



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS UTILIZANDO UM CAMPO DE TEMPERATURA PERIÓDICO: UM ESTUDO TEÓRICO.

Leonardo Vinicius Nascimento da Silva, leonardo.nascimento@ufvjm.edu.br¹

Afonso Luís Rizzi Follador, afonso.luis@ufvjm.edu.br¹

Thiago Parente Lima, thiago.parente@ufvjm.edu.br¹

José Ricardo Ferreira Oliveira, jose.ricardo@ufvjm.edu.br¹

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Instituto de Ciência e Tecnologia. Rodovia MGT 367
Km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina/MG, CEP 39100-000.

Resumo. A caracterização das propriedades termofísicas dos materiais é crucial na Engenharia e nas Ciências Térmicas, desempenhando um papel fundamental na concepção e execução de projetos relacionados à transferência de calor. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho consiste num estudo teórico sobre os métodos de estimativa de propriedades como a difusividade térmica, a condutividade térmica e o calor específico de ligas metálicas por meio da aplicação de um campo de temperatura periódico. De modo específico, o presente trabalho visa a concepção e calibração de uma bancada experimental baseado no método de Angstrom, além da quantificação das incertezas associadas às medições de temperatura. Atualmente, a bancada experimental desenvolvida encontra-se em fase de calibração dos termopares instalados. A medição experimental das propriedades termofísicas em análise constitui objeto de trabalhos futuros.

Palavras-chave: Difusividade Térmica. Condutividade Térmica. Ligas Metálicas. Método de Angstrom.

Abstract. The characterization of the thermophysical properties of materials is crucial in Engineering and Thermal Sciences, playing a fundamental role in the design and execution of heat transfer-related projects. In this context, the objective of the present work consists of a theoretical study on the methods for estimating properties such as thermal diffusivity, thermal conductivity, and specific heat of metal alloys through the application of a periodic temperature field. Specifically, the present work aims at the design and calibration of an experimental bench based on the Angstrom method, as well as the quantification of uncertainties associated with temperature measurements. Currently, the developed experimental bench is in the phase of calibrating the installed thermocouples. The experimental measurement of the thermophysical properties under analysis is the subject of future work.

Keywords: Thermal Diffusivity. Thermal Conductivity. Metallic Alloys. Angstrom Method.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização confiável e precisa das propriedades termofísicas dos materiais é de extrema importância para o desenvolvimento de projetos de Engenharia. Essas propriedades desempenham um papel na concepção e otimização de projetos, em virtude de contribuir para eficiência energética, com seleção adequada de materiais para isolamento térmico, no desempenho térmico, em aplicações na indústria automotiva e aeroespacial, além do desenvolvimento de novos materiais. Portanto, a determinação dessas propriedades faz-se necessárias para o aprimoramento e desenvolvimento das ciências e engenharia. Diante disso, observa-se na literatura, diversos métodos para a estimativa dessas propriedades térmicas, esses são categorizados em dois grupos, em virtude do campo de temperatura na amostra, sendo: métodos transitórios e métodos periódicos (Santos et al., 2010).

No âmbito do campo transitório, o clássico método Flash abordado por Chen et al. (2021), foi empregado para a determinação da difusividade térmica das ligas binárias Ag-Si, juntamente com a medição do calor específico por meio de um calorímetro de varredura diferencial. Esses dados foram utilizados para a determinação da condutividade térmica da liga. Nos seus estudos, Pinto et al. (2015) discretizarão de forma direta do método Flash, seguindo os caminhos estabelecidos por Parker (1961). Essa abordagem proporciona uma base robusta e fundamentada para a caracterização

térmica de materiais. Além disso, as pesquisas conduzidas por Lim et al. (2009) desempenharam um papel fundamental no aprimoramento do método Flash, ao explorar a influência da largura finita do pulso de flash e os efeitos das camadas de grafite. Essa investigação possibilitou o desenvolvimento de um modelo mais preciso para a determinação da difusividade térmica de metais como cobre, alumínio e ferro. A partir dos estudos apresentados, evidencia-se que o método Flash obtém diretamente a difusividade térmica, no entanto, sua abordagem torna-se indireta ao estimar a condutividade térmica.

Ademais, outro método transitório amplamente aplicado na literatura é o método do fio quente, como descrito por Gravena et al. (2010), para determinar a condutividade térmica e difusividade térmica de materiais poliméricos. Essa abordagem fundamenta-se na utilização de um filamento aquecido, envolto pelo material em análise, com o propósito de mensurar suas propriedades térmicas. No estudo de dos Santos et al. (2004), destaca-se que o método de fio quente apresenta limitações, especialmente em relação a materiais caracterizados por elevada condutividade térmica e condutores elétricos. No entanto, dos Santos (2007) propõe o uso de uma solução aquosa de alumina aplicado na superfície em contato da mostra, o que permitiu estimar a condutividade térmica de materiais cerâmicos condutores. Além disso, esse método não está restrito a materiais sólidos, visto que Zhao et al. (2024) aplica essa técnica transiente para encontrar a condutividade térmica do fluido criogênico, enquanto que Merritt et al. (2022) utiliza uma versão modificada desse método para determinar a condutividade térmica de líquidos. Logo, embora o método tenha se revelado direto e preciso na determinação das propriedades térmicas, é necessário que sua aplicação seja orientada pelas características da amostra e condições experimentais.

No estudo realizado por Shirsat et al. (2023), um método transiente foi empregado para determinar propriedades térmicas do concreto sacrificial ferrosilicioso (FSSC), foi realizado o aquecimento da superfície do material, permitindo a medição da resposta térmica por meio de termopares. Enquanto isso, a pesquisa conduzida por Wada et al. (2023) aplicou método de fonte de linha transitória para obter a condutividade térmica em ambientes de reatores nucleares, com auxílio de um termopar tipo K, por ser relativamente de baixo custo e de fácil manutenção. Portanto, destaca-se a crucial importância das propriedades termofísicas para assegurar a segurança das usinas nucleares e promover a eficiência energética.

Com o avanço no desenvolvimento de dispositivos optoeletrônicos, sensores e filmes finos, a determinação das propriedades térmicas emerge como um desafio significativo. Nesse sentido, a pesquisa de Bodzenta et al. (2010) aplicou métodos de medição fototérmica para a determinação da difusividade térmica ou condutividade térmica de filmes finos, por meio do efeito da miragem para detecção de distúrbio de temperatura. Em uma abordagem semelhante, Mami et al. (2018) aplicou o método eletropiroelétrico para determinar a condutividade térmica e a difusividade térmica de filmes finos de sulfetos semicondutores. Pulsos elétricos foram empregados para induzir flutuações de temperatura nas amostras, e a corrente piroelétrica foi medida. Outrossim, Gertych et al. (2019) empregaram a técnica Raman optotérmica para analisar as propriedades dos filmes finos de MoS₂. Nesse método, um feixe de laser foi utilizado para aquecer o material, enquanto um espectrômetro realizava as medições. Logo, o interesse na análise das propriedades térmicas visa selecionar o filme mais apropriado, inovando em novos materiais.

Outras abordagens para a estimativa de propriedades térmicas têm sido desenvolvidas com base em métodos periódicos. Esses métodos envolvem um ciclo de aquecimento e resfriamento alternado em função do tempo, resultando um gradiente de temperatura na amostra semelhante a uma onda senoidal. Estudos de Lamvik (1980) e Bodzenta (2008) destacam a eficácia dessa técnica na investigação das propriedades térmicas de materiais sólidos, em especial, a difusividade térmica. Exemplo disso, Ferreira-Oliveira et al. (2021a) estimou a difusividade térmica de uma liga com memória de forma NiTi aplicando um campo periódico. Posteriormente, quantificaram a incerteza usando o método de Monte Carlo, revelando baixa dispersão e alta confiabilidade na medição. Diversas pesquisas também destacaram a eficácia do método 3w na medição da condutividade térmica de sólidos, resultando em intervalos de confiança aceitáveis (Mishra et al. (2019) e Wang e Sen (2009)). Assim, observa-se a consolidação das técnicas baseadas em métodos periódicos para a caracterização de propriedades térmicas.

Os métodos periódicos permitem que a temperatura varia de forma periódica ao longo da amostra. Ao atingir o regime permanente, torna-se possível a estimativa da difusividade térmica, ao analisar a temperatura em dois pontos. Zhou et al. (2001) utilizou o método de Angstrom para a estimativa da difusividade de magnésio metálico e, posteriormente, determinou a condutividade térmica de forma indireta, relacionando a difusividade térmica e o calor específico. Em uma abordagem, Ferreira-Oliveira et al. (2021b) mensurou a difusividade térmica de ligas de aço inoxidável aplicando o método de Angstrom, demonstrando um desvio inferior a 5,5% em comparação aos dados encontrados na literatura. Esses resultados atestam a eficácia do método empregado.

Santos et al. (2010) empregaram uma variante do método de Angstrom para avaliar a difusividade térmica de determinados polímeros. O aparato de medição desenvolvido destacou-se por instalação descomplicada, baixo custo e manutenção facilitada. Prasad e Ambirajan (2018) abordaram critérios visando aprimorar a precisão da difusividade térmica ao empregar o método de Angstrom em materiais como: aços inoxidáveis, ligas de alumínio e titânio. Os dados obtidos apresentaram dispersão inferior a 2,1% em comparação com informações literárias. Wang et al. (2022) apresentou uma modificação no método de Angstrom, utilizando uma configuração baseada em membrana, para realizar medições diretas da condutividade térmica de membranas de politetrafluoretileno (PTFE). Essa adaptação destaca a robustez do método de Angstrom, consolidando-o como uma técnica eficaz na literatura para a estimação de propriedades térmicas,

no entanto, o seu uso requer três suposições sendo: as propriedades térmicas são independentes da temperatura, o fluxo de calor é paralelo ao eixo da amostra e a borda distante da amostra permanece a uma temperatura constante.

Diversas técnicas estão disponíveis para a determinação da difusividade térmica, condutividade e calor específico. Contudo, escolher o método mais adequado, equilibrando custo e confiabilidade, configura-se um desafio competitivo em escala nacional e internacional. Em geral, métodos transitórios são mais rápidos, porém apresentam custos mais elevados em implementação, operação e manutenção quando comparados aos métodos periódicos. Nesse viés, este estudo buscou modelar teoricamente a medição simultânea da condutividade térmica e da difusividade térmica utilizando um campo de temperatura periódico. De modo específico, o presente trabalho objetivou a concepção e calibração de uma bancada experimental de baixo custo e de fácil manutenção. A escolha da amostra incidiu sobre o aço 1045, devido à sua aplicação frequente em engenharia e à disponibilidade de dados na literatura para fins de comparação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Estudo teórico do modelo de transferência de calor

A modelagem térmica unidimensional proposta para a estimativa das propriedades térmicas deste trabalho são fundamentadas nos estudos de Carslaw e Jaeger (1959), conforme ilustrado pela Fig. 1.

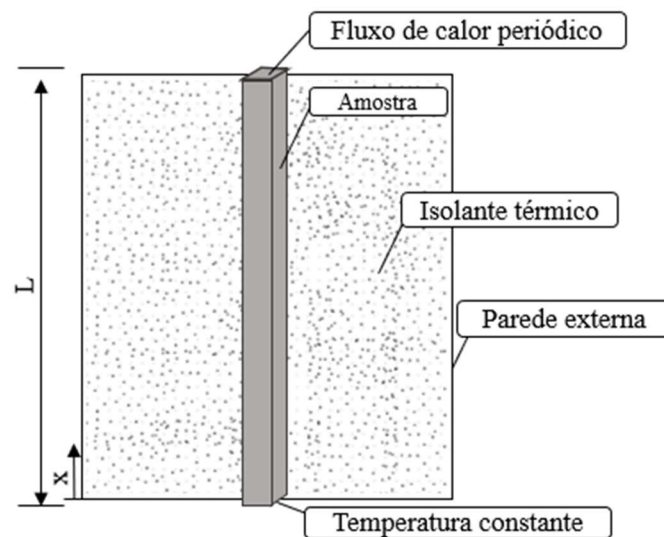


Figura 1. Modelagem do problema de condução de calor

Inicialmente, a concepção da abordagem analítica para solucionar a problemática em questão encontra-se limitada por diversas condições. Primeiramente, é imperativo assegurar a ausência de geração interna de calor no sistema, que deve ser tratado como um meio isotrópico. Além disso, torna-se essencial que as propriedades termofísicas permaneçam constantes dentro do intervalo de temperatura do experimento. O fluxo de calor é unidirecional ao longo do eixo \$x\$, dada a considerável redução da espessura da amostra em comparação com suas demais dimensões, o que torna o gradiente de temperatura transversal desprezível. Para isso, presume-se que as faces da amostra estejam termicamente isoladas ou que a mesma esteja inserida em um ambiente com um número de Biot (\$Bi\$) inferior a 0,1. Com base nessas premissas, o modelo matemático da barra semi-infinita com comprimento \$L\$, a condição inicial e as condições de contorno são apresentados respectivamente por:

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_i; \quad 0 \leq x \leq L \quad (2)$$

$$T(L, t) = A(L) \sin(\omega t + \epsilon) \quad (3)$$

$$T(0, t) = T_o \quad (4)$$

Nesse contexto, ao iniciar o experimento, a amostra encontra-se inicialmente à mesma temperatura de \$T_i\$. Contudo, ao aplicar um fluxo de calor periódico, com frequência pré-determinada, resulta na formação de um campo de temperatura

periódico na amostra. Dessa forma, a solução para o problema de condução de calor é apresentada pela Eq. (5), entretanto, a solução para o campo de temperatura permanente periódica só é estabelecida quando esse regime é alcançado (Carslaw e Jaeger, 1959).

$$T(x, t) = A \sin(\omega t - \phi + \epsilon) + 2\pi\alpha \sum_{n=1}^{\infty} B \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) e^{\left(\frac{-\alpha n^2 \pi^2 t}{L^2}\right)} \quad (5)$$

$$A = \left\{ \frac{\cosh\left[2\left(\frac{w}{2\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}x\right] - \cos\left[2\left(\frac{w}{2\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}x\right]}{\cosh\left[2\left(\frac{w}{2\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}L\right] - \cos\left[2\left(\frac{w}{2\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}L\right]} \right\}^{\frac{1}{2}} = \frac{A(x)}{A(L)} \quad (6)$$

$$\phi = \arg \left\{ \frac{\sinh\left[x\left(\frac{w}{2\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}(1+i)\right]}{\sinh\left[L\left(\frac{w}{2\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}(1+i)\right]} \right\} \quad (7)$$

$$B = \frac{n(-1)^n [\alpha n^2 \pi^2 \sin(\epsilon) - \omega L^2 \cos(\epsilon)]}{\alpha^2 n^4 \pi^4 + \omega^2 L^4} \quad (8)$$

Onde A equivale a razão de amplitude, ω representa a frequência da onda térmica (rad/s), ϕ a defasagem de fase e ϵ a fase de referência. A solução Eq. (5) e suas deduções são apresentadas por Oliveira et al. (2017). Ao observar a Eq. (5), nota-se que o regime transitório do campo de temperatura desaparece quando, logo, a condição de regime periódico é obtida de forma permanente. Assim, ao adotar a premissa de, conforme sugerido por Oliveira et al. (2017), a função que descreve o campo de temperatura periódico permanente é apresentada pela Eq. (9).

$$T(x, t) = A \sin(\omega t - \phi) \quad (9)$$

Ademais, ao obter o campo de temperatura periódico permanente durante o experimento, torna-se viável estimar a difusividade térmica por meio da Eq. (10) proposta por Hahn et al. (2019).

$$\alpha = \frac{\omega(x_r - x_n)^2}{2[\phi(x_2) - \phi(x_1)] \ln \frac{A(x_n)}{A(x_r)}} \quad (10)$$

Onde x_r e x_n caracterizam as posições de referência e qualquer outra posição ao longo da amostra, respectivamente. Adicionalmente, Oliveira et al. (2017) aborda o reajuste da Eq. (10) em (11), onde f é a frequência da onda térmica (em Hertz). Este ajuste é realizado com o objetivo de obter uma função linear $Y = mX$, onde m descreve o inverso da difusividade térmica da amostra.

$$\frac{\phi(x_2) - \phi(x_1)}{\pi f} \ln \frac{A(x_n)}{A(x_r)} = \frac{1}{\alpha} (x_r - x_n)^2 \quad (11)$$

A determinação da condutividade térmica (K) pode ser estimada por meio da Eq. (12), conhecida como Lei de Fourier, em um regime estacionário utilizando o conhecimento do gradiente de temperatura entre dois pontos (Bergman et al, 2019).

$$q_x = -KA_p \frac{dT}{dx} = \frac{kA_p}{L} (T_1 - T_2) \quad (12)$$

Ajustando a Eq. (12), a condutividade térmica do material pode ser encontrada por:

$$K = \frac{q_x L}{A_p (T_1 - T_2)} \quad (13)$$

Onde A_p equivale a área da superfície aquecida, q_x indica a média do fluxo de calor rejeitado pela resistência elétrica ao longo do experimento, e $T_{1,2}$ descreve a temperatura em determinado ponto. Para estimar a condutividade térmica, é crucial assegurar que toda a quantidade de calor seja absorvida pela amostra. Portanto, torna-se necessário realizar uma adaptação do modelo, representada na Fig. 2.

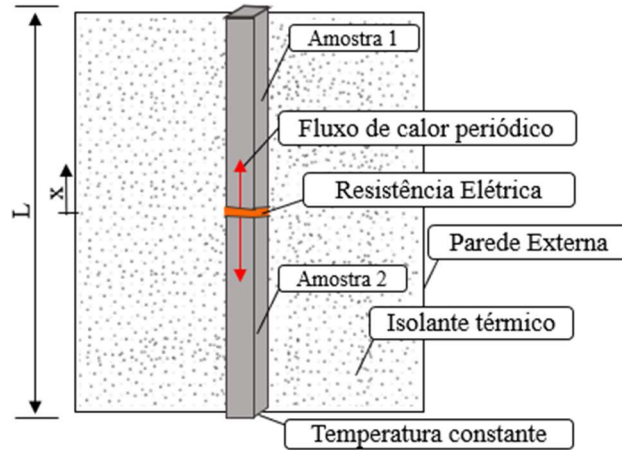


Figura 2. Adaptação ao modelo de condução de calor

Nesse sentido, a taxa de transferência de calor q_x aplicado a cada amostra é expresso como a metade da potência da resistência elétrica sendo essa potência desenvolvida e apresentada por Oliveira et al. (2017) na Eq. (14), onde P_m representa a potência média em watt (W) e ω_a a frequência do aquecimento periódico.

$$P = P_m [1 - \cos(\omega_a t)] \quad (14)$$

Após a estimativa tanto da difusividade térmica quanto da condutividade térmica por meio do experimento, é possível determinar o calor específico (C_p) da amostra utilizando as relações entre difusividade e condutividade térmica, sendo apresentado pela Eq. (15), em que ρ é a densidade aparente.

$$C_p = \frac{\alpha}{k \times \rho} \quad (15)$$

2.2 Projeto da bancada experimental

O presente trabalho se fundamenta no Modelo de Condução de Calor e no Método de Angstrom para a concepção e desenvolvimento do conjunto experimental. Nessa perspectiva, a configuração do ambiente experimental é descrita e visualizada na Figura 3.

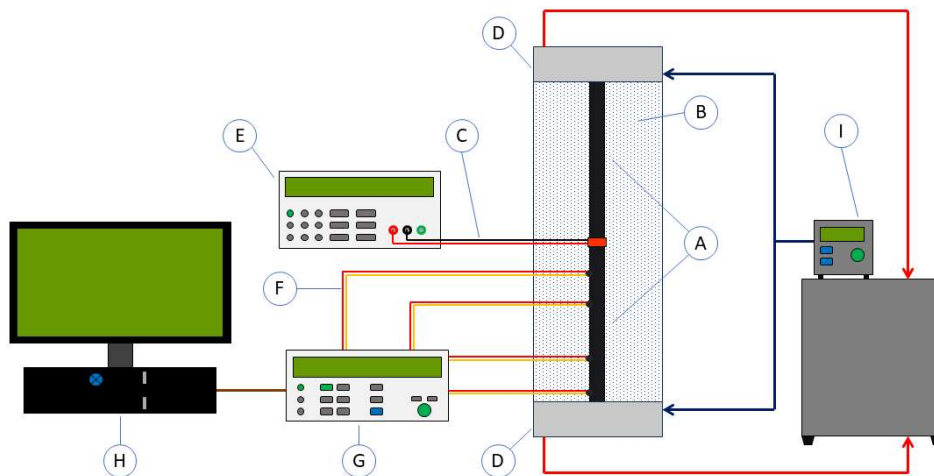


Figura 3. Dispositivo experimental: a) amostras; b) isolamento térmico; c) resistência elétrica; d) manifold; e) fonte de potência; f) termopares; g) sistema de aquisição de dados; h) hardware; i) banho termostático.

Ao retomar o método de Angstrom, a primeira premissa crucial a ser observada está associada à transferência unidimensional de calor ao longo da direção axial da amostra. Com esse propósito, o recipiente que aloja as amostras foi preenchido com um isolante térmico composto por pequenas esferas de poliestireno expandido. Essa estratégia visa a redução das perdas térmicas radiais, assegurando, assim, que o valor de Biot permaneça abaixo de 0,1. Além disso, para assegurar que as faces opostas à resistência elétrica de cada amostra se mantenham em temperaturas constantes durante todo o experimento, foi utilizado um banho termostático. Nesse sistema, um fluido circulante entra em contato de forma contínua com cada face de cada amostra. Esses mecanismos são fundamentais para sustentar o modelo proposto.

Outrossim, as dimensões da amostra são de extrema importância para assegurar precisão e confiabilidade ao aplicar o método de Angstrom. É crucial considerar que, dependendo da frequência ou amplitude da onda térmica, pode ocorrer um tempo insuficiente para que o calor se dissipe ao longo da amostra antes de atingir seu limite dimensional. Portanto, as amostras devem possuir um comprimento mínimo para que sejam caracterizadas como sólidos semi-infinitos, essa dimensão sendo aproximada a partir da Eq. (16) de Bergman et al. (2011), sendo considerado uma condutividade térmica média dos metais, h como coeficiente de convecção do fluido e um diâmetro D de uma circunferência circunscrita da amostra.

$$L_{\infty} = 1,325 \left[\frac{k \times D}{h_{(x/L)=0}} \right] \quad (16)$$

A onda térmica periódica em cada amostra tem origem na resistência elétrica, a qual recebe potência de uma fonte de corrente contínua. Essa onda térmica possibilita flutuações de temperatura ao longo do eixo axial, sendo estas detectadas por meio de quatro termopares soldados por descarga capacitiva na amostra, esses localizados pela amostra conforme o coeficiente de sensibilidade. Os dados coletados pelos termopares são então absorvidos por um sistema de aquisição e, posteriormente, encaminhados a um computador para análise e tratamento.

A Figura 4 apresenta uma visão geral da bancada experimental desenvolvida no presente trabalho.

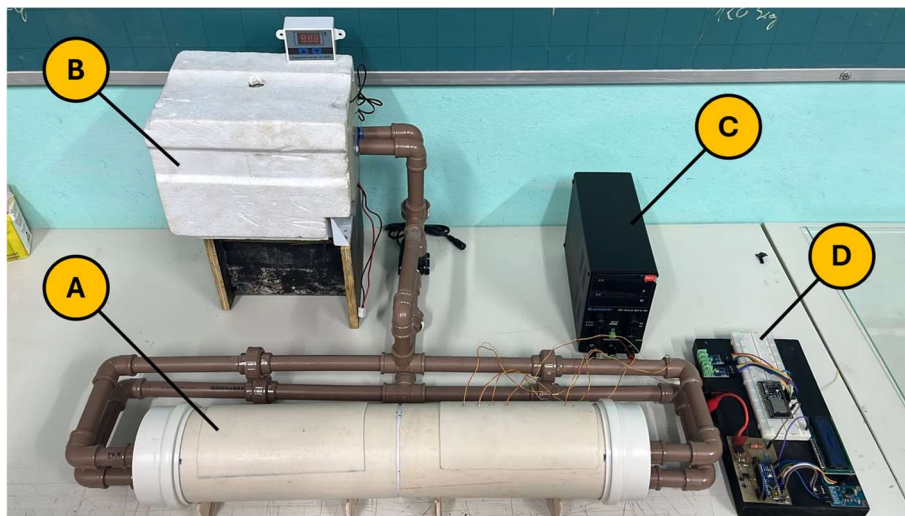


Figura 4. Visão geral da bancada desenvolvida neste trabalho: a) Amostra e termopares; b) banho termostático; c) fonte de potência; d) aquisição de dados.

A concepção da bancada apresentada na Figura 4 e na modelagem do problema físico de transferência de calor encontram-se fundamentadas na literatura. Em Ferreira-Oliveira et al (2021b) estimou a difusividade térmica das ligas de aço ASNI 304 e ASNI 3016 de forma direta. Por outro lado, Junior et al. (2022) empregaram uma abordagem indireta, utilizando inferência bayesiana, para estimar a condutividade térmica do aço inoxidável ASNI 1045. Essa inferência foi baseada em dados experimentais obtidos a partir da difusividade térmica desse mesmo. Os resultados obtidos no referido trabalho, juntamente com suas incertezas, estão presentes nas Tab. 1 e 2.

Tabela 1. Estimativa da difusividade térmica, incerteza e desvios da literatura para ligas de aço

	α ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$)	$U(\alpha)$	Touloukian et al (1972).
AISI 304	3.57	0.43 %	+0.29 %
AISI 316	3.33	0.53 %	+0.29 %
AISI 1045	12.50 ± 0.59	7.08%	-2.37%

Tabela 2. Estimativa da condutividade térmica, incerteza e desvios da literatura para AISI 1045

	k (W/m K)	$U(k)$	Touloukian et al (1972).
AISI 1045	50.54 ± 0.62	2.21%	6.01%

Ademais, neste estudo, almeja-se aprimorar a estimativa das propriedades termofísicas, visando otimizar um problema físico de condução de calor para determinar, de maneira direta, as propriedades como a difusividade térmica, condutividade térmica e o calor específico. Esse último sendo estimado a partir das relações térmicas. Outrossim, buscase para esse trabalho aprimorar a estimativa das propriedades térmicas, permitindo adequação do modelo de condução de calor a fim de obter de forma direta a difusividade térmica e a condutividade térmica, como também, o calor específico a partir das relações térmicas. Por fim, espera-se determinar as propriedades térmicas do aço 1045 por meio de um único dispositivo, de forma confiável, rápida e de baixo custo.

2.3 Análise da sensibilidade e calibração de termopares

Compreender o coeficiente de sensibilidade é de extrema importância para determinar a região mais adequada na busca das propriedades termofísicas. Esta ferramenta é crucial para orientar o posicionamento ideal dos termopares, indicando não apenas a melhor localização destes, mas também o tempo mais propício para a aplicação do fluxo de calor. Nesse contexto, de acordo com Ferreira-Oliveira et al. (2021b, apud Haji-Sheikh et al. (1998)) as posições relativas de cada termopar são determinadas por meio da Eq. (17).

$$\xi = \frac{\partial A}{\partial \alpha} = \frac{\pi f (x_r - x_n)^2 \cdot e^{-\frac{[\pi f (x_r - x_n)^2]}{\alpha |\phi(x_r) - \phi(x_n)|}}}{\alpha^2 \cdot |\phi(x_r) - \phi(x_n)|} \quad (17)$$

De acordo com o estudo de coeficiente de sensibilidade, valores mais elevados indicam maior precisão e confiabilidade nas estimativas das propriedades térmicas. Portanto, este trabalho incluiu a realização do estudo de Ferreira-Oliveira et al (2021b) com o intuito de identificar as quatro regiões mais propícias para a fixação dos termopares. O termopar do tipo K, utilizado neste trabalho, possui comportamento linear em sua faixa de operação.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho encontra-se na etapa de calibração da bancada de experimental. O processo de calibração dos termopares será objeto de trabalhos futuros, e será baseado em Ferreira-Oliveira et al. (2020), visando encontrar um fator de correção para as temperaturas medidas pelos quatro termopares. As temperaturas experimentais serão aplicadas ao modelo matemático desenvolvido no presente trabalho e, dessa forma, serão obtidas as propriedades difusividade térmica e condutividade térmica. Posteriormente, a incerteza de medição das propriedades medidas será quantificada através do Método de Monte Carlo, conforme Ferreira-Oliveira et al. (2020).

4. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de Iniciação Científica ao autor Leonardo Vinicius Nascimento da Silva. Os autores também gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro concedido através da CHAMADA 13/2023 - PARTICIPAÇÃO COLETIVA EM EVENTOS DE CARÁTER TÉCNICO-CIENTÍFICO NO PAÍS.

5. REFERÊNCIAS

- Bergman, T. L., A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- Bergman, Theodore L. Incropera - *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. Grupo GEN, 2019. ISBN 9788521636656.
- Bodzenta, J., 2008. "Thermal wave methods in investigation of thermal properties of solids". *The European Physical Journal Special Topics*, Vol. 154, pp. 305–311. doi:10.1140/epjst/e2008-00566-5.
- Bodzenta, J., Kázmierzak-Bałata, A. and Mazur, J., 2010. "Photothermal methods for determination of thermal properties of bulk materials and thin films". *Central European Journal of Physics*, Vol. 8, pp. 207–220. doi:10.2478/s11534-009-0133-6.
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford Science Publications, Oxford, UK.

- Chen, H., Wang, Q., Geng, D. and Wang, H., 2021. "Specific heat, thermal diffusivity, and thermal conductivity of ag-si alloys within a wide temperature range of 293–823 k". *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 153, p. 109997. ISSN 0022-3697.
- Santos, W.N., Gregorio Filho, R., Mummery, P. and Wallwork, A., 2004. "Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros". *Polímeros*, Vol. 14, No. 5, p. 354–359. ISSN 0104-1428.
- Santos, W.N., 2007. "Aplicação da técnica de fio quente para materiais cerâmicos condutores elétricos." *Congresso Brasileiro de Cerâmica*.
- Ferreira-Oliveira, J., da Silva, P.C., Lucena, L., Dos Reis, R.P., De Araújo, C. and Filho, C., 2021a. "Thermal diffusivity measurement of a niti shape memory alloy using a periodic temperature field". *International Journal of Thermophysics*, Vol. 42.
- Ferreira-Oliveira, J., Lucena, L., Dos Reis, R.P., De Araújo, C. and Bezerra-Filho, C., 2021b. "Thermal diffusivity measurement of stainless-steel alloys through use of the angstrom's method". *Experimental Heat Transfer*, Vol. 35, pp. 1–21.
- Ferreira-Oliveira, J.R., de Lucena, L.R.R., dos Reis, R.P.B., de Araújo, C.J. Bezerra-Filho, C.R. and Arencibia, R.V., 2020. "Uncertainty quantification through use of the monte carlo method in a one-dimensional heat conduction experiment". *International Journal of Thermophysics*.
- Gertych, A.P., Anna Łapińska, K.C., Anna Duzynska, M.Z. and Judek, J., 2019. "Thermal properties of thin films made from mos2 nanoflakes and probed via statistical optothermal raman method". *Scientific Reports*, Vol. 9.
- Gravena, D.A., dos Santos Carollo, L.F. and de Lima e Silva, S.M.M., 2010. "Caracterização térmica de polímeros usando o método do fio quente". *VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA*.
- Hahn, J., Reid, T. and Marconnet, A., 2019. "Infrared microscopy enhanced Ångström's method for thermal diffusivity of polymer monofilaments and films". *Journal of Heat Transfer*, Vol. 141.
- Haji-Sheikh, A., Hong, Y., You, S. and Beck, J., 1998. "Sensitivity analysis for thermophysical property measurements using the periodic method".
- Junior, J., Ferreira Oliveira, J., Nascimento, J., Fernandes, A. and Guimaraes, G., 2022. "Simultaneous estimation of thermal properties via measurements using one active heating surface and bayesian inference". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 172, p. 107304.
- Lamvik, M., 1980. "Determination of thermal diffusivity of solids by use of periodic heat flow". *International Journal of Thermophysics*.
- Lim, K.H., Kim, S.K. and Chung, M.K., 2009. "Improvement of the thermal diffusivity measurement of thin samples by the flash method". *Thermochimica Acta*, Vol. 494, No. 1, pp. 71–79. ISSN 0040-6031.
- Mami, A., Boughalmi, R., Lazzez, S., Mellouki, I., Yacoubi, N. and Amlouk, M., 2018. "Determination of thermal properties of some sulfide thin films using electropyroelectric method". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 136.
- Merritt, B., Seneca, M., Larson, S., Davis, K. and Munro, T., 2022. "Measurements of the thermal conductivity of reference liquids using a modified transient hot-wire needle probe". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 189, p. 122674. ISSN 0017-9310.
- Mishra, K., Garnier, B., Le Corre, S. and Boyard, N., 2019. "Accurate measurement of the longitudinal thermal conductivity and volumetric heat capacity of single carbon fibers with the 3w method". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 139.
- Oliveira, J.R.F. et al., 2017. "Identificação da difusividade térmica de ligas metálicas utilizando um campo de temperatura periódico."
- Parker, W.J.e.a., 1961. "Appl. phys.", No. V.3, pp. 1679–1681.
- Pinto, Juliana, Rouver, Anderson, Betini, Evandro, Almeida, L., Orlando, Marcos, Passos and Carlos, 2015. "Descrição matemática do método flash para determinação da difusividade térmica". doi:10.5151/phypro-vi-efa-001.
- Prasad, A. and Ambirajan, A., 2018. "Criteria for accurate measurement of thermal diffusivity of solids using the angstrom method". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 134, pp. 216–223. ISSN 1290-0729.
- Santos, W.N.d., dos Santos, J.N., Mummery, P. and Wallwork, A., 2010. "Thermal diffusivity of polymers by modified angström method". *Polymer Testing*, Vol. 29, No. 1, pp. 107–112. ISSN 0142-9418.
- Shirsat, A.U., Kumar, A., Moorthi, P., Gopinath, A., Sridharan, A., Karagadde, S., Nanthagopalan, P., Baburajan, P., Rao, R., Kumar Deo, A. and Prabhu, S., 2023. "Measurement of thermal properties of ferro siliceous sacrificial radiation shielding concrete using semi-infinite transient heat conduction model". *Construction and Building Materials*, Vol. 388, p. 131713. ISSN 0950-0618.
- Touloukian, Y. S. R. W. Powell, C. Y. Ho, and M. C. Nicolau. *Thermophysical Properties of Materials*, Vol. 10, New York: Plenum Press, 1972.
- Wada, K., Fleming, A., Eixenberger, J., Jaques, B.J. and Estrada, D., 2023. "Transient multilayer analytical model of a line heat source probe for in-pile thermal conductivity measurements". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 188, p. 108241. ISSN 1290-0729.
- Wang, H. and Sen, M., 2009. "Analysis of the 3-omega method for thermal conductivity measurement". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 7, pp. 2102–2109. ISSN 0017-9310.

- Wang, H., Guo, L., Wang, D., Xu, B., Chu, W. and Xu, W., 2022. "Measuring in-plane thermal conductivity of polymers using a membrane-based modified Ångström method". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 179, p. 107701. ISSN 1290-0729.
- Zhao, X., Wang, X., Dong, X., Wang, Y., Zhao, Y., Sheng, B. and Gong, M., 2024. "A new transient hot-wire thermal conductivity apparatus and measurements of helium at temperatures from 20 k to 300 k". *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 192, p. 107233. ISSN 0021-9614.
- Zhou, J.m., Yang, Y., Magne, Lamvik and Wang, G., 2001. "Determination of thermal conductivity of magnesium alloys". *International Journal of Heat and Mass Transfer*.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.