EXPERIMENTO DIDÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE UMA BARRA METÁLICA

Rodrigo POSSAMAI [1], Daniel KOSLOSKI [1], Gustavo Knox WORMHOUDT[1], Leticia Kamei de Conto SILVA[1], Marlon ABATI [1], Airan RIBEIRO [1], Fernanda Batista de SOUZA[1].

[1]Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Francisco Beltrão
Francisco Beltrão – Paraná - Brasil

E-mails: airan@alunos.utfpr.edu.br, danielkosloski@alunos.utfpr.edu.br, wormhoudt@alunos.utfpr.edu.br, leticiaconto@alunos.utfpr.edu.br, marlonabati@alunos.utfpr.edu.br, rodrigopossamai.2019@alunos.utfpr.edu.br, fernandasouza@utfpr.edu.br.

Resumo: *O estudo experimental das ciências térmicas desempenha um papel fundamental no avanço do entendimento de diversos fenômenos. Entre esses fenômenos, destaca-se a condução de calor, que é amplamente observada em meios sólidos, especialmente em metais. A condutividade térmica, como propriedade intrínseca desses materiais, descreve a magnitude da transferência de calor através deles, e a determinação experimental da condutividade térmica é essencial. O presente estudo descreve um experimento de baixo custo realizado com o objetivo de determinar a condutividade térmica de uma barra cilíndrica metálica de material desconhecido. Para esse fim, foram utilizados um Arduino Uno e termopares, os quais foram conectados à barra metálica e isolados termicamente. Os resultados obtidos indicam uma condutividade térmica de 184,60 ± 2,22 (W/m·K) característica de condutividade térmica em ligas metálicas. Dessa forma, conclui-se que o experimento proposto contribui para o entendimento das propriedades térmicas dos materiais, possibilitando aplicações futuras.*

Palavras-chave: *Aleta; Condutividade Térmica; Transferência de Calor; Arduino.*

INTRODUÇÃO

A condução térmica é um fenômeno fundamental que desempenha um papel essencial em diversas áreas científicas e tecnológicas. A condutividade térmica de um material é uma propriedade crucial para entender sua capacidade de conduzir o calor; essa propriedade, que é classificada como uma propriedade de transporte, depende da estrutura física da matéria, atômica e molecular, que está relacionada com o estado da matéria. No

entanto, a determinação precisa desse coeficiente, geralmente requer equipamentos e métodos sofisticados, resultando em custos elevados (BERGMAN, *et al.* 2019).

Para a realização do experimento, foi utilizado um Arduino Uno e Termopares, dispositivos amplamente disponíveis e de custo acessível para medição de temperatura. Os termopares foram conectados à barra metálica, que foi isolada termicamente com mangueira de silicone para minimizar a influência de fatores externos. Uma fonte de energia foi conectada à extremidade da barra para manter um fluxo de calor constante.

Ainda que os resultados obtidos possam ter uma precisão reduzida em comparação a experimentos mais elaborados, eles ainda são de interesse científico e tecnológico, pois oferecem uma estimativa inicial da condutividade térmica do material das barras metálicas, essas informações podem ser valiosas para aplicações práticas em áreas que envolvem o desenvolvimento de sistemas de isolamento térmico de baixo custo ou soluções preliminares em situações em que a precisão não é primordial.

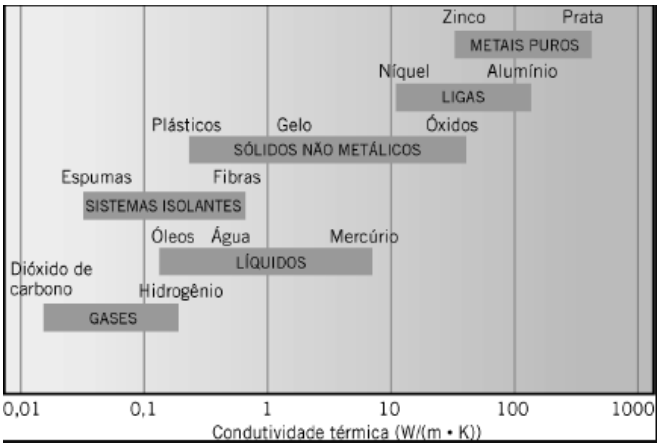
A realização do presente experimento, também pode auxiliar na disseminação de conhecimento, facilitando a compreensão de fenômenos intangíveis como a transferência de calor.

FUNDAMENTAÇAO TEÓRICA

A condução térmica é um mecanismo de transferência de energia em forma de calor que ocorre em materiais sólidos e fluidos sem escoamento, de partículas mais energéticas para menos energéticas, devido a um gradiente de temperatura. Ela envolve a transferência de energia térmica de molécula para molécula dentro do material, resultando em um fluxo de calor ao longo de um corpo (BERGMAN, 2019).

A condutividade térmica (k) é uma propriedade física que descreve a capacidade de um material em conduzir o calor, e pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a natureza do material, sua estrutura, a presença de impurezas, a temperatura e a pressão. Materiais com alta condutividade térmica, como metais (Figura 1), possuem uma estrutura ordenada e ligações fortes entre seus átomos, permitindo uma transferência eficiente de calor. Por outro lado, materiais com baixa condutividade térmica, como isolantes, apresentam estruturas amorfas ou ligações mais fracas, o que limita a transferência de calor.

Figura 1 - Faixas de condutividades térmicas de vários estados da matéria a temperaturas e pressões normais



Fonte: Bergman (2019).

Existem diversas técnicas disponíveis para a determinação da condutividade térmica de materiais, sendo que algumas delas requerem abordagens complexas e de alto custo, como a técnica do fio quente e o método de placas quentes protegidas(SILVA, 2020; SANTOS *et al*., 2004).

No entanto, mesmo na ausência de equipamentos avançados, é possível desenvolver experimentos de forma mais econômica, os quais podem fornecer estimativas razoáveis da condutividade térmica. Esses experimentos podem desempenhar um papel importante na disseminação do conhecimento, especialmente para estudantes de graduação que podem enfrentar dificuldades no estudo teórico de fenômenos intangíveis (AUGUSTO *et al.*, 2019).

METODOLOGIA

Descrição dos materiais e custos

De acordo com Çengel (2009) e Bergman (2019) este estudo se dedica a uma análise mais detalhada da transferência de calor por condução. Utilizando a Lei de Fourier como base teórica e considerando as condições experimentais estabelecidas, foi possível realizar uma dedução aproximada da condutividade térmica do material em estudo, utilizando materiais acessíveis e de custo relativamente baixo (Tabela 1).

Montagem do aparato experimental

Inicialmente, a fonte de energia foi utilizada para fornecer energia à barra metálica. Para isso, os fios da fonte foram conectados a um fio de cobre esmaltado, que por sua vez

foi conectado à extremidade inicial da barra, criando assim um aquecedor de potência conhecida (Figura 2).

Tabela 1 - Relações de material, quantidade e custo

Materiais	Quantidade	Custo (R$)
Termopares DS18B210	4 Unidades	80,00
Barra metálica	1 Unidade	Cedido
Fio de cobre esmaltado	10 Metros	10,00
Mangueira de silicone	3 Metros	Cedido
Fita Isolante	3 Unidades	Cedido
Fonte 15V	1 Unidade	Cedido
Kit Arduino Uno	1 Unidade	150,00
Garra Metálica Suporte	4 Unidades	Cedido
Cano de PVC	1 Unidade	Cedido
Total		240,00

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 2 - Conexão da fonte de calor

Fonte: Autoria Própria (2023).

Após a conexão do aquecedor à barra, foi realizado o isolamento utilizando fita isolante, enquanto o restante da barra metálica foi revestido com uma mangueira de silicone, proporcionando isolamento térmico e minimizando trocas de calor por convecção com o meio ambiente. Ao longo da camada isolante da mangueira, foram feitos quatro furos, nos quais foram inseridos termopares para a obtenção de dados de temperatura. Esses termopares também foram isolados utilizando fita isolante (Figura 3).

Figura 3 - Conexão de Termopares e Isolantes Térmicos

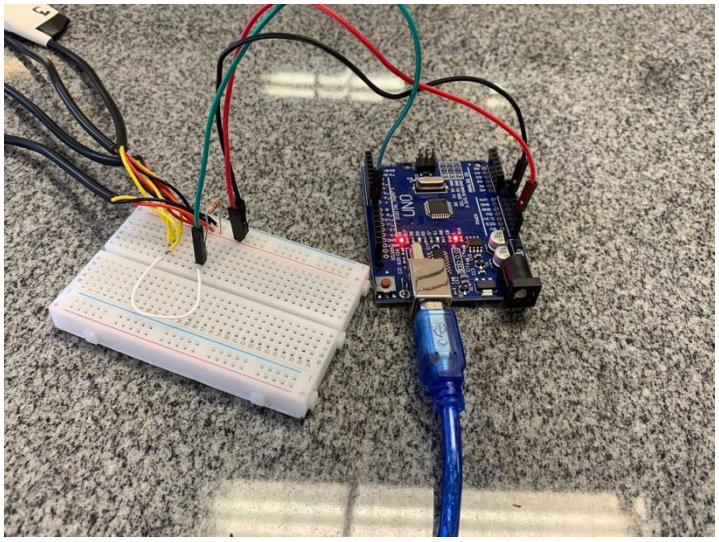
Fonte: Autoria Própria (2023).

Uma vez que o aquecedor, os termopares e os isolantes térmicos foram devidamente conectados, a outra extremidade da barra foi posicionada em contato com um fluxo constante de água à temperatura ambiente de 19,5ºC. Dessa forma, tornou-se possível realizar cálculos com base na hipótese de estado estacionário.

Os termopares, por sua vez, transmitiram os dados de temperatura para um Arduino (Figura 4), onde foi possível observar o alcance do estado estacionário, indicada pelo cessar das variações nas temperaturas. A coleta dos dados de temperatura foi realizada em triplicata.

Para a obtenção dos dados de temperatura, empregou-se um sistema baseado em Arduino, composto por um Arduino UNO para a interpretação dos dados, termopares DS18B210, um resistor de 4000 ohms e uma protoboard para as conexões elétricas. Foi desenvolvido um código em linguagem C++, utilizada pelo Arduino para interpretação dos dados, em conjunto com o aplicativo Arduino IDE, responsável pela comunicação dos dados com o computador.

Figura 4 – Conexão Termopar x Arduino



Fonte: Autoria Própria (2023).

Cálculos para obtenção da condutividade térmica

Para o cálculo da condutividade térmica (k) da barra metálica, foi utilizada a lei de Fourier (Equação 1):

$$q = -kA\frac{dT}{dz} \tag{1}$$

A potência fornecida ao sistema (q) foi calculada com os dados de Voltagem (V) e Corrente (I):

$$q = V \cdot I \tag{2}$$

A área (A) utilizada é a perpendicular ao fluxo, e foi calculada pela Equação 3:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \tag{3}$$

Dividindo a Taxa de calor (Equação 2), pela área (Equação 3), obtemos o fluxo de calor (Equação 4):

$$q'' = \frac{q}{A} \tag{4}$$

Considerando as condições de contorno que em z = 0,175 m a T(0,175) = T_1 (Temperatura medida no termopar 1) e em z = 0,355 m a T(0,355) = T_4 (Temperatura medida no termopar 4) para solução da equação 1, obtém-se a condutividade térmica.

A única varável restante é a variação da temperatura em relação ao eixo Z do cilindro, que pode ser calculada com os dados das posições dos termopares (Tabela 2), e dos dados de temperatura obtidos pelos Termopares.

Tabela 2 - Posição dos termopares

Termopar	Posição (m)
1	0,175
2	0,235
3	0,295
4	0,355

Fonte: Autoria própria (2023).

Para um estudo mais aprofundado da transferência de calor ao longo da barra metálica, foi calculado o seu perfil de temperatura, para comparação posterior de seus valores teóricos, com os dados experimentais obtidos.

A dedução do perfil de temperatura parte da Equação do balanço de Energia para Coordenadas Cilíndricas (Equação 5):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(k\frac{\partial T}{\partial \phi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q'' \tag{5}$$

Aplicando as hipóteses de fluxo unidirecional em Z para coordenadas cilíndricas, estado estacionário, e ausência de geração de energia (Equação 6):

$$0 = \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{6}$$

Aplicando a hipótese de propriedades físicas constantes, e integrando a Equação 6, obtemos o perfil de temperatura em função de Z da barra metálica (Equação 7):

$$T(z) = C1 \cdot z + C2 \tag{7}$$

Com base nos dados experimentais, podemos definir as condições de contorno 1 e 2, para o cálculo das constantes de integração na Equação 7:

- Condição de Contorno 1 (Equação 8):

$$T(0{,}175) = 301{,}23K \tag{8}$$

- Condição de Contorno 2 (Equação 9):

$$T(0{,}355) = 391{,}09K \tag{9}$$

Obtendo os valores de $C1$ e $C2$ e substituindo na Equação 7, obtém-se o perfil de temperatura da barra metálica em função de z (Equação 10):

$$T(z) = -56{,}3703 \cdot z + 311{,}0948 \tag{10}$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Determinação da Condutividade Térmica

As medidas das temperaturas dos termopares 1 e 4 e os valores de condutividade térmica para os três experimentos são apresentados na Tabela 3. As temperaturas médias e a condutividade térmica média são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 3 – Dados de Temperatura e Condutividade da Barra metálica

ΔZ(m)	T_1(ºC)	T_4(ºC)	ΔT(ºC)	k (W/m·K)
0,18	27,87	17,84	10,03	186,54
0,18	28,14	18,03	10,11	185,07
0,18	28,25	17,98	10,27	182,18

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 4 - Médias de dados experimentais de temperatura

T_1(ºC)	T_2(ºC)	T_3(ºC)	T_4(ºC)	k (W/m·K)	Desvio Padrão
28,09	21,82	19,37	17,95	184,60	2,22

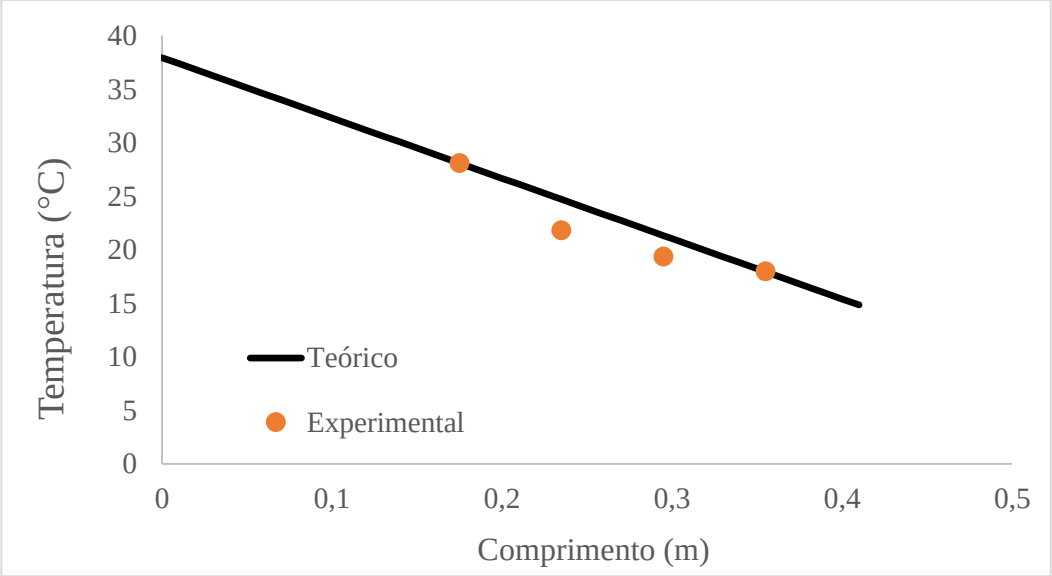
Fonte: Autoria própria (2023).

Após a realização dos experimentos, foi obtido um valor de condutividade térmica para a barra metálica de 184,60±2,22 W/m·K. Conforme o apêndice A de Bergman (2019), que apresenta as propriedades termofísicas de alguns materiais, a condutividade térmica obtida nesse experimento lembra o k de ligas metálicas de alumínio, o que indica que a barra possivelmente não consiste em um material puro, mas sim em uma mistura. Com base apenas nas comparações entre os valores de condutividade térmica encontrados na literatura e aqueles obtidos experimentalmente, não é possível afirmar com certeza quais materiais compõem a liga metálica. No entanto, esses dados podem ser utilizados para estudos termodinâmicos envolvendo trocas de calor e, por meio de análises teóricas, determinar se o material em questão seria adequado para a aplicação desejada.

O perfil de temperatura unidirecional em estado estacionário obtido pela Equação 10 e as temperaturas medidas pelos termopares são apresentados na Figura 5. Observou-se que as temperaturas medidas pelos termopares 1 e 4, foram previstas pelo perfil devido as condições de contorno. No entanto, as temperaturas registradas pelos termopares 2 e 3 apresentaram desvios de 2,88°C e 1,95°C, respectivamente.

Embora seja importante ressaltar que as hipóteses adotadas podem ter influenciado o valor real da condutividade térmica do material, o objetivo principal deste estudo foi alcançado. O método desenvolvido buscou determinar a condutividade térmica utilizando materiais de baixo custo, mesmo que com uma precisão reduzida, ainda assim apresentando resultados satisfatórios.

Figura 5 - Perfil de temperatura unidirecional em estado estacionário



Fonte: Autoria Própria (2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O experimento de baixo custo proposto nesse trabalho permitiu a obtenção da condutividade térmica de uma barra metálica de composição desconhecida. O k obtido neste estudo (k = 184,60±2,22 W/m·K) revelou que a barra metálica pode ser composta de uma liga metálica de alumínio. A realização deste experimento exigiu um aprimoramento da compreensão dos fenômenos de transferência de calor, estimulando discussões detalhadas.

Como resultado, houve um reforço no conhecimento teórico, permitindo uma consolidação mais efetiva dos conceitos estudados.

No caso de interesse em reproduzir o experimento para fins didáticos, é recomendável utilizar uma barra metálica com um coeficiente de condutividade térmica previamente conhecido. Essa escolha permitirá a comparação direta entre os valores obtidos experimentalmente e os valores reais, proporcionando uma melhor compreensão do processo e uma avaliação mais precisa dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGMAN, T. L. *Incropera: fundamentos de transferência de calor e de massa.* Rio de Janeiro: LTC, 2019. Disponível em: https://discovery.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=93589267-f431-3c07-b125-d92f07bcb2e6. Acesso em: 6 jul. 2023.

ÇENGEL, Y. A. *Transferência de calor e massa: uma abordagem prática*. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

AUGUSTO P. A., CASTELO-GRANDE, T., ESTEVEZ, A. M. Practical demonstrations designed and developed by the students for pedagogical learning in transport phenomena. *Education for Chemical Engineers,* v. 26, p. 48–57, 2019.

SILVA, H. B. CONTROLADOR DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (CTC) PARA ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA PELO MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA. 2020.

SANTOS, W. N. DOS et al. Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros. Polímeros, v. 14, n. 5, p. 354–359, dez. 2004.