabilidade do processo de fabricação.	Baixa rigidez e elevada maleabilidade das amostras.
2ª abordagem	Introdução da prensagem térmica utilizando a prensa MonTech LP 3000. Utilização de cinco	Melhorar a compactação e a união entre as camadas.	Aumento da rigidez em relação à primeira abordagem, porém ainda insuficiente para a aplicação

	camadas de lã e quatro camadas de resina.		pretendida.
3ª abordagem	Redução das dimensões para 150 mm × 150 mm. Utilização de resina natural de pinheiro e óleo de linhaça.	Melhorar a estabilidade estrutural e atingir a espessura nominal de 80 mm.	Maior retenção da forma e melhoria da coesão estrutural.
4ª abordagem	Utilização de 30 g de resina natural de pinheiro e 5 ml de óleo de linhaça por camada. Aumento da força de compressão para 30 kN.	Avaliar a influência da dosagem do ligante e da compactação.	Exsudação da resina, cura incompleta e baixa adesão entre as camadas centrais.
5ª abordagem	Eliminação do óleo de linhaça, ajuste da dosagem da resina e monitoramento térmico com termopar.	Definir as condições finais de fabricação do compósito.	Eliminação da exsudação, melhoria da consolidação e definição dos parâmetros finais de processamento.

A primeira abordagem de fabricação consistiu na produção de amostras preliminares por meio da aplicação manual de uma mistura de resina natural de pinheiro e óleo de linhaça sobre mantas de lã de ovelha. Nessa etapa exploratória, o sistema ligante foi preparado previamente e distribuído sobre as fibras, sem controle individual da quantidade depositada em cada amostra, uma vez que o objetivo consistia em avaliar a interação inicial entre os materiais e a viabilidade do processo de fabricação.

Os painéis dessa etapa foram moldados com dimensões de 200 mm × 200 mm e deixados para curar à temperatura ambiente. A Figura 11 apresenta o procedimento de aplicação do sistema ligante sobre as mantas de lã durante essa primeira etapa experimental.

Após a cura, observou-se que as amostras apresentaram baixa rigidez e elevada maleabilidade, sem capacidade de manter estabilidade quando posicionadas verticalmente. Esse comportamento indicou que a metodologia adotada não era suficiente para proporcionar a consolidação estrutural desejada.

A Figura 12 apresenta o aspecto visual das amostras obtidas após a primeira etapa de fabricação.



Figura 11: Manta de lã sendo impregnada com resina natural de pinheiro diluída com óleo de linhaça usando pincel.



Figura 12: Amostra preliminar da primeira etapa após a cura, evidenciando baixa rigidez e elevada maleabilidade

Apesar das limitações observadas, essa etapa foi importante para compreender o comportamento inicial da combinação entre a lã de ovelha e o sistema ligante, fornecendo informações que serviram de base para os ajustes realizados nas etapas subsequentes.

Com base nos resultados obtidos na primeira abordagem, a etapa seguinte introduziu o uso da prensa de placas aquecidas MonTech Laboratory Press LP 3000. Esse equipamento permite a moldagem de materiais sob condições controladas de temperatura, força e tempo, promovendo simultaneamente compactação mecânica e aquecimento do Sistema.

A Figura 13 apresenta a prensa laboratorial utilizada durante o desenvolvimento das amostras.



Figura 13: Prensa laboratorial MonTech Laboratory Press LP 3000 utilizada no processamento das amostras.

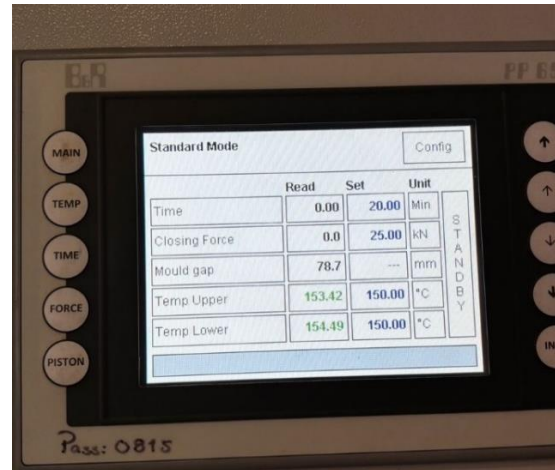
Nesse procedimento, a estrutura foi montada por meio da sobreposição de cinco camadas de lã intercaladas com quatro camadas de resina natural de pinheiro granulada. O conjunto foi submetido à prensagem térmica a uma temperatura de 150 °C, força de compressão de 25 kN e tempo de ciclo de 20 minutos.

A introdução da prensa permitiu maior controle das condições de compactação e da união entre as camadas, resultando em painéis com maior rigidez em comparação com aqueles produzidos exclusivamente por aplicação manual do ligante. Apesar dessa melhoria, o comportamento mecânico observado ainda indicava a necessidade de ajustes adicionais na distribuição dos materiais e nos parâmetros de fabricação.

A Figura 14 apresenta a montagem da amostra na prensa térmica e o monitoramento dos parâmetros operacionais durante o processo de fabricação.



a) amostra posicionada na prensa térmica



b) monitoramento da prensa

Figura 14: Amostra preliminar posicionada na prensa, exibindo a sobreposição de camadas e a interface de monitoramento de parâmetros.

Os resultados obtidos nessa etapa demonstraram a importância da prensagem térmica para a consolidação do compósito, servindo de base para o desenvolvimento das etapas subsequentes

A terceira abordagem teve como objetivo otimizar o preenchimento da amostra e melhorar a estabilidade estrutural do painel. Com base nos resultados obtidos anteriormente, optou-se pela redução das dimensões das amostras para 150 mm × 150 mm, permitindo diminuir o consumo de materiais durante os ensaios preliminares e facilitar o controle do processo de fabricação.

A lã foi cortada em dimensões padronizadas e organizada em uma estrutura multicamadas compostas por mantas fibrosas e camadas sucessivas de ligante. Nessa etapa, foram utilizados 40 g de resina natural de pinheiro e 8,2 ml de óleo de linhaça por camada aglutinante.

O processo de prensagem manteve-se configurado a 150 °C e 25 kN durante 20 minutos. Ao final do ciclo, obteve-se uma amostra com espessura próxima de 80 mm e maior retenção da forma quando comparada às etapas anteriores, indicando avanços na consolidação estrutural do compósito.

A Figura 15 apresenta o aspecto visual da amostra antes e após a prensagem térmica.



a) Antes da prensagem



b) Depois da prensagem

Figura 15: Amostra preliminar obtida na terceira etapa experimental, exibindo evolução na retenção da forma e compacidade estrutural.

Os resultados obtidos nessa etapa indicaram que a metodologia adotada se aproximava das condições necessárias para a obtenção da espessura pretendida, servindo como base para os ajustes realizados na etapa seguinte, particularmente em relação à dosagem do ligante e à força de compressão aplicada

A quarta abordagem teve como objetivo avaliar a influência da dosagem do ligante e da força de compressão sobre a consolidação do compósito. Para isso, utilizou-se uma dosagem de 30 g de resina natural de pinheiro e 5 ml de óleo de linhaça por camada aglutinante. Os parâmetros da prensa térmica foram mantidos em 150 °C durante 20 minutos, aumentando-se a força de compressão para 30 kN.

As Figuras 16 e 17 apresentam, respectivamente, a pesagem da resina natural de pinheiro utilizada na composição e a distribuição do ligante sobre as mantas de lã antes da prensagem.



Figura 16: Pesagem da resina natural de pinheiro na forma sólida utilizada na composição



Figura 17: Distribuição da resina granulada sobre a manta de lã antes da prensagem.

Após a abertura do molde, observou-se exsudação da resina para as bordas e para a face oposta do painel. Esse comportamento indicou que a quantidade de ligante utilizada excedia a capacidade de retenção da estrutura fibrosa para aquela configuração de amostra.

Além disso, mesmo após o resfriamento, o material apresentou superfície parcialmente pegajosa ao toque, sugerindo que a cura da resina não havia ocorrido de forma completa. Os resultados indicaram que a incorporação do óleo de linhaça dificultava a solidificação da matriz, comprometendo a consolidação do compósito.

Outro aspecto observado nessa etapa foi a baixa adesão entre as camadas localizadas na região central da amostra. Durante o manuseio, verificou-se a separação parcial das camadas internas, indicando que o calor aplicado pelas placas aquecidas da prensa não atingia adequadamente o núcleo do painel durante o tempo de processamento adotado.

Essa observação motivou a etapa seguinte do estudo, direcionada à redução da quantidade de ligante, à eliminação do óleo de linhaça e à investigação do comportamento térmico interno do compósito durante a prensagem.

A quinta abordagem representou a etapa final de desenvolvimento do protocolo de fabricação. Com base nos resultados obtidos anteriormente, foram

realizadas duas modificações principais: a redução da dosagem da resina natural de pinheiro e a eliminação do óleo de linhaça.

As Figuras 17 e 18 apresentam a dosagem ajustada da resina e a montagem das camadas de lã utilizadas nessa etapa.



Figura 18: Dosagem de resina natural de pinheiro ajustada para evitar o transbordamento superficial



Figura 19: Montagem das camadas de lã, evidenciando a distribuição uniforme do aglutinante e a ausência de aditivos líquidos.

A nova formulação eliminou os problemas de exsudação observados anteriormente e resultou em amostras com superfície seca e maior estabilidade estrutural após a prensagem. Os resultados indicaram que a remoção do óleo de linhaça favoreceu a consolidação da matriz ligante e a adesão entre as camadas do compósito.

Com base nos resultados obtidos durante as etapas preliminares, foi definida a matriz experimental definitiva utilizada nos ensaios de caracterização térmica. Todas as amostras foram produzidas com dimensões de 150 mm × 150 mm, espessura nominal de 80 mm e estrutura interna composta por 11 camadas de lã de ovelha intercaladas por 10 camadas de matriz aglutinante.

A Tabela 3 apresenta as formulações selecionadas para os ensaios oficiais de condutividade térmica.

Tabela 4: Matriz experimental definitiva para os ensaios de condutividade térmica.

Identificação da Amostra	Descrição do Ligante	Dosagem de Resina Natural de Pinheiro (por camada)	Incorporação de Óleo de Linhaça (por camada)	Número de Camadas de Lã	Espessura Nominal
Amostra 1	Resina pura (baixa dosagem)	20,0 g	Não	11	80 mm
Amostra 2	Resina+Óleo (baixa dosagem)	20,0 g	5,0 ml	11	80 mm
Amostra 3	Resina pura (alta dosagem)	30,0 g	Não	11	80 mm
Amostra 4	Resina+Óleo (alta dosagem)	30,0 g	5,0 ml	11	80 mm
Amostra 5	Sem ligante (Amostra de Controle)	0,0 g	Não	11	80 mm

Embora os ensaios preliminares tenham indicado que a incorporação do óleo de linhaça dificultava a cura completa da matriz ligante, formulações contendo esse componente foram mantidas na matriz experimental definitiva. Essa decisão esteve associada à proposta de desenvolvimento do material conduzida em parceria com o idealizador do sistema compósito, que previa a utilização do óleo de linhaça como constituinte da formulação. Dessa forma, optou-se por incluir amostras com e sem óleo de linhaça, permitindo avaliar experimentalmente a influência desse componente no desempenho térmico dos painéis.

Para investigar a causa da baixa adesão observada na região central das amostras produzidas durante as etapas preliminares, a fase final de desenvolvimento foi instrumentada com um termopar do tipo K posicionado no centro geométrico do painel, entre as camadas centrais de lã..

A Figura 18 apresenta o posicionamento do termopar utilizado para o monitoramento da temperatura interna durante o processo de prensagem.



a) Posicionamento do termopar entre as camadas centrais.



b) Detalhe da instrumentação da amostra.

Figura 20: Inserção do termopar no centro das camadas para medição da inércia térmica.

Sob as condições operacionais de 150 °C e força de compressão de 30 kN, o monitoramento térmico em tempo real permitiu avaliar a evolução da temperatura no núcleo do painel durante o processo de prensagem. Após 20 minutos de exposição às placas aquecidas, a temperatura registrada no centro da amostra atingiu aproximadamente 61 °C.

Esse comportamento está associado à baixa condutividade térmica da lã de ovelha, que restringe a propagação do calor em direção ao núcleo do compósito. A Figura 21 apresenta o monitoramento da temperatura interna da amostra durante o ciclo inicial de prensagem.

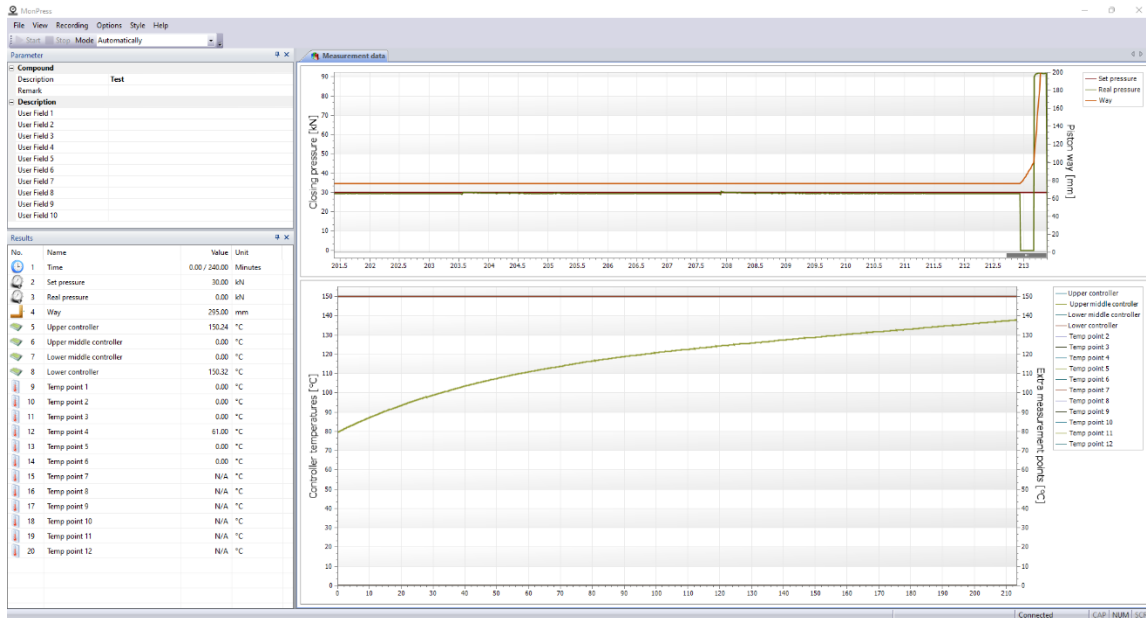


Figura 21: Gráfico de monitoramento via software evidenciando a estabilização da temperatura interna do núcleo em 61 °C após o ciclo inicial de 20 minutos).

Embora essa elevada resistência à condução de calor seja uma característica desejável para a aplicação do material como isolante térmico em edificações, ela também influenciou diretamente o processo de fabricação dos painéis. A baixa propagação de calor através da espessura da amostra dificultou o aquecimento uniforme do compósito durante a prensagem.

A temperatura de aproximadamente 61 °C registrada no núcleo mostrou-se insuficiente para promover a fusão e a consolidação adequadas da resina natural de pinheiro nas regiões centrais do painel. Esse resultado contribui para explicar a baixa adesão observada entre as camadas internas durante os ensaios preliminares, evidenciando a necessidade de ampliar o tempo de exposição térmica para garantir o aquecimento efetivo de todo o compósito.

Os resultados obtidos corroboraram as observações realizadas durante os ensaios preliminares, nos quais foram verificadas falhas de adesão entre as camadas centrais do compósito. Dessa forma, optou-se por realizar um ensaio complementar com tempo prolongado de permanência na prensa, visando avaliar a evolução da temperatura interna e determinar o período necessário para o aquecimento efetivo do núcleo da amostra.

Em função da elevada resistência térmica observada, o tempo de prensagem foi ampliado para 240 minutos (4 horas), mantendo-se a temperatura das placas em 150 °C e a força de compressão em 30 kN. O objetivo foi monitorar a cinética de aquecimento do núcleo e verificar a aproximação do sistema às condições de equilíbrio térmico.

A análise dos dados obtidos mostrou que a temperatura interna aumentou gradualmente ao longo do ensaio, atingindo um valor máximo de 137,7 °C. Mesmo sob compressão constante, a temperatura do núcleo permaneceu inferior à temperatura nominal das placas aquecidas.

A Figura 22 apresenta a evolução da temperatura interna do painel durante o ensaio prolongado, bem como a estabilidade da força de compressão aplicada.

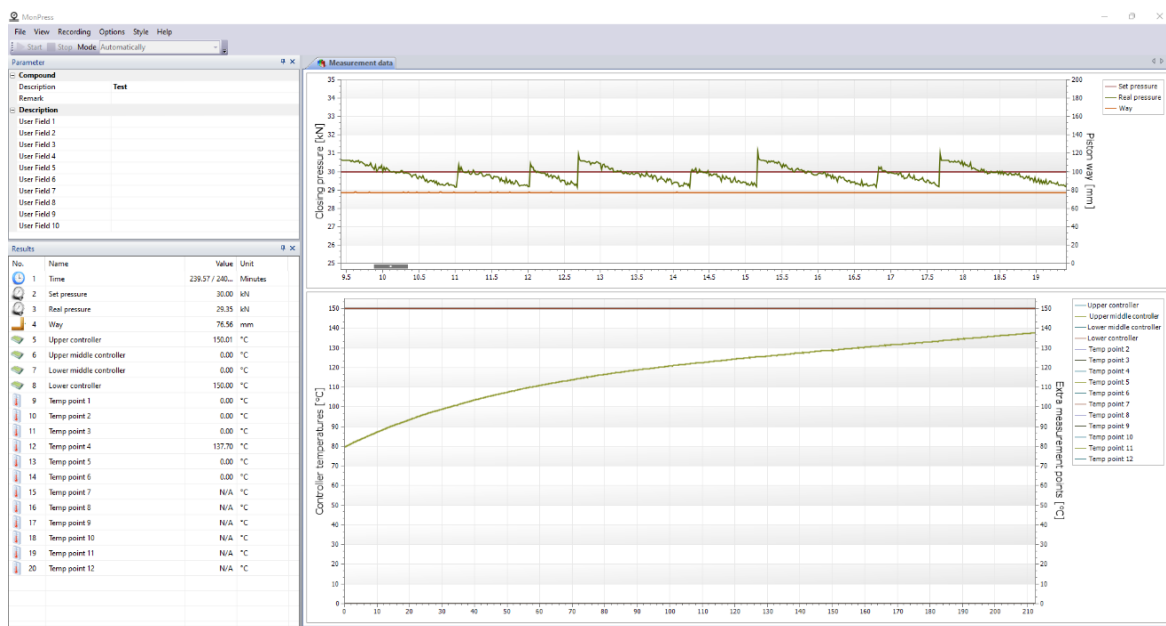


Figura 22: Interface de monitoramento da prensa MonTech, evidenciando a estabilidade da força de compressão (30 kN) e a curva de temperatura do núcleo atingindo o equilíbrio em 137,7 °C

A diferença observada entre a temperatura das placas aquecidas e a temperatura registrada no núcleo indica a existência de um gradiente térmico persistente ao longo da espessura do material, resultado associado à estrutura porosa e à capacidade de isolamento térmico da lã de ovelha.

Do ponto de vista da fabricação, a interrupção do monitoramento foi definida com base na estabilização da taxa de variação da temperatura interna. Nessas condições, verificou-se que a temperatura alcançada no núcleo era suficiente para

promover a fusão da resina natural de pinheiro e melhorar a adesão entre as camadas do compósito.

Com base nesses resultados, foram estabelecidas as condições operacionais adotadas para a produção das amostras destinadas aos ensaios de caracterização térmica: temperatura de 150 °C, força de compressão de 30 kN e tempo de prensagem prolongado. Essas condições foram aplicadas às formulações apresentadas na Tabela 3 e utilizadas na etapa subsequente de determinação da condutividade térmica.

3.3 Ensaios de Condutividade Térmica e Procedimentos Analíticos

A determinação da condutividade térmica dos painéis compósitos constituiu a etapa final desta investigação, uma vez que o desempenho térmico representa o principal parâmetro funcional para avaliar a viabilidade do material como isolante na construção civil.

Para essa caracterização, foi adotado o método da Placa Quente Protegida (*Guarded Hot Plate – GHP*), amplamente utilizado para a determinação da condutividade térmica de materiais em regime estacionário. Os ensaios foram conduzidos em conformidade com as normas ASTM C177, ISO 8302, DIN EN 1946-2 e DIN EN 12667, assegurando a comparabilidade dos resultados obtidos com aqueles reportados na literatura e com materiais isolantes comercialmente consolidados.

As subseções seguintes apresentam o equipamento utilizado, os parâmetros experimentais adotados e os procedimentos empregados para a determinação da condutividade térmica das amostras desenvolvidas.

3.3.1 Equipamento e Princípio do Método

Os ensaios foram realizados utilizando o equipamento λ -Meter EP500e, apresentado na Figura 23. O sistema opera por meio de placas aquecidas e placas frias controladas eletronicamente, estabelecendo um fluxo térmico unidimensional através da amostra. O equipamento possui ainda uma zona de guarda térmica

(*guarded zone*), responsável por minimizar as perdas laterais de calor e assegurar a precisão das medições, conforme estabelecido na norma ASTM C177.

A Figura 23 apresenta o equipamento utilizado para a determinação da condutividade térmica dos painéis compósitos.



Figura 23 : Equipamento λ -Meter EP500e

Para a realização dos ensaios, foram confeccionadas cinco amostras correspondentes à matriz experimental definitiva apresentada na Tabela 3. Todas as amostras foram produzidas utilizando o protocolo de fabricação definido na etapa de desenvolvimento, com prensagem a 150 °C, força de compressão de 30 kN e tempo de processamento de 240 minutos.

As amostras apresentaram dimensões padronizadas de 150 mm × 150 mm e espessura nominal de 80 mm, atendendo às especificações do equipamento. Antes dos ensaios, foram verificadas a integridade estrutural, a uniformidade geométrica e o paralelismo entre as faces dos corpos de prova, com o objetivo de assegurar adequado contato térmico com as placas do equipamento.

A Figura 24 apresenta a interface de configuração utilizada durante os ensaios.

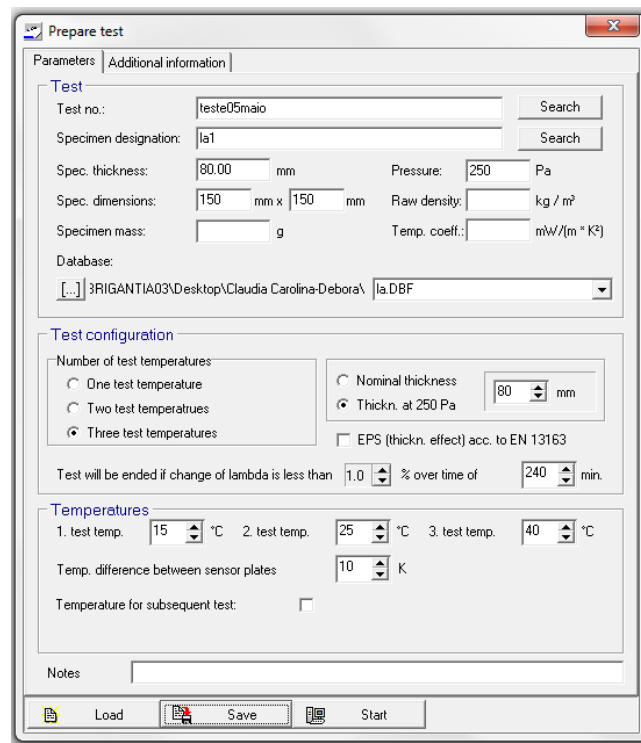


Figura 24: Interface de configuração do ensaio no software do equipamento

Os ensaios foram realizados para temperaturas médias de medição de 15 °C, 25 °C e 40 °C, mantendo-se um diferencial de temperatura constante de 10 K entre a placa quente e a placa fria.

Durante os ensaios, o equipamento monitorou continuamente a potência elétrica fornecida, as temperaturas das placas, a espessura efetiva da amostra sob compressão e a estabilidade do fluxo térmico. Como critério de validação, foi adotada uma variação inferior a 1,0% na condutividade térmica medida, garantindo que o sistema tivesse atingido o regime estacionário antes do registro dos resultados.

A determinação da condutividade térmica baseou-se na Lei de Fourier para condução térmica unidimensional em regime estacionário (Incropera et al., 2007; ASTM C177, 2022), expressa pela Equação (5):

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad (5)$$

Onde:

- λ = condutividade térmica do material (W/(m·K));
- Q = taxa de transferência de calor (W);
- d = espessura da amostra (m);
- A = área útil de medição (m²);
- ΔT = diferença de temperatura entre as faces do material (K).

O fluxo térmico necessário para manter o gradiente de temperatura é obtido a partir da potência elétrica dissipada no sistema de aquecimento, conforme a Equação (6) (Halliday; Resnick; Walker, 2016):

$$Q = U \cdot I \quad (6)$$

Onde:

- U = tensão elétrica aplicada (V);
- I = corrente elétrica (A).

A correlação entre essas equações, realizada automaticamente pelo software do equipamento, permite determinar a condutividade térmica dos materiais ensaiados. Valores reduzidos de λ indicam menor transferência de calor por condução e, conseqüentemente, melhor desempenho como material isolante.

3.4 Avaliação da Condutividade Térmica

Os ensaios de condutividade térmica foram realizados nas cinco amostras que compõem a matriz experimental definitiva, utilizando os parâmetros previamente definidos para o método da Placa Quente Protegida. O objetivo desta etapa consistiu na determinação experimental da condutividade térmica dos painéis compósitos desenvolvidos e na avaliação da influência da composição do ligante sobre o desempenho térmico do material.

O equipamento foi operado no modo de espessura fixa (*Fixed Thickness*), ajustando o fechamento das placas para a espessura nominal de 80 mm das

amostras. Essa configuração permitiu minimizar variações dimensionais durante o ensaio e garantir condições uniformes de medição.

As determinações foram realizadas para temperaturas médias de 15 °C, 25 °C e 40 °C, mantendo-se um diferencial térmico constante de 10 K entre as placas quente e fria. Como critério de aceitação dos resultados, adotou-se a estabilização da condutividade térmica medida com variação inferior a 1%, condição necessária para a caracterização do regime estacionário (ASTM C177, 2022; ISO 8302, 1991).

Durante os ensaios, foi utilizado o sistema de proteção térmica periférica (*Guard Ring*) do próprio equipamento, cuja função consiste em minimizar as perdas laterais de calor e favorecer o desenvolvimento de um fluxo térmico predominantemente unidimensional através da amostra (ASTM C177, 2022).

Após o posicionamento dos corpos de prova entre as placas de medição, o software realizou o monitoramento contínuo da temperatura, da potência elétrica dissipada e da evolução da condutividade térmica ao longo do tempo. Em função da baixa difusividade térmica característica dos materiais fibrosos, os tempos necessários para estabilização do regime estacionário foram relativamente elevados, ultrapassando frequentemente 400 minutos por amostra.

Os valores finais de condutividade térmica obtidos para cada condição experimental são apresentados e discutidos na seção seguinte.

4 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento e a caracterização térmica dos painéis compósitos produzidos à base de lã de ovelha e resina natural de pinheiro. A análise contempla os resultados obtidos nos ensaios de condutividade térmica, bem como as observações realizadas durante o processo de fabricação e consolidação das amostras.

As formulações foram avaliadas considerando a influência da composição da matriz ligante, da presença de óleo de linhaça, da densidade aparente e da estabilidade física dos painéis, buscando identificar a configuração mais adequada em termos de desempenho térmico e viabilidade estrutural.

Os resultados também foram comparados com valores reportados na literatura para materiais isolantes convencionais e para outros bioisolantes, permitindo contextualizar o desempenho do compósito desenvolvido e avaliar o seu potencial de aplicação na construção civil.

4.1 Caracterização Física e Densidade Aparente

A densidade aparente constitui um dos principais parâmetros físicos para a avaliação de materiais isolantes fibrosos, uma vez que influencia diretamente a quantidade de ar aprisionado no interior da estrutura e, conseqüentemente, o comportamento térmico do compósito.

Após a fabricação e estabilização das amostras, foram realizadas medições de massa e volume dos corpos de prova utilizados nos ensaios térmicos. A partir desses valores, determinou-se a densidade aparente de cada formulação desenvolvida.

Os valores de massa final e densidade aparente obtidos para as diferentes formulações são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Massa e densidade aparente das formulações do compósito.

Identificação da Amostra	Descrição do Ligante	Massa Final (g)	Densidade Aparente (p) [kg/ m³]
--------------------------	----------------------	-----------------	---------------------------------

Amostra 1 (A1)	Resina pura (20,0 g)	287,2	159,5
Amostra 2 (A2)	Resina + Óleo (20,0 g + 5,0 ml)	293,2	162,9
Amostra 3 (A3)	Resina pura (30,0 g)	294,3	163,6
Amostra 4 (A4)	Resina + Óleo (30,0 g + 5,0 ml)	325,9	181,1
Amostra 5 (A5)	Sem ligante (Controle)	41,1	22,8

Observa-se que as formulações contendo matriz ligante apresentaram densidades aparentes compreendidas entre 159,5 e 181,1 kg/m³, enquanto a amostra de controle (A5), constituída exclusivamente por lã de ovelha, apresentou densidade significativamente inferior (22,8 kg/m³). Esse comportamento evidencia a influência da incorporação da resina natural de pinheiro na compactação e consolidação da estrutura do compósito.

A Figura 25 apresenta o aspecto visual das amostras após a prensagem e cura.

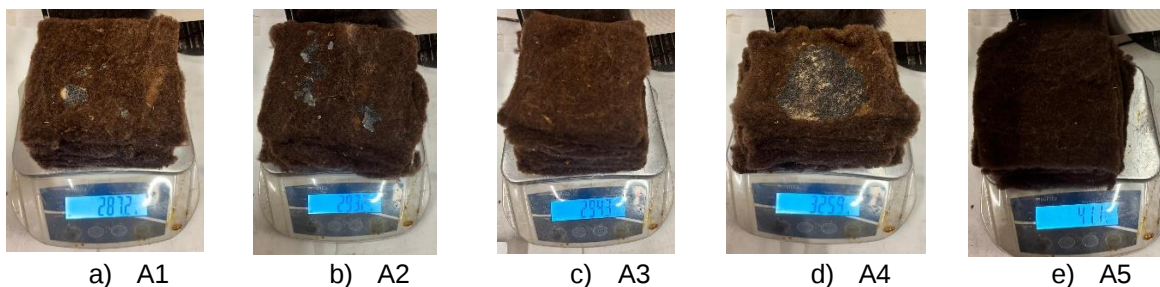


Figura 25: Aspecto visual das amostras desenvolvidas após a prensagem e cura.

A Amostra 5 (A5), produzida sem a adição de ligante, apresentou a menor densidade aparente entre todas as formulações avaliadas. Esse resultado está associado à elevada quantidade de vazios internos e à ausência de uma matriz responsável pela união das fibras.

Embora a elevada porosidade seja uma característica favorável para materiais isolantes, observou-se que a ausência de ligante comprometeu a

estabilidade dimensional e a integridade física da amostra, dificultando o seu manuseio e a manutenção da geometria após a fabricação.

Com a incorporação da resina natural de pinheiro, verificou-se aumento da densidade aparente dos painéis, resultado associado tanto ao preenchimento parcial dos vazios internos quanto à compactação promovida durante a prensagem térmica.

As formulações contendo maior quantidade de resina apresentaram maior coesão estrutural quando comparadas às formulações de menor dosagem. Durante o manuseio experimental, observou-se que as amostras com menor teor de resina apresentavam regiões menos compactadas e maior desprendimento superficial de fibras.

A incorporação de óleo de linhaça também promoveu alterações perceptíveis no comportamento físico das amostras. Durante a fase de desenvolvimento experimental já haviam sido observados indícios de que a presença desse componente poderia dificultar a cura da matriz ligante. Os resultados obtidos nas amostras finais corroboraram essa observação

Nas formulações contendo óleo, verificou-se a ocorrência de superfícies mais aderentes ao toque, menor rigidez e maior dificuldade de estabilização dimensional quando comparadas às formulações produzidas apenas com resina natural de pinheiro. Esses resultados sugerem que a presença do óleo influenciou o processo de cura e consolidação da matriz ligante, comportamento já observado durante as etapas preliminares de desenvolvimento.

4.2 Condutividade Térmica em Regime Estacionário

A condutividade térmica (λ) constitui a principal propriedade utilizada para avaliar o potencial de aplicação de um material como isolante térmico. Os resultados obtidos para as diferentes formulações desenvolvidas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados experimentais de condutividade térmica das amostras desenvolvidas.

Identificação da Amostra	Descrição do Ligante	λ a 15 °C [W/(m·K)]	λ a 25 °C [W/(m·K)]	λ a 40 °C [W/(m·K)]
--------------------------	----------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

Amostra 1	Resina pura (20,0 g)	0,0534	0,0590	0,0634
Amostra 2	Resina + Óleo (20,0 g + 5,0 ml)	0,0406	0,0455	0,0487
Amostra 3	Resina pura (30,0 g)	0,0458	0,0511	0,0559
Amostra 4	Resina + Óleo (30,0 g + 5,0 ml)	0,0453	0,0567	0,0574
Amostra 5	Sem ligante (Controle)	0,0376	0,0495	0,0549

Os resultados apresentados na Tabela 5 demonstram que os valores de condutividade térmica variaram entre 0,0376 e 0,0634 W/(m·K), dependendo da composição da amostra e da temperatura de ensaio. Em todas as formulações observou-se aumento da condutividade térmica com a elevação da temperatura média de medição, comportamento frequentemente reportado para materiais fibrosos e porosos (Papadopoulos, 2005; Asdrubali et al., 2015).

A Figura 26 apresenta a evolução da condutividade térmica em função da temperatura média de ensaio para todas as formulações avaliadas.

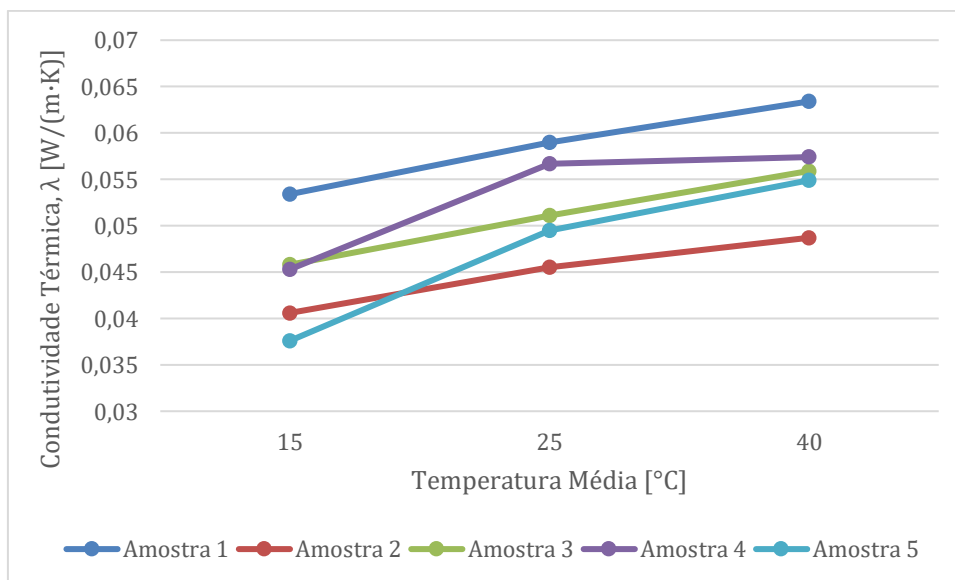


Figura 26: Evolução da condutividade térmica em função da temperatura média de ensaio.

A amostra de referência (REF), constituída exclusivamente por lã de ovelha, apresentou o menor valor de condutividade térmica a 15 °C, registrando 0,0376 W/(m·K). Esse resultado pode ser atribuído à elevada porosidade da estrutura fibrosa e à grande quantidade de ar aprisionado no interior do material.

Entretanto, conforme discutido anteriormente, a ausência de uma matriz ligante comprometeu a estabilidade dimensional e a integridade física da amostra, limitando a sua aplicação prática como painel isolante.

A incorporação da resina natural de pinheiro promoveu aumento da densidade aparente e, conseqüentemente, ligeiro aumento da condutividade térmica. Por outro lado, proporcionou melhorias na coesão estrutural e na estabilidade física dos painéis, características necessárias para a utilização do material em aplicações construtivas.

A Figura 27 apresenta a comparação dos valores de condutividade térmica obtidos a 15 °C para todas as formulações desenvolvidas.

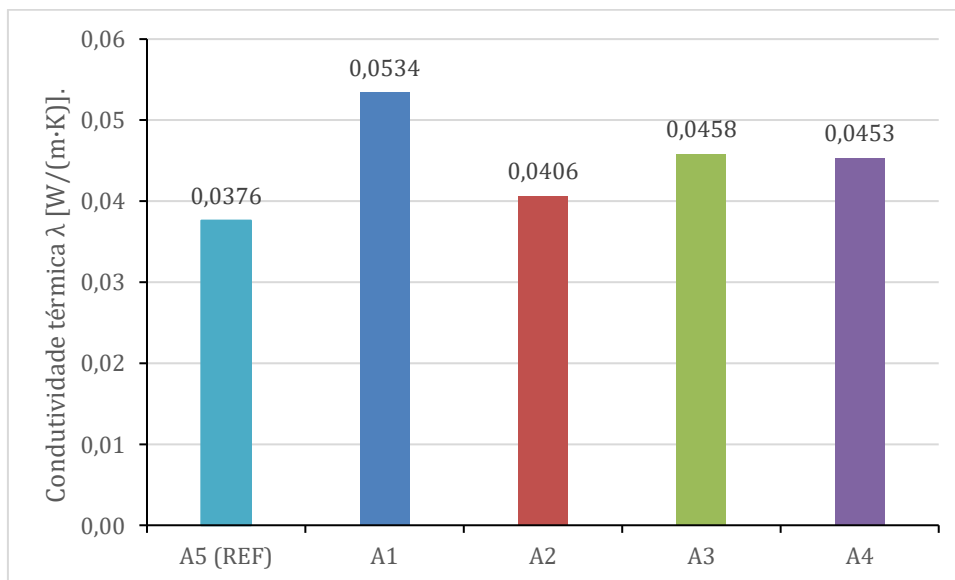


Figura 27: Influência da dosagem de resina natural na condutividade térmica a 15 °C

Entre as formulações contendo matriz ligante, a Amostra 2 apresentou o menor valor de condutividade térmica a 15 °C (0,0406 W/(m·K)), seguida pelas Amostras 4 e 3, cujos valores foram de 0,0453 e 0,0458 W/(m·K), respectivamente. A

Amostra 1 apresentou o maior valor de condutividade térmica entre os compósitos avaliados, registrando 0,0534 W/(m·K)

A presença do óleo de linhaça influenciou o comportamento térmico das formulações. Nas condições avaliadas, as amostras contendo óleo apresentaram valores de condutividade térmica inferiores aos observados nas formulações equivalentes produzidas apenas com resina natural de pinheiro.

Contudo, conforme observado durante a fase de desenvolvimento experimental, as formulações contendo óleo apresentaram dificuldades de cura e menor estabilidade física após a prensagem. Dessa forma, embora tenham apresentado resultados térmicos favoráveis, esses sistemas revelaram limitações relacionadas à consolidação da matriz ligante.

A amostra de referência (REF) apresentou o menor valor absoluto de condutividade térmica. No entanto, a ausência de ligante comprometeu a estabilidade dimensional e a integridade estrutural do material, tornando sua aplicação prática mais limitada quando comparada aos painéis consolidados.

Considerando conjuntamente os resultados de condutividade térmica, a estabilidade dimensional observada durante o manuseio e a integridade estrutural dos painéis produzidos, a Amostra 3 destacou-se como a formulação que apresentou o comportamento mais equilibrado para a aplicação proposta nesta investigação. Embora não tenha apresentado o menor valor absoluto de condutividade térmica, essa formulação combinou desempenho térmico satisfatório com adequada consolidação da matriz ligante e ausência dos problemas de cura observados nas formulações contendo óleo de linhaça.

4.3 Validação Analítica Através de Modelos Preditivos de Mistura

A porosidade volumétrica constitui um parâmetro relevante para a compreensão do comportamento térmico de materiais isolantes fibrosos, uma vez que está diretamente relacionada à quantidade de ar aprisionado no interior da estrutura. Em materiais porosos, a presença de vazios preenchidos por ar contribui para a redução da transferência de calor por condução, influenciando diretamente a condutividade térmica do compósito (Papadopoulos, 2005; Asdrubali et al., 2015).

Com o objetivo de avaliar a influência da incorporação da resina natural de pinheiro na estrutura interna dos painéis desenvolvidos, foi estimada a porosidade

volumétrica das formulações produzidas. O cálculo foi realizado a partir da relação entre a densidade aparente experimental do compósito e a densidade da fase sólida, conforme descrito por Gibson e Ashby (1997), sendo expresso pela Equação (7).

$$\varepsilon = 1 - \frac{p_{comp}}{p_{sólido}} \quad (7)$$

Onde:

ε = porosidade volumétrica;

p_{comp} = densidade aparente do compósito (kg/m³);

$p_{sólido}$ = densidade da fase sólida (kg/m³).

Tabela 4: Porosidade volumétrica estimada das formulações desenvolvidas

Identificação da Amostra	Densidade Aparente (p) [kg/m ³]	Porosidade Volumétrica (ε) [%]
A1	159,5	87,73
A2	162,9	87,47
A3	163,6	87,42
A4	181,1	86,07
A5 (REF)	22,8	98,25

Os resultados apresentados na Tabela 6 demonstram que todas as formulações desenvolveram estruturas altamente porosas, com valores compreendidos entre 86,07% e 98,25%. Esses resultados indicam que a maior parte do volume dos painéis permaneceu ocupada por vazios preenchidos por ar, mesmo após a incorporação da matriz ligante.

A amostra de referência (REF), constituída exclusivamente por lã de ovelha, apresentou a maior porosidade volumétrica (98,25%). Esse comportamento

é compatível com sua reduzida densidade aparente e com os baixos valores de condutividade térmica observados anteriormente, uma vez que a elevada quantidade de ar aprisionado reduz os mecanismos de transferência de calor por condução (Papadopoulos, 2005).

Nas formulações contendo resina natural de pinheiro observou-se uma redução da porosidade em comparação com a amostra de referência. Esse comportamento pode ser atribuído ao preenchimento parcial dos vazios internos pela matriz ligante e ao aumento da compactação promovido durante a prensagem térmica.

Apesar dessa redução, os valores de porosidade permaneceram elevados em todas as formulações avaliadas, indicando que a incorporação da resina não eliminou a estrutura porosa característica da lã de ovelha. Esse resultado ajuda a explicar a manutenção de valores relativamente baixos de condutividade térmica mesmo nas amostras que apresentaram maiores densidades aparentes.

Observa-se ainda que a Amostra 4 apresentou a menor porosidade volumétrica (86,07%), resultado coerente com sua maior densidade aparente (181,1 kg/m³). Em contrapartida, as Amostras 1, 2 e 3 apresentaram valores de porosidade bastante próximos, variando entre 87,42% e 87,73%, evidenciando que as diferentes formulações mantiveram uma estrutura interna predominantemente porosa.

De modo geral, os resultados obtidos corroboram o comportamento descrito na literatura para materiais isolantes fibrosos, nos quais a combinação entre elevada porosidade e ar aprisionado na estrutura interna constitui um dos principais mecanismos responsáveis pelo desempenho térmico do material (Asdrubali et al., 2015; Schiavoni et al., 2016; Papadopoulos, 2005).

4.4 Sensibilidade Térmica e Comportamento Transiente

A estabilidade térmica das formulações foi avaliada a partir da variação da condutividade térmica entre as temperaturas médias de ensaio de 15 °C e 40 °C. Para esta análise, foram calculadas a variação absoluta da condutividade térmica e a variação percentual relativa de cada amostra, permitindo avaliar a sensibilidade térmica dos compósitos perante o aumento da temperatura.

Embora os ensaios tenham sido realizados em três temperaturas médias de medição (15 °C, 25 °C e 40 °C), a análise de sensibilidade térmica foi conduzida utilizando os valores obtidos nos extremos da faixa experimental. Essa abordagem permite quantificar a variação máxima da condutividade térmica observada para cada formulação ao longo do intervalo de temperaturas investigado. Os resultados obtidos a 25 °C apresentaram comportamento intermediário para todas as amostras, confirmando a tendência de aumento gradual da condutividade térmica com a elevação da temperatura observada anteriormente na Tabela 5.

A variação absoluta da condutividade térmica foi determinada pela diferença entre os valores obtidos a 40 °C e 15 °C, conforme a Equação (8):

$$\Delta\lambda = \lambda_{40} - \lambda_{15} \quad (8)$$

O incremento relativo foi calculado pela relação percentual entre a variação observada e o valor inicial da condutividade térmica, conforme a Equação (9):

$$\text{Incremento Relativo (\%)} = ((\lambda_{40} - \lambda_{15}) / \lambda_{15}) \times 100 \quad (9)$$

Os resultados obtidos para as diferentes formulações são apresentados na Tabela 7.

Tabela 5: Sensibilidade térmica das formulações desenvolvidas

Identificação da Amostra	λ a 15 °C [W/(m·K)]	λ a 40 °C [W/(m·K)]	Variação Absoluta ($\Delta\lambda/\Delta T$)	Incremento Relativo [%]
Amostra 1	0,0534	0,0634	0,0100	18,73
Amostra 2	0,0406	0,0487	0,0081	19,95
Amostra 3	0,0458	0,0559	0,0101	22,05
Amostra 4	0,0453	0,0574	0,0121	26,71
Amostra 5	0,0376	0,0549	0,0173	46,01

Os resultados apresentados na Tabela 7 demonstram que todas as formulações apresentaram aumento da condutividade térmica com a elevação da temperatura. Esse comportamento é característico de materiais porosos contendo ar aprisionado, uma vez que o aumento da temperatura intensifica os mecanismos de transferência de calor no interior da estrutura fibrosa (Papadopoulos, 2005; Asdrubali et al., 2015).

A amostra de referência (REF), constituída exclusivamente por lã de ovelha sem adição de ligante, apresentou a maior sensibilidade térmica entre todas as formulações avaliadas, registrando um incremento relativo de 46,01% entre 15 °C e 40 °C. Esse comportamento pode estar associado à elevada porosidade da estrutura e à ausência de uma matriz ligante responsável pela consolidação interna do material. Tal resultado está em concordância com a elevada porosidade observada anteriormente para esta formulação, que atingiu aproximadamente 98% (Papadopoulos, 2005)

Por outro lado, as formulações contendo resina natural de pinheiro apresentaram menores variações relativas da condutividade térmica quando comparadas à amostra de referência. A presença da matriz ligante promoveu maior coesão estrutural e contribuiu para reduzir a sensibilidade térmica do compósito perante o aumento da temperatura.

Entre as formulações avaliadas, a Amostra 3 apresentou incremento relativo de aproximadamente 22%, mantendo simultaneamente valores reduzidos de condutividade térmica, adequada estabilidade dimensional e boa integridade estrutural. Esse comportamento reforça as observações realizadas durante a fase de desenvolvimento experimental, nas quais essa formulação apresentou o melhor equilíbrio global entre desempenho térmico e estabilidade física.

Entre as formulações avaliadas, a Amostra 3 apresentou incremento relativo de aproximadamente 22%, mantendo simultaneamente valores reduzidos de condutividade térmica, adequada estabilidade dimensional e boa integridade estrutural. Esse comportamento reforça as observações realizadas durante a fase de desenvolvimento experimental, nas quais essa formulação apresentou o melhor equilíbrio global entre desempenho térmico e estabilidade física.

Com o objetivo de ilustrar o comportamento temporal da condutividade térmica durante os ensaios, a Figura 28 apresenta a curva de estabilização obtida para uma das formulações analisadas ao longo do ensaio.

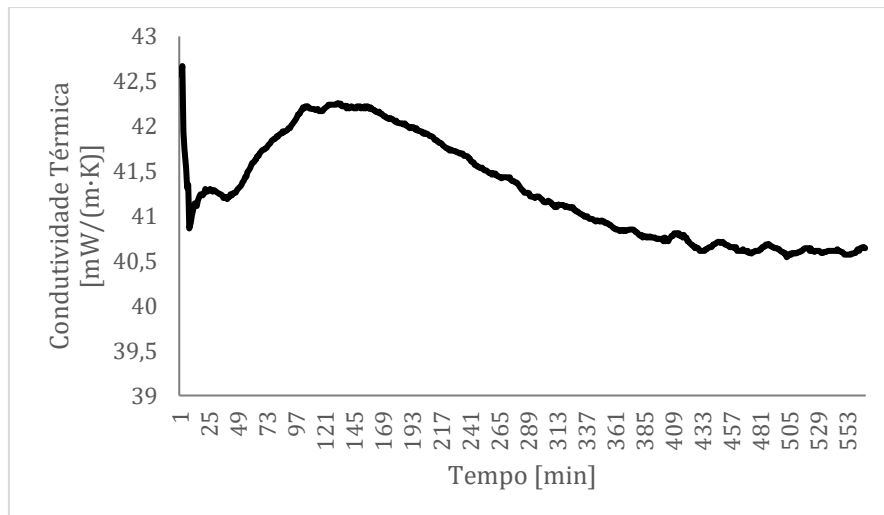


Figura 28: Curva de estabilização da condutividade térmica durante o ensaio.

Observa-se um período transiente inicial prolongado, seguido pela estabilização gradual das leituras até ao estabelecimento do regime estacionário. Em diversos ensaios, o tempo necessário para a convergência dos resultados ultrapassou 500 minutos, evidenciando a reduzida difusividade térmica característica da estrutura fibrosa do compósito.

O longo período necessário para atingir o regime estacionário indica que a propagação do calor através do material ocorre de forma gradual, comportamento frequentemente associado a materiais porosos e fibrosos utilizados para isolamento térmico (Papadopoulos, 2005; Asdrubali et al., 2015).

Do ponto de vista das construções, esse comportamento sugere potencial capacidade de retardamento da transferência de calor através do elemento construtivo. A elevada porosidade da lã de ovelha, combinada com a consolidação promovida pela matriz ligante, contribui para reduzir a velocidade de propagação do fluxo térmico, característica desejável em materiais destinados ao isolamento térmico de edificações (Schiavoni et al., 2016; Asdrubali et al., 2015).

Os resultados obtidos demonstram que, além de apresentar baixos valores de condutividade térmica, o compósito desenvolvido possui comportamento térmico estável perante variações moderadas de temperatura, evidenciando potencial para aplicação como material isolante em sistemas construtivos sustentáveis.

4.5 Comparação com Materiais Isolantes Comerciais

Com o objetivo de contextualizar o desempenho térmico do compósito desenvolvido, os resultados experimentais foram comparados com valores típicos de materiais isolantes comercialmente utilizados na construção civil.

Tabela 6: Comparativo de condutividade térmica entre a Amostra 3 e materiais isolantes comerciais.

Material Isolante	Origem / Natureza	λ típico [W/(m·K)]
Poliuretano Expandido (PUR)	Sintético / Petroquímico	0,022 – 0,028
Poliestireno Expandido (EPS)	Sintético / Petroquímico	0,031 – 0,040
Lã de Rocha	Mineral / Incombustível	0,035 – 0,045
Amostra 3 (Painel de Lã de Ovelha)	Natural / Bio-baseado	0,0458 (a 15 °C)
Cortiça Aglomerada	Natural / Renovável	0,040 – 0,050

Os resultados demonstraram que a formulação otimizada apresentou valores de condutividade térmica compatíveis com materiais naturais utilizados como isolantes térmicos, aproximando-se do desempenho de materiais como cortiça expandida e lã mineral.

Embora materiais sintéticos como poliuretano expandido e poliestireno expandido apresentem valores inferiores de condutividade térmica, o compósito bio-baseado desenvolvido apresenta vantagens relacionadas à utilização de matérias-primas naturais, renováveis e potencialmente biodegradáveis.

Além disso, o reaproveitamento da lã de ovelha como matéria-prima para painéis isolantes contribui para a valorização de resíduos agropecuários e para o desenvolvimento de soluções sustentáveis aplicadas à construção civil.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica preliminar do compósito desenvolvido como alternativa bio-baseada para aplicações de isolamento térmico em edificações.

De forma complementar, a Tabela 7 apresenta uma síntese integrada dos principais resultados obtidos ao longo desta investigação. Foram reunidos os parâmetros físicos, térmicos e as observações verificadas durante o processo de fabricação, permitindo uma avaliação conjunta do desempenho de cada formulação e justificando tecnicamente a seleção da formulação ótima.

Tabela 7: Síntese dos resultados experimentais das formulações desenvolvidas

Amostra	Formulação	Densidade (kg/m ³)	λ 15 °C (W/m·K)	λ 25 °C (W/m·K)	λ 40 °C (W/m·K)	$\Delta\lambda$ (%)	Comportamento observado	Avaliação
A1	20 g resina	159,5	0,0534	0,0590	0,0634	18,73	Boa cura, menor compactação	Aceitável
A2	20 g resina + óleo	162,9	0,0406	0,0455	0,0487	19,95	Cura incompleta, superfície pegajosa	Não recomendada
A3	30 g resina	163,6	0,0458	0,0511	0,0559	22,05	Boa cura, elevada estabilidade	Formulação ótima
A4	30 g resina + óleo	181,1	0,0453	0,0567	0,0574	26,71	Excesso de ligante, cura prejudicada	Não recomendada
A5	Controle	22,8	0,0376	0,0495	0,0549	46,01	Sem estabilidade estrutural	Apenas referência

A análise conjunta dos resultados evidencia que a seleção da formulação mais adequada não pode ser baseada exclusivamente na menor condutividade térmica. Embora a Amostra 5 tenha apresentado o menor valor de λ e a Amostra 2 tenha demonstrado desempenho térmico bastante competitivo, ambas apresentaram limitações relacionadas à estabilidade física e à viabilidade de processamento. Em contrapartida, a Amostra 3 apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho térmico, estabilidade dimensional, integridade estrutural e facilidade de fabricação, sendo, por isso, considerada a formulação mais promissora para aplicações em isolamento térmico de edificações.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O desenvolvimento do presente trabalho permitiu investigar a viabilidade de utilização da lã de ovelha associada à resina natural de pinheiro como alternativa bio-baseada para aplicação em sistemas de isolamento térmico na construção civil. A partir de uma abordagem experimental progressiva e iterativa, foi possível estabelecer um protocolo de fabricação capaz de produzir painéis compósitos com estabilidade dimensional, coesão estrutural e desempenho térmico compatível com materiais isolantes comercialmente utilizados.

Os resultados obtidos demonstraram que a incorporação da matriz aglutinante exerceu influência direta tanto no comportamento físico quanto nas propriedades termo físicas das amostras desenvolvidas. A introdução da resina promoveu aumento significativo da densidade aparente e da rigidez estrutural dos painéis, permitindo superar a instabilidade mecânica observada na lã de ovelha sem consolidação.

Do ponto de vista térmico, todas as formulações avaliadas apresentaram valores de condutividade térmica inferiores a $0,065 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, enquadrando-se dentro da faixa característica de materiais isolantes aplicados à envolvente de edifícios. Entre as composições analisadas, a formulação constituída por 30 g de resina natural de pinheiro sem incorporação de óleo de linhaça (Amostra 3) apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho térmico, estabilidade física e viabilidade de fabricação.

Os ensaios também evidenciaram que a presença do óleo de linhaça, embora tenha reduzido a viscosidade inicial da mistura e favorecido a trabalhabilidade da resina, comprometeu significativamente o processo de cura do compósito. As formulações contendo óleo apresentaram superfícies pegajosas, dificuldades de consolidação e menor estabilidade estrutural, demonstrando que o ganho pontual de desempenho térmico não compensou as limitações físicas observadas.

Outro resultado particularmente relevante desta investigação foi a identificação da elevada resistência térmica interna da lã de ovelha durante o próprio processo produtivo. O monitoramento experimental com termopar inserido no núcleo das amostras demonstrou que a baixa condutividade térmica do material dificultou a propagação de calor até o centro geométrico do painel durante a

prensagem. Essa constatação permitiu compreender as falhas de adesão observadas nas etapas preliminares e fundamentou cientificamente a necessidade do prolongamento do ciclo térmico de fabricação.

Os resultados obtidos através do equipamento λ -Meter EP500e demonstraram ainda que o compósito desenvolvido apresenta comportamento térmico estável e compatível com soluções naturais de isolamento já consolidadas no mercado, como os aglomerados de cortiça e determinados tipos de lã mineral. Adicionalmente, a análise da cinética de estabilização térmica indicou que as formulações mais densas apresentam maior inércia térmica, característica desejável para aplicações voltadas ao amortecimento das oscilações térmicas em edifícios.

De forma geral, os resultados desta dissertação demonstram que a lã de ovelha possui elevado potencial como matéria-prima para o desenvolvimento de materiais isolantes sustentáveis, especialmente quando associada a matrizes naturais adequadamente dosadas e processadas sob condições térmicas controladas.

Apesar dos resultados promissores, esta investigação representa uma etapa inicial dentro do desenvolvimento de compósitos bio-baseados aplicados à construção civil. O estudo concentrou-se prioritariamente na consolidação física das formulações e na caracterização da condutividade térmica em regime estacionário. Dessa forma, considera-se fundamental que trabalhos futuros aprofundem a investigação de propriedades complementares relacionadas ao desempenho mecânico, comportamento higrotérmico, absorção de umidade, envelhecimento acelerado, resistência ao fogo e durabilidade a longo prazo.

Além disso, análises microestruturais mais avançadas poderão contribuir para compreender de forma detalhada a interação entre a matriz aglutinante e as fibras queratínicas, bem como os mecanismos internos responsáveis pela transferência de calor no interior do compósito. Estudos futuros poderão ainda explorar a otimização industrial do processo produtivo, visando reduzir o tempo de prensagem e o consumo energético necessário para a consolidação completa dos painéis.

Por fim, conclui-se que o compósito desenvolvido apresenta potencial técnico relevante para futuras aplicações em soluções construtivas sustentáveis, contribuindo simultaneamente para a valorização de recursos naturais renováveis, redução de resíduos agroindustriais e incremento da eficiência energética no setor da construção civil.

REFERENCIAS

- [1] Al-Homoud, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40(3), 353–366.
- [2] Alyousef, R., et al. (2020). Pine resin as a natural polymer binder in lightweight composites. *Polymers*, 12(3), 364.
- [3] Arrakhiz, E. Z., Elachaby, M., Bouhfid, R., Vaudreuil, S., Essassi, M., & Qaiss, A. (2012). Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites. *Materials & Design*, 43, 200-205.
- [4] Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1–17.
- [5] ASTM International. (2019). *Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus (ASTM C177-19)*.
- [6] Batiot, B., et al. (2019). Assessing the true thermal performance of bio-based insulation materials in building envelopes. *Building and Environment*, 160, 106180.
- [7] Bicer, A., & Kar, F. (2017). Thermal and mechanical properties of concretes containing natural resins. *Thermophysics and Aeromechanics*, 24, 621-628.
- [8] Briga-Sá, A., Nascimento, D., Teixeira, N., Pinto, J., Caldeira, F., Varum, H., & Paiva, A. (2013). Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. *Construction and Building Materials*, 38, 155–160.
- [9] Carson, J. K., Lovatt, S. J., Farrar, D. J., & Cleland, D. J. (2005). Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(11), 2150-2158.
- [10] CEN. (2001). *EN 12667:2001 - Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods*. European Committee for Standardization.
- [11] CEN. (2012). *EN 13162:2012 - Thermal insulation products for buildings - Factory made mineral wool (MW) products*. European Committee for Standardization.
- [12] Corscadden, K. W., Biggs, J. N., & Stiles, D. K. (2014). Sheep's wool insulation: A sustainable alternative use for a renewable resource? *Resources, Conservation and Recycling*, 86, 9-15.
- [13] Dénes, F., Manoliu, A., & Varga, E. (2019). Natural fiber-based insulation materials. *Journal of Natural Fibers*, 16.
- [14] Dénes, O., Florea, I., & Manea, D. L. (2022). Analysis of sheep wool-based composites for building insulation. *Polymers*, 14(10), 2109.
- [15] Eucken, A. (1932). Die Wärmeleitfähigkeit keramischer feuerfester Stoffe. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 3(1), 16–20.
- [16] Eurostat. (2023). *Final energy consumption by sector, EU*. Publications Office of the European Union.
- [17] Gil, L. (2015). New cork-based materials and applications. *Materials*, 8(2), 625–637.
- [18] Hegyi, A., Lăzărescu, A. V., Baeră, C., & Rusu, T. (2017). Aspects regarding the structural configuration of composite panels aimed for thermal insulation of buildings. *Procedia Engineering*, 181, 331–337.
- [19] Ingrao, C., Lo Giudice, A., Bacenetti, J., Tricase, C., Dotelli, G., Fiala, M., ... & Mbohwa, C. (2015). Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 29-42.
- [20] International Energy Agency, & United Nations Environment Programme. (2023). *Global status report for buildings and construction*. IEA.

- [21] ISO. (1991). *ISO 8302:1991 - Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus*. International Organization for Standardization.
- [22] ISO. (2007). *ISO 10456:2007 - Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*. International Organization for Standardization.
- [23] Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43(10), 2549-2563.
- [24] Jones, D., & Brischke, C. (Eds.). (2017). *Performance of bio-based building materials*. Woodhead Publishing.
- [25] Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518-2523.
- [26] Kymäläinen, H. R., & Sjöberg, A. M. (2008). Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*, 43(7), 1261-1269.
- [27] Liu, L., Li, H., Lazzaretto, A., Manente, G., Tong, C., Liu, Q., & Li, N. (2017). The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 912-932.
- [28] Maxwell, J. C. (1873). *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Vol. 1). Clarendon Press.
- [29] Mazutti, N. (2023). *Caracterização do comportamento térmico e ao fogo de misturas à base de argila e lã de ovelha* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Maria.
- [30] Moisés, L. M. C. C. (2013). *Valorização da lã de ovelha de raças autóctones portuguesas* (Tese de doutoramento). Universidade da Beira Interior.
- [31] Mounir, S., Khabbazi, A., Khmou, A., Bammou, L., & Elhamdouni, Y. (2015). Thermal inertia and thermal properties of the composite material clay-wool. *Sustainable Cities and Society*, 19, 191-199.
- [32] Palumbo, M., Avellaneda, J., & Lacasta, A. M. (2015). Availability of crop by-products in Spain: New raw materials for natural thermal insulation. *Resources, Conservation and Recycling*, 99, 1-6.
- [33] Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77–86.
- [34] Parlato, M. C. M., Porto, S. M. C., & Valenti, F. (2022). Valorisation of Sheep Wool Fibers in Sustainable Energy-Efficient Materials: Thermal and Acoustic Properties of Bio-Based Composites. *Energies*, 15(3), 866.
- [35] Pennacchio, A., Pucci, B., Segreto, G., D'Amelio, N., & Antonella, P. (2017). Valorization of sheep wool waste. *Waste Management*, 61, 104–110.
- [36] Pietrak, K., & Wiśniewski, T. S. (2015). A review of models for effective thermal conductivity of composite materials. *Journal of Power Technologies*, 95(1), 14–24.
- [37] Progelhof, R. C., Throne, J. L., & Ruetsch, R. R. (1976). Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review. *Polymer Engineering & Science*, 16(9), 615-625.
- [38] Russell, S. J. (Ed.). (2006). *Handbook of nonwovens*. Woodhead Publishing.
- [39] Santos, C. A. P., & Matias, L. (2006). *ITE 50: Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [40] Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988–1011.
- [41] Tiskatine, R., Ouka, I., Bouhjar, A., Lahcine, A., Boukhattem, L., Bazid, S., & Bouhal, T. (2018). Thermophysical analysis of natural insulation materials made from sheep wool and clay. *Journal of Building Engineering*, 20, 317-327.
- [42] União Europeia. (2018). *Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018*. Jornal Oficial da União Europeia.

- [43] Vêjelis, S., et al. (2024). Thermal performance of natural fibre insulation materials. *Journal of Building Engineering*.
- [44] Volf, M., Diviš, J., & Havlík, F. (2015). Thermal, sound and environmental properties of sheep wool insulation. *Energy and Buildings*, 86, 59–65.
- [45] Welling, J., & Hasan, M. (2014). Linseed oil as a natural binder for natural fiber composites. *Industrial Crops and Products*, 60, 234-241.
- [46] Zach, J., Korjenic, A., Petránek, V., Hroudová, J., & Bednar, T. (2012). Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. *Energy and Buildings*, 49, 246-253.
- [47] Zukowski, M., & Haik, G. (2010). Thermal and physical properties of sheep wool insulation. *Energy and Buildings*, 42(1), 118-121.

