

DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA E INDEPENDENTE DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE MATERIAIS SÓLIDOS

Valério Luiz Borges*

vlborges@mecanica.ufu.br

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva*

metrevell@mecanica.ufu.br

Gilmar Guimarães*

gguima@mecanica.ufu.br

*Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila s/n, Campus Santa Mônica, CEP 38400-089, Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo: O desenvolvimento de técnicas experimentais para a determinação da difusividade térmica, α , e condutividade térmica, λ , de diferentes materiais, tem interessado muitos pesquisadores devido a sua larga aplicação em problemas de engenharia. Cita-se, por exemplo, o estudo de campos térmicos em processos de usinagem como furação, torneamento e fresamento, onde a vida útil das ferramentas é função das altas temperaturas alcançadas. Em qualquer investigação térmica desses processos é necessário o conhecimento dessas propriedades. Propõe-se nesse trabalho uma técnica experimental que obtenha simultaneamente α e λ de materiais condutores. Ressalta-se que a obtenção simultânea dessas propriedades só ocorre com sucesso quando seus respectivos coeficientes de sensibilidade, definidos como a primeira derivada em relação a grandeza a ser medida, nesse caso a temperatura, são linearmente independentes. Observa-se que tais coeficientes são usualmente baixos e correlacionados quando avaliados em materiais condutores. A técnica proposta representa uma forma alternativa na solução desse problema, uma vez que se obtém as propriedades de forma simultânea porém independente. Essa independência é alcançada através da definição de duas funções objetivo uma no domínio da frequência e outra no domínio do tempo. Uma das funções é calculada a partir da fase da função resposta em frequência de um sistema dinâmico, que tem como entrada o fluxo de calor e saída a temperatura, e a outra função é obtida a partir das temperaturas em um modelo difusivo tridimensional. Obtém-se as propriedades para amostras de PVC e aço inox 304.

Palavra Chave: determinação propriedades térmicas, problemas inversos, otimização, condução de calor tridimensional

1. INTRODUÇÃO

A metrologia de materiais ocupa-se dos aspectos relativos à preparação de materiais de referência, à definição de normas e procedimentos de medição e à disseminação de valores universalmente aceitos de propriedades físicas e químicas de materiais. Trata-se, portanto, de uma área estratégica tanto do ponto de vista científico quanto de apoio ao setor produtivo nacional. Isto fica evidente quando se percebe que toda a tecnologia atual, de microcomputadores e Internet, passando pela moderna indústria automotiva e, mesmo pelo setor primário, depende, em grande medida, da disponibilidade de materiais (semicondutores, fibras ópticas, metais, cerâmicas e plásticos, entre outros) com propriedades físicas e químicas caracterizadas com precisão, exatidão e

rastreabilidade. O mesmo se pode dizer com relação ao controle de qualidade de produtos, nos quais o acesso a materiais padrão de referência é necessário para garantir a confiabilidade e uniformidade dos resultados fornecidos por diferentes laboratórios em todo o País. As determinações e medições das propriedades dos materiais utilizados no setor elétrico, por exemplo, são fundamentais para a eficiência energética dos equipamentos fabricados no País. A rastreabilidade garante credibilidade internacional às medições realizadas no Brasil, sendo portanto fator fundamental para a melhoria da competitividade dos produtos brasileiros no mercado internacional.

A cerca disto todo engenheiro deve estar vitalmente interessado nos materiais disponíveis para a execução de seus projetos. O conhecimento do comportamento dos materiais depende o sucesso do projeto de engenharia. O conhecimento do material intervém na possibilidade de escolha e mesmo na sua correta aplicação, com isenção de falhas. Alguns projetos são viabilizados graças ao desenvolvimento de novos materiais que ampliem as possibilidades de utilização. As características dos materiais determinam, na maioria dos casos, qual técnica deve ser utilizada no processamento dos mesmos. A caracterização adequada dos materiais a serem processados é imprescindível em estudos de simulação de processos industriais. Dentre as principais estão às propriedades térmicas como o calor específico, a difusividade térmica e a condutividade térmica.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Sistema Dinâmico

A técnica proposta baseia-se em um sistema dinâmico do tipo entrada/saída como mostrado na Fig. (1) que por sua vez é obtido dos modelos térmicos descritos na Fig. (2). Observa-se que ϕ_i representa o fluxo de calor e T_i a temperatura, na superfície da amostra. O índice i descreve a localização dos respectivos fluxo de calor e temperatura na amostra. O modelo térmico, por sua vez, pode ser obtido de um problema de transferência de calor uni, bi ou tridimensional, como mostrado na Fig. (2).



Figura 1 - Sistema dinâmico tipo entrada/saída

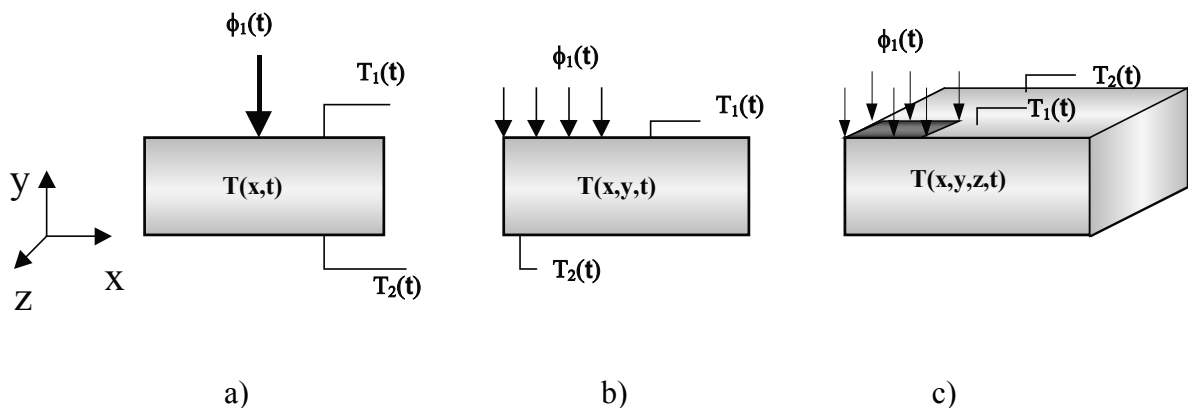


Figura 2 - Esquema de modelos térmicos equivalentes: a) 1D, b) 2D e c) 3D

Qualquer que seja o modelo térmico equivalente, os sinais de entrada $x(t)$ e de saída $y(t)$ são definidos respectivamente como:

$$x(t) = \phi_1(t) \quad (1)$$

$$y(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t) \quad (2)$$

Assim, o modelo dinâmico é descrito pela função resposta a um pulso unitário $h(\tau)$, que é definida como a saída do sistema em qualquer tempo a pulso unitário aplicado a um tempo anterior τ . Logo, para qualquer pulso unitário $x(t)$, a saída do sistema $y(t)$ pode ser dada pela integral de convolução (Bendat & Piersol, 1986).

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) x(\tau) d\tau \quad (3)$$

Uma vez que para sistemas fisicamente realizáveis (causal) $h(\tau) = 0$ para $\tau < 0$, a Eq. (3) pode ser escrita como:

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(t - \tau) x(\tau) d\tau \quad (4)$$

Ainda, se $X(f)$ e $Y(f)$ são respectivamente as transformadas de Fourier de $x(t)$ e $y(t)$, ou seja:

$$Y(f) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (5)$$

$$X(f) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (6)$$

onde $j = \sqrt{-1}$. então segue que:

$$Y(f) = H(f) \times X(f) \quad (7)$$

e a função resposta em frequência de um sistema pode ser obtida por:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (8)$$

Observa-se que a $H(f)$ é uma função complexa e, portanto, é escrita como:

$$H(f) = |H(f)| e^{-j\varphi(f)} \quad (9)$$

onde os termos $|H(f)|$ e $\varphi(f)$ são respectivamente o módulo e a fase da resposta em frequência, $H(f)$. A fase $\varphi(f)$ por sua vez é definida por:

$$\varphi(f) = \arctang[imH(f) / reH(f)] \quad (10)$$

onde $imH(f)$ e $reH(f)$ representam a parte real e imaginária de $H(f)$.

2.2 Estimativa da Difusividade Térmica: Domínio da Frequência

A maior conveniência do uso do domínio da frequência para a estimativa da difusividade térmica, reside no fato que a fase de $H(f)$ é uma função exclusiva de α . Ou seja, embora a resposta em frequência $H(f)$ seja função de α e λ conforme indica a Eq. (9), quando decomposta em módulo e fase obtém-se:

$$|H(f)| = \text{função}(\alpha, \lambda) \quad (11)$$

e

$$\varphi(f) = \text{função}(\alpha) \quad (12)$$

Uma vez verificado a Eq. (12), ou seja a dependência exclusiva de α em $\varphi(f)$, um procedimento para a determinação da difusividade térmica pode ser a minimização de uma função objetivo, S_φ , baseada na diferença entre os valores experimentais e calculados da fase. Esta função é, por sua vez, definida como:

$$S_\varphi = \sum_{i=1}^{N_f} (\varphi_e - \varphi_t)^2 \quad (13)$$

onde φ_e e φ_t são respectivamente os valores experimentais e calculados da fase de $H(f)$.

2.3 Estimativa da Condutividade Térmica: Domínio do Tempo

Uma vez que a difusividade térmica é obtida, uma função objetivo baseado no erro quadrático entre temperaturas experimentais e calculadas é suficiente para a obtenção da condutividade térmica. Neste caso, não há problemas de identificabilidade pois somente uma variável de projeto está sendo estimada. Portanto, o valor de λ ótimo será escolhido entre os melhores valores que minimizem a função S_T , definida como:

$$S_T = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_t} [Te_{ij} - Tt_{ij}]^2 \quad (14)$$

Analogamente ao procedimento anterior, a minimização é feita usando o método da seção áurea com aproximação polinomial (Vanderplaats, 1986).

3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade tem sido usada como uma ferramenta para guiar os passos na direção de uma modelagem mais eficiente, identificando as variáveis mais importantes e que apresentem potencial para serem calculadas.

É interessante observar que a alternativa da determinação das propriedades térmicas no domínio da frequência, surgiu através da análise dos coeficientes de sensibilidade de $h(t)$, no domínio do tempo. Ou seja, observou-se que havia uma dependência linear da difusividade e condutividade térmica em sua forma temporal. Nesse sentido, uma característica particular desse método reside no fato da fase ser uma função exclusiva da difusividade térmica, o que na prática separa a obtenção das propriedades térmicas dando uma certeza de unicidade aos valores determinados.

A difusividade é, assim determinada usando-se a função fase no domínio da frequência enquanto a condutividade usando-se as temperaturas no domínio do tempo. Observa-se que gradientes altos de temperatura são importantes, para que a técnica proposta tenha sucesso. Nesse caso o modelo difusivo unidimensional é aplicado com sucesso para materiais não condutores, devido a geração de grandes gradientes de temperaturas para pequenas espessuras. Entretanto, para materiais condutores devido aos baixos gradientes de temperatura, uma análise de sensibilidade indica a adequacidade do uso de modelos tridimensionais.

A grande vantagem no uso de um modelo tridimensional reside na possibilidade da aplicação da técnica em amostras finas, uma vez que, nesse caso, os gradientes mais significativos estão nas direções laterais da amostra. Outra vantagem deve-se ao modelo tridimensional ser menos restrito fisicamente, pois diminui consideravelmente os erros devido a hipótese de unidimensionalidade.

4. RESULTADOS

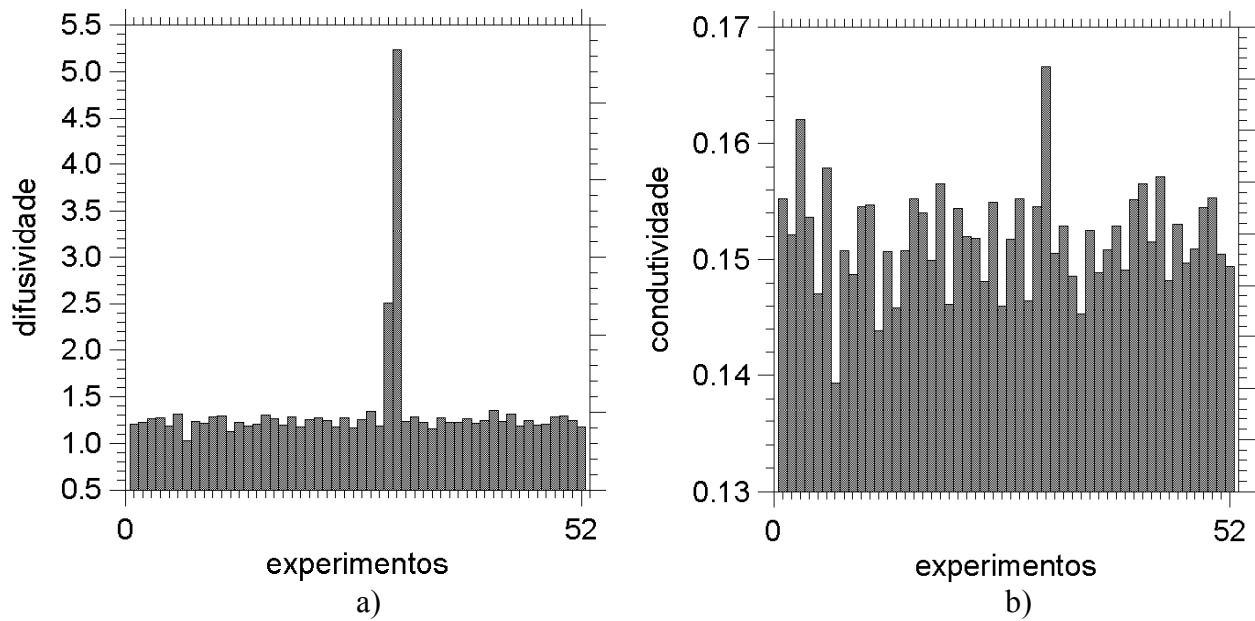
Como já mencionado, a técnica desenvolvida nesse trabalho baseia-se na hipótese das propriedades térmicas, α e λ não variarem com a temperatura. Assim, o calor imposto na amostra deve ser suficiente para o estabelecimento de gradientes térmicos que permitam a identificação das propriedades e ao mesmo tempo garantam a representatividade de uma temperatura média. Nesse caso, limitou-se a diferença máxima de temperatura entre as superfícies da amostra em $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os valores das propriedades térmicas são assim determinados para uma temperatura média. A robustez da técnica é demonstrada através de sua aplicação em dois materiais: um condutor (aço inox AISI 304) e um não condutor (PVC).

4.1 Determinação de α e λ para o PVC

Para o PVC foram realizados 52 experimentos. Na Tab. (1) é mostrado um resumo dos parâmetros experimentais envolvidos.

Tabela 1 – Parâmetros experimentais para o PVC			
material		PVC (Polychloroethylene)	
dimensões da amostra (mm)	x	305.0	
	y	50.0	
	z	305.0	
intervalo de aquisição	(s)	7.0344	
duração média do aquecimento		150.0	
duração do experimento		7203.23	
número de pontos		1024	
posição dos termopares (mm)	x	y	z
	152.5	50.0	152.5
	152.5	0.0	152.5

A Fig. (3) apresenta os valores determinados de α e λ para todos os experimentos. Aplicando-se o princípio de Chauvenet, obtêm-se estatisticamente os valores médios de $1.239819 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \pm 1.88\%$ e $0.1515595 \text{ W/mK} \pm 1.1\%$, para a difusividade e condutividade térmica, respectivamente. A Tab. (6.4) apresenta uma comparação entre os valores determinados neste trabalho com os valores padrões obtidos na literatura.

Figura 3 – Histograma para a) α e b) λ Tabela 2 – Valores médios determinados de α e λ para o PVC

	Presente Trabalho	intervalo confiança (%)	Método Flash (Insa – França)	Erro (%)
$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)} \times 10^7$	1.239819	± 1.88	1.28	3.14
	Presente Trabalho	intervalo confiança (%)	Método Placa Quente (Insa – França)	Erro (%)
$\lambda \text{ (W/mK)}$	0.1515595	± 1.1	0.157	3.46

Observa-se assim, uma grande concordância nos resultados estimados, obtendo-se erros inferiores 4% para as propriedades térmicas se comparados com valores de referência.

4.2 Determinação de α e λ para o aço inox AISI 304

Para o aço inox AISI 304 foram realizados 6 experimentos. Na Tab. (3) é mostrado um resumo dos parâmetros experimentais envolvidos.

Tabela 3 – Parâmetros experimentais para o aço inox AISI 304

material		aço inox AISI 304		
dimensões da amostra (mm)	x	138.82		
	y	10.22		
	z	64.62		
intervalo de aquisição	(s)	0.551		
duração média do aquecimento		120		
duração do experimento		564.224		
número de pontos		1024		
posição dos termopares (mm)	x	y	z	
	52.66	10.22	1.80	
	54.80	10.22	62.76	

A Fig. (4) apresenta os resultados determinados de α e λ para todos os experimentos. Aplicando-se o princípio de Chauvenet, obtêm-se estatisticamente os valores médios de $4.142649 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \pm 1.95\%$ e $22.05743 \text{ W/mK} \pm 1.87\%$, para a difusividade e condutividade térmica, respectivamente. A Tab. (4) apresenta uma comparação entre os valores determinados neste trabalho de α e λ com valores padrões obtidos na literatura.

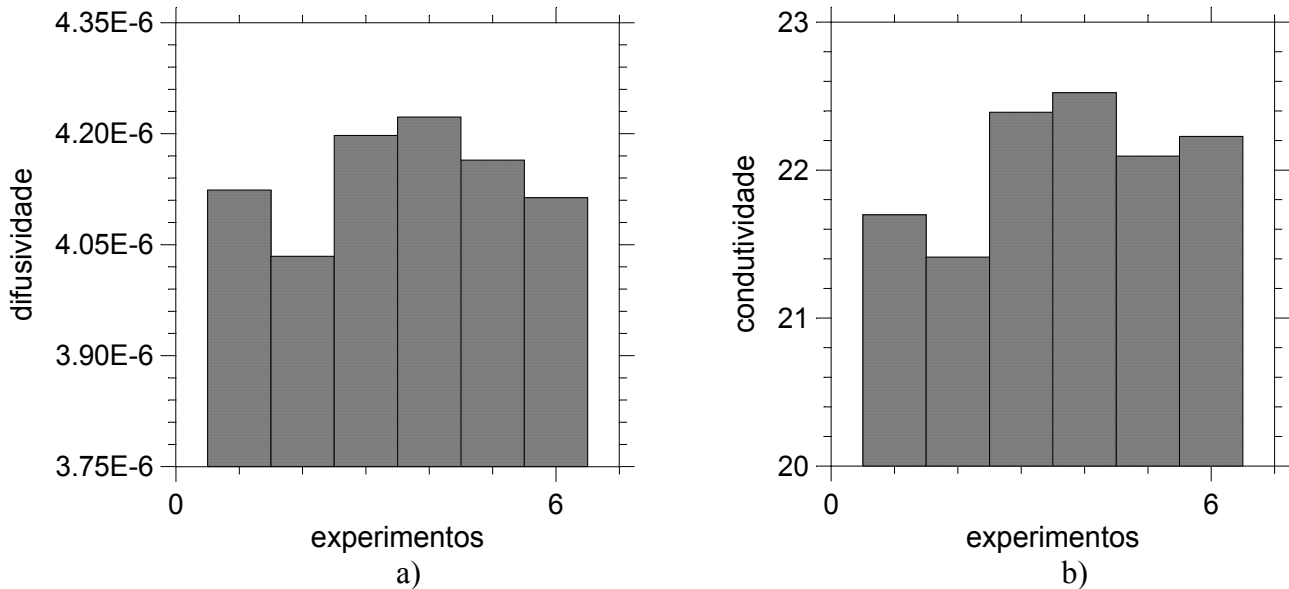


Figura 4 – Histograma para a) α e b) λ

Tabela 4 – Valores médios determinados de α e λ para o aço inox AISI 304

	Presente Trabalho	intervalo confiança (%)	(Incropera et al)	Erro (%)
$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)} \times 10^6$	4.142649	1.95	3.95	4.9
	Presente Trabalho	intervalo confiança (%)	(Incropera et al)	Erro (%)
$\lambda \text{ (W/mK)}$	22.05743	1.87	14.9	48.0

Observa-se na Tab. (4) uma grande concordância no valor determinado para a difusividade térmica, obtendo-se um erro inferior a 5% se comparado com o valor de referência. O mesmo não acontece para a condutividade, pois a curva de calibração para o sinal do fluxo esta com problemas, isto pode ser melhor explicado em (Borges, V.L., 2003), no Cap. IV deste trabalho uma explicação, de porque a os valores calculados de α independem do fluxo, e o mesmo não acontece para os valores calculados de λ . A curva de calibração deve ser refeita, mas não foi possível refazê-la em tempo hábil para o envio deste trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento CNPq, Fapemig e Capes, pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

Guimarães, G., Philippi, P.C. and Thery, P., 1995, "Use of parameters Estimation Method in the Frequency Domain for the Simultaneous Estimation of Thermal Diffusivity and Conductivity", American Institute of Physics, vol. 66, nº 3, March 1995, pp. 2582-2588.

Vanderplaats, G. N., 1986, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: With Applications".

Borges, V. L., 2003, "Determinação Das Propriedades Termofísicas De Materiais Sólidos". Dissertação de Mestrado - UFU.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DETERMINATION SIMULTANEOUS AND INDEPENDENT OF THE THERMOPHYSICALS PROPERTIES OF MATERIALS SOLIDS

Valério Luiz Borges*

vlborges@mecanica.ufu.br

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva*

metrevel@mecanica.ufu.br

Gilmar Guimarães*

gguima@mecanica.ufu.br

*Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila s/n, Campus Santa Mônica, CEP 38400-089, Uberlândia, MG, Brasil.

Abstract: This work presents a new experimental technique to obtain the thermal diffusivity, α , and the thermal conductivity, λ , of metallic materials simultaneously. A literature review shows many works based on parameter estimation techniques to estimate these properties. In these cases, the properties are estimated by minimizing an objective function defined by the square error of the difference between a theoretical and measured temperature. However, only in especial conditions the parameter estimation technique can estimate more than one variable simultaneously. The main difficulty, in this case, is due the sensitivity coefficients being low and correlated. These sensitivity coefficients are defined as the first derivative of the temperature with respect the unknown properties. This problem, more critical in conductor materials, is avoided by the new technique proposed here. The method is based on two different objective functions from the same experimental data. The functions are defined from the frequency response function, FRF, of a single-input/single-output system. The input is represented by a heat flux imposed at the frontal surface of a metallic sample (stainless steel 304) while the temperature response to this excitation represent the output. The thermal system is represented by a three dimensional model. Once the phase angle of the FRF is an exclusive function of α , an objective function based on this angle is defined to estimate the thermal diffusivity. The FRF modulus is, then, used in another objective function to determine the thermal conductivity. This paper also presents an uncertainty analysis of the technique and its potentiality for use in non-conductor materials.

Keywords: *Thermophysical properties estimation, Heat conduction, Optimization, Experimental Techniques, Inverse Problems*