

KHAUAN QUEIROZ
MARCEL RICARDO NOGUEIRA DE OLIVEIRA
JULIANO PIZZANO AYOUB

**LÃ DE ROCHA:
AVALIAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR
EM SUPERFÍCIE CILÍNDRICA ISOLADA**


Pascal
Editora

2023

KHAUAN QUEIROZ
MARCEL RICARDO NOGUEIRA DE OLIVEIRA
JULIANNNO PIZZANO AYOUB

LÃ DE ROCHA

AVALIAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SUPERFÍCIE
CILÍNDRICA ISOLADA

EDITORA PASCAL

2023

Editor Chefe: Prof. Dr. Patrício Moreira de Araújo Filho

Edição e Diagramação: Eduardo Mendonça Pinheiro

Edição de Arte: Khauan Queiroz e Eduardo Mendonça Pinheiro

Bibliotecária: Rayssa Cristhália Viana da Silva – CRB-13/904

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

Dr^a. Maria Raimunda Chagas Silva

Dr. Glauber Túlio Fonseca Coelho

Dr^a. Sinara de Fátima Freire dos Santos

Dr. Elmo de Sena Ferreira Junior

Dr. Saulo José Figueredo Mendes

Dr^a. Ildenice Nogueira Monteiro

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L111

Queiroz, Khauan; de Oliveira, Marcel Ricardo Nogueira; Ayoub, Julianno Pizzano

Lã de Rocha: Avaliação da transferência de calor em superfície cilíndrica isolada / Khauan Queiroz, Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira e Julianno Pizzano Ayoub — São Luís: Editora Pascal, 2023.

38 f. : il.:

Formato: PDF

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-6068-009-8

D.O.I.: 10.29327/5322949

1. Transferência de Calor. 2. Avaliação. 3. Lã de rocha. I. Queiroz, Khauan. II. de Oliveira, Marcel Ricardo Nogueira. III. Ayoub, Julianno Pizzano. IV. Título.

CDU: 621.43621.43-037.52

Qualquer parte deste livro poderá ser reproduzida ou transmitida, sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros, desde que seja citado o autor.

2023

www.editorapascal.com.br

APRESENTAÇÃO

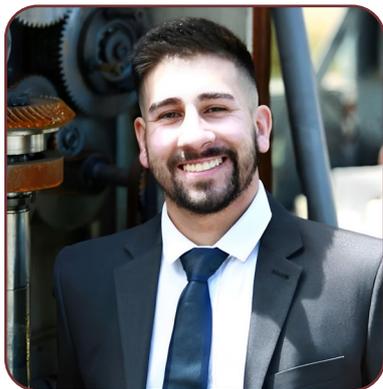
O crescimento e avanço tecnológico das grandes corporações mundiais na atualidade, na busca pelo aprimoramento dos sistemas produtivos, visa a redução de consumíveis e uma diminuição significativa de custos. A demanda energética é um fator que vem se consolidando no mundo todo e a tendência é que se intensifique cada vez mais no mercado. Empresas procuram aplicar tecnologias capazes de manter a eficiência do sistema, isto é, diminuir o gasto para realizar a mesma quantidade de trabalho ou trabalhar mais utilizando o mesmo gasto energético.

O livro “Lã de Rocha: Avaliação da Transferência de Calor em Superfície Cilíndrica Isolada” aborda uma perspectiva única dos conceitos de transmissão de calor através de superfícies com isolamento térmico aplicado. Mais do que um simples agente isolante termoacústico, a lã de rocha além de oferecer segurança e eficiência, também agrega sustentabilidade aos sistemas cilíndricos de transporte. Uma solução simples e de custo relativamente baixo que vem ganhando espaço entre alternativas já consolidadas no mercado e que busca a redução do consumo de combustíveis sejam eles de quaisquer naturezas.

“Lã de Rocha: Avaliação da Transferência de Calor em Superfície Cilíndrica Isolada” vai além de uma análise superficial do tema; serve como um referencial para o progresso dos sistemas cilíndricos com maior eficiência energética.

Boa leitura!

AUTORES



Khauan Queiroz

Engenheiro mecânico formado pelo Centro Universitário Campo Real em 2020. Realizou em 2019 o curso de SolidWorks pela Softgraf. Atuou na área de estoque no setor farmacêutico. Atuou na indústria de isolamento térmico e acústico a base de basalto, no laboratório realizando análises, na programação de manutenção e também no setor de Aplicação, desenvolvendo produtos e projetos com o SolidWorks. Atualmente trabalha na DGEMAR assessoria industrial no setor de Engenharia.



Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira

Possui Graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Possui Graduação interrompida em Engenharia Civil pela Faculdade Campo-Real. Possui Especialização em Estruturas de Concreto e Fundações pela Universidade Paranaense. Mestrando em Bioenergia na Universidade Estadual do Centro-Oeste. Tem experiência no ramo de construção civil como proprietário de empresa e consultor. Atuou com elaboração e implantação de gestão ambiental, como PGRCC, técnicas e matéria prima sustentável. Ministrou palestras e cursos nas áreas de engenharia ambiental, civil, segurança, gestão empresarial e marketing. Pesquisador da engenharia, escritor e proprietário da Atlas Engenharia Ambiental. Atualmente atua na área comercial da Gesla Isolamentos Termoacústicos.



Julianno Pizzano Ayoub

Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Engenheiro de Segurança do Trabalho pelo Centro Universitário Campo Real. Especialista em Engenharia da Qualidade. Especialista em Engenharia de Produção. Especialista em Engenharia de Suprimentos. Especialista em Engenharia Geotécnica. Especialista em Meio Ambiente, Desenvolvimento e Sustentabilidade. Especialista em Gestão Ambiental. Especialista em Direito Ambiental. Especialista em Educação Ambiental. Especialista em Docência no Ensino Superior. Especialista em Gestão de Produção Industrial. Especialista em Engenharia Química. Mestre em Bioenergia pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Escritor e membro de conselho editorial. Tem experiência com gestão de pessoas, redução de custos, adequações às NRs, aplicação de ferramentas de Qualidade, certificações, auditorias, perícias e treinamentos. Possui também

experiência em laboratório, análise, desenvolvimento de produtos e processos de isolantes termoacústicos minerais, inclusive atuando como Gerente de uma Fábrica de lã de Rocha. Desde 2023 atua como Engenheiro Ambiental e de Segurança do Trabalho na Atlas Engenharia Ambiental, e como pesquisador na DGEMAR Assessoria Industrial.

AGRADECIMENTO

A Deus primeiramente, pelo dom da vida e pelo discernimento concedido para seguir em frente em busca dos anseios da vida. Aos que se fizeram presente nos momentos de tribulação, sejam professores, familiares e amigos, e hoje colhemos juntos os frutos do sucesso, o nosso mais singelo agradecimento. A todos que de algum modo contribuíram para a conclusão deste sonho, nossa admiração e gratidão.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	4
AGRADECIMENTO	6
RESUMO.....	8
INTRODUÇÃO.....	9
REVISÃO DE LITERATURA.....	11
MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	12
<i>Transferência de calor por condução.....</i>	<i>13</i>
<i>Condutividade térmica</i>	<i>14</i>
<i>Transferência de calor por convecção.....</i>	<i>15</i>
<i>Resistividade térmica.....</i>	<i>17</i>
<i>Sistemas radiais</i>	<i>18</i>
ISOLAMENTO TÉRMICO	18
<i>Lãs Minerais.....</i>	<i>19</i>
<i>Raio crítico de isolamento.....</i>	<i>20</i>
<i>Espessura ótima de isolamento</i>	<i>20</i>
METODOLOGIA.....	21
ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO	24
CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS	37

RESUMO

Atualmente, as indústrias estão cada vez mais empenhadas em aprimorar seus sistemas produtivos e garantir uma eficiência energética eficaz. Com o objetivo de reduzir os custos operacionais e minimizar as perdas de calor em sistemas térmicos, é altamente recomendável a utilização de materiais isolantes térmicos. O presente livro se propõe a analisar o desempenho do isolamento térmico, utilizando a lã de rocha como exemplo, em uma superfície cilíndrica e seu impacto na redução da taxa de transferência de calor em um sistema. Para alcançar esse objetivo, o experimento envolveu o aquecimento da água por meio de um aquecedor elétrico e o subsequente transporte dessa água por uma mangueira convencional do cotidiano. Durante o processo, foram empregados dois termopares para medir as temperaturas de entrada e saída do fluido, tanto com o isolamento térmico quanto sem ele. Os resultados obtidos a partir dessa análise revelaram-se altamente satisfatórios, demonstrando que o material isolante, no caso a lã de rocha, conseguiu efetivamente reduzir a taxa de transferência de calor. O ganho de temperatura observado foi significativo, alcançando aproximadamente 10°C. Após cuidadosas análises e interpretação dos resultados, podemos concluir que o isolamento térmico, empregando a lã de rocha, é uma estratégia eficaz para minimizar as perdas de calor em sistemas que envolvem o transporte de água quente. Além de contribuir para a conservação de energia, essa abordagem pode gerar economias substanciais em sistemas industriais e comerciais que dependem de tubulações para manter a temperatura dos fluidos.

Palavras-chave: Isolamento Térmico. Transferência de calor. Tubulações. Lã de Rocha.

INTRODUÇÃO



A busca por aprimoramentos nos sistemas produtivos, visando à redução de despesas, é uma prioridade para muitas corporações na atualidade. As indústrias estão constantemente em busca de melhorar suas tecnologias para aumentar sua rentabilidade. Empresas estão empenhadas em adotar tecnologias que preservem a eficiência do sistema, ou seja, que permitam realizar o mesmo trabalho com menor consumo de recursos energéticos ou realizar mais trabalho com o mesmo nível de consumo de energia.

Existem setores industriais que operam com sistemas térmicos, onde ocorre a troca de calor entre diferentes meios. Processos que envolvem calor, como secagem, calcinação e tratamentos térmicos, consomem considerável quantidade de energia. Controlar essa transferência de calor de forma eficaz pode resultar em reduções significativas nos custos operacionais. A geração de energia térmica muitas vezes requer a queima de combustíveis, como carvão, lenha, óleo, derivados do petróleo e cana-de-açúcar. Portanto, se o sistema não for adequadamente isolado termicamente, a eficiência térmica é prejudicada (LEITE, 2016).

Em sistemas que precisam manter o calor, é comum ocorrer perda de energia térmica devido à transferência de calor do ambiente mais quente para o mais frio. A transferência de calor ocorre sempre que há uma diferença de temperatura entre dois ou mais meios, pois o calor tende a fluir para o meio de temperatura mais baixa (BERGMAN; LAVINE, 2019). Essa perda de calor ocorre por meio de mecanismos de transferência, como condução, convecção e radiação.

Para otimizar a eficiência térmica do sistema e minimizar ou eliminar as perdas de calor causadas por esses mecanismos de transferência, a solução é a utilização de isolamento térmico. Isso requer o uso de materiais isolantes que não apenas reduzam a transferência de calor entre os meios, mas também podem oferecer isolamento acústico, reduzindo ruídos indesejados. Uma característica fundamental de um bom material isolante é ter uma baixa condutividade térmica, ou seja, dificultar a transferência de calor entre os meios.

Como método de estudo, optou-se por um estudo de caso que envolveu a construção de um protótipo semelhante a uma tubulação de água aquecida, seguido da coleta de dados para análise.

O objetivo principal deste livro é determinar a eficácia da lã de rocha como isolante térmico e compreender como ela afeta o sistema. Os objetivos específicos incluem a análise das perdas de energia no sistema antes da aplicação do isolamento e após a incorporação do material isolante em um fluxo de água aquecida.



**REVISÃO
DE
LITERATURA**

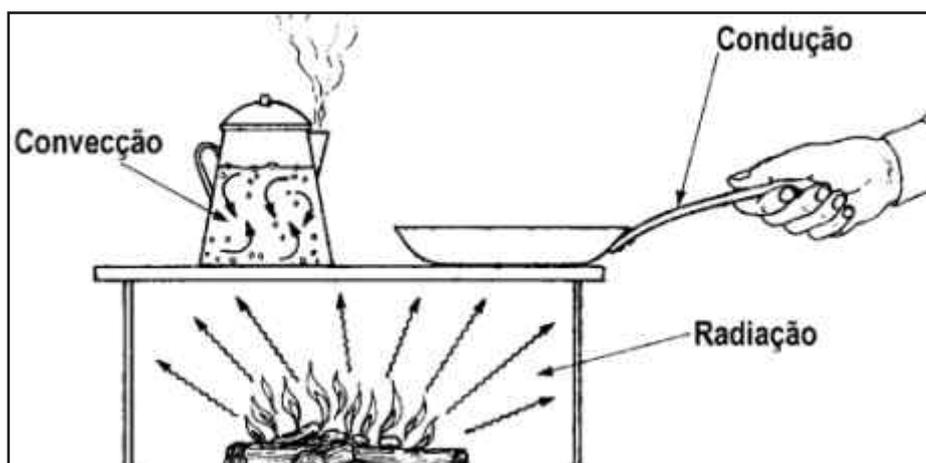
Alguns conceitos necessários para a realização da pesquisa, tais como: mecanismos de transferência de calor (condução e convecção), definição de condutividade térmica, caracterização de isolamento térmico e conceituação de raio crítico.

MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O estudo da transferência de calor é fundamental para a compreensão de uma ampla variedade de processos industriais, bem como para o funcionamento eficiente de trocadores de calor. De acordo com Çengel e Ghajar (2012), o calor é definido como uma forma de energia que se desloca de um meio para outro, resultando em uma variação de temperatura. Essa transferência de energia entre os meios é conhecida como transferência de calor e pode ocorrer por três modos distintos: condução, convecção e radiação.

Aprofundar nosso conhecimento sobre esses processos de transferência de calor é essencial para otimizar projetos industriais, sistemas de aquecimento e resfriamento, além de contribuir para a eficiência energética e a redução de custos em diversas aplicações práticas. Portanto, a compreensão desses princípios é de suma importância tanto na pesquisa acadêmica quanto na indústria.

Figura 1. Mecanismos de transferência de calor.



Fonte: Unisul - Fenômenos de transporte II, s/d.

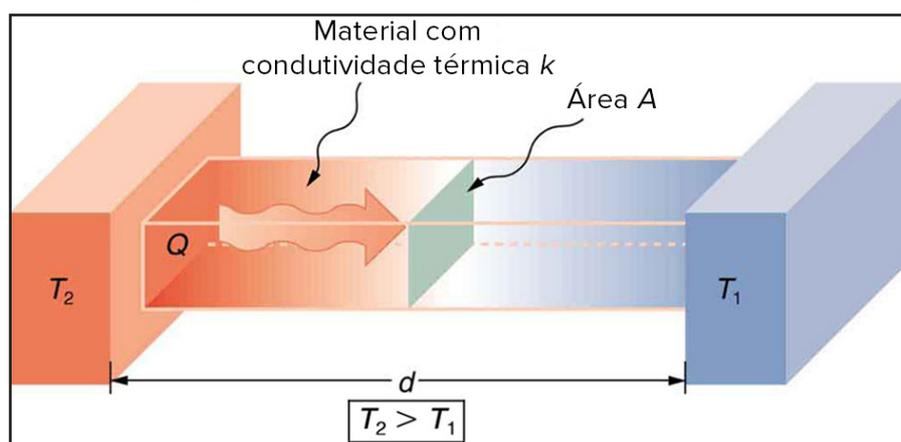
Bergman e Lavine (2019 p. 2), conceituam os mecanismos de transferência de calor como:

Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser sólido ou um fluido, usamos o termo condução para nos referirmos à transferência de calor que ocorrerá ao longo do meio. Em contraste, o termo convecção se refere a transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estiverem a diferentes temperaturas. O terceiro modo de transferência de calor é chamado de radiação térmica.

Transferência de calor por condução

A transferência de calor por condução pode acontecer em líquidos, gases e sólidos. Uma vez que em líquidos e gases ocorre por meio da colisão e difusão das partículas e nos sólidos através das vibrações moleculares que se encontram em rede (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Essa transmissão de energia acontece devido a interação das partículas, partindo das moléculas de maior energia para as moléculas vizinhas de menor energia. A figura 2 apresenta uma superfície cilíndrica onde ocorre a condução de calor do ponto T2 em direção ao ponto T1, segundo Bergman e Lavine (2019).

Figura 2. Representação da condução de calor através de uma superfície cilíndrica.



Fonte: Khan Academy, 2020.

Para sistemas que transmitem calor, é necessário quantificar essa taxa transferida, permitindo assim determinar uma melhor eficiência e obter uma redução no custo de operação. Entretanto, é fundamental considerar algumas variáveis para efetuar o cálculo, as principais são: geometria da superfície, espessura, tipo de material, diferença de temperatura em que o sistema está inserido e condutividade térmica do material.

Para o cálculo da transferência de calor utiliza-se da equação diferencial que é denominada *Lei de Fourier*, onde a taxa de condução de calor é proporcional à área de transferência e a diferença de temperatura, porém inversamente proporcional à espessura (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). A *Lei de Fourier* está expressa na equação 1.

$$q' = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde:

q' - taxa de condução de calor [W/m^2];

k - condutividade térmica do material [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$];

A - área de transferência de calor [m^2];

dT/dx - gradiente de temperatura [$^{\circ}\text{C}$].

É importante ressaltar que a área onde ocorre a condução de calor, é sempre normal à direção da taxa de transferência de calor, e a condutividade térmica varia de acordo com o material utilizado. O sinal negativo indica que a transferência de calor é no sentido positivo, ou seja, no sentido da diminuição da temperatura (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

É permitido considerar o gradiente de temperatura como uma condição estacionária, sendo assim o fluxo de calor por condução pode ser expresso, de acordo com Çengel e

Ghajar (2012, p. 19), pela equação 2.

$$q' = -kA \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (2)$$

Onde:

T1 - temperatura interna [°C];

T2 - temperatura externa [°C];

L - espessura [m].

Condutividade térmica

A condutividade térmica representa a capacidade de um material em conduzir o calor. Materiais com alta condutividade térmica são empregados como dissipadores de calor, enquanto aqueles com baixa condutividade térmica são utilizados como isolantes térmicos. Como afirmado por Çengel e Ghajar (2012), a condutividade térmica pode ser definida como “a taxa de transferência de calor através de uma unidade de comprimento de um material por unidade de área e por unidade de diferença de temperatura.”

Compreender e aplicar o conceito de condutividade térmica é crucial em diversas aplicações, desde o projeto de dispositivos eletrônicos até a eficiência energética na construção civil. O conhecimento dessa propriedade dos materiais desempenha um papel significativo no desenvolvimento de soluções que buscam controlar e gerenciar o calor de maneira eficaz em uma variedade de contextos industriais e tecnológicos. Portanto, a condutividade térmica é um elemento-chave na engenharia e na ciência dos materiais.

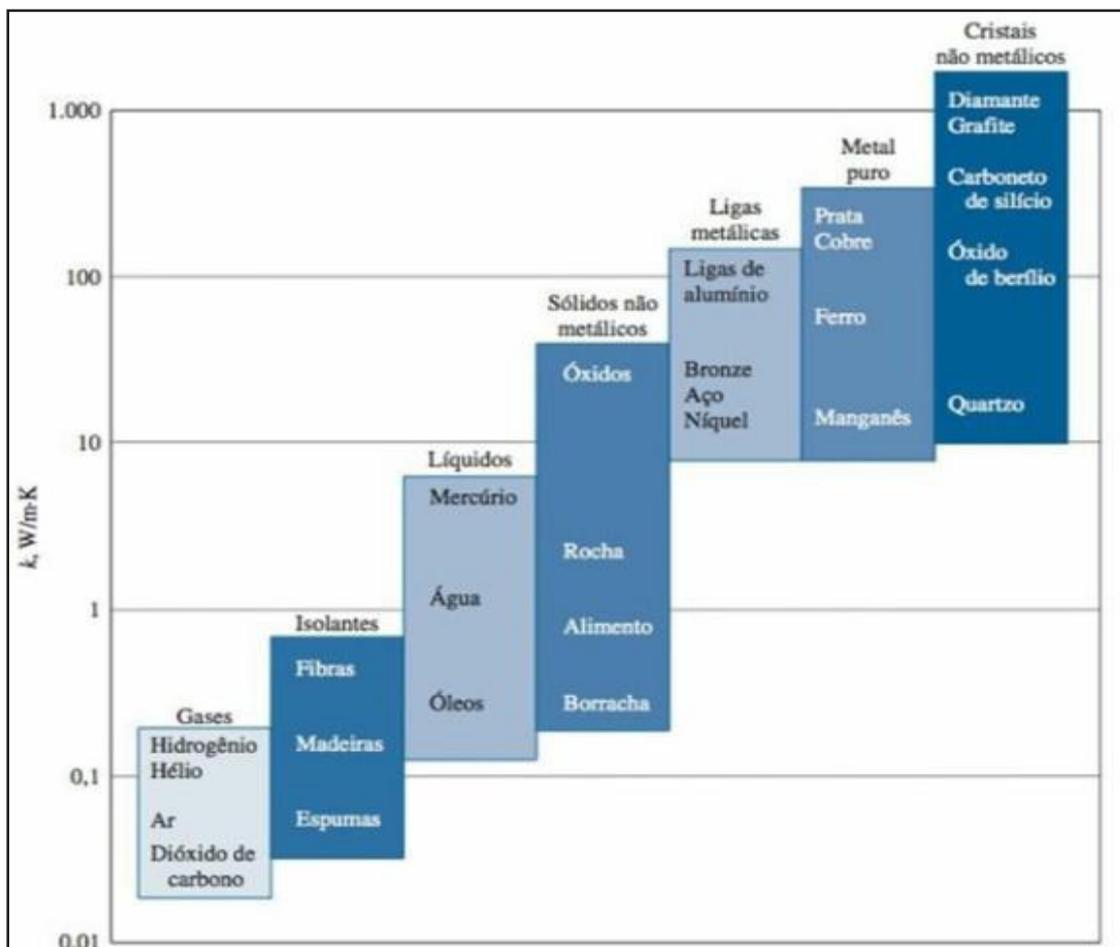
Quadro 1. Materiais suas respectivas condutividades térmicas.

Condutividade térmica de de alguns materiais em temperatura ambiente	
Material	k [W/m.K]
Diamante	2.300
Prata	429
Cobre	401
Ouro	317
Alumínio	237
Ferro	80,2
Mercúrio (l)	8,54
Vidro	0,78
Tijolo	0,72
Água (l)	0,607
Pele humana	0,37
Madeira (carvalho)	0,17
Hélio (g)	0,152
Borracha macia	0,13
Fibra de vidro	0,043
Ar (g)	0,026
Uretano, espuma rígida	0,026

Fonte: Çengel e Ghajar (2012, p. 20).

A grandeza varia de acordo com o material e sua propriedade física. Em sólidos a condutividade térmica é maior, pois o espaçamento entre as moléculas é menor, em seguida os líquidos e por fim os gases. É possível verificar que o cobre é um dos melhores condutores térmicos, logo, é utilizado em larga escala em fios e cabos para a condução de eletricidade. Diferente da fibra mineral, que possui um valor baixo de condutividade e vem sendo utilizada como um isolante térmico.

Figura 3. Condutividade térmica em vários estados físicos.



Fonte: Çengel e Ghajar (2012, p. 21).

As fibras minerais se encontram na coluna dos materiais isolantes e a faixa de condutividade térmica fica entre 0,05 à 0,8 W/mK, aproximadamente. Diversos materiais possuem o valor de sua condutividade térmica tabelada e padronizada, entretanto uma forma de determinar esse valor é se apropriando da *Lei de Fourier* e reorganizando a mesma (Equação 3).

$$k = -\frac{q'}{dT/dx} \tag{3}$$

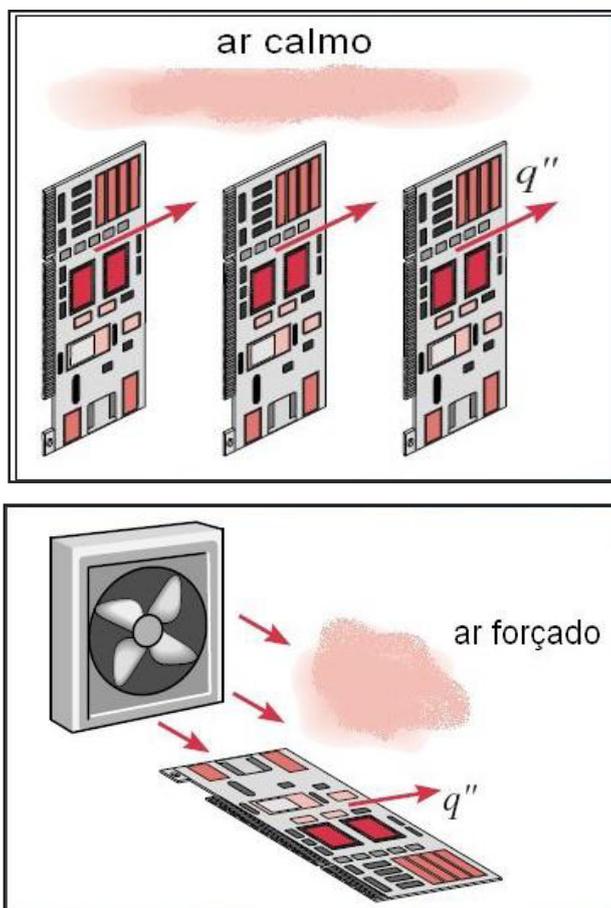
Transferência de calor por convecção

Neste mecanismo de transferência de calor, é necessário existir movimento de um fluido, caso isto não ocorra, a transferência de calor se dá por condução. Pode-se dizer que se o fluido, seja um gás ou um líquido, possuir uma velocidade maior, a transferência de calor por convecção é maior. Diferente da transferência de calor por condução onde pode-se obter em condições estacionárias, a convecção ocorre em sólidos, gases ou fluidos,

combinando efeitos de condução e de escoamento de um fluido (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A transmissão de calor por convecção é classificada de duas maneiras: convecção natural (ou livre) e convecção forçada. Bergman e Lavine (2019) descrevem a convecção natural quando o movimento do fluido é causado pela diferença de densidade, causada por uma diferença de temperatura. Em contraposição, a convecção forçada se dá quando existe uma força externa, como por exemplo um ventilador, uma bomba ou até mesmo o vento atmosférico.

Figura 4. Exemplo de convecção forçada e natural.



Fonte: Sistemas Térmicos (2015, p.18).

Como na condução, a transferência de calor por convecção também pode ser quantificada e determinada. A equação que determina essa quantidade de calor transferida é denominada *Lei de resfriamento de Newton*, expressa na equação 4.

$$q'' = hA(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Onde:

q'' - transferência de calor por convecção [W];

h - coeficiente convectivo [W/m^2K];

A - área de transferência de calor [m^2];

T_s - temperatura da superfície [$^{\circ}C$];

T_∞ - temperatura do fluido [$^{\circ}C$].

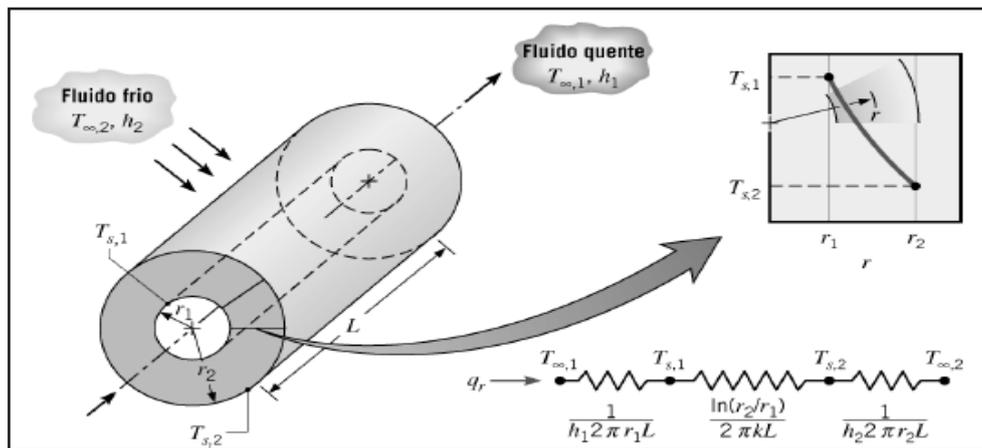
Resistividade térmica

A resistividade térmica representa a capacidade de um material de dificultar a transferência de calor para o meio circundante, sendo o inverso da condutividade térmica. Conforme definido por THERMAL ENGINEERING (2019), “a resistência térmica é uma propriedade que mede a diferença de temperatura pela qual um objeto ou material resiste ao fluxo de calor.”

Uma analogia útil para compreender a resistência térmica é a resistência elétrica. De acordo com Bergman e Lavine (2019), assim como a resistência elétrica impede a condução de eletricidade, a resistência térmica impede a condução de calor. Essa analogia pode facilitar a compreensão do conceito de resistência térmica.

Ao calcular a transferência de calor em um sistema, é essencial considerar o somatório de todas as resistências térmicas envolvidas. Isso significa que a resistência térmica de cada componente ou material presente no sistema contribui para determinar a eficiência geral da transferência de calor. Portanto, entender e quantificar as resistências térmicas é fundamental para o projeto e a otimização de sistemas que envolvem a transferência de calor.

Figura 5. Representação das resistências térmicas em um cilindro oco.



Fonte: Bergman; Lavine (2019, p. 78).

Como o livro tem por finalidade abordar a transferência de calor através de uma superfície cilíndrica, as resistências térmicas para um sistema radial serão obtidas pelas equações 5 e 6.

Para a condução:

$$R_{cond.} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (5)$$

Onde:

$R_{cond.}$ - resistência térmica para a condução [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$];

r_2 - raio externo [m];

r_1 - raio interno [m];

L - comprimento do cilindro [m];

k - condutividade térmica [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].

Para a convecção:

$$R_{conv.} = \frac{1}{2\pi r L h} \quad (6)$$

Onde:

$R_{conv.}$ - resistência térmica para a convecção [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$];

r - raio [m];

L - comprimento do cilindro [m];

h - coeficiente convectivo [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].

Sistemas radiais

Em cilindros e esferas, o gradiente de temperatura ocorre somente na direção radial, dessa forma a análise feita deve considerar o sistema como unidimensional. Quando analisados cilindros ocos, como tubulações, onde as superfícies interna e externa estarão em contato com fluidos, é possível definir uma equação para calcular a transferência de energia desse sistema (BERGMAN; LAVINE, 2019).

Se considerar um sistema composto (condução e convecção), a equação para a taxa de transferência de calor pode ser expressa conforme as equações abaixo.

$$q'' = \frac{T_1 - T_2}{R_{total}} \quad (7)$$

Onde o denominador é escrito como:

$$R_{total} = \frac{1}{h_1(2\pi r_1 L)} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_2(2\pi r_2 L)} \quad (8)$$

ISOLAMENTO TÉRMICO

O isolamento térmico em sistemas e construções está se tornando cada vez mais relevante nos dias atuais, devido aos benefícios substanciais que oferece. Em construções, um isolamento eficaz proporciona conforto térmico e acústico aos ocupantes, aumentando a produtividade em ambientes como escritórios. Além disso, em sistemas de produção, como redes de tubulações de vapor ou água quente, um isolamento bem dimensionado pode resultar em redução significativa da transferência de calor para o ambiente, contribuindo para a eficiência energética.

Conforme destacado pela ISOVER (2020), o isolamento térmico desempenha um papel crucial em regiões quentes, mantendo o calor externo afastado e reduzindo a necessidade de ar-condicionado. Em regiões frias, por outro lado, ele preserva o ambiente aquecido, minimizando a necessidade de aquecimento.

Maia (2016) define o isolamento térmico como um material ou uma combinação de materiais que, quando aplicados em uma superfície, cria uma barreira à transferência de calor por condução, convecção e radiação. Embora o vácuo seja o melhor isolante térmico em teoria, sua aplicação prática é desafiadora. Não existe um material que possa eliminar

completamente a transferência de calor, mas há uma variedade de materiais que, quando usados adequadamente, podem reduzir significativamente essa troca de energia.

A escolha de um material isolante depende da aplicação específica e dos objetivos do sistema isolado. No entanto, os materiais isolantes compartilham características comuns, como baixa condutividade térmica, resistência ao fogo, durabilidade, atoxicidade e conformidade com as normas técnicas da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Existem diversas categorias de materiais isolantes, incluindo os sintéticos, minerais, gasosos, entre outros. Alguns exemplos notáveis incluem cortiça, isopor, madeira, ar, cerâmica, lã de vidro e lã de rocha. Este livro se concentrará especificamente em um material isolante térmico e acústico conhecido como lã mineral, mais especificamente, a lã de rocha.

Lãs Minerais

A lã mineral é um termo comumente utilizado para descrever materiais isolantes compostos por silicatos, produzidos a partir de fibras entrelaçadas e aglutinadas por uma resina, conforme definido por Aleixo (2015). Dois exemplos notáveis de lãs minerais amplamente disponíveis no mercado são a lã de rocha e a lã de vidro, que são frequentemente utilizadas como isolantes termoacústicos. Ambos os materiais compartilham características que os tornam atrativos em diversas aplicações no mercado.

As principais características das lãs minerais, como lã de rocha e lã de vidro, incluem baixa condutividade térmica, resistência à água, incombustibilidade, imputrescibilidade, facilidade de instalação e a vantagem de não requererem manutenção periódica. Como destacado por Neto (2009), esses materiais são inertes, incombustíveis e possuem baixa condutividade térmica.

A produção dessas lãs minerais envolve um processo que começa com a fusão de matérias-primas específicas, como o basalto para a lã de rocha e vidro reciclado para a lã de vidro. Uma resina fenólica é adicionada durante o processo de fabricação para unir as fibras, resultando no produto final com consistência desejada. O processo de fabricação comum envolve a fusão da matéria-prima e a geração de fibras por meio de centrifugação, semelhante a uma máquina de algodão doce, como explicado por Alves (2008). Apesar de terem diferentes matérias-primas, as lãs de vidro e de rocha são semelhantes em suas aplicações, variando apenas na faixa de temperatura na qual cada uma deve ser utilizada.

Figura 6. Feltro e painéis, de lã de rocha.



Fonte: REPROTERM - Soluções Ambientais, 2020.

Devido à sua incombustibilidade, esses materiais encontram diversas aplicações tanto na construção civil quanto na indústria. São leves e de baixo custo, podendo ser utilizados para isolar forros, paredes, pisos, paredes corta-fogo, em construção naval, na fa-

bricação de produtos eletroeletrônicos, em caldeiras e no isolamento de tubulações. Sua versatilidade e desempenho tornam as lãs minerais uma escolha popular para atender a uma ampla gama de necessidades de isolamento térmico e acústico em diversos setores.

Quando pretende-se aplicar um isolante térmico em superfícies radiais, como tubulações, é importante estar atento a um fenômeno chamado raio crítico. O conceito será exposto na seção seguinte.

Raio crítico de isolamento

O principal objetivo da aplicação de um isolante térmico em tubulações é reduzir as perdas de calor entre o fluido transportado e o ambiente circundante. No entanto, é importante respeitar alguns limites para garantir que o isolamento não tenha o efeito oposto ao desejado. Em determinadas situações, especialmente quando o isolamento é aplicado em seções circulares, pode haver oportunidades de maximizar a transferência de calor de maneira eficaz.

O raio crítico tem dependência com a condutividade térmica do isolamento e com o coeficiente externo de convecção (IFSC, 2009). Esse valor de raio pode ser determinado pela equação 9.

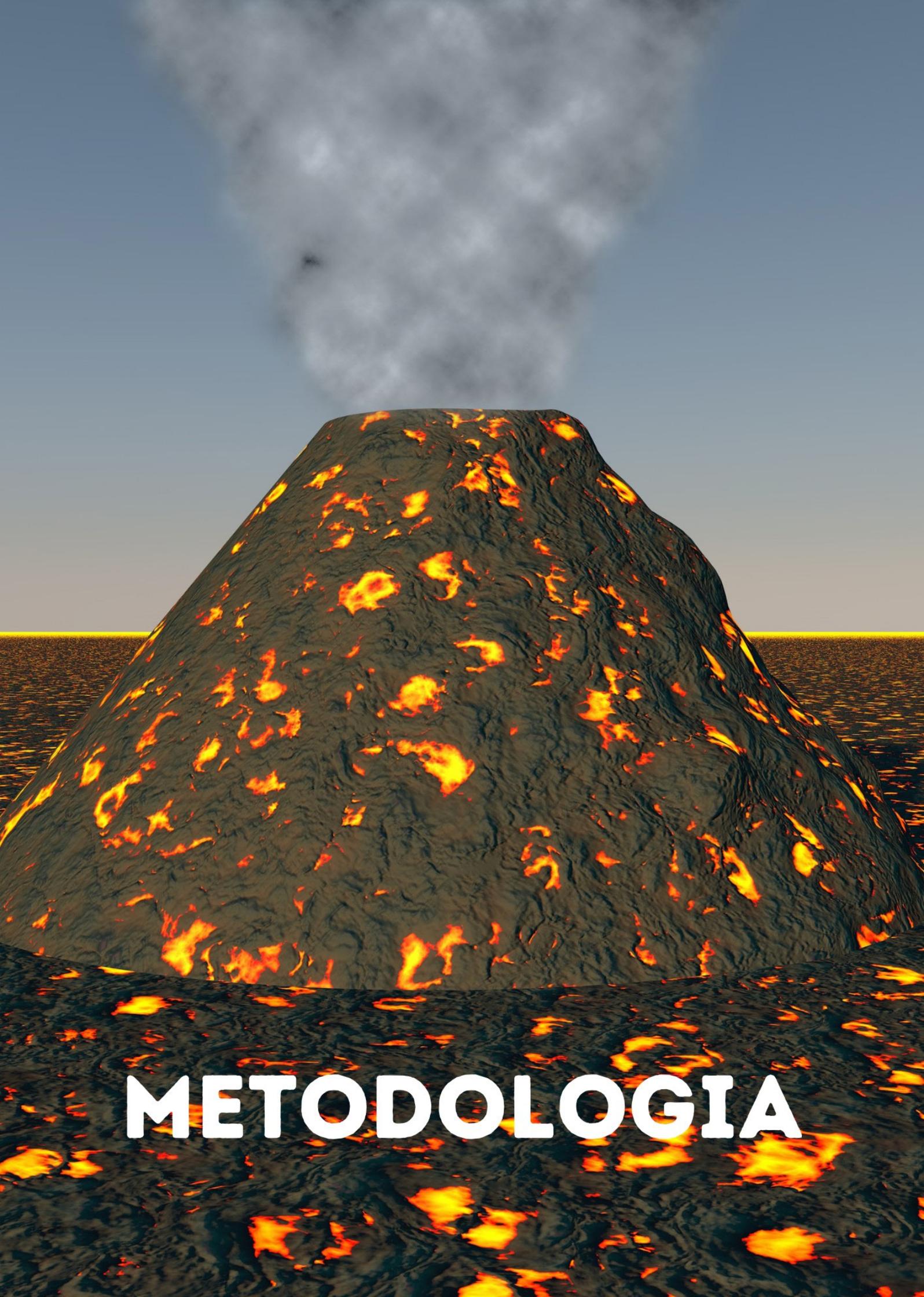
$$R_c = \frac{k}{h} \quad (9)$$

Quando o raio do material isolante for menor ou igual ao raio crítico, a transferência de calor perdido terá seu valor máximo. Logo, o ideal para o isolamento de superfícies cilíndricas é manter o raio do isolante térmico maior que o raio crítico.

Espessura ótima de isolamento

A aplicação de um material isolante térmico afeta significativamente na redução da transferência de calor e diminui no gasto energético é um fato, porém surge um novo gasto com o próprio material isolante. O ponto que se localiza entre a redução de energia e o custo do material isolante, é chamado de ponto ótimo. Para determinar a espessura ótima, antes é preciso delimitar os valores gastos com energia e com isolamento (MAIA, 2016).

A espessura ótima tem total relação com o raio crítico, uma vez que o raio crítico determina onde ocorrerá o valor máximo da transferência de calor, logo, antes da aplicação de qualquer isolamento, é importante delimitar esses valores para evitar prejuízos e gastos exorbitantes.



METODOLOGIA

Com o intuito de garantir uma análise eficaz da eficiência dos isolantes térmicos, optou-se por conduzir um ensaio científico específico. Este ensaio envolve a utilização de uma mangueira comum do dia a dia, na qual um fluxo de água quente será direcionado. A análise visa avaliar a transferência de calor por meio dessa mangueira quando isolada com lã mineral, sendo a lã de rocha o material escolhido para este propósito.

A medição da transferência de calor será realizada por meio de dois termopares, permitindo a determinação das temperaturas do fluido na entrada e na saída da mangueira. O aquecimento da água será efetuado por meio de um aquecedor elétrico localizado nas instalações do Centro Universitário Campo Real.

Para o desenvolvimento deste estudo e a consecução dos objetivos propostos, foram conduzidos ensaios em uma superfície cilíndrica, com e sem a aplicação de um isolante térmico. Esse método permitirá uma avaliação precisa do impacto do isolamento térmico na transferência de calor, proporcionando dados valiosos para a análise da eficácia do isolante escolhido.

Os materiais utilizados para a realização dos ensaios estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2. Materiais necessários para o ensaio.

LISTA DE MATERIAIS	Quantidade
Mangueira comum de jardim 10mm	20 metros
Sensor de temperatura DS18B20	2
Arduíno com cabo USB	2
Resistor de 4,7K Ω	2
Protoboard	2
Cabos jumper macho-macho	10
Máquina aquecedora de água	1
Lã de rocha de densidade 28 Kg/m ³	5 painéis de 1,30m x 0,5m x 0,04m
Linha de Nylon	1 rolo
Fita isolante	1 rolo

Fonte:Autor, 2020.

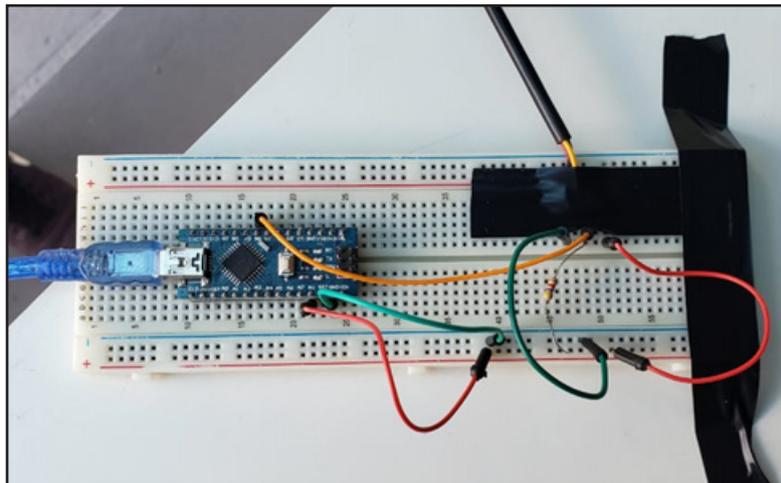
As Figuras respectivamente mostram a caixa de chimarrão utilizada para utilizar água quente e em seguida o sistema da montagem do arduino, seus componentes e o sensor utilizado para medição da temperatura da água.

Figura 7. Máquina para o aquecimento da água.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 8. Componentes do arduíno.



Fonte: Autor, 2020.

DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO

Primeiramente realizou-se um corte na mangueira para a instalação do sensor (Sensor 1 - Entrada). O sensor foi colocado a 1 metro do bocal da máquina aquecedora de água e vedado com fita isolante para evitar vazamento.

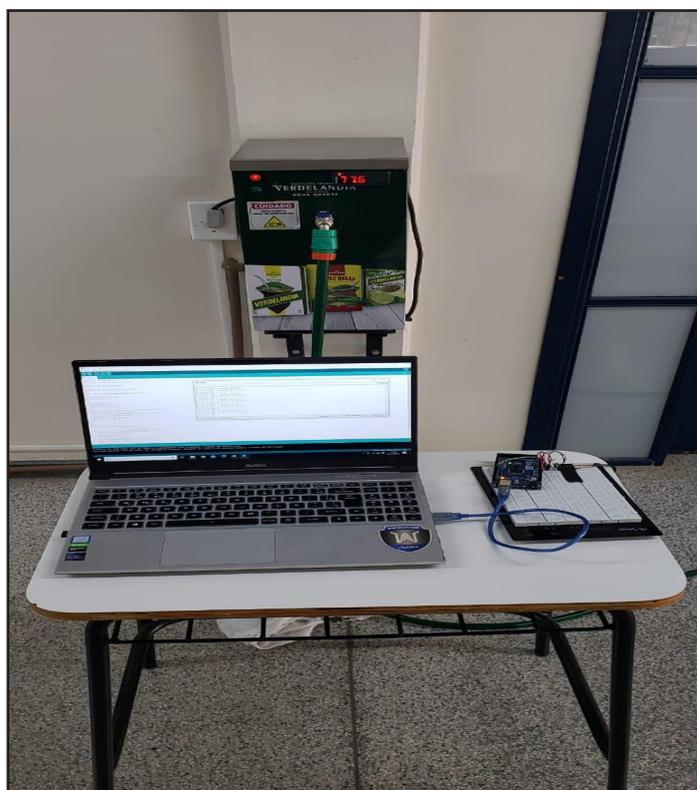
Figura 9. Medida de corte para instalação do sensor.



Fonte: Autor, 2020.

Instalado o sensor, a mangueira foi acoplada ao aquecedor elétrico e com o auxílio de um notebook o sensor foi ativado.

Figura 10. Mangueira acoplada ao aquecedor e sensor de entrada ativado.



Fonte: Autor, 2020.

Em seguida o sensor da saída do sistema foi instalado e ativado (Figuras 11 e 12).

Figura 11. Sensor na saída do sistema.



Fonte: Autor, 2020.

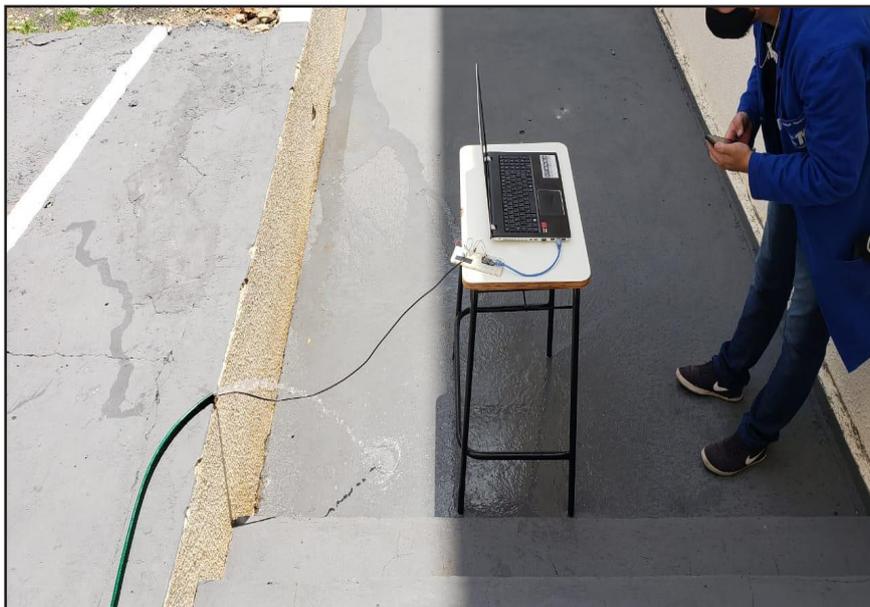
Figura 12. Sensor na saída do sistema ativado.



Fonte: Autor, 2020.

Foram realizados dois ensaios sem isolamento, o primeiro com a vazão máxima de funcionamento (torneira aberta inteira) e o segundo com vazão reduzida (metade da torneira aberta). A figura 13 mostra o sistema em funcionamento e após o fechamento do fluxo os dados obtidos foram armazenados.

Figura 13. Sistema em funcionamento.



Fonte: Autor, 2020.

Em seguida, para a realização da segunda parte do ensaio, onde aplica-se o isolamento térmico (lã de rocha), foi necessário cortar os painéis de lã, em partes de 10cmX130cm (Figuras 14 e 15). A condutividade térmica da lã de rocha para a densidade 28 Kg/m^3 é de $0,043 \text{ W/mK}$.

Figura 14. Painéis de lã de rocha (1,30mX0,50mX0,04m).



Fonte: Autor, 2020.

Figura 15. Lã de rocha após o corte (1,30mX0,10mX0,04m).



Fonte: Autor, 2020.

Posteriormente, o isolante térmico foi aplicado no sistema, sendo fixado com fita isolante e linhas de nylon.

Figura 16. Lã de rocha isolando o sistema.



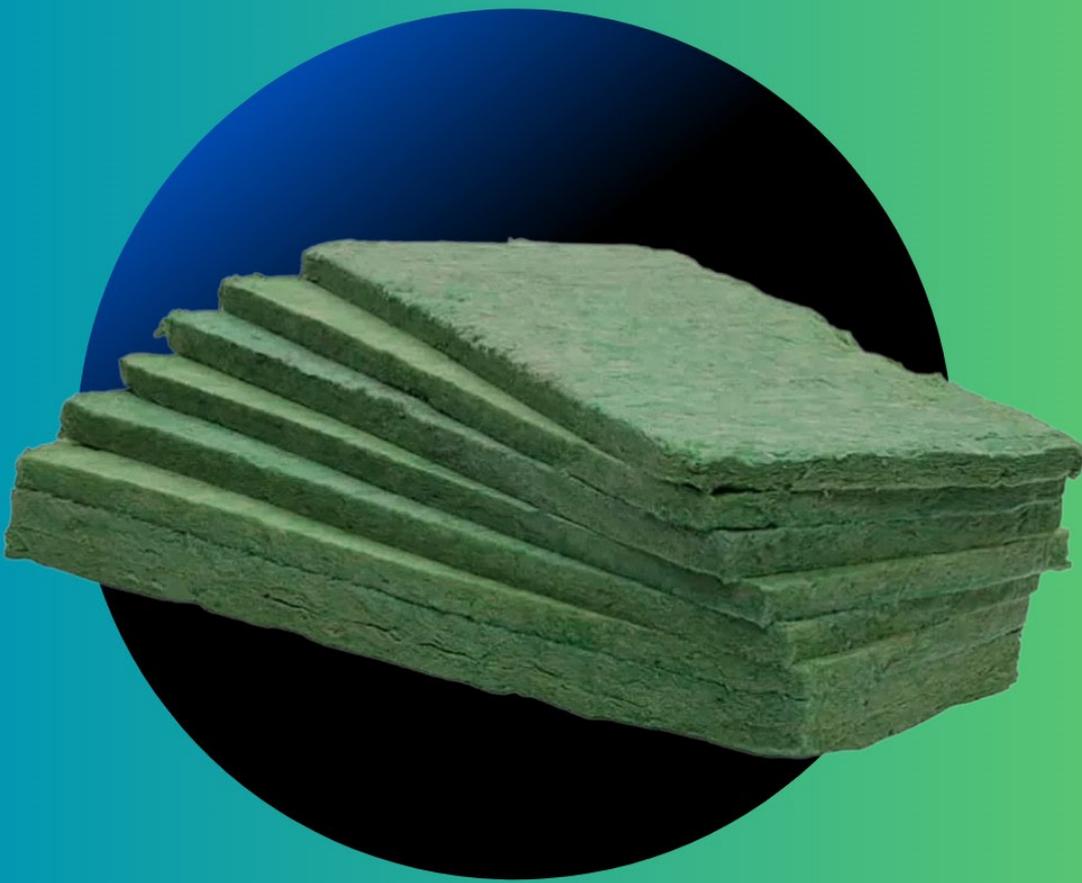
Fonte: Autor, 2020.

Foram realizados dois ensaios com a lã de rocha isolando o sistema, o primeiro com a vazão máxima e o segundo com a metade dessa vazão, semelhante aos ensaios sem o

isolante térmico.

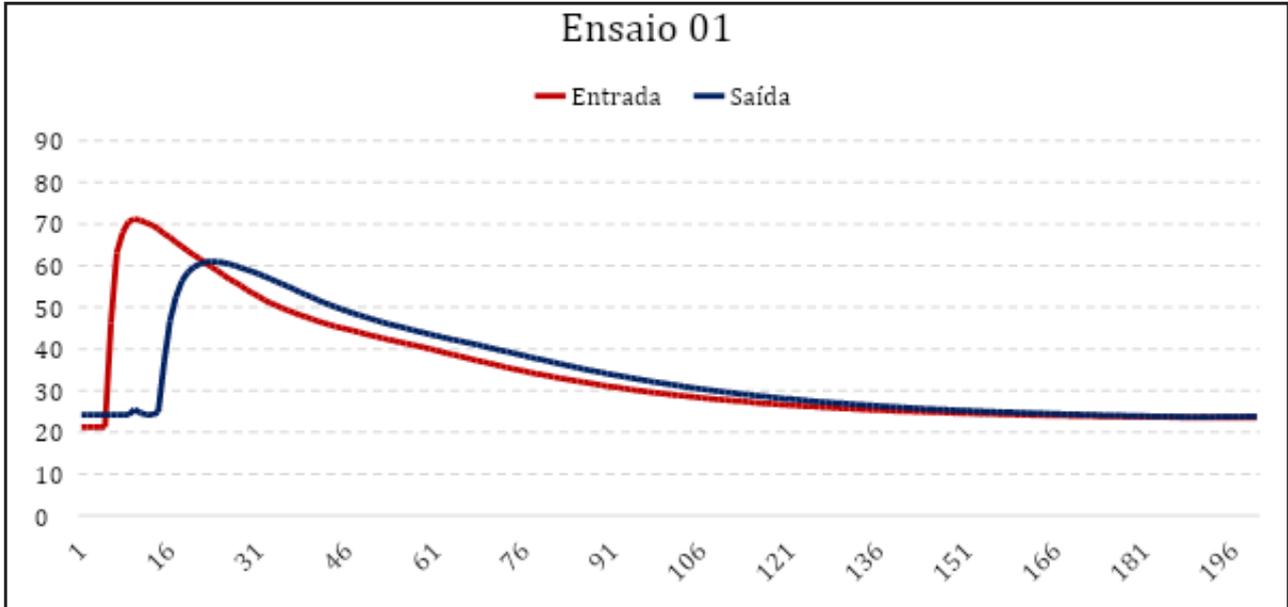
Após a conclusão dos ensaios e os dados armazenados em planilhas, com o auxílio do software Excel foram elaborados gráficos “Temperatura (°C) X Tempo (segundos)” para a análise de como o isolamento térmico atua no sistema e reduz a taxa de transferência de calor. Devido a mudanças no escopo do projeto, os cálculos de transferência de calor não foram realizados, mas é possível analisar somente com os dados obtidos através dos termopares a diferença entre sistemas isolados e não isolados. A seção seguinte apresenta os resultados obtidos.

ANÁLISE DOS RESULTADOS



○ gráfico 1 apresenta os dados obtidos do primeiro ensaio realizado, onde não havia isolamento térmico e estava com o fluxo máximo de água do equipamento (vazão máxima).

Gráfico 1. Ensaio sem isolamento e vazão máxima do fluxo de água.

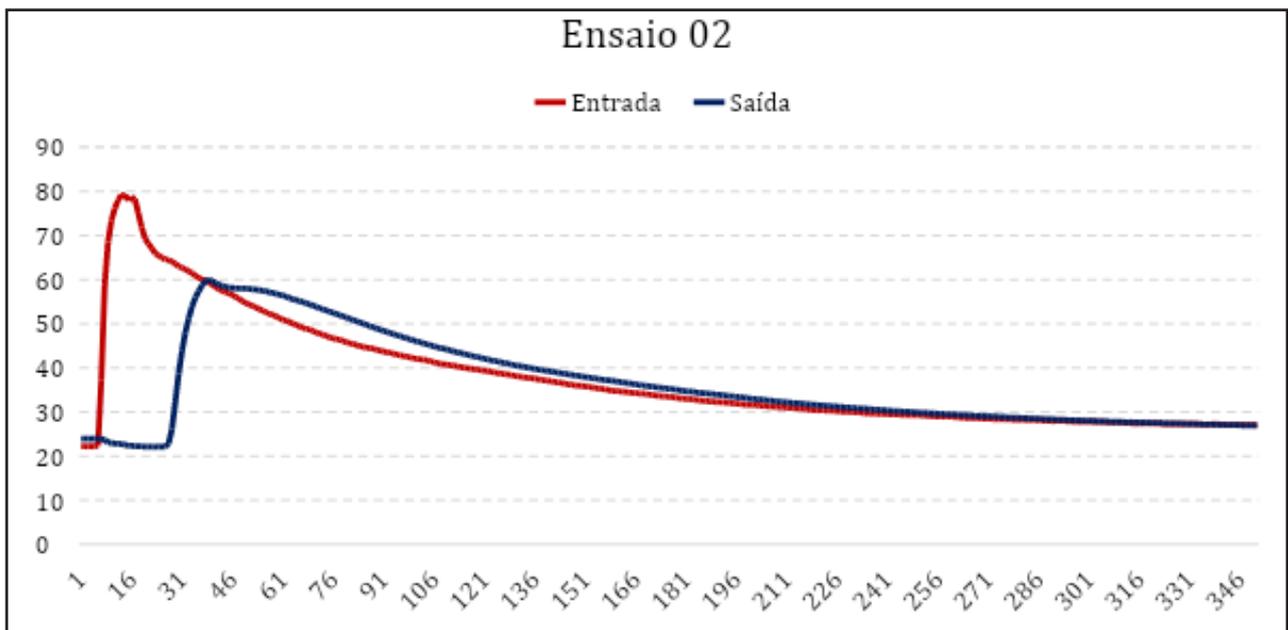


Fonte: Autor, 2020.

Nota-se que em pouco tempo a temperatura tanto de entrada, quanto de saída são reduzidas e também os valores de cada curva se aproximam rapidamente, se estabilizando em uma temperatura baixa com relação a temperatura inicial. Percebe-se também que a temperatura máxima de saída é 10°C inferior que a máxima de entrada, indicando uma perda de calor considerável no sistema.

Para o segundo ensaio a vazão foi reduzida, abrindo a torneira pela metade e os seguintes dados foram obtidos (Gráfico 2).

Gráfico 2. Ensaio sem isolamento e vazão reduzida do fluxo de água.

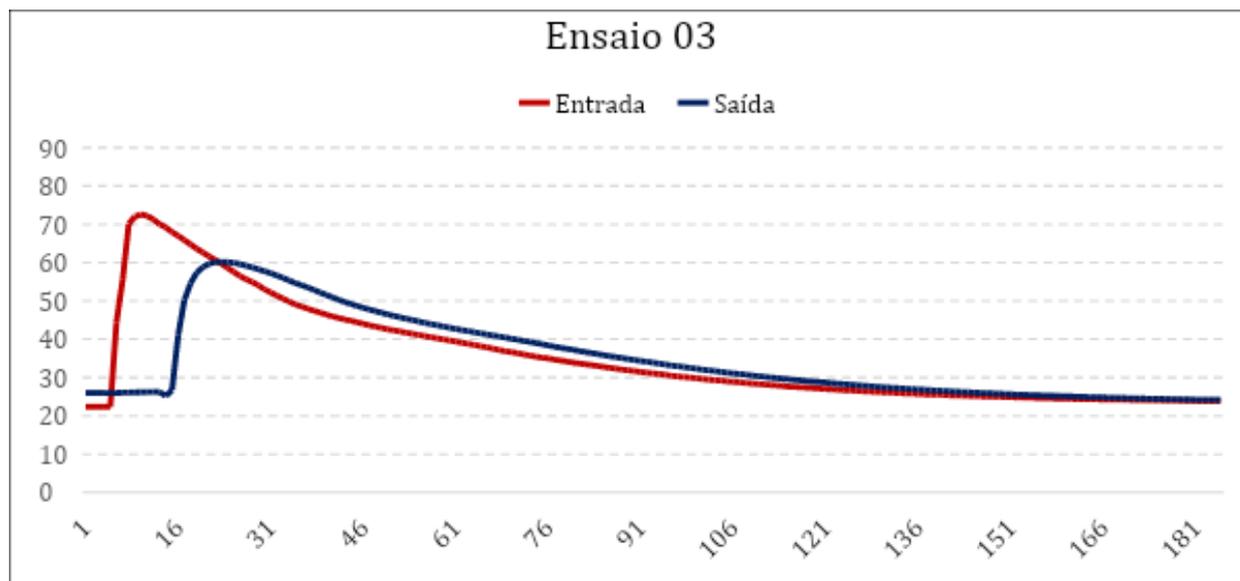


Fonte: Autor, 2020.

Com a redução do fluxo de água houve um aumento da temperatura de entrada, pois a máquina usada para o aquecimento do fluido aumentou a sua eficiência. Comparando os gráficos, é possível observar também a diferença no tempo em que o sistema se estabilizou, havendo uma diferença de 150 segundos. Entretanto não se percebe grande diferença em relação ao ensaio 1.

Observando os dados obtidos por meio dos ensaios onde utilizou-se o isolamento térmico, é possível notar que com a vazão máxima o resultado é semelhante ao ensaio 1, pois o rendimento da máquina aquecedora é baixo para esse sistema.

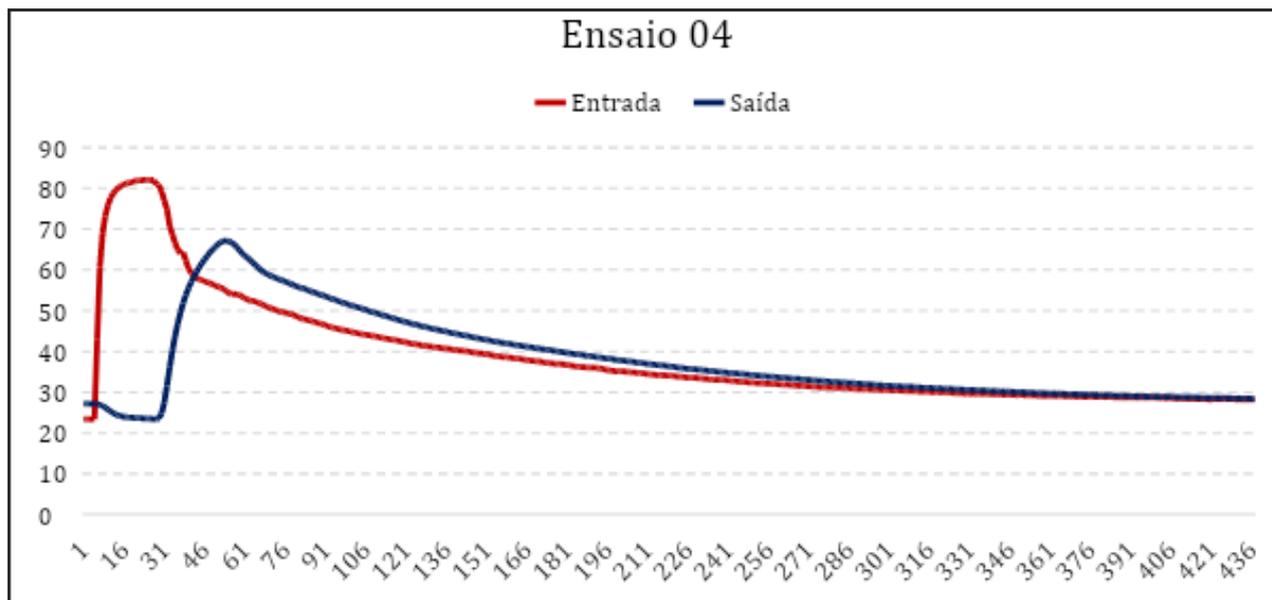
Gráfico 3. Ensaio com isolamento térmico e máxima vazão do fluxo de água.



Fonte: Autor, 2020.

O último ensaio realizado foi utilizando a lã de rocha isolando o sistema e a vazão reduzida do fluxo de água (Gráfico 4).

Gráfico 4. Ensaio com isolamento térmico e vazão reduzida do fluxo de água.

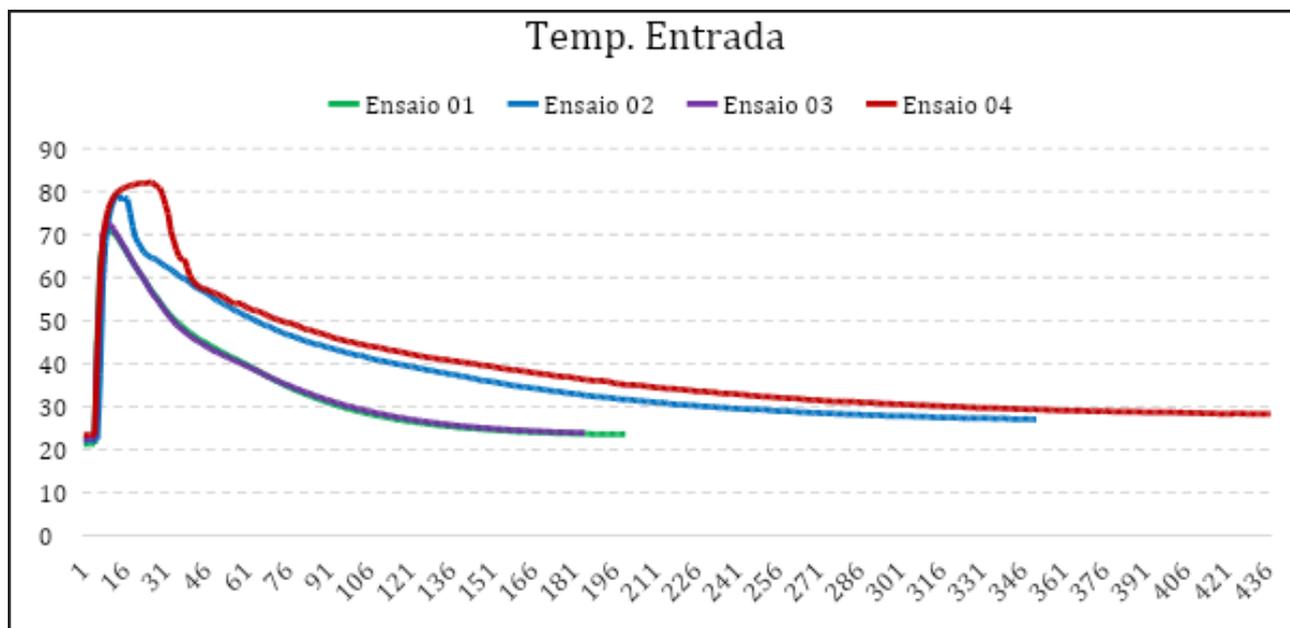


Fonte: Autor, 2020.

Nessa medição percebe-se o efeito que o isolamento causa no sistema, onde a temperatura permanece máxima por uma faixa de tempo maior que em outros ensaios realizados, tanto na entrada, quanto na saída. Uma diferença considerável também é observada no tempo em que o sistema levou para igualar as temperaturas de entrada e de saída e no valor em que se estabilizaram.

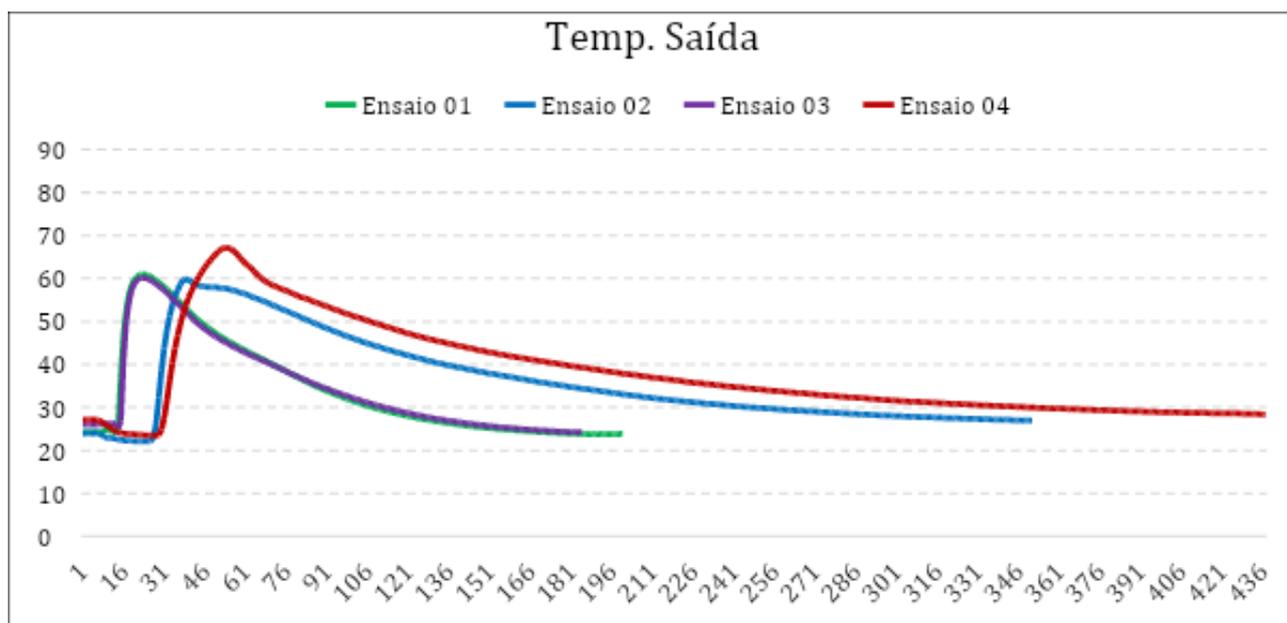
Os gráficos 5 e 6 demonstram as medições de entrada e de saída do fluxo de água dos quatro ensaios, respectivamente.

Gráfico 5. Medições de todas as entradas do fluxo.



Fonte: Autor, 2020.

Gráfico 6. Medições de todas as saídas do fluxo.



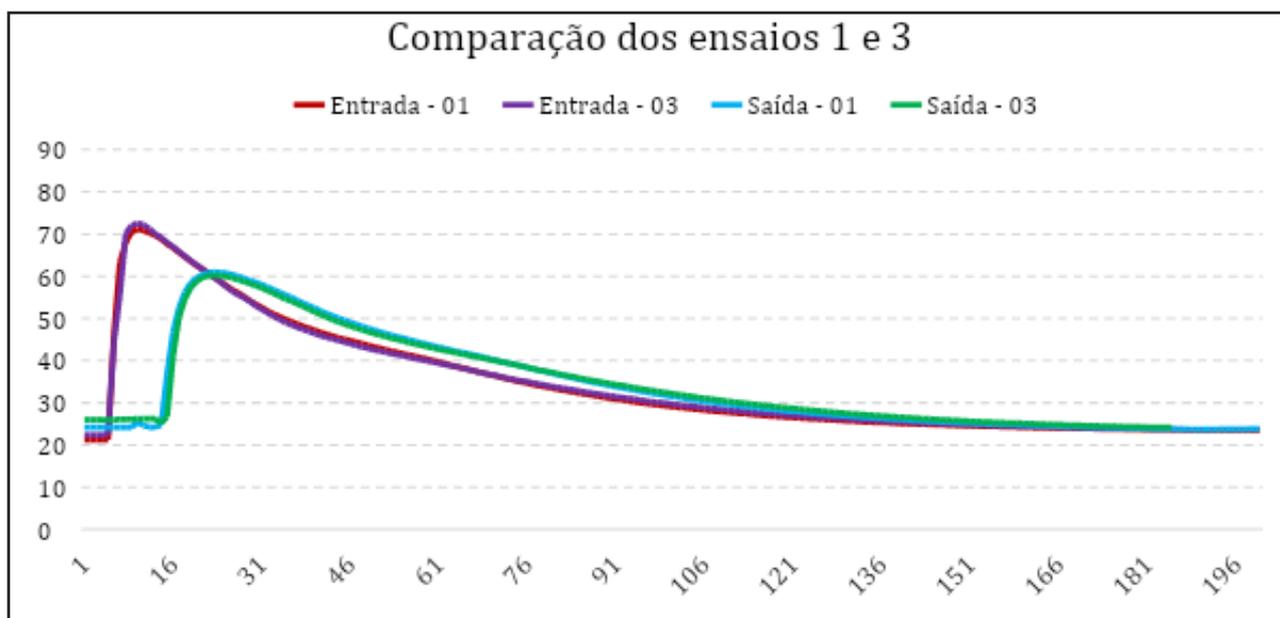
Fonte: Autor, 2020.

Observa-se que ensaios realizados a máxima vazão tanto utilizando isolamento, quanto sem o material isolante, se assemelham em diversos aspectos. Já nos outros ensaios

é possível notar que a utilização de um isolamento térmico mantém uma temperatura maior e por um período de tempo também maior.

Para possibilitar a visualização de como o isolamento térmico atuou no sistema, foram elaborados dois gráficos comparando os ensaios. O gráfico 7 retrata uma comparação entre os ensaios 1 e 3, onde em ambos a vazão foi a máxima do projeto e o único diferencial foi o isolamento aplicado no ensaio 3.

Gráfico 7. Comparativo entre os ensaios 1 e 3.

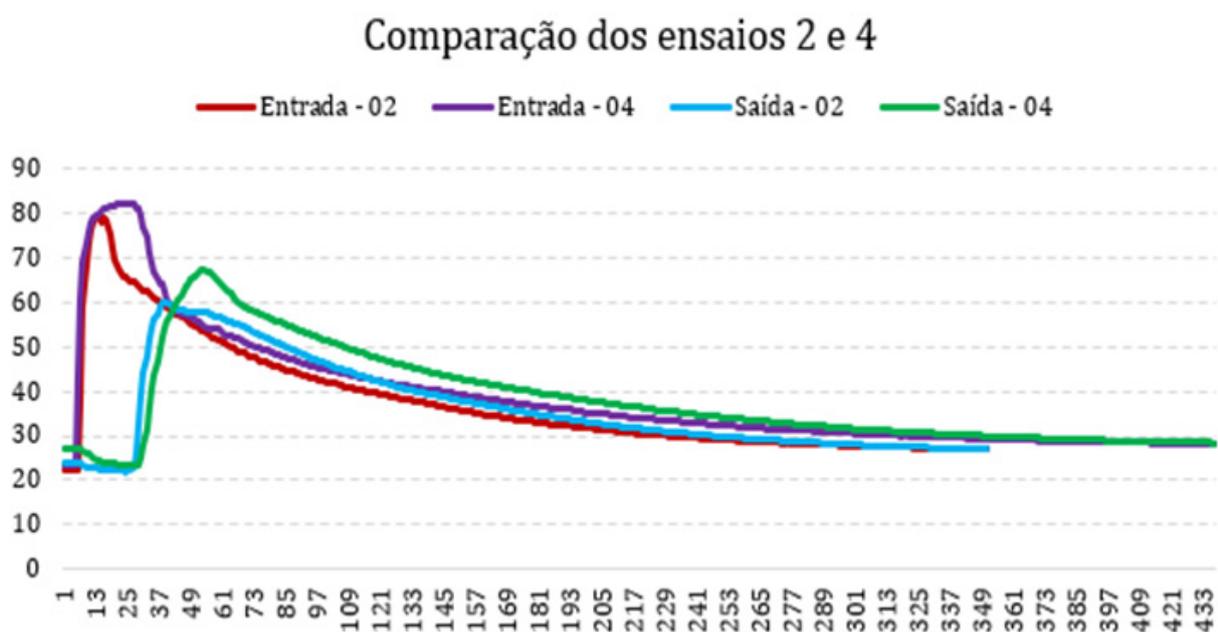


Fonte: Autor, 2020.

É possível verificar que os ensaios tanto com isolamento, quanto sem, são praticamente iguais, isso se dá por conta do rendimento do aquecedor elétrico utilizado que quando a uma vazão máxima perde a sua eficiência.

O gráfico 8 apresenta a comparação entre os ensaios 2 e 4 (vazão reduzida).

Gráfico 8 - Comparativo entre os ensaios 2 e 4.

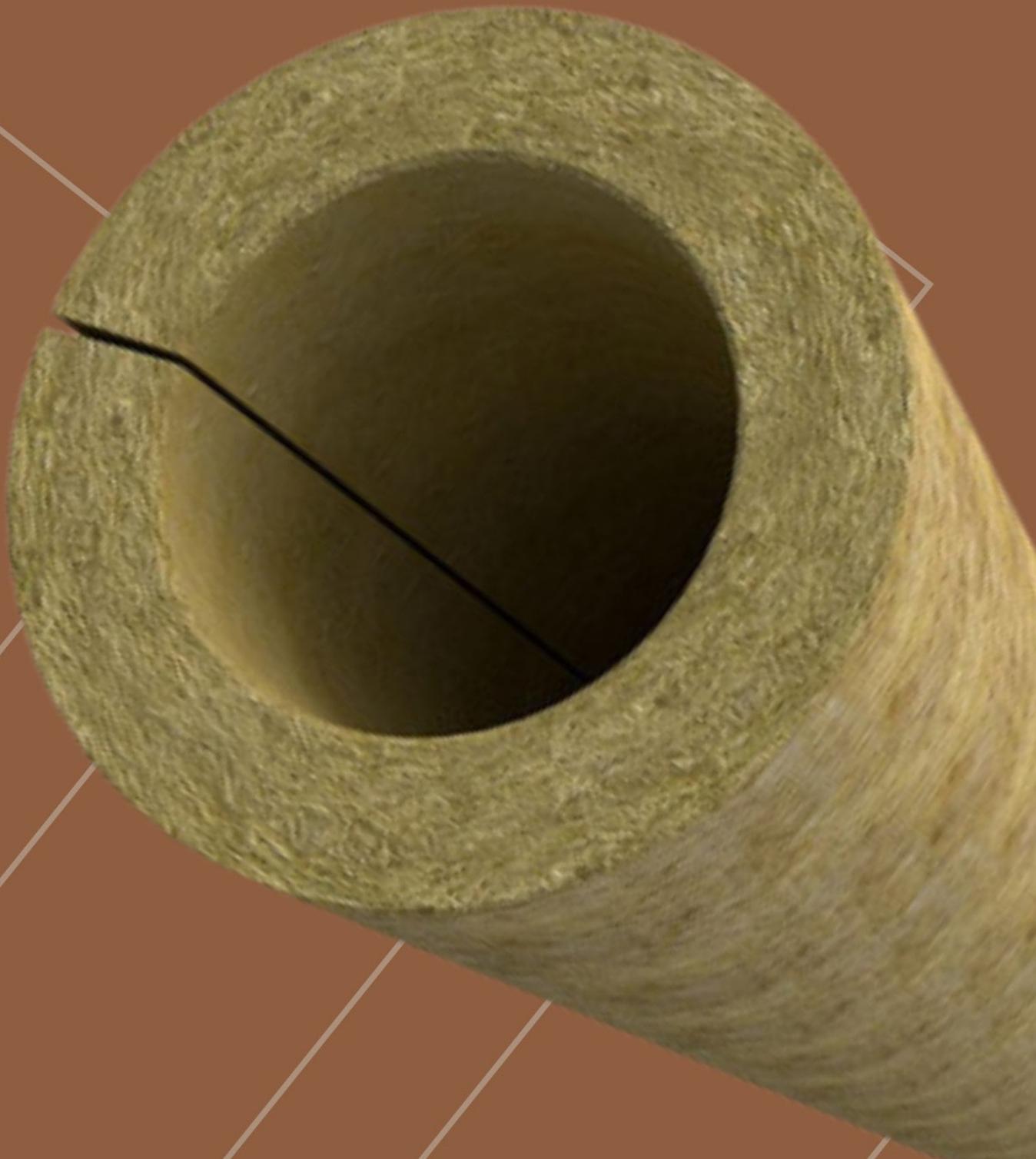


Fonte: Autor, 2020.

Nessa última análise é possível observar a eficiência da lã de rocha na isolação térmica. As curvas de entrada mostram que quando se utiliza um isolamento térmico a temperatura máxima é maior e mantida por mais tempo do que um sistema sem isolamento. Comparando as curvas de saída, é permitido afirmar que a temperatura máxima também atinge um valor maior, enquanto na saída do ensaio 2 a máxima chegou a aproximadamente 60°C, no ensaio 4 a temperatura chegou a 67°C.

Também é possível observar que as temperaturas em um sistema isolado, se estabilizam em um valor maior, neste caso gerando uma diferença de aproximadamente 10°C e o tempo de estabilização aumentou em 84 segundos.

Conclusão



Com o objetivo de comparar o fluxo de água aquecida em uma superfície cilíndrica, tanto com quanto sem isolante térmico, a fim de determinar se o uso de lã de rocha proporcionaria uma eficaz redução na transferência de calor, este livro conduziu quatro ensaios experimentais. Os resultados obtidos nesta análise experimental confirmaram os objetivos estabelecidos. Se extrapolados para sistemas reais de tubulações, esses resultados poderiam resultar em economias significativas tanto de energia quanto de combustível, que é frequentemente utilizado em processos de aquecimento.

Em conclusão, este estudo destaca a importância de utilizar materiais isolantes à base de lã mineral em projetos que envolvem a necessidade de reduzir a transferência de calor sem comprometer o desempenho dos equipamentos. Embora a aplicação inicial de isolamento possa envolver custos adicionais, ao longo do tempo, as economias geradas no sistema compensarão esses custos iniciais. Além disso, essa abordagem contribui para a preservação do meio ambiente, uma vez que resulta em economia de energia e água, além de utilizar um material não poluente. Portanto, o uso de isolantes térmicos à base de lã mineral não apenas traz benefícios econômicos, mas também é uma escolha ecologicamente consciente.

REFERÊNCIAS

ALEIXO, Fábio da Costa; **Reaproveitamento de lã de rocha para obtenção de vidros sodo-cálcicos**. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Instituto Federal do Espírito Santo. Espírito Santo: Vitória, 2015.

ALVES, Joner O.; **Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte de granito visando a produção de lã mineral**. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT. Minas Gerais: Ouro Preto, 2008.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S.; **Incropera - Fundamentos de transferência de calor e massa**. Tradução e revisão técnica: Fernando Luiz P. Pessoa, Eduardo M. Queiroz e André Luiz H. Costa. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.; **Transferência de Calor e Massa**. 4. ed. New York: The McGraw-Hill, 2012.

FENÔMENOS DE TRANSPORTE II - UNISUL. **Mecanismos de transferência de calor**. Disponível em: <<https://fenomenosdetransporte2unisul.wordpress.com/2013/03/10/mecanismos-de-transferencia-de-calor-1a-aula-fenomenos-de-transporte-ii/>>. Acesso em: 04 de nov. de 2020.

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA - Área técnica de refrigeração e condicionamento de ar. Santa Catarina: São José, 2009

ISOVER - O que é isolamento térmico. **Isover Saint-Gobain**. São Paulo, 12 de fev. de 2020. Disponível em: <<https://www.isover.com.br/noticias/o-que-e-isolamento-termico>> . Acesso em: 16 de set. de 2020.

KHAN ACADEMY - **O que é condutividade térmica?** Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/specific-heat-and-heat-transfer/a/what-is-thermal-conductivity>>. Acesso em: 15 de jan. de 2021.

LEITE, Pedro Paulo B. **Identificação, prevenção e monitoramento dos fatores causadores da corrosão sob isolamento térmico**. Tese (Mestrado em Montagem Industrial) - Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro: Niterói, 2016.

MAIA, Maria Fernanda C. B.; **Eficiência da aplicação do fosfogesso como isolante térmico industrial**. Tese (Doutorado em Energia) - Universidade Federal do ABC. São Paulo: Santo André, 2016.

NETO, Carlos B.; **Transferência de calor - Isolamento térmico**. Santa Catarina: São José, 2009.

REPROTERM - **Soluções Ambientais**. Disponível em: <<http://reproterm.com.br/la-de-rocha-thermax-flex/>>. Acesso em: 25 de nov. de 2020.

SISTEMAS TÉRMICOS. **Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica**. Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/3962290/>>. Acesso em: 5 de nov. de 2020.

THERMAL ENGINEERING - **What is Thermal Resistance – Thermal Resistivity – Definition**. Califórnia, 2019. Disponível em: <<https://www.thermal-engineering.org/what-is-thermal-resistance-thermal-resistivity-definition/>>. Acesso em: 27 de out. de 2020.





ISBN: 978-65-6068-009-8

TBR



9 786560 680098