

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA VICTOR CIVITA – FATEC TATUAPÉ
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS

Daniela Aiko Hokama

ANÁLISE DE MATERIAIS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO

São Paulo
2025

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA VICTOR CIVITA – FATEC TATUAPÉ
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS

Daniela Aiko Hokama

ANÁLISE DE MATERIAIS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO

Relatório Técnico Científico apresentado
como pré-requisito para conclusão do
Curso Superior de Tecnologia em
Construção de Edifícios, na Faculdade
de Tecnologia do Tatuapé “Victor Civita”
elaborado sob orientação do Prof. Dr.
Douglas Casagrande

São Paulo
2025

RESUMO

A crescente demanda por sistemas de climatização intensifica o consumo energético global e os impactos ambientais, tornando essencial a adoção de estratégias construtivas passivas que promovam a eficiência energética em edificações. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo principal analisar comparativamente a taxa de transferência de calor em diferentes tipos de lã, identificando o material com menor condutividade térmica (k). A metodologia adotada foi de natureza experimental e quantitativa, utilizando ensaios comparativos em quatro materiais isolantes: lã de rocha, lã de vidro, lã de ovelha e lã de politereftalato de etileno (PET). Devido à inviabilidade técnica de medir a potência térmica útil, a análise de desempenho foi baseada no método de correlação da densidade média experimental com os valores de (k) nominais da literatura. Os resultados, consolidados pela resistência térmica (R) e potência de condução (P_{cond}), classificaram a lã de vidro como o isolante mais eficiente, pois apresentou o maior valor de resistência térmica e o menor valor de potência de condução. Em contraste, a lã de ovelha foi classificada como o pior isolante, por apresentar o menor valor de resistência térmica e maior valor de potência de condução. A lã de rocha e de PET foram classificadas como alternativas intermediárias. Conclui-se que a escolha de materiais com baixo valor de k é a estratégia mais eficaz para a redução de perdas térmicas.

Palavras-chave: Isolamento térmico; condutividade térmica; resistência térmica; materiais isolantes térmico.

SUMÁRIO

RESUMO.....	0
1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Objetivos	6
1.2 Objetivos específicos	6
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Transferência de calor	7
2.2 Condução térmica	8
2.2.1 Lei de Fourier	9
2.2.2 Condutividade Térmica (k)	11
2.2.3 Resistência térmica (R)	14
2.3 Convecção térmica	14
2.4 Radiação térmica	14
2.5 Desempenho térmico em edificações	15
2.6 Materiais isolantes térmico	15
2.6.1 Lã de rocha	15
2.6.2 Lã de vidro	17
2.6.3 Lã de ovelha	18
2.6.4 Lã de PET	19
2.6.5 Condutividade térmica (k) dos materiais estudados	19
3 METODOLOGIA	20
3.1 Materiais e equipamentos	20
3.1.1 Aparatos de medição	20
3.1.2 Especificações do aparato experimental	24
3.2 Amostras	26
3.3 Determinação da condutividade térmica (k)	29
4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS	30
4.1 Determinação do valor de k	30
4.2 Apresentação geral dos resultados	31
4.3 Cálculo da potência de condução (P_{con})	36
4.3.1 Potência de condução (P_{con}) da lã de rocha	37
4.3.2 Potência de condução (P_{con}) da lã de vidro	39
4.3.3 Potência de condução (P_{con}) da lã de ovelha	40

4.3.4	Potência de condução (<i>P_{con}</i>) da lã de PET	41
4.4	Análise comparativa final e discussão de desempenho	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
	BIBLIOGRAFIA	45
	APÊNDICE	48

1 INTRODUÇÃO

Conforme a Organização Mundial da Saúde, pessoas que moram em climas temperados passam, em média, entre 80 e 90% de suas vidas em ambientes internos (World Health Organization, 1997). Apesar de esse dado ser de quase três décadas atrás, ele continua relevante, visto que o padrão de permanência prolongada em ambientes internos tende a ser mantido, ou até mesmo intensificado ao longo dos anos, principalmente com o crescimento urbano e o aumento constante da poluição.

Com o agravamento das temperaturas extremas, tanto de calor quanto de frio, causado pelo aquecimento global, o uso de sistemas de climatização, como o ar-condicionado, tem se tornado cada vez mais comum. Atualmente, esses sistemas respondem por aproximadamente 2,7% das emissões globais de gases de efeito estufa e representam cerca de 7% do consumo total de eletricidade no planeta (Ritchie, 2024). Esse aumento do consumo energético contribui diretamente para o agravamento do aquecimento global, estabelecendo um ciclo vicioso. Nesse contexto, torna-se essencial buscar soluções passivas, ou seja, estratégias construtivas que não dependem de energia elétrica, para o controle térmico de uma edificação, com o propósito de reduzir o consumo energético e, consequentemente, os impactos ambientais.

Dentre os métodos mais eficazes para reduzir a dependência desses sistemas de climatização, destaca-se a adoção de um bom sistema de isolamento térmico. Esse tipo de solução tem como função principal minimizar ou impedir a troca de calor entre os ambientes internos e externos, promovendo maior conforto térmico e eficiência energética.

Além de contribuir para a redução dos impactos ambientais, o isolamento térmico também gera benefícios econômicos para residências e edificações comerciais. Uma vez que não há a necessidade da utilização de sistemas de climatização, o consumo de energia elétrica diminui, resultando em menores custos operacionais ao longo do tempo.

A eficiência energética em edificações recebe um incentivo crescente de políticas públicas e normas técnicas, que propõem a redução do consumo excessivo de energia e à melhoria do conforto ambiental. Atualmente, no Brasil, conta-se com a norma de desempenho NBR 15575, que tem como objetivo garantir a qualidade das construções e contribuir para a preservação do meio ambiente. Essa norma estabelece requisitos para o desempenho térmico que buscam garantir o conforto térmico sem depender exclusivamente dos sistemas de climatização.

Neste trabalho, serão comparados quatro tipos de lãs, de vidro, de rocha, de ovelha e lã de politereftalato de etileno (PET), com o objetivo de discutir suas características e desempenho. A escolha desses materiais neste estudo procura estabelecer um paralelo entre alternativas convencionais e opções renováveis, de baixo impacto ambiental.

A metodologia adotada neste trabalho é de natureza experimental, com abordagem quantitativa. Foram realizados ensaios comparativos com materiais isolantes em ambiente controlado, visando medir a variação de temperatura ao longo do tempo para cálculo da taxa de transferência de calor.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste estudo é analisar comparativamente a taxa de transferência de calor em diferentes tipos de lã, por meio da medição da variação de temperatura em um intervalo de tempo controlado, a fim de comparar seu desempenho e identificar o material com menor condutividade térmica.

1.2 Objetivos específicos

- Registrar a variação de temperatura de cada material isolante observado, sob exposição a uma fonte de calor controlada;
- Calcular a taxa de transferência térmica de cada amostra com base nos dados obtidos;
- Avaliar e classificar a eficiência térmica dos materiais analisados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para compreender a eficiência dos materiais isolantes térmicos, é fundamental analisar os conceitos de transferência de calor e as propriedades dos tipos de materiais utilizados nesse contexto. Esta seção visa detalhar esses aspectos com base em literaturas especializadas, além de apresentar fórmulas e princípios físicos aplicados no cálculo da taxa de transferência térmica, que serão utilizados nas análises experimentais.

2.1 Transferência de calor

No estudo da transferência de calor aplicada ao conforto térmico de edificações, o primeiro conceito fundamental é a distinção entre temperatura e calor.

Embora no senso comum a temperatura seja associada às percepções de “frio” e “quente”, em termos científicos ela pode ser definida por um conjunto de condições teóricas. De forma geral, devido ao movimento aleatório, os átomos ou moléculas da matéria possuem energia cinética. A média dessa energia cinética das partículas resulta em um efeito mensurável, cuja grandeza é denominada temperatura (Hewitt, 2015).

Fundamentalmente, sempre que dois corpos apresentam temperaturas diferentes, ocorre uma transferência de energia térmica entre eles. Assim, a transferência de calor pode ser definida como a quantidade de energia térmica transferida em função do tempo, em decorrência dessa diferença de temperatura, buscando o equilíbrio térmico. “A transferência de calor, por tanto, é uma grandeza física vetorial caracterizada pela intensidade e orientação espacial” (Ordenes, Lamberts, Guths, 2008).

A transferência de calor pode ser definida como a transmissão de energia de uma região para outra em decorrência de uma diferença de temperatura. Como diferenças de temperatura existem em todo o universo, o fenômeno do fluxo de calor é tão universal quanto aqueles associados às atrações gravitacionais. Diferentemente da gravidade, entretanto, o fluxo de calor não é regido por uma relação única, mas sim por uma combinação de diversas leis independentes da física. (Kreith, Manglik, Bohn, 2011, p. 6).

Existem três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

2.2 Condução térmica

A condução térmica é especialmente relevante no estudo de materiais isolantes térmicos para edificações pois é o principal mecanismo de transferência de calor em materiais sólidos e fluidos estacionários. A compreensão detalhada desse fenômeno possibilita a escolha adequada dos materiais e o cálculo preciso do fluxo de calor nos sistemas construtivos.

Este mecanismo é o processo de propagação de calor no interior de um meio estacionário, seja sólido, líquido ou gasoso, aquecido de forma não uniforme, ou entre meios estacionários distintos em contato direto (Oliveira, 2016, p. 14). Diferentemente da radiação térmica, que pode ocorrer no vácuo, a condução exige a presença de um material e depende diretamente de suas propriedades físicas.

A condução térmica ocorre devido à interação entre partículas (moléculas, átomos ou elétrons) presentes em um material. Na presença de um gradiente de temperatura (∇T), a energia térmica é transferida das regiões com maior agitação molecular (temperaturas mais altas) para aquelas com menor agitação (temperaturas mais baixas). Esse processo pode ser explicado por dois mecanismos microscópicos, os movimentos de elétrons livres e a vibração de rede (fônons) (Callister; Rethwisch, 2016, p. 731).

A constituição atômica do material faz com que o material seja classificado como condutor ou isolante térmico. Os metais, por exemplo, são ótimos condutores de calor. Por possuírem “os elétrons mais externos ‘fracamente’ ligados, tornando-se livres para transportar energia por meio de colisões através do metal” (Oliveira, 2016). No movimento de elétrons livres, os elétrons da camada de valência não estão ligados a átomos específicos, o que permite que estes elétrons fiquem livres. Quando uma extremidade do metal é aquecida, esses elétrons absorvem energia cinética e a transportam rapidamente pelo material, colidindo com outros elétrons e núcleos atômicos. É essa movimentação eficiente que torna os metais excelentes condutores de calor (e de eletricidade).

A vibração da rede cristalina, conceitualmente modelada e tratada pela física como fônons, é o principal mecanismo de transferência de calor em materiais isolantes. De acordo com Muhammad (2017, p. 379) “Os fônons são vibrações quantizadas dos átomos da rede cristalina. Eles são semelhantes aos elétrons ou fótons (partículas de luz), no sentido de que carregam energia”. Os fônons são os principais responsáveis pelo transporte de calor em materiais semicondutores e isolantes. O calor se desloca do lado quente para o lado frio sempre que um sistema está em desequilíbrio térmico e a distribuição de temperatura não é uniforme.

2.2.1 Lei de Fourier

A lei de Fourier estabelece o modelo macroscópico fundamental para descrever a taxa de transferência de calor por condução em um material. Embora seja a principal ferramenta de cálculos na engenharia, é importante salientar que, em nível macroscópico, a transferência de calor em materiais dielétricos (isolantes) e em semicondutores ocorre principalmente através dos fônons. Entretanto, a lei de Fourier, relaciona as propriedades do material com o gradiente de temperatura. De modo geral, a lei descreve o fenômeno da condução térmica e estabelece que o fluxo de calor é proporcional à área de seção transversal.

A lei de Fourier descreve esse processo por:

$$Q = k \cdot A \cdot \nabla T \cdot \Delta t \quad (1)$$

Onde:

Q = calor em joule (J)

k = condutividade térmica do material (W/m·K)

A = área de seção transversal (m²)

∇T = gradiente de temperatura em kelvin (K/m), $\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k}$

Δt = tempo em segundos (s)

Ao relacionar o fluxo de calor (Q) com o gradiente de temperatura, obtemos:

$$Q = -k \cdot A \cdot \nabla T \cdot \Delta t \quad (2)$$

Em coordenadas unidimensionais, como por exemplo paredes planas, temos:

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \cdot \Delta t \quad (3)$$

Onde:

Q = calor em joule (J)

k = condutividade térmica, propriedade intrínseca do material (W/m·K)

A = área de seção transversal (m²)

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura (∇T) em uma dimensão (K/m)

Δt = tempo em segundos (s)

O Sinal negativo indica que o calor flui no sentido oposto ao aumento da temperatura.

Ao calcular a potência P, ou seja, a taxa de transferência de calor $\frac{Q}{\Delta t}$, em watts (W), obtém-se a seguinte expressão:

$$P = k \cdot A \cdot \frac{(T_f - T_i)}{L} \quad (4)$$

Onde:

P = Potência ou taxa de transferência de calor (W); (W = J/s)

k = condutividade térmica do material (W/m·K)

A = área de seção transversal (m^2)

$(T_f - T_i)$ = diferença de temperatura entre as superfícies quente e fria (K)

L = espessura do material isolante térmico em metros (m)

2.2.2 Condutividade Térmica (k)

A Condutividade térmica (k) é uma propriedade intrínseca de um material, medida no Sistema Internacional em $W/(m \cdot K)$. É essencial na lei de Fourier, pois quantifica a sua capacidade de conduzir calor. Através do valor da condutividade térmica, é possível classificar um material como sendo isolante ou condutor: quanto maior for o valor de k , melhor o material conduz calor. Por essa razão, materiais que possuem um k baixo, como a madeira e a borracha, são considerados materiais isolantes.

Em materiais sólidos, a condução térmica ocorre por meio de dois mecanismos primários, a vibração da rede cristalina (fônons) e o movimento dos elétrons livres. Por tanto, a condutividade térmica total (k), é dada pela soma dos dois mecanismos (Callister; Rethwisch, 2016, p. 731).

$$k = k_r + k_e \quad (5)$$

Onde:

k_r = condutividade térmica devido à vibração da rede;

k_e = condutividade térmica devido ao movimento de elétrons livres.

É importante salientar que todos os materiais apresentam a vibração da rede cristalina (fônons) e o movimento dos elétrons livres, porém em níveis diferentes (Callister; Rethwisch, 2016, p. 731). A Tabela 1 apresenta essa diferença de contribuição para a condutividade térmica total (k), justificando a classificação dos materiais em isolantes ou condutores.

Tabela 1 — Contribuição dos Mecanismos Microscópicos para a Condutividade Térmica Total (k)

Tipo de material	k_e	k_r	Condutividade total k
Condutores	Contribuição alta $k_e > k_r$	Contribuição média	Alto valor de k (condução eficiente)
Isolantes	Contribuição quase nula	Contribuição baixa	Baixo valor de k (condução deficiente)

(Fonte: O autor)

Para um material ser considerado isolante térmico eficiente, é necessário que ele apresente um valor de condutividade térmica total (k) baixo. Como mostrado na tabela 1, isso exige que a contribuição do movimento de elétrons livres (k_e) seja praticamente inexistente e que a contribuição da vibração da rede (k_r) seja baixa.

É essencial compreender que a condução por fônons sempre será menos eficiente que a condução por elétrons livres, entretanto, apesar de ser ineficiente, a condução por fônons existe. O diamante é um ótimo exemplo por ser um mineral que não conduz eletricidade, mas é um excelente condutor térmico (Callister; Rethwisch, 2016, p. 473), pois apresenta baixo valor de elétrons livres (k_e), mas um alto valor de fônons (k_r), fazendo com que o valor de k seja alto (entre 2000 e 2500 W/m·K).

A tabela 2 apresenta alguns exemplos de materiais e sua eficiência.

Tabela 2 — Classificação térmica de materiais com base nas contribuições microscópicas (k_e e k_r)

Material	k_e	k_r	Condutividade total k	Eficiência
Cobre	Muito alto	Médio	$k \approx k_e$	Ótimo condutor elétrico e térmico
Diamante	Nulo	Muito alto	$k \approx k_r$	Ótimo condutor térmico e péssimo condutor elétrico
Lã de vidro	Quase nulo	Baixo	Baixo valor de k	Ótimo isolante

(Fonte: O autor)

No nível microscópico, o valor de k está diretamente associado à estrutura física, atômica e molecular da matéria. A estrutura do material não só determina o material como isolante ou condutor, mas também a eficiência da transferência de calor.

Em materiais isolantes, o baixo valor de k é obtido por meio de duas características estruturais principais: a porosidade e a baixa densidade. Essa estrutura é o que permite o aprisionamento de ar (ou outros gases) em suas cavidades, reduzindo significativamente a transferência de calor por condução (Neto, 2018).

Embora o baixo valor de k ser essencial para definir um bom isolante, a lei de Fourier demonstra que a eficiência da condução de calor também depende da espessura (L) do material, pois “o calor transferido por condução (q) é inversamente proporcional à espessura do material” (Martins, 2008), ou seja, a espessura funciona como uma “resistência térmica”. Quanto mais espesso o material, maior a barreira ao fluxo de calor, por isso, a relação é inversamente proporcional.

2.2.3 Resistência térmica (R)

Segundo a NBR 15220-1, resistência térmica pode ser definida como “quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário”. De modo geral, a resistência térmica (R) é objetivamente e de modo geral, determinada pela relação entre a espessura (L) e a condutividade térmica (k) do material, conforme a equação (6) (NBR 15220-2):

$$R = \frac{L}{k} \quad (6)$$

Onde:

R é a resistência térmica, em $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$;

L é a espessura da camada de material do componente, em m;

k é a condutividade térmica do material, em $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

2.3 Convecção térmica

Convecção térmica envolve a transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão) e a transferência através do movimento global, ou macroscópico, do fluido (Incropera et al., 2008). Na prática, a convecção ocorre principalmente quando fluidos, como ar ou líquidos em movimento, entram em contato com uma superfície com temperatura diferente

2.4 Radiação térmica

Radiação térmica é a transmissão de calor por ondas eletromagnéticas (infravermelho). Ao contrário da condução e da convecção, a radiação não necessita de um meio material para ocorrer, sendo mais eficiente no vácuo (Catunda, 2016).

2.5 Desempenho térmico em edificações

Segundo Borges (2013, p. 26), “o desempenho térmico de uma edificação é resultado da sua interação com o ambiente térmico que a envolve”. Sendo assim, o conforto térmico de uma edificação decorre das suas condições de exposição. Spannenberg (2006, p. 55) afirma que estas condições de exposição são divididas em condições climáticas, de implantação e de uso. Outras grandezas envolvendo as características dos materiais utilizados são outros fatores de influência no desempenho térmico de uma edificação. Neste contexto, o uso estratégico de materiais isolantes térmicos se torna fundamental para melhorar o desempenho térmico da edificação.

Assim como o desempenho térmico de uma edificação depende do desempenho térmico de cada elemento de vedação, o isolamento térmico corresponde à média ponderada das resistências térmicas das superfícies que compõem a edificação: paredes, coberturas, pisos e aberturas (Spannenberg, 2006, p. 56).

O principal objetivo do isolamento térmico em edificações, é maximizar a Resistência Térmica Total (R_{total}) do envelope construtivo, uma vez que o fluxo de calor, ou potência térmica (Q), é inversamente proporcional a essa resistência. A norma de desempenho NBR 15575 – 4 Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas, e a NBR 15575 – 5 Requisitos para sistemas de cobertura, estabelecem os valores admissíveis de transmitância térmica em parede e coberturas, a fim de proporcionar um desempenho térmico apropriado para cada zona bioclimática.

2.6 Materiais isolantes térmico

Assim como mencionado na seção 2.2.2, um material isolante térmico apresenta uma baixa condutividade térmica (k) e uma estrutura porosa. Esses materiais podem ser classificados como materiais de origem mineral, sintética, vegetal e animal. A seguir, serão caracterizados os materiais isolantes explorados neste trabalho.

2.6.1 Lã de rocha

A lã de rocha é um material de origem mineral, produzida a partir de rochas vulcânicas, como o basalto, através de um processo chamado fusão. Este

material é comumente utilizado como isolante termoacústico e se destaca por apresentar baixo peso, baixa condutividade térmica, incombustibilidade, resistência ao fogo, atoxicidade, além de apresentarem ampla aplicabilidade e longa vida útil (Guozhong, 2020).

Comercialmente, a lã de rocha pode ser encontrada em painéis ou mantas (rolos), disponíveis em diferentes espessuras e densidades que variam conforme a necessidade de uso.

A avaliação de um material isolante térmico estende-se para além de sua propriedade térmica. O Diagrama Radar (Figura 1) ilustra essa avaliação holística, comparando o desempenho da lã de rocha, em painéis e em rolos, em seis critérios de relevância técnico e ambiental.

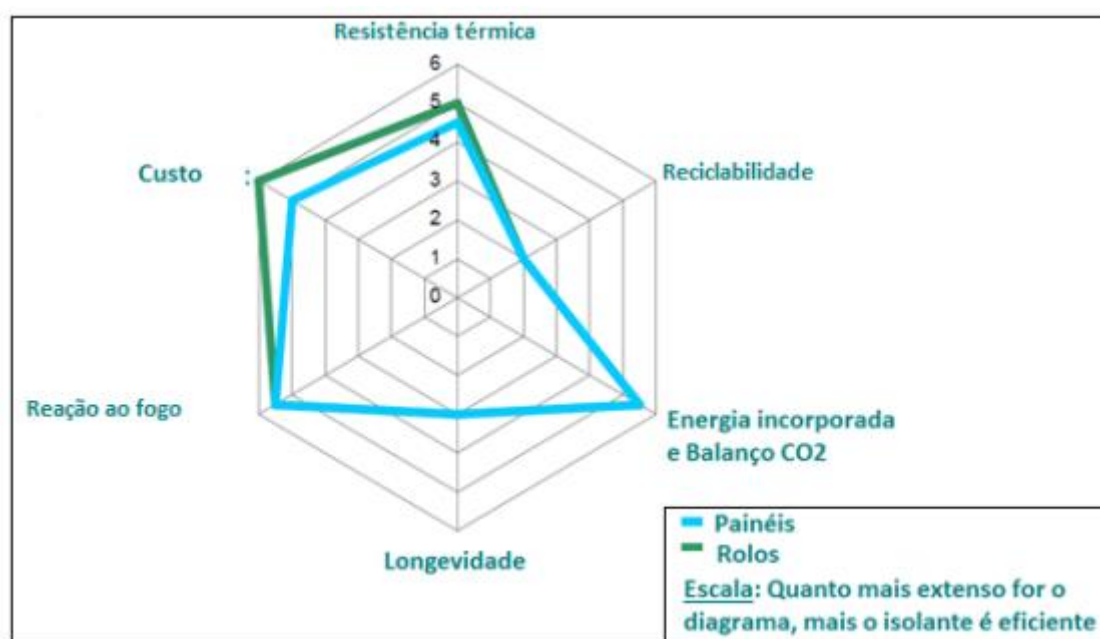


Figura 1 — Diagrama Radar da lã de rocha (Fonte: Silva, 2013, p. 14)

Como é possível analisar no diagrama, apesar de ser um material não renovável, a lã de rocha é um excelente material isolante térmico e apresenta muitas vantagens como o baixo custo e ótima resistência térmica. Embora a lã de rocha ser um material inorgânico e, portanto, possuir vida útil longa, a pontuação moderada no Diagrama Radar indica que, em comparação com outros materiais isolantes, ela é classificada como média.

2.6.2 Lã de vidro

Assim como a lã de rocha, a lã de vidro é um material de origem mineral, sendo fabricado em alto forno a partir de sílica e sódio. Este material é um dos isolantes térmicos mais tradicionais usados na construção civil por apresentar baixa condutividade térmica, incombustibilidade e por não favorecer a proliferação de fungos ou bactérias (Catai; Penteado; Dalbello, 2006).

A figura 2 apresenta um Diagrama Radar da lã de vidro, comparando o seu desempenho em seis critérios de relevância técnico e ambiental

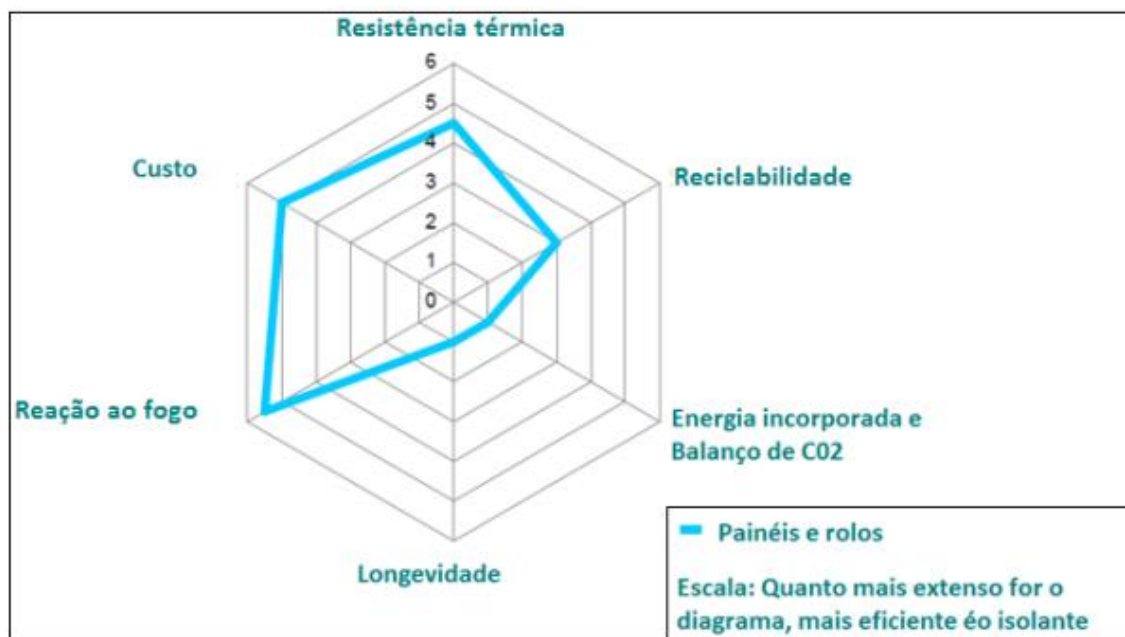


Figura 2 — Diagrama Radar da lã de vidro (Fonte: Silva, 2013, p. 12)

Embora a lã de vidro apresente aceitável resistência à água no curto prazo, seu desempenho térmico decai significativamente quando o material é submetido a uma forte umidade. Isso ocorre porque a presença de água, que é altamente condutiva, aumenta a condutividade térmica (k) do material. Nesse sentido, Silva (2013, p. 11) observa que a eficiência da lã de vidro como isolante pode diminuir após dez anos de uso, indicando que a longevidade do seu desempenho térmico é um fator crítico na seleção e dimensionamento para edificações.

É possível observar na Figura 2 que Silva indicou que a longevidade da lã de vidro é baixa, entretanto, é importante ressaltar que a afirmação do mesmo não é uma regra absoluta e sim uma meia verdade. A lã de vidro é inerte e de longa

vida útil, mas a sua durabilidade funcional está ligada à proteção contra a umidade, infiltrações e compressão, que são os fatores externos que podem comprometer a estrutura fibrosa e, conseqüentemente, reduzir o seu valor de Resistência Térmica (R) ao longo do tempo.

2.6.3 Lã de ovelha

Apesar de no Brasil não ser uma prática comum utilizar lã de ovelha como material isolante térmico, países como Chile, Espanha e Reino Unido esta solução já é uma realidade (Gil; Pisani, 2024). O material é de origem natural, de fonte renovável, sendo valorizado por suas propriedades de sustentabilidade e desempenho higrotérmico.

A figura 3 apresenta um Diagrama Radar da lã de ovelha, comparando o seu desempenho em seis critérios de relevância técnico e ambiental.

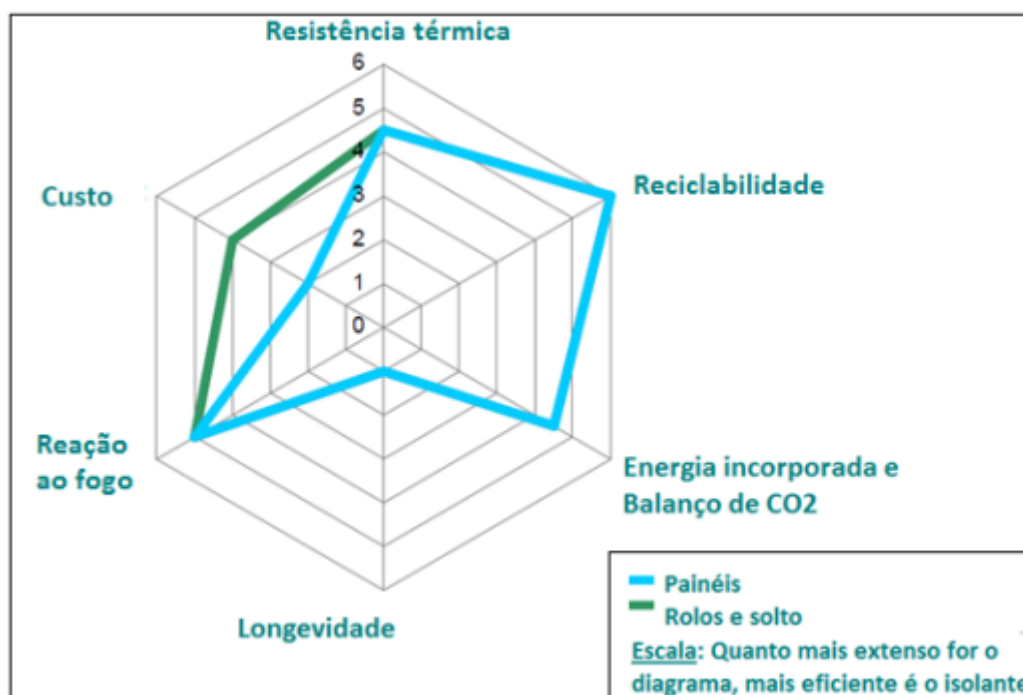


Figura 3 — Diagrama Radar da lã de ovelha (Fonte: Silva, 2013, p. 48)

Como a lã de ovelha não é um material convencional, o seu custo pode ser elevado em comparação com os materiais isolantes convencionais. Apesar disso, a lã de ovelha possui propriedades de desempenho higrotérmico superiores e é capaz de absorver e liberar umidade do ambiente sem comprometer drasticamente sua resistência térmica, o que contribui para a

regulação da umidade e a qualidade do ar interior da edificação (Gil; Pisani, 2024).

2.6.4 Lã de PET

A lã de polietileno tereftalato (PET) é outra solução com viés sustentável, e apesar de estar no mercado brasileiro a mais de dez anos, a utilização desse material não é tão popular quanto a lã de vidro e de rocha. O principal diferencial da lã de PET é o seu apelo ecológico: ela é fabricada a partir da reciclagem de garrafas PET descartadas, o que a torna uma opção de fonte renovável com alto teor de material reciclado.

“A Lã de Pet é feita com fibras muito leves de poliéster, que passam por um processo de compactação a baixa temperatura (160°C a 180°C) e pressão.” (Trisoft, 2017). Por possuir uma estrutura fibrosa, esse material consegue aprisionar um grande volume de ar possibilitando um valor baixo de condutividade térmica (k).

De acordo com Dias, Mazzurana e Piovesan (2017), a condutibilidade térmica da lã de PET é semelhante aos materiais convencionais, sendo um ótimo substituto para a lã de vidro e de rocha.

2.6.5 Condutividade térmica (k) dos materiais estudados

A tabela 3 apresenta os valores médios de condutividade térmica dos quatro materiais estudados. É importante ressaltar que o valor de k varia de acordo com a densidade do material.

Tabela 3 — Condutividade térmica (k) dos materiais estudados

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)
Lã de rocha	40-200	0,033-0,040
Lã de vidro	15-75	0,031-0,037
Lã de ovelha	10-25	0,038-0,054
Lã de PET	15-60	0,034-0,039

(Fonte: Adaptado de Gil; Pisani, 2024)

Para determinar o valor experimental da condutividade térmica (k) dos materiais, é necessário isolar a variável k na Lei de Fourier, como demonstrado na equação (7).

$$k = \frac{Q \cdot L}{\Delta T \cdot A} \quad (7)$$

Onde:

k é a condutividade térmica (W/(m.k));

Q é a potência térmica transferida (W);

L é a espessura da amostra (m);

ΔT é a diferença de temperatura entre a superfícies quente e fria;

A é a área de seção transversal de amostra (m²)

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa é caracterizada como um estudo experimental de natureza quantitativa. O objetivo busca compreender a relação de causa e efeito entre as propriedades de cada material e seu desempenho como isolante térmico. Além disso, a pesquisa apresenta caráter descritivo, pois visa detalhar e comparar o comportamento de diferentes materiais em condições controladas.

3.1 Materiais e equipamentos

3.1.1 Aparatos de medição

A coleta de dados para a análise da condução térmica de cada material estudado foi realizada através de um sistema experimental de baixo custo, composto por uma câmara de ensaio, uma fonte de calor e um sistema de medição. O design do aparato objetiva garantir que o fluxo de calor acontecesse, principalmente, de forma unidirecional através das amostras, evitando a perda de calor para o ambiente.

O sistema principal é composto por um gabinete de dimensões 13 cm x 13 cm x 10 cm, que serve como invólucro externo. No seu interior, foi construído uma divisória de madeira prensada para acomodar as amostras e a fonte de calor de forma padronizada, essa divisão interna assegura que a amostra

utilizada preencha um espaço definido e fique em contato direto com a fonte de calor. O aparato experimental desenvolvido é ilustrado na figura 4.

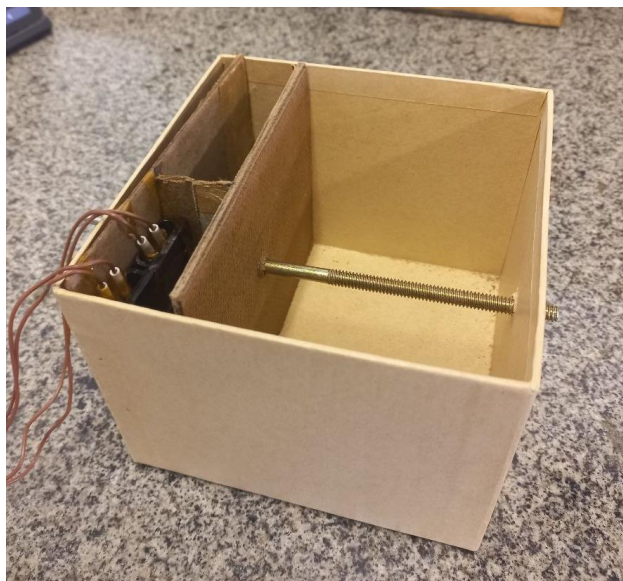


Figura 4 — Visão geral do aparato experimental.
Fonte: O Autor.

A fonte de calor utilizada foi uma resistência de aquecimento de cerâmica, extraída de um alisador de cabelo. A resistência opera em 110V e é capaz de atingir temperaturas superiores a 200°C, garantindo um fluxo térmico significativo e constante para a realização dos ensaios. A resistência é composta por duas placas, o que proporciona uma área de contato maior e otimizada para a análise da transferência de calor.

A resistência foi fixada a uma das divisórias internas do aparato com uma fita térmica de alta temperatura, capaz de suportar temperaturas superiores a 200°C. A fixação garante que a fonte de calor permaneça estacionário e em contato direto com a amostra durante todo o experimento. A figura 5 ilustra a resistência fixada na divisória, e a figura 6 ilustra a resistência dentro da câmara de ensaio.

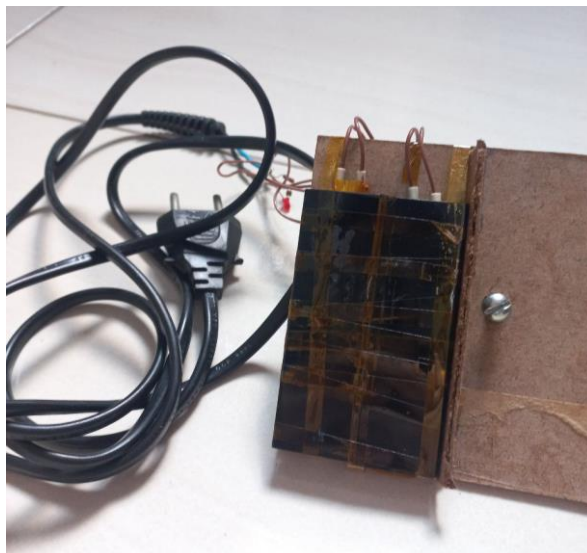


Figura 5 — Fonte de calor fixada na divisória.
Fonte: O Autor

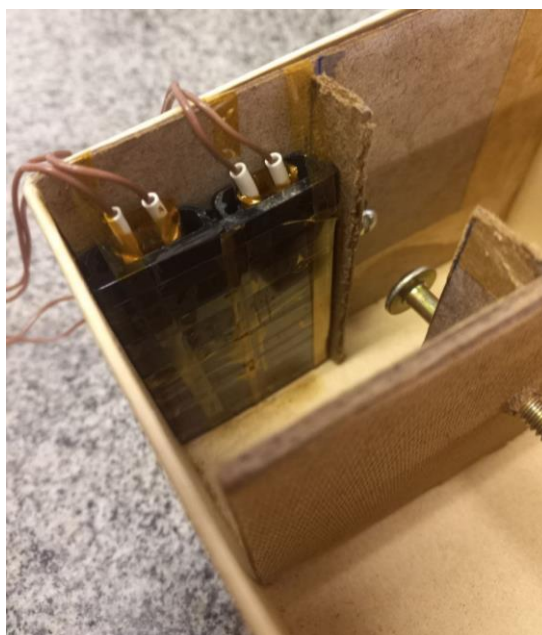


Figura 6 — Fonte de calor dentro da câmara de ensaio.
Fonte: O Autor

A montagem do aparato foi projetada de forma que a resistência permaneça confinada em uma das seções da câmara. A segunda divisória de madeira é ajustável através de um parafuso passante, permitindo que a amostra seja pressionada de forma consistente contra a resistência, otimizando o contato térmico entre as superfícies.

Para garantir a padronização das amostras e a reprodutibilidade dos resultados, foi necessário assegurar que a espessura de cada material testado fosse exata. Para isso, foi elaborado um dispositivo de compressão, composto por duas

placas de alumínio espaçadas por um bloco de madeira para definir a espessura exata de 1,5 cm (figura 7). Este dispositivo foi posicionado dentro do aparato de ensaio e dessa forma, o parafuso passante na parede da câmara, fixa o dispositivo de compressão, garantindo a uniformidade da amostra para todos os testes, eliminando a variabilidade na espessura de cada material. A figura 7 e 8 ilustra o aparato de padronização fora e dentro da câmara de medição. A Figura 9 ilustra o posicionamento de uma das amostras dentro do dispositivo de compressão, evidenciando a espessura padronizada de 1,5 cm.

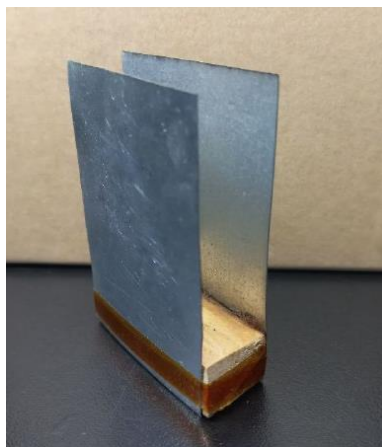


Figura 7 — Aparato de padronização de espessura das amostras.
Fonte: O Autor.

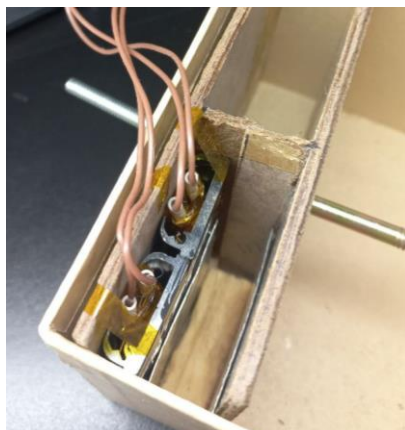


Figura 8 — Aparato dentro da câmara de medição.
Fonte: O Autor.

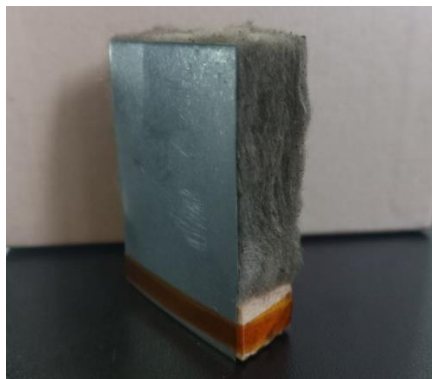


Figura 9 — Amostra de lã de rocha dentro do aparato, com 1,5 cm de espessura.
Fonte: O Autor.

Para a medição dos dados de temperatura, foram utilizados dois multímetros da marca Minipa do Brasil, do modelo ET-2517^a, na função termômetro. Cada equipamento foi conectado a um termopar tipo K (ver figura 10).



Figura 10 — Multímetros e termopares utilizados.
Fonte: O Autor.

3.1.2 Especificações do aparato experimental

A figura 11 especifica as medições do aparato experimental utilizado neste trabalho.

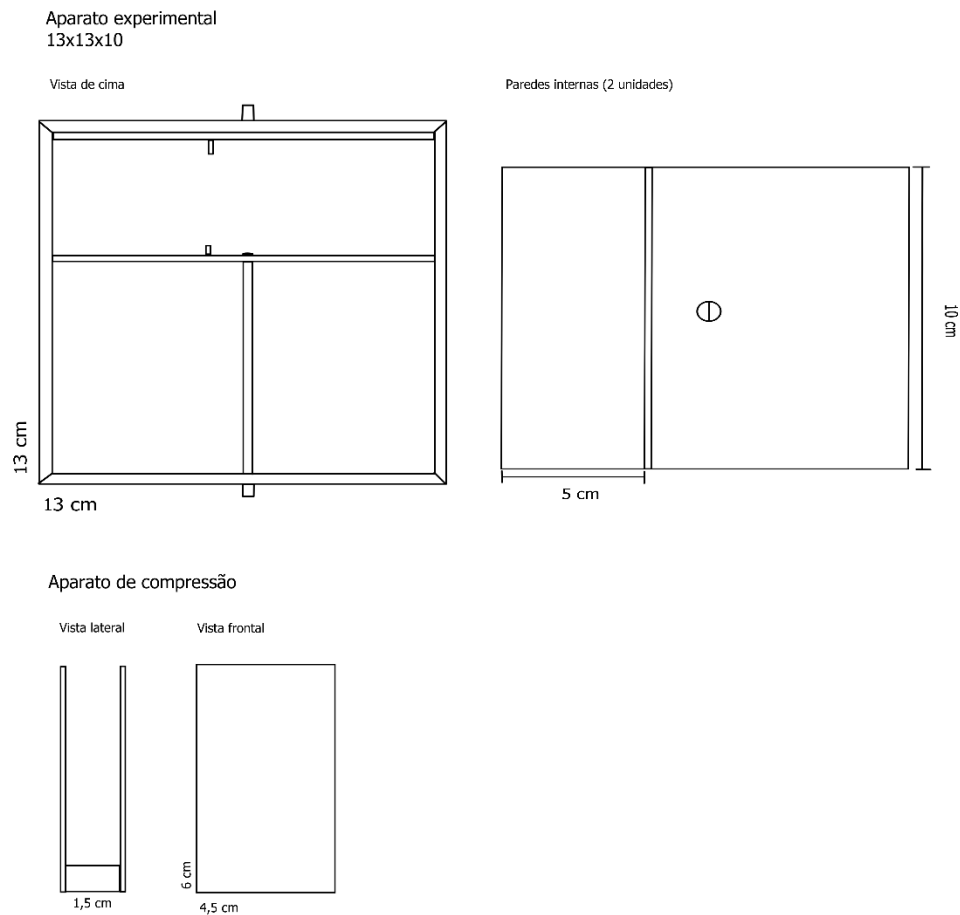


Figura 11 — Especificações do aparato experimental
Fonte: O Autor.

A caixa utilizada como base para o aparato experimental possui 13x13 cm, entretanto, é importante ressaltar que não é necessário utilizar uma caixa com as mesmas medidas, visto que, a área interna do aparato foi reduzida para compor os corpos de prova de 5 cm de largura. Uma caixa de 5x5cm com tampa serviria o propósito e não seria necessário utilizar as paredes internas, pois elas servem para reduzir a área da câmara de isolamento.

A figura 12 demonstra como o experimento funciona.

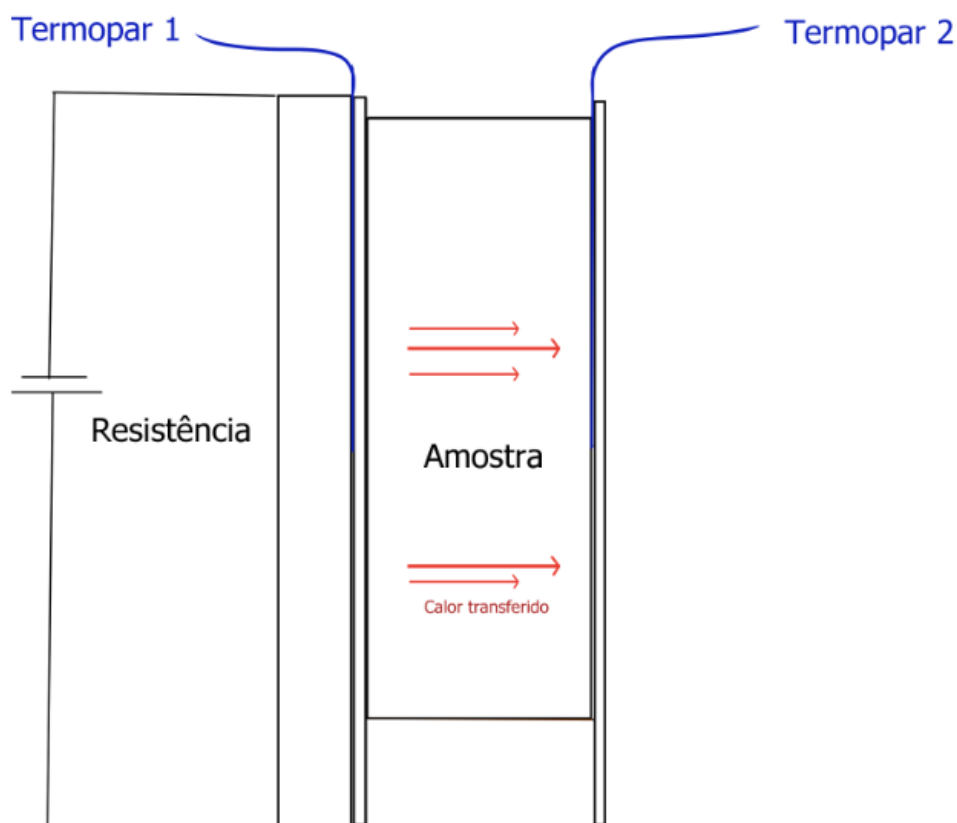


Figura 12 — Funcionamento do aparato.
Fonte: O Autor.

3.2 Amostras

Para garantir a precisão e a comparabilidade dos resultados, os corpos de prova de cada material estudado tiveram suas dimensões padronizadas. Para cada material selecionado, foi separado cinco corpos de prova com dimensões médias de 5 cm x 4,5 cm. A espessura foi uniformizada em 1,5 cm utilizando o aparato de compressão previamente descrito.

Após a separação dos corpos de prova, foi-se utilizado uma balança analítica digital da marca Gehaka, no modelo AG200 (ver figura 13) para a medição de sua massa. A etapa de pesagem permitiu o cálculo da densidade de cada material, fator fundamental para a análise de suas propriedades de isolamento. Os Corpos de Prova (CP) utilizados nos ensaios são ilustrados na Figura 14.

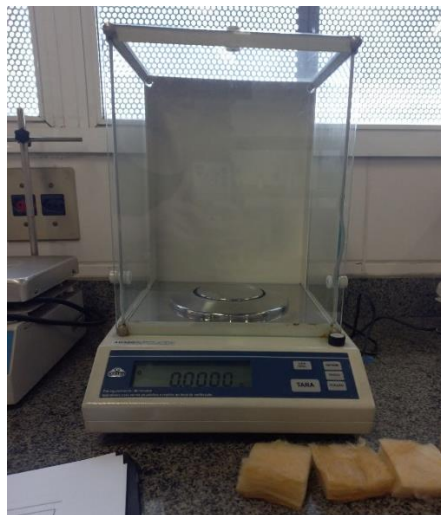


Figura 13 — Balança analítica utilizada para a pesagem das amostras.
Fonte: O Autor.



Figura 14 — Corpos de Prova de cada material. Lã de rocha, lã de vidro, lã de ovelha e lã de PET, respectivamente.
Fonte: O Autor.

As tabelas a seguir, apresentam os valores dimensionais, a massa e a densidade média de cada material utilizado como dado de entrada para os cálculos da condutividade térmica (k) na Seção 4.

Tabela 4 — Caracterização Dimensional e Física dos Corpos de Prova de lã de rocha

Lã de rocha						
CP	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)
1	5,0	4,6	1,5	2,4984	34,50	0,0724
2	5,1	4,5	1,5	2,0280	34,43	0,0589
3	4,9	4,5	1,5	2,0015	33,07	0,0605
4	4,9	4,6	1,5	2,0291	33,81	0,0600
5	4,9	4,5	1,5	2,1005	33,07	0,0635
Média	4,94	4,54	1,5	2,1315	33,37	0,0639

Tabela 5 — Caracterização Dimensional e Física dos Corpos de Prova de lã de vidro

Lã de vidro						
CP	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)
1	5,1	4,5	1,5	0,6088	34,42	0,0177
2	4,9	4,5	1,5	0,6571	33,08	0,0199
3	5,0	4,5	1,5	0,5815	33,75	0,0172
4	5,0	4,7	1,5	0,7816	35,25	0,0222
5	5,0	4,5	1,5	0,7047	33,75	0,0209
Média	5,0	4,54	1,5	0,6667	34,05	0,0196

Tabela 6 — Caracterização Dimensional e Física dos Corpos de Prova de lã de ovelha

Lã de ovelha						
CP	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)
1	4,9	4,6	1,5	0,6404	33,81	0,0189
2	5,0	4,5	1,5	0,7109	33,75	0,0211
3	5,0	4,5	1,5	0,7718	33,75	0,0229
4	5,0	4,6	1,5	0,7745	34,50	0,0224
5	5,0	4,5	1,5	0,6212	33,75	0,0184
Média	4,98	4,54	1,5	0,7038	34,05	0,0207

Tabela 7 — Caracterização Dimensional e Física dos Corpos de Prova de lã de PET

Lã de PET						
CP	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)
1	4,8	4,5	1,5	1,1646	32,40	0,03594
2	5,0	4,3	1,5	1,2377	32,25	0,03838
3	5,0	4,5	1,5	1,2046	33,75	0,03569
4	4,8	4,5	1,5	1,2710	32,40	0,03923
5	5,0	4,5	1,5	1,1955	33,75	0,03542
Média	4,92	4,46	1,5	1,2149	32,91	0,03693

3.3 Determinação da condutividade térmica (k)

Para determinar o valor experimental da condutividade térmica (k) dos materiais (equação 7), foi necessário descobrir a potência térmica (P) fornecida pela resistência elétrica utilizada.

O método adotado foi a medição indireta da potência, utilizando o princípio da potência elétrica:

$$P = V \cdot I$$

Onde a potência elétrica é determinada pela multiplicação da tensão (V) e da corrente (I). A medição foi realizada utilizando três multímetros, conforme ilustrado na Figura 15.

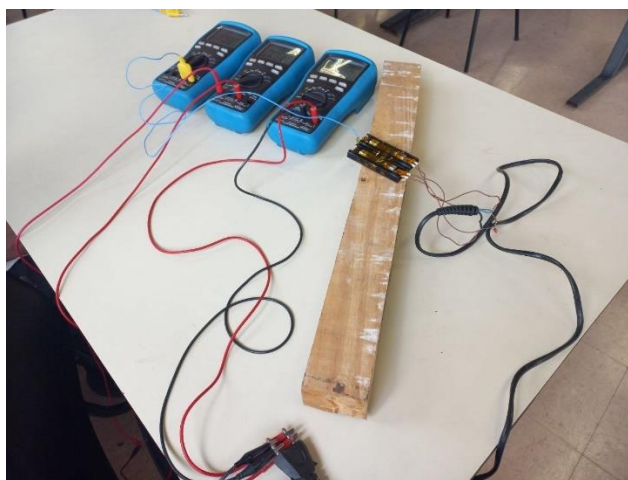


Figura 15 — Visão geral da medição da tensão e corrente da resistência utilizada.

Os valores obtidos foram de $V = 128,5$ e $I = 0,3$ A.

Calculando a potência elétrica, obtemos:

$$P = 128,5 \cdot 0,3 = 38,55 \text{ W}$$

Entretanto, o valor obtido é muito alto, e ao utilizar 38,55 W na Lei de Fourier para calcular o k experimental, o resultado é incoerente e excessivamente alto para qualquer material isolante.

A discrepância ocorreu porque o valor encontrado corresponde a potência elétrica total, e não a potência elétrica útil (P_{util}) que atravessou a amostra.

Dada a impossibilidade de isolar e medir com precisão a potência térmica útil conduzida, foi necessário substituir o valor de k obtido experimentalmente pelo valor nominal da literatura.

4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O presente capítulo destina-se a apresentar, analisar e discutir os resultados obtidos a partir da metodologia experimental definida na seção anterior. Conforme o objetivo principal deste trabalho, a análise se concentra na comparação da taxa de transferência de calor dos materiais estudados.

4.1 Determinação do valor de k

Conforme detalhado na seção 3.1.3, a potência térmica útil não pode ser obtida, resultando em um valor incoerente de condutividade térmica (k). Desta forma, para que a análise de transferência de calor por condução fosse viável, foi necessário recorrer ao método de correlação pela densidade. Conforme abordado na fundamentação teórica (seção 2.2.2), a condutividade térmica é altamente dependente da densidade do material, portanto, a densidade média obtida experimentalmente para cada corpo de prova foi utilizada para selecionar o valor de k mais representativo dentro da faixa nominal estabelecido pela literatura.

Conforme a tabela 8, podemos definir os valores de k para cada material estudado, utilizando a densidade média experimental como parâmetro de correlação. Para a lã de rocha, que possui o valor de densidade média experimental próximo do valor mínimo, será utilizado $k = 0,033 \text{ W}/(m.K)$. Para a lã de vidro, que assim como a lã de rocha, possui o valor de densidade média experimental próximo do valor mínimo, será adotado $k = 0,031 \text{ W}/(m.K)$. A lã de ovelha apresenta densidade média experimental próximo ao valor máximo, logo será utilizado $k = 0,054 \text{ W}/(m.K)$. A lã de PET apresenta densidade média experimental entre os valores mínimo e máximo da literatura, logo, será utilizado o valor médio de $k = 0,036 \text{ W}/(m.K)$.

Tabela 8 — Correlação da densidade média experimental com as faixas nominais de condutividade térmica (k)

Material	Densidade média experimental (kg/m ³)	Faixa de densidade (literatura) (kg/m ³)	Condutividade térmica (k) (W/m.k)
Lã de rocha	63,88	40-200	0,033-0,040
Lã de vidro	19,58	15-75	0,031-0,037
Lã de ovelha	20,67	10-25	0,038-0,054
Lã de PET	36,93	15-60	0,034-0,039

(Fonte: Adaptado de Gil e Pisani, 2024)

4.2 Apresentação geral dos resultados

Os resultados obtidos a partir do aparato experimental, focado na estabilidade térmica de cada material será introduzido através de gráficos, que ilustram a temperatura e o tempo que cada material atingiu a saturação, junto de uma tabela que resume os dados obtidos. Os dados brutos serão apresentados no Apêndice.

Gráfico 1 — Resultado dos cinco corpos de prova de lã de rocha

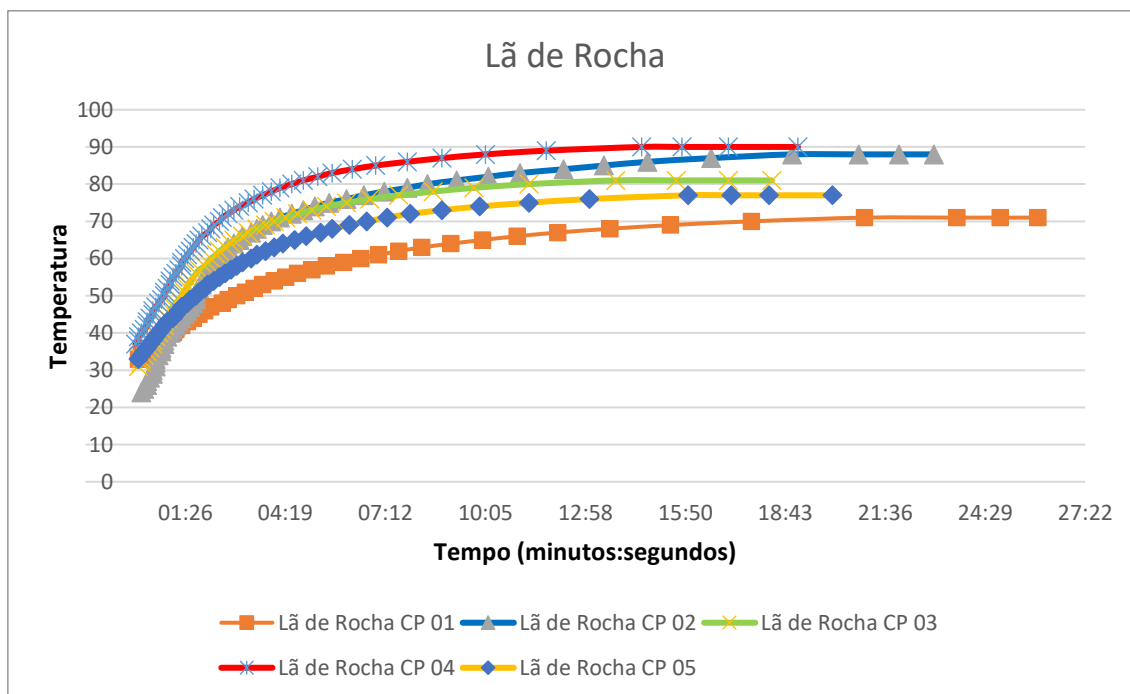


Tabela 9 — Dados de saturação de cada corpo de prova de lâ de rocha.

Lã de rocha		
CP	Temperatura de saturação, C°	Tempo até atingir a saturação (min:seg)
1	71	20:58,0
2	88	18:54,9
3	81	13:49,8
4	90	14:33,7
5	77	15:54,1

Os resultados obtidos para a lâ de rocha demonstram que, apesar de o método de ensaio ter apresentado consistência na subida de temperatura, a tabela 9 aponta uma dispersão significativa na performance das amostras. A temperatura de saturação varia 19°C entre o CP 1 em 71°C e o CP 4 em 90°C. Além de apresentar uma variação no tempo para atingir a saturação.

Apesar da dispersão, a subida de temperatura constante para todos os corpos de prova válida a consistência do método de ensaio, indicando que a dispersão dos resultados é, possivelmente, por conta da não-homogeneidade da lâ de rocha.

Gráfico 2 — Resultado dos cinco corpos de prova de lã de vidro

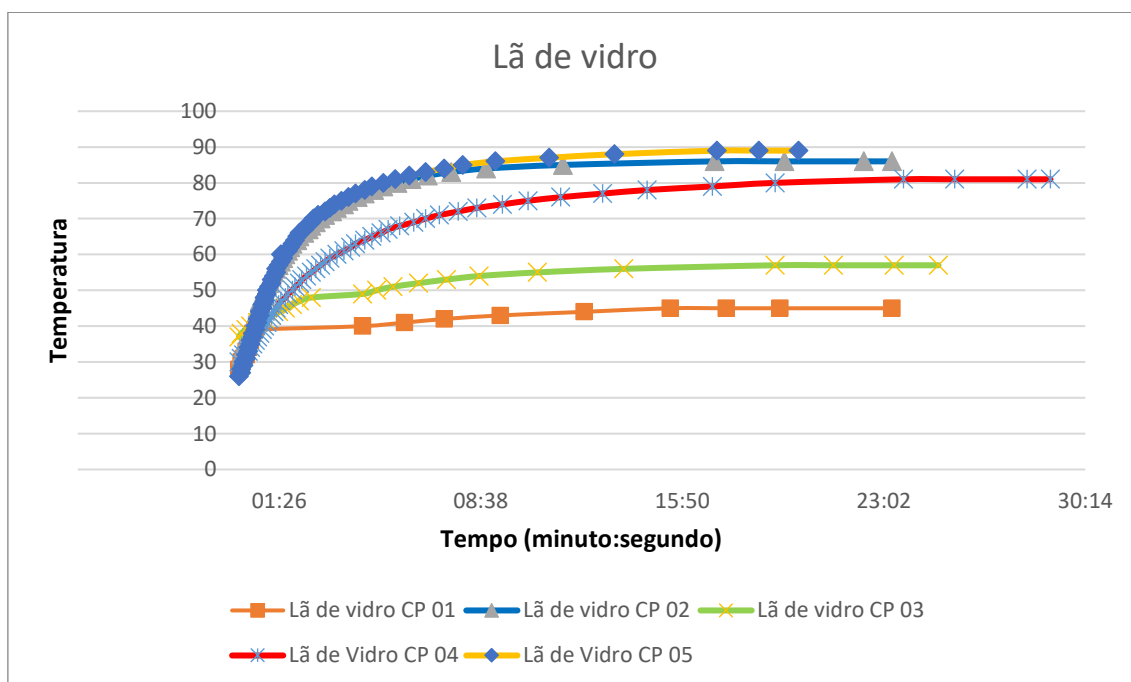


Tabela 10 — Dados de saturação de cada corpo de prova de lã de vidro.

Lã de vidro		
CP	Temperatura de saturação, C°	Tempo até atingir a saturação (min:seg)
1	45	15:26,8
2	86	17:00,8
3	57	19:10,7
4	81	23:43,2
5	89	17:04,0

Como é possível observar tanto no gráfico 2 quanto na tabela 10, os corpos de prova 1 e 3, apresentam valor de saturação anormalmente baixo em comparação com os demais corpos de prova que estão na faixa dos 80°C. Apesar desses CPs apresentarem os menores valores de densidade, e em teoria, a baixa densidade poder levar a um comportamento atípico, de forma analítica, os valores de saturação encontrados são muito baixos e incoerentes com o *setup* experimental, indicando que houve alguma falha de execução, como mau

contato ou perda excessiva de calor lateral. Portanto, os corpos de prova 1 e 3 serão descartados da análise.

Apesar da diferença no tempo para atingir o regime permanente, os CPs 2, 4 e 5 apresentaram saturação de temperaturas próximas e subida de temperatura constante.

Gráfico 3 — Resultado dos cinco corpos de prova de lã de ovelha

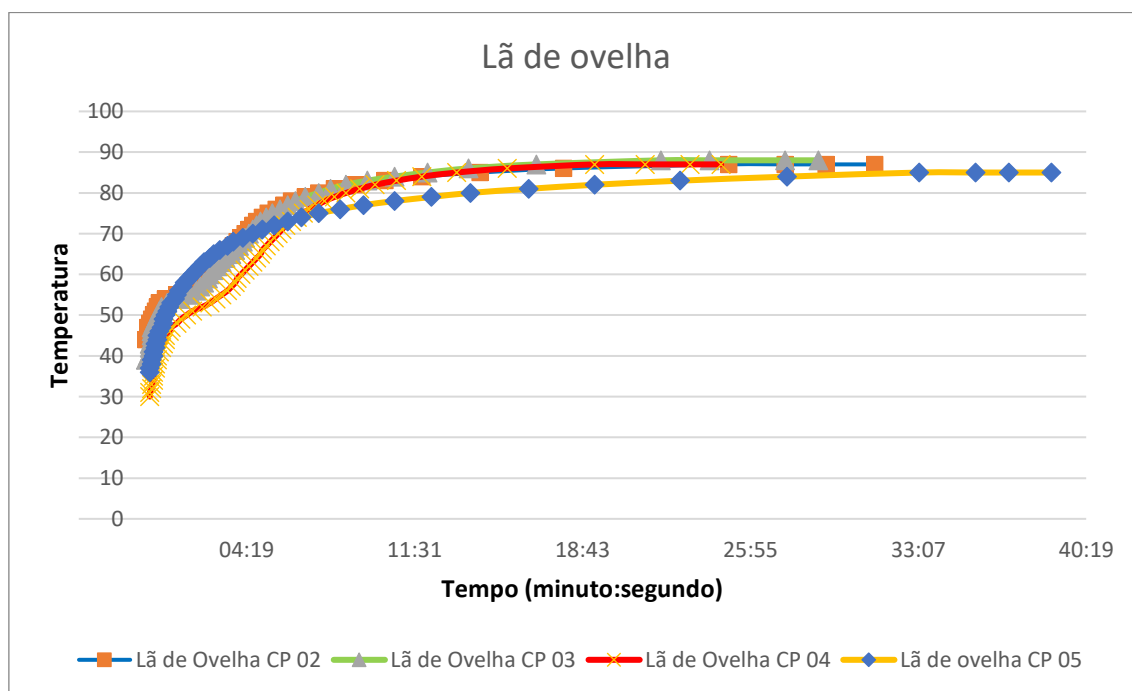


Tabela 11 — Dados de saturação de cada corpo de prova de lã de ovelha

Lã de ovelha		
CP	Temperatura de saturação, C°	Tempo até atingir a saturação (min:seg)
1	Descartado	Descartado
2	87	25:00,9
3	88	22:06,2
4	87	19:16,6
5	85	33:08,0

Como indicado na tabela 11, o CP 1 foi imediatamente descartado por motivos de falha de execução.

Apesar da grande diferença de tempo para atingir regime permanente, cerca de 11 minutos entre o valor mais baixo e mais alto, os quatro corpos de prova válidos

apresentaram um resultado muito satisfatório, com temperaturas de saturação muito próximas umas das outras (85°C e 88°C). O gráfico 3 confirma a consistência da temperatura de saturação para o conjunto válido.

Gráfico 4 — Resultado dos cinco corpos de prova de lã de PET

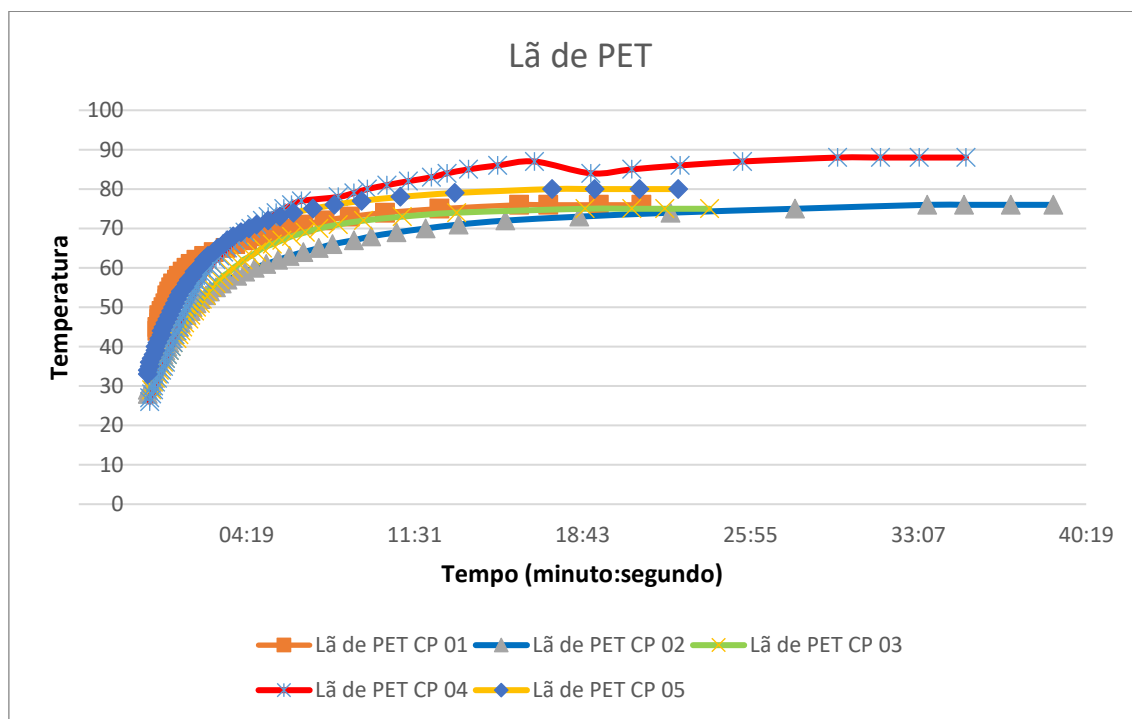


Tabela 12 — Dados de saturação de cada corpo de prova de lã de PET

Lã de PET		
CP	Temperatura de saturação, C°	Tempo até atingir a saturação (min:seg)
1	76	15:59,7
2	76	33:28,1
3	75	18:49,6
4	88	29:39,0
5	80	17:25,6

Como é possível observar no gráfico 4, o corpo de prova 4 não apresenta uma subida constante, em certo momento, é possível notar que a temperatura caiu e voltou a subir novamente. Isso ocorre por conta de uma falha de execução, logo o CP 4 será descartado.

Os corpos de prova válidos, CP 1, 2, 3 e 5, apresentam temperatura de saturação próximas umas das outras, variando apenas 5°C da menor para a menor

temperatura. Apesar disso, é possível notar na tabela 12 uma variação muito grande de temperatura, variando mais de 15 minutos do menor para o maior tempo.

Ao realizar uma breve análise dos quatro materiais estudados, podemos definir que existe uma incógnita em comum em todos os materiais: a existência da diferença de tempo até atingir o regime permanente. Existem algumas explicações para tal:

- não-homogeneidade na orientação das fibras, o calor conduz melhor paralelamente à fibra do que perpendicularmente;
- variação da densidade;
- variação de contato com a fonte de calor.

Analisando que existiram alguns corpos de prova descartados devido à falha de execução, e que todos os corpos de prova restantes possuem densidades semelhantes, a explicação mais plausível para a variação de tempo é a variação de contato com a fonte de calor. Podemos concluir que alguns corpos de prova tiveram um contato ligeiramente melhor com a resistência do que os outros, resultando em uma maior potência térmica útil (Q_{util}) sendo absorvida. Isso permite que a amostra estabilize mais rapidamente.

4.3 Cálculo da potência de condução (P_{con})

O cálculo da potência de condução é importante para o objetivo deste estudo pois através dos resultados obtidos, é possível observar de forma numérica qual dos quatro materiais estudados apresentam melhor desempenho.

A fórmula utilizada para calcular a potência térmica é diretamente derivada da Lei de Fourier:

$$P_{con} = \frac{Q}{t} = k \cdot A \frac{T_h - T_c}{L}$$

Onde:

$\frac{Q}{t}$ é o calor por unidade de tempo (potência térmica);

k é a condutividade do material;

A é a área em metros;

$T_h - T_c$ é a diferença de temperatura;

L é a espessura em metros.

Para a análise final, a resistência térmica (R) (equação 6) será calculada nessa seção.

4.3.1 Potência de condução (P_{con}) da lã de rocha

Como justificado na seção 4.1, o valor de condutividade térmica (k) utilizado será o valor nominal encontrado na literatura, $k = 0,033 \text{ W/(m.K)}$.

Corpo de prova 1:

$$P_{con} = 0,033 \cdot 0,0023 \frac{223-71}{0,015} = 0,76912 \text{ W}$$

Corpo de prova 2:

$$P_{con} = 0,033 \cdot 0,0023 \frac{222 - 88}{0,015} = 0,67804 \text{ W}$$

Corpo de prova 3:

$$P_{con} = 0,033 \cdot 0,0022 \frac{222 - 81}{0,015} = 0,68244 \text{ W}$$

Corpo de prova 4:

$$P_{con} = 0,033 \cdot 0,0022 \frac{222 - 90}{0,015} = 0,63888 \text{ W}$$

Corpo de prova 5:

$$P_{con} = 0,033 \cdot 0,0022 \frac{222 - 77}{0,015} = 0,7018 \text{ W}$$

Valor médio:

$$\frac{0,76912 + 0,67804 + 0,68244 + 0,63888 + 0,7018}{5} = 0,694056 \text{ W}$$

Desvio padrão:

CP	P (w)	$d^2 = (P_i - \bar{P})^2$	d^2
1	0,76912	$(0,7612 - 0,694056)^2$	0,005634604
2	0,67804	$(0,67804 - 0,694056)^2$	0,000256512
3	0,68244	$(0,68244 - 0,694056)^2$	0,000134931
4	0,63888	$(0,63888 - 0,694056)^2$	0,003044391
5	0,70180	$(0,70180 - 0,694056)^2$	0,000059970
média ($\bar{P}$)	0,694056	$\sum d^2 =$	0,009130408

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,009130408}{(5 - 1)}} = 0,047776585 \text{ W} \cong 0,05 \text{ W}$$

Logo, a potência de condução da lã de rocha é: $P_{lã \text{ de rocha}} = (0,70 \pm 0,05) \text{ W}$.

Resistencia térmica (R):

$$R = \frac{0,015}{0,033} = 0,4545 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

4.3.2 Potência de condução (P_{con}) da lâ de vidro

Como justificado na seção 4.1, o valor de condutividade térmica (k) utilizado será o valor nominal encontrado na literatura, $k = 0,031 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Corpo de prova 2:

$$P_{con} = 0,031 \cdot 0,0022 \frac{224 - 86}{0,015} = 0,62744 \text{ W}$$

Corpo de prova 4:

$$P_{con} = 0,031 \cdot 0,0023 \frac{225 - 81}{0,015} = 0,68448 \text{ W}$$

Corpo de prova 5:

$$P_{con} = 0,031 \cdot 0,0022 \frac{226 - 89}{0,015} = 0,62289 \text{ W}$$

Valor médio:

$$\frac{0,62744 + 0,68448 + 0,62289}{3} = 0,64494 \text{ W}$$

Desvio padrão:

CP	P (w)	$d^2 = (P_i - \bar{P})^2$	d^2
2	0,62744	$(0,62744 - 0,64494)^2$	0,00030613
4	0,68448	$(0,68448 - 0,64494)^2$	0,00156368
5	0,62289	$(0,62289 - 0,64494)^2$	0,00048606
média ($\bar{P}$)	0,64494	$\sum d^2 =$	0,00235586

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,00235586}{(3-1)}} = 0,03432 \text{ W} \cong 0,03 \text{ W}$$

Logo, a potência de condução da lã de vidro é: $P_{lã \text{ de vidro}} = (0,64 \pm 0,03) \text{ W}$.

Resistencia térmica (R):

$$R = \frac{0,015}{0,031} = 0,4839 \text{ m}^2 \cdot \text{K/}$$

4.3.3 Potência de condução (P_{con}) da lã de ovelha

Como justificado na seção 4.1, o valor de condutividade térmica (k) utilizado será o valor nominal encontrado na literatura, $k = 0,054 \text{ W/(m.K)}$.

Corpo de prova 2:

$$P_{con} = 0,054 \cdot 0,0022 \frac{228 - 87}{0,015} = 1,11672 \text{ W}$$

Corpo de prova 3:

$$P_{con} = 0,054 \cdot 0,0022 \frac{229 - 88}{0,015} = 1,11672 \text{ W}$$

Corpo de prova 4:

$$P_{con} = 0,054 \cdot 0,0023 \frac{228 - 87}{0,015} = 1,16748 \text{ W}$$

Corpo de prova 5:

$$P_{con} = 0,054 \cdot 0,0022 \frac{228 - 85}{0,015} = 1,13256 \text{ W}$$

Valor Médio:

$$\frac{1,11672 + 1,11672 + 1,16748 + 1,13256}{4} = 1,13337 \text{ W}$$

Desvio padrão:

CP	P (w)	$d^2 = (P_i - \bar{P})^2$	d^2
2	1,11672	$(1,11672 - 1,13337)^2$	0,000277223
3	1,11672	$(1,11672 - 1,13337)^2$	0,000277223
4	1,16748	$(1,16748 - 1,13337)^2$	0,001163492
5	1,13256	$(1,13256 - 1,13337)^2$	6,561E-07
média ($\bar{P}$)	1,13337	$\sum d^2 =$	0,001718593

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,001718593}{(4 - 1)}} = 0,0239346 \text{ W} \cong 0,02 \text{ W}$$

Logo, a potência de condução da lã de ovelha é: $P_{\text{lã de ovelha}} = (1,13 \pm 0,02) \text{ W}$.

Resistencia térmica (R):

$$R = \frac{0,015}{0,054} = 0,2778 \text{ m}^2 \cdot \text{K/}$$

4.3.4 Potência de condução (P_{con}) da lã de PET

Como justificado na seção 4.1, o valor de condutividade térmica (k) utilizado será o valor nominal encontrado na literatura, $k = 0,036 \text{ W/(m.K)}$.

Corpo de prova 1:

$$P_{con} = 0,036 \cdot 0,0022 \frac{228 - 76}{0,015} = 0,80256 \text{ W}$$

Corpo de prova 2:

$$P_{con} = 0,036 \cdot 0,0021 \frac{223 - 76}{0,015} = 0,74088 \text{ W}$$

Corpo de prova 3:

$$P_{con} = 0,036 \cdot 0,0022 \frac{222 - 75}{0,015} = 0,77616 \text{ W}$$

Corpo de prova 5:

$$P_{con} = 0,036 \cdot 0,0022 \frac{228 - 80}{0,015} = 0,78144 \text{ W}$$

Valor médio:

$$\frac{0,80256 + 0,74088 + 0,77616 + 0,78144}{4} = 0,77526 \text{ W}$$

Desvio padrão:

CP	P (w)	$d^2 = (P_i - \bar{P})^2$	d^2
1	0,80256	$(0,80256 - 0,77526)^2$	0,00074529
2	0,74088	$(0,74088 - 0,77526)^2$	0,001181984
3	0,77616	$(0,77616 - 0,77526)^2$	8,1E-07
5	0,78144	$(0,78144 - 0,77526)^2$	3,81924E-05
média ($\bar{P}$)	0,77526	$\sum d^2 =$	0,001966277

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,001966277}{(4 - 1)}} = 0,025601282 \text{ W} \cong 0,02 \text{ W}$$

Logo, a potência de condução da lâ de PET é: $P_{lâ \text{ de PET}} = (0,77 \pm 0,02) \text{ W}$.

Resistencia térmica (R):

$$R = \frac{0,015}{0,036} = 0,4167 \text{ m}^2 \cdot \text{K/}$$

4.4 Análise comparativa final e discussão de desempenho

Esta seção consolida os resultados obtidos na seção anterior para determinar o desempenho relativo de cada material. Para facilitar a comparação, os resultados de cada material estão consolidados na tabela 13.

Tabela 13 — Consolidação dos resultados de desempenho térmico

Material	k nominal (W/m.K)	Resistência térmica (R) (m ² .K/W)	Potência média (P_{con}), (W)	Desvio padrão (σ)($\pm W$)
Lã de rocha	0,033	0,4545	0,70	$\pm 0,05$
Lã de vidro	0,031	0,4839	0,64	$\pm 0,03$
Lã de ovelha	0,054	0,2778	1,13	$\pm 0,02$
Lã de PET	0,036	0,4167	0,77	$\pm 0,02$

Fonte: O Autor.

A análise direta dos resultados mostra que o melhor isolante térmico entre os materiais estudados é aquele com a maior resistência térmica (R) e a menor potência de condução (P_{con}).

Com base nesses requisitos, a lã de vidro é o material que apresentou o melhor desempenho dentro os quatro materiais analisados. A lã de rocha e a lã de PET apresentaram desempenho regulares, podendo ser classificados como isolantes intermediários. O pior isolante analisado foi a lã de ovelha que apresentou o pior desempenho, com a menor resistência térmica e maior potência de condução.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou comparativamente a taxa de transferência de calor e a eficiência térmica de diferentes materiais isolantes, cumprindo integralmente o objetivo geral de identificar o material com menor condutividade térmica. Os objetivos específicos foram atingidos através da metodologia experimental e da análise de correlação pela densidade.

A avaliação final classificou os materiais pela sua eficiência, identificando a lã de vidro como o isolante de melhor desempenho. Esse material apresentou a maior resistência térmica ($0,4839 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$) e, conseqüentemente, a menor potência de condução ($0,64 \pm 0,03 \text{ W}$), confirmando a eficácia do seu baixo valor de k em minimizar a troca de calor. A lã de rocha se posicionou em segundo lugar, seguido da lã de PET que apresentou um desempenho satisfatório como uma alternativa sustentável. A lã de ovelha apresentou o pior desempenho dentre os materiais estudados com a menor resistência térmica ($0,2778 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$) e o maior valor de potência de condução ($1,13 \pm 0,02 \text{ W}$), resultando em um desempenho insatisfatório.

Em suma, a escolha de materiais que apresentam uma baixa densidade, e conseqüentemente um baixo valor de k , é a estratégia mais eficaz para reduzir o consumo energético e os impactos ambientais em edificações, conforme estipulado pela NBR 15575.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a utilização de métodos avançados de medição de potência térmica útil, como o método de calorimetria de placa, para validar os valores nominais de k , e conseguir resultados mais precisos.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575-4: Edificações habitacionais — Desempenho — Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575-5: Edificações habitacionais — Desempenho — Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BORGES, Raphael Melo. Análise de desempenho térmico e acústico de unidades habitacionais construídas no Conjunto Habitacional Benjamin José Cardoso em Viçosa-MG. Viçosa, 2013.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CATAI, Rodrigo Eduardo; PENTEADO, André Padilha; DALBELLO, Paula Ferraretto. Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico. Paraná, 2006.

CATUNDA, Carlos Eduardo. Transferência de calor. 2016. Disponível em: <http://www.cefet-rj.br/index.php/demec-downloads>. Acesso em: 18 nov. 2025.

DIAS, Carine Ott; MAZZURANA, Milena Mori; PIOVESAN, Tenile Rieger. Lã de PET como material alternativo em prol do desempenho térmico de edificações. Ijuí-RS, 2017.

EL-SABA, Muhammad. Transport of information-carriers in semiconductors and nanodevices. Ain-Shams University, Egypt, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/345751249_Phonon_Transport_and_Heat_Flow. Acesso em: 3 out. 2025.

GIL, Erica; PISANI, Maria Augusta Justi. Lã de ovelha como isolante no sistema construtivo light wood frame. São Paulo, set. 2024.

HEWITT, Paul G. Física Conceitual. Tradução de Trieste Freire Ricci. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9251: Thermal insulation — Heat transfer conditions and properties of materials — Vocabulary. 1st ed. Geneva, 1987.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. Principles of Heat Transfer. 7. ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.

LU, Guozhong. Study on the properties of rock wool for external thermal insulation of buildings under the soaking and hot & humid conditions. Journal of Physics: Conference Series, v. 1622, p. 012006, 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1622/1/012006>. Acesso em: 18 nov. 2025.

OLIVEIRA, Santiago del Rio. Condução térmica: notas de aula (PEM 00135). 2. versão. Bauru, SP: UNESP, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, jun. 2017.

ORDENES, Martin; LAMBERTS, Roberto; GÜTHS, Saulo. Transferência de calor na envolvente da edificação. Florianópolis, 2008.

RITCHIE, Hannah. Air conditioning causes around 3% of greenhouse gas emissions. How will this change in the future? Our World in Data, 2024. Disponível em: <https://ourworldindata.org/air-conditioning-causes-around-greenhouse-gas-emissions-will-change-future>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SILVA, Filipe Manuel Fernandes. Estudo de materiais de isolamento térmico inovadores. Porto: Universidade do Porto, 2013.

SPANNENBERG, Mariane Gampert. Análise de desempenho térmico, acústico e lumínico em habitação de interesse social: estudo de caso em Marau-RS. Florianópolis, 2006.

TRISOFT. Manta de pet substitui lã de rocha e lã de vidro com eficiência em isolamento térmico e conforto acústico. 2017. Disponível em: <<https://www.trisoft.com.br/manta-depet-substitui-la-de-rocha-e-la-de-vidro/>>.

Acesso em: 18 nov. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Assessment of exposure to indoor air pollutants. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 1997. (WHO Regional Publications, European Series, No. 78).

APÊNDICE

Dados brutos do ensaio experimental

Este apêndice contém os dados brutos de medição de Tempo e Temperatura de saturação de todos os Corpos de Prova (CPs) utilizados no experimento, conforme a metodologia detalhada no Capítulo 3. Estes dados suportam a análise de estabilidade térmica apresentada na Seção 4.2.

Tabela A.1 — Dados brutos Lã de rocha CP 1

Lã de Rocha CP 01		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
212	33	00:02,6
212	34	00:10,6
213	35	00:19,6
213	36	00:28,8
214	37	00:36,0
214	38	00:45,4
215	39	00:55,0
215	40	01:03,0
216	41	01:11,3
216	42	01:21,5
217	43	01:31,0
217	44	01:40,4
217	45	01:49,8
218	46	02:01,1
218	47	02:11,4
219	48	02:28,8
219	49	02:42,2
219	50	02:55,7
219	51	03:10,4
220	52	03:26,6
220	53	03:42,4
220	54	04:01,5
220	55	04:21,9
221	56	04:41,8
221	57	05:05,7
221	58	05:30,3
221	59	05:58,5
221	60	06:29,2
222	61	07:02,3
222	62	07:34,6

222	63	08:17,4
222	64	09:03,8
222	65	09:59,9
222	66	11:00,5
223	67	12:12,3
223	68	13:38,9
223	69	15:27,4
223	70	17:43,7
223	71	20:58,0
223	71	23:41,6
223	71	24:52,5
223	71	26:00,0
Permaneceu em 71°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.2 — Dados brutos Lã de rocha CP 2

Lã de Rocha CP 02		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
205	24	00:07,9
205	25	00:14,2
205	26	00:19,3
205	27	00:22,4
205	28	00:25,2
205	29	00:28,2
205	30	00:30,7
205	31	00:33,3
205	32	00:35,7
205	33	00:37,0
206	34	00:40,6
206	35	00:42,9
206	36	00:45,8
206	37	00:49,0
207	38	00:52,2
207	39	00:56,0
208	40	01:00,3
208	41	01:05,0
208	42	01:09,8
209	43	01:15,9
210	44	01:21,3
210	45	01:27,0

210	46	01:31,9
211	47	01:35,7
211	48	01:39,4
211	49	01:42,7
211	50	01:45,0
212	51	01:47,2
212	52	01:49,7
212	53	01:52,6
212	54	01:56,1
213	55	01:59,7
213	56	02:03,6
213	57	02:07,7
213	58	02:12,4
213	59	02:17,6
214	60	02:22,8
214	61	02:28,5
214	62	02:34,8
215	63	02:42,3
215	64	02:49,3
215	65	02:57,7
215	66	03:07,0
216	67	03:17,6
216	68	03:28,8
216	69	03:42,1
217	70	03:55,5
217	71	04:11,6
217	72	04:29,1
218	73	04:48,0
218	74	05:10,0
218	75	05:34,6
219	76	06:04,3
219	77	06:33,6
220	78	07:07,6
220	79	07:49,2
220	80	08:26,4
220	81	09:15,3
221	82	10:09,3
221	83	11:05,6
221	84	12:18,3
221	85	13:28,4
221	86	14:47,2
222	87	16:33,8
222	88	18:54,9

222	88	20:50,8
222	88	22:01,7
222	88	23:00,0
Permaneceu em 88°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.3 — Dados brutos Lã de rocha CP 3

Lã de Rocha CP 03		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
212	31	00:03,7
212	32	00:09,1
212	33	00:12,5
212	34	00:16,2
212	35	00:20,1
212	36	00:24,5
212	37	00:28,4
213	38	00:32,1
213	39	00:36,4
213	40	00:40,3
213	41	00:44,0
214	42	00:47,7
214	43	00:51,5
214	44	00:55,4
215	45	00:58,8
215	46	01:02,3
215	47	01:05,9
215	48	01:11,5
216	49	01:16,0
216	50	01:19,0
216	51	01:23,5
216	52	01:27,8
217	53	01:32,3
217	54	01:36,8
217	55	01:41,6
217	56	01:47,1
218	57	01:51,9
218	58	01:57,7
218	59	02:04,1
218	60	02:10,8
218	61	02:17,8
219	62	02:25,3
219	63	02:33,9

219	64	02:42,5
219	65	02:52,2
220	66	03:03,0
220	67	03:14,8
220	68	03:29,0
220	69	03:43,7
220	70	03:59,8
220	71	04:18,1
221	72	04:40,9
221	73	05:03,9
221	74	05:32,2
221	75	06:04,4
221	76	06:45,7
221	77	07:35,2
222	78	08:33,8
222	79	09:46,8
222	80	11:19,9
222	81	13:49,8
222	81	15:32,6
222	81	17:05,4
222	81	18:19,0
Permaneceu em 81°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.4 — Dados brutos Lã de rocha CP 4

Lã de Rocha CP 04		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
210	37	00:01,6
210	38	00:04,5
210	39	00:07,5
210	40	00:11,4
210	41	00:14,7
210	42	00:18,2
210	43	00:22,3
210	44	00:25,6
211	45	00:29,0
211	46	00:32,4
211	47	00:36,2
212	48	00:40,9
212	49	00:44,3
212	50	00:47,7
213	51	00:51,5

213	52	00:54,4
213	53	00:58,2
214	54	01:01,8
214	55	01:05,7
215	56	01:09,7
215	57	01:13,5
215	58	01:17,5
216	59	01:21,6
216	60	01:26,1
216	61	01:30,8
216	62	01:35,3
217	63	01:40,3
217	64	01:45,3
217	65	01:50,9
217	66	01:56,5
218	67	02:02,9
218	68	02:08,7
218	69	02:16,9
218	70	02:23,7
219	71	02:32,2
219	72	02:40,5
219	73	02:51,0
219	74	03:01,5
220	75	03:13,1
220	76	03:25,4
220	77	03:39,7
220	78	03:54,6
220	79	04:11,1
220	80	04:29,2
220	81	04:51,5
221	82	05:14,8
221	83	05:41,4
221	84	06:15,0
221	85	06:55,7
221	86	07:48,2
221	87	08:51,2
222	88	10:03,2
222	89	11:51,9
222	90	14:33,7
222	90	15:44,0
222	90	17:05,7
222	90	19:02,6
Permaneceu em 90°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.5 — Dados brutos Lã de rocha CP 5

Lã de Rocha CP 05		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
211	33	00:06,6
211	34	00:09,6
211	35	00:15,0
211	36	00:21,5
211	37	00:26,1
212	38	00:31,4
212	39	00:36,5
212	40	00:41,8
213	41	00:46,8
214	42	00:52,0
214	43	00:57,1
215	44	01:03,0
215	45	01:07,6
215	46	01:13,8
216	47	01:19,5
216	48	01:29,2
217	49	01:36,4
217	50	01:43,2
217	51	01:49,9
218	52	01:57,7
218	53	02:06,6
218	54	02:14,4
219	55	02:23,6
219	56	02:32,6
219	57	02:43,3
219	58	02:54,1
219	59	03:05,3
220	60	03:18,1
220	61	03:32,0
220	62	03:46,0
220	63	04:00,5
220	64	04:16,7
221	65	04:35,6
221	66	04:55,4
221	67	05:17,9
221	68	05:41,9
221	69	06:09,4
221	70	06:39,6
221	71	07:16,5
221	72	07:57,0
222	73	08:50,0

222	74	09:55,7
222	75	11:21,8
222	76	13:04,2
222	77	15:54,1
222	77	17:08,1
222	77	18:13,6
222	77	20:04,5
Permaneceu em 77°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.6 — Dados brutos Lã de vidro CP 1

Lã de vidro CP 01		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
212	28	00:00,7
212	29	00:02,7
213	30	00:06,8
213	31	00:10,3
213	32	00:13,3
213	33	00:16,7
214	34	00:19,2
214	35	00:21,5
214	36	00:22,7
214	37	00:25,1
215	38	00:29,4
215	39	00:37,2
221	40	04:23,8
221	41	05:55,0
222	42	07:19,6
222	43	09:20,1
222	44	12:18,7
222	45	15:26,8
222	45	17:26,2
222	45	19:17,9
222	45	23:21,5
Permaneceu em 45°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.7 — Dados brutos Lã de vidro CP 2

Lã de vidro CP 02		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
214	32	00:05,2
214	33	00:08,1
214	34	00:10,3
214	35	00:13,8
214	36	00:16,6
215	37	00:19,3
215	38	00:22,5
215	39	00:25,1
215	40	00:27,5
216	41	00:29,8
216	42	00:32,6
216	43	00:35,0
216	44	00:37,5
216	45	00:39,8
217	46	00:42,6
217	47	00:45,6
217	48	00:49,5
217	49	00:53,9
218	50	00:55,9
218	51	00:59,0
218	52	01:02,7
218	53	01:06,2
219	54	01:10,0
219	55	01:14,2
219	56	01:18,9
219	57	01:23,2
219	58	01:28,1
219	59	01:33,4
220	60	01:38,9
220	61	01:44,7
220	62	01:50,8
221	63	01:57,4
221	64	02:04,2
221	65	02:11,4
221	66	02:19,9
221	67	02:28,1
222	68	02:36,7
222	69	02:45,6
222	70	02:55,5
222	71	03:06,3
222	72	03:17,8

222	73	03:30,8
222	74	03:43,0
223	75	03:57,0
223	76	04:12,9
223	77	04:30,9
223	78	04:50,3
223	79	05:11,5
223	80	05:37,5
223	81	06:09,0
224	82	06:42,6
224	83	07:34,3
224	84	08:51,3
224	85	11:37,2
224	86	17:00,8
224	86	19:28,4
224	86	22:18,2
224	86	23:18,6
Permaneceu em 86°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.8 — Dados brutos Lã de vidro CP 3

Lã de vidro CP 03		
213	37	00:01,3
213	38	00:06,8
213	39	00:13,5
214	40	00:24,1
214	41	00:38,6
217	42	00:55,0
218	43	01:09,9
219	44	01:25,0
220	45	01:39,7
220	46	01:54,3
221	47	02:08,5
222	48	02:32,9
223	49	04:24,3
224	50	04:54,9
224	51	05:32,2
224	52	06:24,3
224	53	07:23,5
224	54	08:35,2
225	55	10:38,7
225	56	13:46,4
225	57	19:10,7
225	57	21:14,4
225	57	23:22,6
225	57	25:00,0
Permaneceu em 57°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.9 — Dados brutos Lã de vidro CP 4

Lã de vidro CP 04		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
212	30	00:01,4
212	31	00:06,8
212	32	00:12,3
212	33	00:17,6
212	34	00:23,2
213	35	00:29,1
213	36	00:34,3
214	37	00:40,4
215	38	00:45,4
215	39	00:50,0
215	40	00:55,2
216	41	00:59,5
216	42	01:04,4
216	43	01:09,1
217	44	01:14,2
217	45	01:19,0
217	46	01:24,7
218	47	01:30,4
218	48	01:38,7
218	49	01:45,7
219	50	01:53,2
219	51	02:00,2
219	52	02:08,1
220	53	02:16,3
220	54	02:25,0
220	55	02:35,7
220	56	02:44,5
221	57	02:54,3
221	58	03:04,9
221	59	03:16,2
221	60	03:29,6
222	61	03:42,9
222	62	03:57,5
222	63	04:11,5
222	64	04:28,4
222	65	04:44,8
223	66	05:03,7
223	67	05:22,5
223	68	05:46,6

223	69	06:12,7
223	70	06:40,0
224	71	07:12,2
224	72	07:50,7
224	73	08:31,3
224	74	09:25,6
224	75	10:21,4
224	76	11:32,1
225	77	12:57,6
225	78	14:36,6
225	79	16:56,1
225	80	19:09,0
225	81	23:43,2
225	81	25:33,9
225	81	28:09,3
225	81	29:00,0
Permaneceu em 81°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.10 — Dados brutos Lã de vidro CP 5

Lã de vidro CP 05		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
213	26	00:00,9
213	27	00:03,1
214	28	00:05,6
214	29	00:08,1
215	30	00:11,2
215	31	00:14,3
215	32	00:16,9
215	33	00:19,2
216	34	00:22,2
216	35	00:24,8
216	36	00:27,1
217	37	00:30,0
217	38	00:32,3
217	39	00:34,7
217	40	00:36,9
218	41	00:39,2
218	42	00:42,5
218	43	00:43,8
218	44	00:46,0

219	45	00:48,2
219	46	00:50,6
219	47	00:52,8
220	48	00:57,0
220	49	00:59,5
220	50	01:02,2
220	51	01:05,2
221	52	01:08,0
221	53	01:11,3
221	54	01:14,6
221	55	01:17,9
222	56	01:21,6
222	57	01:25,3
222	58	01:29,8
222	59	01:33,8
223	60	01:29,1
223	61	01:43,3
223	62	01:48,4
223	63	01:53,5
223	64	01:59,4
224	65	02:06,5
224	66	02:12,3
224	67	02:17,8
224	68	02:25,7
225	69	02:33,4
225	70	02:42,3
225	71	02:52,2
225	72	03:02,9
225	73	03:12,6
226	74	03:24,4
226	75	03:38,4
226	76	03:53,6
226	77	04:09,0
226	78	04:28,1
227	79	04:46,6
227	80	05:11,4
227	81	05:34,4
227	82	06:06,6
227	83	06:38,1
227	84	07:19,2
226	85	07:59,9
226	86	09:11,9
226	87	11:05,5
226	88	13:24,4
226	89	17:04,0

226	89	18:34,6
226	89	19:58,4
226	89	21:44,0
Permaneceu em 89°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.11 — Dados brutos Lã de ovelha CP 1

Lã de Ovelha CP 01		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
CORPO DE PROVA DESCARTADO		

Tabela A.12 — Dados brutos Lã de ovelha CP 2

Lã de Ovelha CP 02		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
214	44	00:00,7
215	45	00:03,1
215	46	00:04,3
215	47	00:06,6
215	48	00:10,0
215	49	00:13,4
216	50	00:17,7
216	51	00:22,9
217	52	00:29,5
218	53	00:37,2
220	54	00:52,0
222	55	01:18,0
224	56	01:49,7
224	57	02:08,1
225	58	02:20,3
225	59	02:30,9
225	60	02:40,6
225	61	02:48,8
226	62	02:57,7
226	63	03:06,6
226	64	03:15,1
226	65	03:25,1

226	66	03:34,2
226	67	03:44,7
226	68	03:53,5
227	69	04:03,3
227	70	04:12,5
227	71	04:23,5
227	72	04:34,0
227	73	04:47,1
227	74	04:59,3
227	75	05:16,7
227	76	05:33,0
227	77	05:54,8
227	78	06:16,4
228	79	06:48,8
228	80	07:22,7
228	81	08:06,0
228	82	09:01,9
228	83	10:16,2
228	84	11:49,1
228	85	14:19,8
228	86	17:55,6
228	87	25:00,9
228	87	27:26,0
228	87	29:08,9
228	87	31:14,7
Permaneceu em 87°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.13 — Dados brutos Lã de ovelha CP 3

Lã de Ovelha CP 03		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
214	39	00:01,8
214	40	00:06,0
214	41	00:08,8
214	42	00:11,3
215	43	00:12,2
215	44	00:12,7
215	45	00:13,8
215	46	00:15,4
215	47	00:17,4
216	48	00:21,3
216	49	00:24,5
217	50	00:28,9
217	51	00:33,7
218	52	00:42,3
220	53	00:54,8
222	54	01:28,4
224	55	01:56,8
225	56	02:11,3
225	57	02:20,4
225	58	02:28,8
226	59	02:37,6
226	60	02:45,4
226	61	02:54,5
226	62	03:04,1
227	63	03:14,9
227	64	03:25,5
227	65	03:37,5
227	66	03:48,3
227	67	03:58,3
227	68	04:07,7
227	69	04:16,8
227	70	04:25,0
228	71	04:34,7
228	72	04:45,2
228	73	04:57,1
228	74	05:12,0
228	75	05:26,7
228	76	05:45,0
228	77	06:04,9
228	78	06:26,9

229	79	06:51,2
229	80	07:23,0
229	81	07:57,3
229	82	08:37,3
229	83	09:31,6
229	84	10:37,6
229	85	12:05,0
229	86	13:51,6
229	87	16:43,8
229	88	22:06,2
229	88	24:09,4
229	88	27:27,3
229	88	28:47,5
Permaneceu em 88°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.14 — Dados brutos Lã de ovelha CP 4

Lã de Ovelha CP 04		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
212	30	00:09,6
212	31	00:11,5
212	32	00:13,5
213	33	00:15,8
213	34	00:17,6
213	35	00:19,5
213	36	00:21,3
214	37	00:23,4
214	38	00:26,1
214	39	00:28,6
215	40	00:31,8
215	41	00:34,8
215	42	00:38,6
216	43	00:42,9
217	44	00:48,0
217	45	00:52,4
218	46	00:58,8
218	47	01:04,9
219	48	01:19,0
220	49	01:30,9
221	50	01:44,3
222	51	02:00,5
223	52	02:23,6

224	53	02:42,9
224	54	03:00,0
225	55	03:16,0
225	56	03:27,6
225	57	03:38,4
225	58	03:47,9
225	59	03:56,6
225	60	04:04,8
226	61	04:13,7
226	62	04:23,4
226	63	04:33,2
226	64	04:43,6
226	65	04:52,9
226	66	05:01,9
226	67	05:10,8
226	68	05:19,3
226	69	05:28,2
226	70	05:39,1
226	71	05:51,0
227	72	06:01,6
227	73	06:14,9
227	74	06:28,9
227	75	06:43,9
227	76	07:02,0
227	77	07:19,5
227	78	07:41,3
227	79	08:03,8
227	80	08:34,7
227	81	09:08,1
227	82	09:49,8
227	83	10:44,0
228	84	11:47,6
228	85	13:20,5
228	86	15:31,8
228	87	19:16,6
228	87	21:26,9
228	87	23:21,9
228	87	24:41,6
Permaneceu em 87°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.15 — Dados brutos Lã de ovelha CP 5

Lã de Ovelha CP 05		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
218	36	00:10,8
218	37	00:12,1
218	38	00:14,0
218	39	00:16,2
218	40	00:18,7
218	41	00:21,0
218	42	00:23,5
218	43	00:25,8
218	44	00:28,4
218	45	00:31,3
219	46	00:34,6
219	47	00:37,6
219	48	00:43,2
219	49	00:47,0
220	50	00:51,4
220	51	00:56,2
221	52	01:01,0
221	53	01:06,6
222	54	01:12,9
222	55	01:19,3
222	56	01:25,6
223	57	01:33,2
223	58	01:41,0
223	59	01:49,1
223	60	01:58,5
224	61	02:07,8
224	62	02:18,8
225	63	02:30,0
225	64	02:42,8
225	65	02:56,6
226	66	03:12,1
226	67	03:28,2
226	68	03:47,4
226	69	04:08,2
226	70	04:32,7
226	71	04:58,6
227	72	05:28,5
227	73	06:03,5
227	74	06:40,2
227	75	07:26,0

227	76	08:19,6
227	77	09:22,2
227	78	10:41,3
228	79	12:15,2
228	80	13:55,6
228	81	16:26,5
228	82	19:12,8
228	83	22:54,9
228	84	27:30,7
228	85	33:08,0
228	85	35:36,8
228	85	37:00,6
228	85	38:48,0
Permaneceu em 85°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.16 — Dados brutos Lã de PET CP 1

Lã de PET 01		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
217	44	00:28,2
217	45	00:30,7
217	46	00:33,3
218	47	00:36,1
218	48	00:36,6
218	49	00:42,2
218	50	00:45,3
219	51	00:49,2
219	52	00:53,1
219	53	00:57,2
220	54	01:01,7
220	55	01:06,8
221	56	01:12,1
221	57	01:18,8
222	58	01:26,3
222	59	01:34,3
223	60	01:45,7
224	61	01:55,9
224	62	02:10,4
225	63	02:29,5
226	64	02:54,1
226	65	03:23,6

226	66	03:48,2
227	67	04:18,6
227	68	04:49,0
227	69	05:21,0
227	70	06:02,0
228	71	06:46,5
228	72	07:38,4
228	73	08:47,2
228	74	10:15,7
228	75	12:37,2
228	76	15:59,7
228	76	17:14,9
228	76	19:26,5
228	76	21:16,1
Permaneceu em 76°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.17 — Dados brutos Lã de PET CP 2

Lã de PET 02		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
211	28	00:04,6
211	29	00:07,1
211	30	00:10,6
211	31	00:14,3
211	32	00:18,1
211	33	00:22,3
211	34	00:26,8
212	35	00:31,3
212	36	00:35,2
212	37	00:40,3
213	38	00:44,5
213	39	00:49,6
213	40	00:55,0
214	41	01:00,1
214	42	01:05,2
214	43	01:11,5
215	44	01:16,9
215	45	01:22,8
215	46	01:28,9
216	47	01:35,9
216	48	01:45,5
216	49	01:53,3

217	50	02:01,6
217	51	02:11,1
217	52	02:20,7
218	53	02:33,0
218	54	02:44,4
218	55	02:57,6
219	56	03:14,0
219	57	03:31,2
219	58	03:53,0
220	59	04:14,9
220	60	04:40,6
220	61	05:08,5
220	62	05:41,3
221	63	06:12,3
221	64	06:42,8
221	65	07:23,2
221	66	07:59,2
221	67	08:53,6
222	68	09:42,3
222	69	10:46,6
222	70	11:58,3
222	71	13:23,8
222	72	15:24,1
223	73	18:33,0
223	74	22:27,6
223	75	27:51,0
223	76	33:28,1
223	76	35:03,9
223	76	37:06,3
223	76	38:57,1
Permaneceu em 76°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.18 — Dados brutos Lã de PET CP 3

Lã de PET 03		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
210	29	00:14,6
210	30	00:15,6
210	31	00:19,4
210	32	00:23,0
211	33	00:27,9
211	34	00:33,0

212	35	00:38,8
213	36	00:44,4
213	37	00:50,2
214	38	00:55,3
214	39	01:01,6
215	40	01:06,8
215	41	01:12,0
216	42	01:18,2
216	43	01:24,2
216	44	01:29,9
217	45	01:35,4
217	46	01:42,0
217	47	01:48,1
218	48	01:57,3
218	49	02:04,4
218	50	02:11,2
218	51	02:19,3
219	52	02:27,0
219	53	02:34,4
219	54	02:42,4
219	55	02:52,1
219	56	03:01,4
220	57	03:10,6
220	58	03:21,4
220	59	03:32,7
220	60	03:45,4
220	61	03:58,7
221	62	04:11,9
221	63	04:29,9
221	64	04:44,6
221	65	05:02,2
221	66	05:23,4
221	67	05:47,5
222	68	06:14,6
222	69	06:48,6
222	70	07:25,4
222	71	08:13,4
222	72	09:18,4
222	73	10:58,0
222	74	13:19,9
222	75	18:49,6
222	75	20:50,0
222	75	22:14,5
222	75	24:08,1

Permaneceu em 75°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado

Tabela A.19 — Dados brutos Lã de PET CP 4

Lã de PET 04		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
214	26	00:09,4
214	27	00:11,1
214	28	00:14,6
214	29	00:17,9
214	30	00:21,4
214	31	00:25,4
214	32	00:29,8
215	33	00:34,4
215	34	00:38,8
216	35	00:43,0
216	36	00:47,7
217	37	00:52,2
217	38	00:56,7
217	39	01:01,0
218	40	01:04,3
219	41	01:07,9
219	42	01:11,4
219	43	01:15,2
219	44	01:19,0
220	45	01:23,4
220	46	01:26,9
220	47	01:30,5
221	48	01:36,5
221	49	01:40,8
221	50	01:45,3
222	51	01:50,4
222	52	01:55,2
222	53	02:00,1
222	54	02:05,5
223	55	02:11,2
223	56	02:16,8
223	57	02:22,9
223	58	02:29,7
224	59	02:36,4
224	60	02:43,6
224	61	02:51,5

224	62	02:59,4
225	63	03:07,8
225	64	03:17,6
225	65	03:28,7
225	66	03:38,0
225	67	03:49,2
226	68	04:01,8
226	69	04:14,1
226	70	04:28,1
226	71	04:43,2
227	72	04:59,0
227	73	05:14,2
227	74	05:33,4
227	75	05:56,2
227	76	06:15,1
227	77	06:39,6
228	78	08:14,9
228	79	08:57,1
228	80	09:29,6
228	81	10:22,3
228	82	11:15,7
228	83	12:14,3
228	84	12:56,4
228	85	13:52,0
228	86	15:07,4
228	87	16:38,5
228	84	19:04,6
228	85	20:50,6
228	86	22:53,2
228	87	25:36,3
228	88	29:39,0
228	88	31:29,7
228	88	33:11,5
228	88	35:07,7
Permaneceu em 88°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		

Tabela A.20 — Dados brutos Lã de PET CP 5

Lã de PET 05		
Temp. Resistência	Temperatura	Tempo (min:seg.milis)
214	33	00:03,6
214	34	00:05,9
215	35	00:09,0
215	36	00:12,4
216	37	00:15,3
217	38	00:21,2
218	39	00:23,8
218	40	00:26,2
219	41	00:29,6
219	42	00:33,8
220	43	00:37,7
220	44	00:41,4
221	45	00:44,9
221	46	00:49,5
222	47	00:53,0
222	48	01:00,2
223	49	01:05,0
223	50	01:10,4
223	51	01:15,4
224	52	01:21,0
224	53	01:26,9
224	54	01:31,8
225	55	01:38,7
225	56	01:44,9
225	57	01:51,2
225	58	01:58,4
225	59	02:06,7
226	60	02:14,1
226	61	02:22,9
226	62	02:31,4
226	63	02:41,8
226	64	02:52,8
227	65	03:04,4
227	66	03:17,9
227	67	03:31,7
227	68	03:47,0
227	69	04:04,9
227	70	04:25,3
227	71	04:47,5
228	72	05:15,3

228	73	05:44,9
228	74	06:20,1
228	75	07:08,8
228	76	08:04,9
228	77	09:14,5
228	78	10:56,4
228	79	13:15,4
228	80	17:25,6
228	80	19:15,8
228	80	21:09,2
228	80	22:48,7
Permaneceu em 80°C por cerca de 5 min, logo o ensaio foi encerrado		