

ESTIMATIVA SIMULTÂNEA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA E DA CAPACIDADE DE CALOR VOLUMÉTRICA DO METAL DURO PELO MÉTODO DE GAUSS

GABRIEL MARTINS VULCANI (IC), SANDRO METREVELLE MARCONDES DE LIMA E SILVA (PQ)

Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** capacidade de calor volumétrica. condutividade térmica. estimativa Simultânea. sensibilidade.

**Introdução**

Desde os primórdios da humanidade, buscavam-se tecnologias que facilitem a existência do ser humano, podendo citar como exemplos, produtos hoje rudimentares, como uma simples lança, até tecnologias modernas e complexas, como aviões e automóveis. Porém com o desenvolvimento da tecnologia, foi necessário desenvolver paralelamente métodos matemáticos computacionais que fossem capazes de fornecer aproximações fiéis e seguras para os problemas complexos propostos.

Um dos campos da engenharia fundamental para o desenvolvimento tecnológico é a área de transferência de calor. Na engenharia, há uma constante busca para se desenvolver materiais que possuam melhores propriedades termofísicas aliadas a um custo relativamente menor do que materiais que já estejam em uso. Por isso, é de suma importância que existam trabalhos como o desenvolvido neste projeto, no intuito de determinar de maneira concisa as propriedades termofísicas e colaborar de maneira significativa para o desenvolvimento de métodos mais eficazes dentro da área de transferência de calor, bem como na engenharia mecânica como um todo.

Por exemplo, dentro da indústria automobilística pode-se citar o mecanismo de freio de um automóvel, onde é essencial a temperatura que o disco de freio irá atingir. Assim sendo, devem-se realizar estudos para evitar acidentes durante a frenagem do veículo, isto é, projetar um material que suporte a temperatura máxima durante a parada do veículo valendo-se de um coeficiente de segurança. Podem-se também realizar estudos no intuito de verificar se há um material mais apropriado (menor preço, características mecânicas equivalentes) para compor o sistema de freio, proporcionando assim para a empresa fabricante uma diminuição no preço do material, sem perder a qualidade já conhecida.

**Metodologia**

O experimento desse trabalho foi baseado em Ramos (2020), o qual utilizou uma bancada ,composta por: microcomputador, onde se faz o controle dos parâmetros da aquisição de dados; aquisição de dados, que faz a coleta dos sinais de temperatura vindos do termopar alocado na face inferior da amostra; fonte de alimentação digital, que é responsável pelo fornecimento da potência constante ao aquecedor resistivo; multímetro, no qual a corrente elétrica fornecida ao aquecedor resistivo é verificada; termopar tipo T, que conduz até à aquisição de dados os sinais para a leitura de temperatura; aquecedor resistivo, transforma energia elétrica em energia térmica, fornecendo o fluxo de calor à amostra; isolamento térmico, que isola todas as superfícies da amostra com exceção àquela onde se impõe o fluxo de calor; e amostra metálica, onde aplica-se o fluxo de calor na face superior e mede-se o gradiente de temperatura na face inferior.

Com estas condições conseguimos aproximar o problema para a unidimensionalidade como de mostrando na figura 2

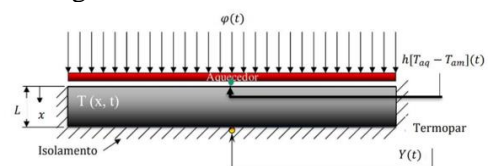


Figura 1 - Modelo unidimensional

As amostras utilizadas neste trabalho possuem as mesmas dimensões geométricas para facilitar a montagem e a aquisição de dados. Além disso, o aquecedor possui a mesma dimensão das amostras, pois assim há o aquecimento de toda superfície, ou seja, faz com que o experimento seja unidimensional. Ademais, os parâmetros utilizados foram definidos através de análises de simulações dos coeficientes de sensibilidade; logo, ficou definido que a duração da incidência de fluxo do calor é de 10s, com aquisições

feitas no intervalo de tempo de 0,1s para obter uma quantidade de números de dados adequados para se fazer uma análise concisa. Com intensidade de fluxo de 14.650 W/m<sup>2</sup> devido a sua alta condutividade térmica.

Segundo Carollo (2010), e em Nicolas (2020), repara-se a necessidade de descartar os primeiros dados devido à inércia térmica do aquecedor resistivo. Logo, neste trabalho, os 2 primeiros segundos de experimento foram descartados na realização da estimação simultânea.

Com o intuito de determinar a distribuição de temperatura ao longo da amostra, utiliza-se a equação da difusão do calor pelo método das diferenças finitas com formulação implícita, tal método de discretização se baseia na substituição de meios contínuos por pontos no espaço, cada ponto é denominado uma região do sistema, em que a sua temperatura é obtida pela média das regiões nas suas proximidades.

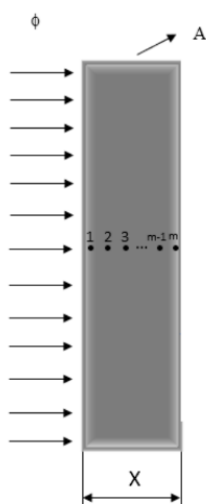


Figura 2 – Esquema do balanço de energia

A estimação das propriedades simultaneamente e sequencialmente em todo o domínio das temperaturas, deu-se pela técnica iterativa baseada no método de minimização de Gauss (Beck and. Arnold,1977).

Por fim, a resolução dos sistemas citados anteriormente é resolvida por um algoritmo programado no Matlab, tal resolução se dá calculando as propriedades termofísicas com as temperaturas em uma iteração anterior em que os sistemas de equações são resolvidos por um processo iterativo. Este algoritmo de Gauss tem a característica de poder usar a temperatura calculada anteriormente em um ponto atual, assim se faz necessário o uso de um critério de convergência para que haja a minimização dos erros nos procedimentos para obter as propriedades.

## Resultados e discussão

Em Beck e Arnold (1977), foi provado a relevância de analisar os coeficientes de sensibilidade para encontrar os parâmetros ideais de maneira simultânea. A fim de obter a sensibilidade, é necessário calcular a derivada não nula e de magnitude adequada; todavia, neste caso estudado para a estimação simultânea, ambas derivadas não podem ter diferenças excessivas. Baseando nas propriedades obtidas no trabalho de Grzesik, Nieslony e Bartoszu (2009), utilizamos tais propriedades para o cálculo dos coeficientes do metal duro, em que:  $k = 34,5 \text{ W/mK}$ ,  $cp = 200 \text{ J/kgK}$  e a densidade medida foi de  $14.310 \text{ kg/m}^3$ .

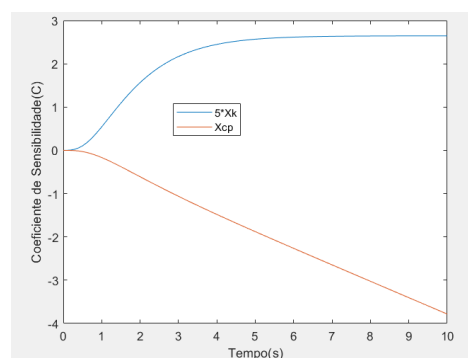


Figura 3 – Coeficientes de Sensibilidades do Metal duro

Através da análise gráfica acima, percebe-se que a sensibilidade do calor específico varia de maneira inversamente proporcional ao aumento da temperatura na amostra. Apesar disso, ao se analisar a sensibilidade da condutividade térmica, observa-se que ela cresce de maneira rápida ao ser exposta a uma fonte de calor, porém ela atinge o seu valor máximo e permanece constante até o final do experimento. Assim, percebe-se que é possível a estimação simultânea dos 2 parâmetros citados, pois suas sensibilidades não apresentam codependência, são coerentes e razoáveis.

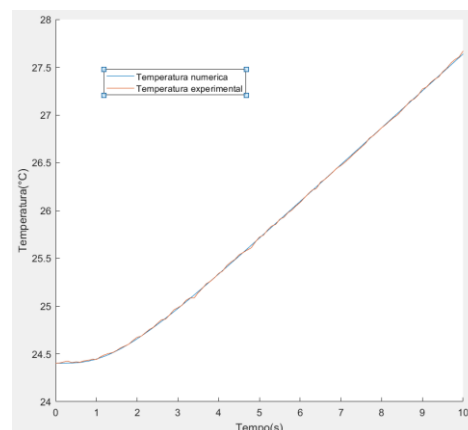


Figura 4– Temperaturas numéricas e experimentais do metal duro

A seguir, pela Tabela 1, tem-se os resultados obtidos para a condutividade térmica e para o calor específico da amostra. Além disso, há a determinação do desvio padrão das estimativas e a diferença percentual em relação à literatura.

Tabela 1 Tabela dos valores médios do metal duro

Propriedade	Média	Desvio Padrão	Abas, Hayashi e Seetharaman (2007)	Diferença (%)
K (W/m k)	41,21	3,05	48	14,13
$10^6 \rho_{cp}$ (J m <sup>3</sup> /kg K)	3,80	2,51	3,59	2,75

Comparando os resultados obtidos no experimento com a literatura, conclui-se que são relativamente próximos, contudo, com certa discrepância. Tal discrepância pode ser entendida com os erros referentes ao processo de ensaio, como resistência de contato, fator não considerado neste relatório, ou até mesmo fatores intrínsecos à amostra, como sua granulometria e pequenas variações em sua composição.

Sendo assim, percebe-se que os resultados das estimativas das propriedades do metal duro foram satisfatórios, pois houve apenas uma diferença de 3,5% entre os resultados obtidos neste trabalho com relação a literatura.

## Conclusões

Neste trabalho, foi utilizada uma técnica de estimativa simultânea de 2 parâmetros termofísicos, condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica, para o metal duro. O diferencial desse método é o baixo custo computacional, de equipamentos e de materiais utilizados nos experimentos, assim como a simplicidade, facilidade e rapidez da montagem experimental. Como o calor específico se mostrou mais sensível à variação de temperatura no tempo, se faz necessário o controle da intensidade do fluxo e do tempo do experimento, pois se houver uma discrepância muito alta entre as sensibilidades analisadas, isso gera um erro

no cálculo na propriedade de menor intensidade de variação. Os resultados obtidos apresentam concordância com a literatura, com 2,75% para a capacidade de calor volumétrica e 14,13% para a condutividade térmica. Conclui-se também que os valores de  $\rho_{cp}$  apresentam uma maior precisão nos experimentos, uma vez que sua sensibilidade é mais alta; porém, os valores encontrados para k são também bastante satisfatórios. Logo, os objetivos propostos foram concluídos, podendo serem considerados os modelos térmicos 1D, aproximações válidas para se estimar propriedades térmicas.

## Agradecimento

Agradeço Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro através da concessão de uma bolsa de iniciação científica, pelo suporte financeiro, a FAPEMIG pelo apoio financeiro ao laboratório e a UNIFEI pelo amparo.

## Referências

- ABNT NBR 15200-4. **Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida**, 2005.
- Antunes M. M. (2020), **Estimação Simultânea de Propriedades Térmicas de Metais Utilizando Técnicas de Problemas Inversos Não Lineares**, Trabalho Final de Graduação- Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2020.
- BECK, J. V., ARNOLD, K. J. **Parameter Estimation in Engineering and Science**. Wiley, New York, USA, 501p, 1997.
- CAROLLO, L. F. S. **Estimação Simultânea de Propriedades Termofísicas de Materiais Metálicos**, Itajubá, 94p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2010.
- CAROLLO, L. F. S., GRAVENA, D. A., LIMA E SILVA, S. M. M. **Reduced Metallic Probe for the Thermal Characterization of Polymers**, Polímeros, v 22, pp. 282-287, 2012.
- Ramos, N.P. (2020) **Estimação Simultânea de Propriedades Térmicas de Metais Considerando o Efeito da Resistência de Contato**, Dissertação, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2020.