

## Estimação Simultânea de Propriedades Térmicas Usando Técnicas de Problemas Inversos

Luiz Augusto P. de Abreu (IC), Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva (PQ)  
*Universidade Federal de Itajubá*

**Palavras-chave:** condutividade térmica, capacidade de calor volumétrica, estimativa simultânea, coeficientes de sensibilidade.

### Introdução

A rápida evolução do meio industrial desenvolveu cada vez mais a necessidade na engenharia de buscar soluções e realizar estudos nas diversas áreas para que haja resultados confiáveis e de baixo custo. O metal é hoje largamente utilizado nos processos industriais devido a sua alta aplicabilidade, isso motiva o desenvolvimento e estudos, almejando a obtenção de propriedades cada vez mais adequadas para o meio em que lhe esteja aplicando. Sendo assim, a determinação de suas propriedades termofísicas é de extrema importância para a determinação do seu comportamento quando submetido a variações de temperaturas.

Problemas envolvendo transferência de calor estão presentes no cotidiano de um engenheiro, por exemplo: no setor de indústria civil, há a necessidade do constante estudo do material utilizado na construção, para que haja um ambiente interno mais confortável. Já, em processos de usinagem, soldagem e fundição, o controle da variação da temperatura é uma variável importante para que haja um processo mais produtivo e mais confiável. Logo, a determinação de propriedades termofísicas está diretamente inserida na indústria, contribuindo para que o processo seja mais eficaz, mais barato e prolongando a vida de componentes.

Assim, esse trabalho tem como intuito estimar simultaneamente as propriedades térmicas do aço inoxidável AISI 304 e do metal duro, carboneto de tungstênio: a condutividade térmica,  $k$ , e a capacidade de calor volumétrica,  $\rho c_p$ . A capacidade de calor volumétrica corresponde à capacidade do material em armazenar energia, já a condutividade térmica representa a capacidade de transferir calor por condução do material.

Portanto, utiliza-se neste trabalho um modelo térmico fundamentado na equação da difusão unidimensional transiente em coordenadas cilíndricas, em que um fluxo de calor constante é aplicado na face superior da amostra, tal fluxo de calor se dá pela resistência elétrica do aquecedor. Visto que as outras faces da amostra foram isoladas com o intuito de haver unidimensionalidade no sistema. A montagem do

experimento é não simétrica, onde a amostra está entre o aquecedor e o isolante. Para obter a temperatura numérica, faz-se o uso da solução do problema térmico usando o método de Diferenças Finitas Implícito; já as propriedades térmicas foram estimadas pelo método de Gauss. Além disso, foi feita uma análise dos coeficientes de sensibilidade, obtido pela derivada parcial da temperatura em relação ao parâmetro estimado, conseqüentemente, determina-se através desses coeficientes se é possível estimar pelo método de Gauss os materiais estudados, já que se as sensibilidades estiverem correlacionadas não será possível completar a estimação, além de determinar o tempo total do experimento e o intervalo de tempo.

### Metodologia

No sistema representado na Figura 1, demonstra-se como foi realizado a montagem experimental deste trabalho, que é composta por tais equipamentos: microcomputador, no qual se faz todo controle dos parâmetros obtidos pela aquisição de dados; aquisição de dados, onde se faz a coleta de dados dos sinais de temperaturas provenientes do termopar fixado na parte superior da amostra; fonte de alimentação, que têm a função de fornecer potência constante para o aquecedor; multímetro, no qual se verifica a corrente elétrica fornecida para o aquecedor; termopar tipo T, que mede a temperatura; aquecedor resistivo, que fornece o fluxo de calor para amostra por meio da transformação de energia elétrica em energia térmica; isolamento térmico, usado nas superfícies onde não há o aquecedor com intuito de garantir a unidimensionalidade do experimento. Por fim, a amostra metálica é onde se impõe o fluxo de calor e se obtém o gradiente de temperatura.

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 da superfície 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

sensibilidades; 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. Já, as intensidades de fluxo de calor das amostras foram distintas para as duas amostras, em que: metal duro, é utilizado um fluxo de calor de 14.650 W/m<sup>2</sup> devido a sua alta condutividade térmica e no aço inoxidável, se utiliza um fluxo de calor de 2.450 W/m<sup>2</sup> devido a sua menor condutividade térmica que o metal duro.

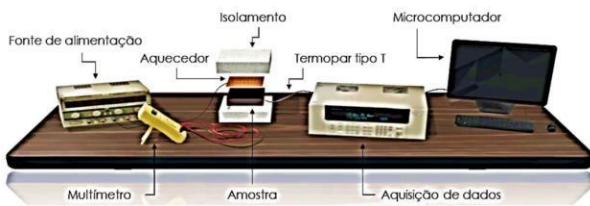


Figura 1 – Bancada Experimental.

Segundo Carollo (2010), e em Ramos (2020), observa-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

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

Metal duro:

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), foram utilizadas tais propriedades térmicas para o cálculo dos coeficientes de sensibilidade do metal duro, em que:  $k = 34,5 \text{ W/mK}$ ,  $c_p = 250 \text{ J/kgK}$  e  $\rho$  foi de  $14.310 \text{ kg/m}^3$ , resultando em uma capacidade de calor volumétrica de  $\rho c_p 10^6 = 3,59 \text{ J/ m}^3\text{K}$ .

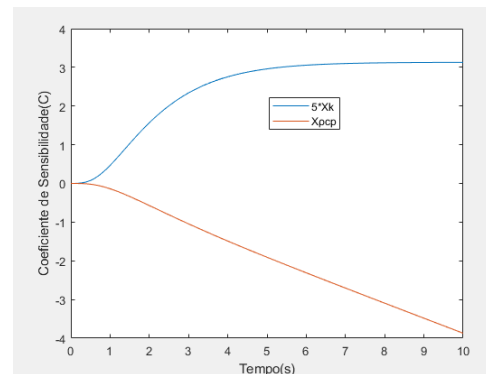


Figura 2 – Coeficientes de sensibilidades do metal duro.

Através da análise da Fig. (2), 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.

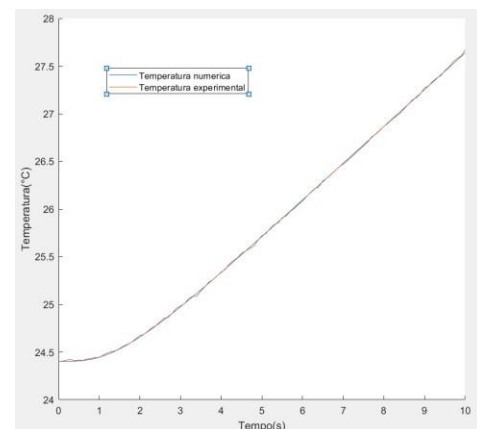


Figura 3– Temperaturas numéricas e experimentais do metal duro.

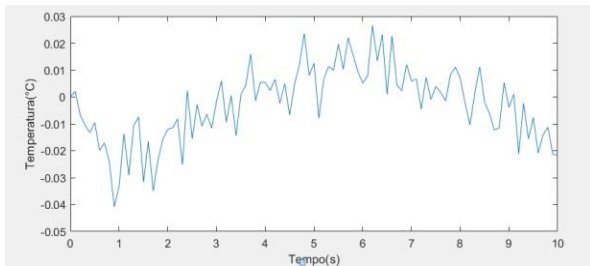


Figura 4 -Resíduo entre as temperaturas para o metal duro.

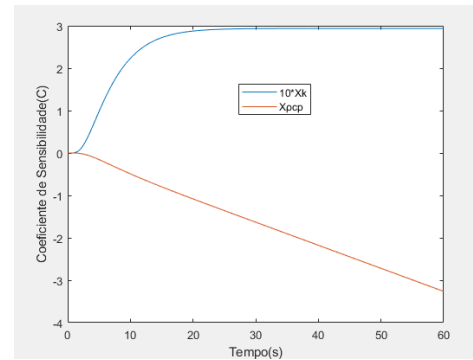


Figura 5 – Coeficientes de sensibilidades do Aço Inoxidável.

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados obtidos para a condutividade térmica e para a capacidade de calor volumétrica 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
$\rho c_p 10^6$ (J /m <sup>3</sup> 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 trabalho, ou até mesmo fatores intrínsecos à amostra, como sua granulometria e pequenas variações em sua composição.

### Aço Inoxidável AISI 304:

Os procedimentos feitos para determinar as propriedades térmicas deste material foram baseadas nas mesmas metodologias apresentadas na seção do metal duro. Entretanto, o experimento durou cerca de 60s e o incremento de tempo variando de 0.1s. Já, o fluxo de calor imposto foi no valor de 2450W/m<sup>2</sup>. Baseando-se em Carollo (2016), os valores das propriedades térmicas de referências foram:  $k = 15,49$  W/mK,  $c_p = 541,72$  J/kgK e  $\rho$  foi de 8030 kg/m<sup>3</sup>, resultando em uma capacidade de calor volumétrica de  $\rho c_p 10^6 = 4,345$  J/ m<sup>3</sup>K.

Através da análise da Figura 5, conclui-se que pelo comportamento das curvas dos gráficos é possível estimar as propriedades simultaneamente da mesma forma que no Metal duro.

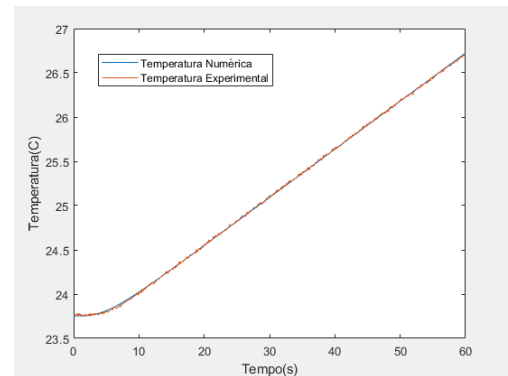


Figura 6– Temperaturas numéricas e experimentais do Aço Inoxidável.

A seguir, pela comparação entre a temperatura numérica e a temperatura experimental, evidencia-se que houve pouca diferença entre essas temperaturas. Visto isso, na Figura 7, apresenta-se o resíduo entre as temperaturas, ou seja, a diferença entre elas.

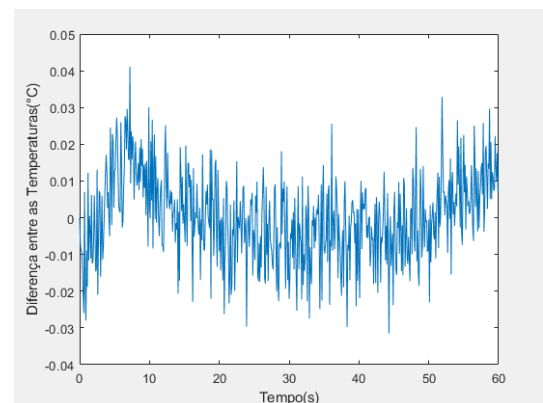


Figura 7 -Resíduo para o Aço Inoxidável

Na Tabela 2, estão representados todos os valores obtidos das propriedades estimadas ao decorrer deste trabalho. Analogamente, no metal duro calcula-se o desvio padrão e a diferença percentual em relação a literatura.

Tabela 2 - Tabela dos valores médios do Aço inoxidável

Propriedade	Média	Desvio Padrão	Abas, Hayashi e Seetharaman (2007)	Diferença (%)
$k$ (W/m k)	14,381	0,913	14,9	3,483
$\rho c_p \cdot 10^6$ (J/ m <sup>3</sup> K)	4,435	0,051	4,345	2,029

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

### Conclusões

Ao decorrer deste trabalho foi apresentada uma técnica de estimação simultânea de 2 parâmetros termofísicos, a condutividade térmica e a capacidade de calor volumétrica, para o aço inoxidável AISI304 e para o metal duro. Logo, os diferenciais desse método são o baixo custo de equipamentos e facilidade da montagem experimental.

Assim, foi possível analisar que o calor específico teve um comportamento de maior sensibilidade à variação de temperatura; portanto, é necessário o controle da intensidade do fluxo e do tempo do experimento, já que se ocorrer uma discrepância entre as sensibilidades almejadas haverá um maior erro dos resultados das propriedades.

Por fim, conclui-se que o método apresentado neste trabalho é válido para estimar propriedades termofísicas simultaneamente. Pois, os resultados apresentados na seção de resultados, foram aproximados da literatura, com baixa porcentagem de erro, comprovando assim a veracidade desse método. Além disso, foi possível perceber que para ambos os materiais estudados houve um menor erro na capacidade de calor volumétrico, isso se dá devido a sua maior sensibilidade.

Agradeço a Fundação de Amparo à pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro através da concessão de uma bolsa de iniciação científica.

Agradeço Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro ao LABTC.

### Referências

ABAS, R. A., HAYASHI, M., SEETHARAMAN, S. **Thermal Diffusivity Measurements of Some Industrially Important Alloys by a Laser Flash Method**, International Journal of Materials Research, Vol 98 (2007), 1-6.

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. **Aplicação de Diferentes Intensidades de Fluxo de Calor para a Estimação Simultânea de Propriedades Termofísicas de Materiais Metálicos em Função da Temperatura**, Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil (2016).

GRZESIK, W., NIESLONY, P., BARTOSZUK, M. **Modelling of the Cutting Process Analytical and Simulation Methods**, Advances in Manufacturing Sciences and Technology, Vol 33 (2009), 6-29.

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.

### Agradecimentos