

DESENVOLVIMENTO E CONSOLIDAÇÃO DE TÉCNICAS EXPERIMENTAIS NA IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAIS SÓLIDOS

Amanda Ribeiro Tillmann

artillmann@mecanica.ufu.br

Valério Luiz Borges

vlborges@mecanica.ufu.br

Sandro M. M. de Lima e Silva

metrevel@mecanica.ufu.br

Gilmar Guimarães

gguima@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC,
Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos - LTCM
Av. João Naves de Ávila, 2160, CEP 38408-100, Tel.(34) 3239-4148, Fax:(34) 3239-4206
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: *Propõe-se nesse trabalho uma técnica experimental para obtenção simultânea da difusividade térmica, α , e condutividade térmica, λ , de materiais isolantes, a partir do uso de um modelo térmico que considera a transferência de calor tridimensional transiente. Ressalta-se que a maioria das técnicas existentes para estimação das propriedades α e λ utiliza mais de uma superfície de acesso. Assim, neste trabalho também propõe-se a determinação destas propriedades utilizando somente uma superfície de acesso, uma vez que alguns dos meios existentes, medição de α e λ em campo, possuem apenas uma superfície de acesso. Para determinação de α e λ de materiais metálicos e não metálicos existem vários métodos clássicos como os métodos transientes, método do Fio Quente e o método Flash. Os dois métodos podem ser usados para determinação simultânea destas propriedades, mas usualmente o do Fio Quente é mais indicado para a obtenção de λ enquanto o Flash para a determinação de α . Uma alternativa para se obter as propriedades simultaneamente é utilizar a técnica Mista. Nesta técnica uma função objetivo de fase no domínio da frequência é usada para obtenção de α e uma função objetivo de mínimos quadrados no domínio do tempo é usada para obtenção de λ . O objetivo principal deste trabalho é a estimação de α e λ usando apenas uma superfície de acesso através da técnica Mista. A temperatura teórica é obtida através da resolução da equação de difusão de calor para o modelo tridimensional proposto. Também, são feitas análises para a obtenção da localização e disposição ótima dos sensores e investigação da aplicabilidade da técnica quanto ao tipo de material.*

Palavras-chave: *determinação de propriedades térmicas, condução de calor, otimização, métodos experimentais.*

1. INTRODUÇÃO

A caracterização de materiais, ou seja, a determinação de suas propriedades é atualmente um ramo bastante promissor e importante em diversos setores (setores industrial, elétrico, científico, controle de qualidade entre outros) todos esses setores dependem da disponibilidade de materiais com propriedades físicas e químicas bem definidas e que tenham, precisão e confiabilidade. Do ponto de vista econômico é importante que se tenham materiais bem caracterizados para garantir a

competição dos mesmos no mercado internacional. As determinações e medições das propriedades dos materiais utilizados no setor elétrico, por exemplo, são fundamentais para eficiência energética dos equipamentos fabricados no País. O mesmo se aplica ao setor da indústria química que também necessita ter um conhecimento das propriedades dos equipamentos, visto que a maioria dos mesmos trabalha a altas temperaturas e pressão. Dessa forma todo engenheiro deve estar inevitavelmente atento as características e comportamento dos materiais utilizados em seus projetos, uma vez que o conhecimento das propriedades do material é essencial na execução de projetos, pois evita falhas, diminui custos e aumenta a aplicabilidade dos mesmos. Para a caracterização de materiais existem um grande número de técnicas, cada uma com sua particularidade e importância. A caracterização adequada dos materiais a serem processados é imprescindível em estudo de processos industriais. Dentre as principais estão às propriedades térmicas, como a condutividade térmica, λ , e a difusividade térmica, α . A dificuldade no desenvolvimento das técnicas para obtenção destas propriedades reside no desenvolvimento de uma parte experimental e uma parte numérica que geralmente são sensíveis a erros sistemáticos e aleatórios, uma vez que envolvem um modelo teórico e sua implementação experimental. Citam-se como exemplos, erros de calibração de sensores ou perdas de calor em modelos unidimensionais. A previsão desses erros e a otimização tanto de modelos como de experimentos representa, assim, um papel fundamental para o desenvolvimento de técnicas para obtenção λ e α . Vários autores têm se dedicado ao estudo e desenvolvimento de técnicas para a determinação de propriedades termofísicas. Em Nicolau et al (2001) um dispositivo experimental, bem como uma metodologia própria são desenvolvidos para a determinação simultânea das propriedades condutividade térmica e calor específico de materiais isolantes. O dispositivo é baseado na utilização de fluxímetros a gradientes tangenciais e aplica-se a amostras planas de formato quadrado. A metodologia consiste no aquecimento de uma das superfícies da amostra através de uma taxa constante, enquanto que a outra superfície é mantida à temperatura constante através do contato com uma placa refrigerada a água. O conjunto parte de uma condição inicial de temperatura uniforme e avança até a condição final de regime permanente, com gradiente de temperatura uniforme sobre o corpo de prova. No estado final, regime permanente, é calculada a condutividade térmica. O calor específico é calculado a partir da variação de temperatura sofrida pelo corpo de prova e da quantidade de calor absorvida, obtida dos valores de fluxos instantâneos acusados pelos fluxímetros. Um programa de simulação é desenvolvido para avaliação dos procedimentos de medição e dos erros envolvidos no processo. Destaca-se que a determinação de λ é em regime permanente o que demanda tempos grandes e que as propriedades são somente obtidas para materiais não condutores. O trabalho de Aviles-Ramos et al (2001) apresenta a avaliação de uma técnica espectral para a determinação de propriedades termofísicas λ e ρc_p (capacidade de calor volumétrica). Neste caso, um experimento virtual transiente é construído, usando-se sinais periódicos. As soluções analíticas para a temperatura são encontradas para um modelo bidimensional no domínio tempo e no domínio espectral, com as propriedades λ e ρc_p anisotrópicas. Sendo que no domínio espectral, o ângulo de fase, depende das posições relativas dos sensores de temperatura e também das propriedades termofísicas. As propriedades são encontradas a partir da minimização de uma função objetivo de mínimos quadrados de fase que é definida pela diferença ao quadrado entre a fase experimental e a fase calculada pelo modelo. A técnica para o cálculo do ângulo de fase apresentada é analítica, quando isto não é possível, soluções numéricas são necessárias para a solução da temperatura e ângulo de fase. Entretanto, além dos resultados neste trabalho serem simulados uma limitação desta técnica é a geração do fluxo de calor periódico, que exige uma montagem experimental difícil de se construir. Lahoucine and Khellaf (2004) determinam λ e α do Delrin e do aço inoxidável AISI 304 para um modelo de difusão unidimensional (placa de espessura L), usando métodos periódicos levando em consideração os efeitos dos termopares. Da mesma forma que Haji-Sheikh et al (1998) α é obtida do atraso da fase, enquanto λ é obtida através de um fator de correção para os efeitos dos termopares. De fato este fator é relacionado com a redução da amplitude da temperatura medida devido aos efeitos dos termopares. Este fator fornece informação sobre a interação do material do sólido e do termopar. Então, além da natureza do contato e propriedades termofísicas do termopar, também contem

informação sobre o sólido tal como sua condutividade e difusividade. Cita-se como desvantagem deste trabalho a geração de um fluxo de calor periódico, o que exige uma montagem experimental complicada e de alta custo. Meukam et all (2004) realizam um estudo experimental para a caracterização térmica de materiais de construção. Neste trabalho, os autores verificaram o efeito da adição de saibro ou serragem no tijolo de solo laterítico sobre as propriedades térmicas λ e α . Neste sentido, os autores mostram que o efeito do uso de saibro ou serragem é o decréscimo das propriedades λ e α . O conteúdo de umidade destes materiais pode modificar o desempenho térmico deles. A condutividade térmica dos materiais foi obtida em regime permanente através do uso da Lei de Fourier. Já a difusividade térmica é obtida usando-se o método Flash. Malinarič (2004) determina λ e α do PMMA (polymethylmethacrilate). A teoria do método da fonte plana dinâmica e seu aparato experimental são discutidas. Os métodos dos coeficientes de sensibilidade e da análise de diferença são usados para determinar o intervalo de tempo no qual os dados experimentais podem ser usados para obtenção λ e α . Ressalta-se, que também a influência do aquecedor e suas perdas nas laterais da amostra e a influência do ruído são estudadas. Uma restrição importante quanto ao uso das técnicas apresentadas, reside no próprio acesso às superfícies do meio. A maioria dos meios existentes (por exemplo: edificações), tem normalmente uma superfície de trabalho. Ou seja, apenas uma superfície onde se deve submeter a excitação térmica para o estabelecimento do problema térmico e, ainda, serem feitas as aquisições dos dados experimentais de temperatura e fluxo (determinação de propriedades termofísicas *in situ*). Neste sentido, Lima e Silva et all (2003) desenvolveram uma técnica experimental adequada para determinação de α e λ de polímeros *in situ*. Duas funções objetivos distintas são usadas para a determinação destas propriedades. Uma função objetivo de fase definida a partir da correlação entre os sinais de temperatura experimental e teórico no domínio da frequência é usada para a determinação de α . Uma outra função objetivo de mínimos quadrados entre os sinais de temperatura experimental e teórico no domínio do tempo é usada para a determinação de λ . Uma restrição para uso desta técnica é que Lima e Silva et all (2003) conseguem determinar α e λ usando um modelo unidimensional. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma técnica experimental capaz da determinação simultânea das propriedades térmicas α e λ usando somente uma superfície de acesso. A base da técnica proposta é a obtenção destas propriedades utilizando a técnica Mista. Esta técnica representa uma forma alternativa na obtenção de α e λ , uma vez que se obtém estas propriedades de forma simultânea e independente. Esta independência é alcançada através da definição de duas funções objetivo, uma 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 em um modelo difusivo tridimensional, e a segunda função objetivo é obtida usando-se as temperaturas experimentais e calculadas. Primeiro é feita uma análise da sensibilidade da temperatura em relação às propriedades térmicas para a obtenção da localização e disposição ótima dos sensores. Uma vez determinada a melhor localização dos sensores, a etapa posterior é o cálculo das propriedades α e λ usando a técnica Mista.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Sistema Dinâmico

A técnica proposta se baseia no sistema tipo entrada/ saída mostrado na Figura 1.



Figura 1. Sistema dinâmico tipo entrada/saída

O modelo térmico por sua vez pode ser obtido de um problema de transferência de calor tridimensional, como mostrado na Figura 2. As temperaturas $T_1(t)$ e $T_2(t)$ representam as temperaturas medidas na superfície da amostra e ϕ_1 representa o fluxo imposto na amostra.

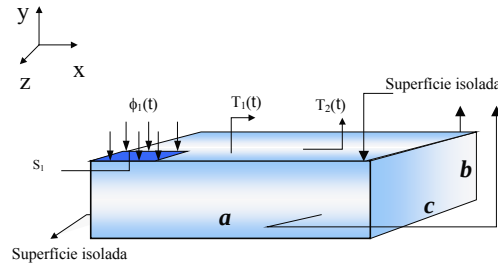


Figura 2. Esquema do modelo térmico equivalente

A determinação das temperaturas teóricas será feita através da resolução da respectiva equação de difusão de calor proposta para esse modelo térmico.

2.2 Modelo Teórico

A equação da difusão de calor governante do problema mostrado na Figura 2 pode ser escrita por:

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

na região R ($0 < x < a$, $0 < y < b$, $0 < z < c$) em $t > 0$, sujeita à condição inicial:

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \quad (2)$$

e às condições de contorno:

$$-k \frac{\partial T(x, b, z, t)}{\partial y} = \phi_1(t) \text{ em } S_1 \quad (0 \leq x \leq x_H, \quad 0 \leq z \leq z_H), \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(x, b, z, t)}{\partial y} = 0 \text{ em } S_2 \quad (x, z \in S \mid (x, z) \notin S_1),$$

$$\frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial x} = \frac{\partial T(a, y, z, t)}{\partial x} = \frac{\partial T(x, 0, z, t)}{\partial y} = \frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial z} = \frac{\partial T(x, y, c, t)}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

onde S representa a superfície dada por ($0 \leq x \leq a$, $0 \leq z \leq c$) e x_H e y_H os limites da superfície S_1 onde é aplicado a fonte de calor. A solução das Equações 1-4 pode, então, ser expressa em termos da função de Green tridimensional (Ozisik, 1993) como sendo:

$$T(x, y, z, t) - T_0 = \frac{\alpha}{\lambda} \int_{\tau=0}^t \left[\int_{S'} G(x, y, z / x', y', z', t - \tau) \Big|_{y'=b} dS' \right] \phi_1(\tau) d\tau, \quad (5)$$

onde $G(x, y, z / x', y', z', t - \tau)$ é a função de Green associada ao problema térmico. A Equação 5 pode ser escrita como:

$$\theta(x, y, z, t) = \int_{\tau=0}^t G^+(x, y, z, t - \tau) \cdot \phi(\tau) d\tau, \quad (6)$$

onde,

$$G^+(x, y, z, t - \tau) = \frac{\alpha}{\lambda} \int_{S'} G(x, y, z / x', y', z', t - \tau) \Big|_{z'=0} dS', \quad (7)$$

Para duas posições quaisquer dadas pelos pares (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) , a Equação 7 é dada por:

$$\theta(x_1, y_1, z_1, t) = \theta_1(t) = - \int_{\tau=0}^t G_1^+(t - \tau) \cdot \phi_1(\tau) d\tau, \quad (8)$$

$$\theta(x_2, y_2, z_2, t) = \theta_2(t) = - \int_{\tau=0}^t G_2^+(t - \tau) \cdot \phi_2(\tau) d\tau, \quad (9)$$

Se $G_i^+(t)$ e $\phi_i(t)$ são funções de t para $t > 0$ então as Equações 8 e 9 representam a integral de convolução destas funções dadas por $G_i^+ * \phi_i$, ou seja:

$$\theta_1(t) = G_1^+ * \phi_1(\tau) = \int_{\tau=0}^t G_1^+(t - \tau) \cdot \phi_1(\tau) d\tau, \quad (10)$$

$$\theta_2(t) = G_2^+ * \phi_2(\tau) = - \int_{\tau=0}^t G_2^+(t - \tau) \cdot \phi_2(\tau) d\tau, \quad (11)$$

Se as transformadas de Fourier da convolução das Equações 10 e 11 existem umas de suas propriedades podem ser aplicadas, Abramowitz and Stegun (1968), ou seja:

$$\mathfrak{F}\left(G_1^+(t) * \phi_1(t)\right) = G_1^+(f) \cdot \phi_1(f), \quad (12)$$

$$\mathfrak{F}\left(G_2^+(t) * \phi_1(t)\right) = G_2^+(f) \cdot \phi_1(f), \quad (13)$$

As Eqs. (12) e (13) podem ser escritas no domínio da frequência como:

$$\theta_1(f) = G_1^+(f) \cdot \phi_1(f), \quad (14)$$

$$\theta_2(f) = G_2^+(f) \cdot \phi_1(f), \quad (15)$$

Observa-se que como $\phi_i(t)$ e $\theta_i(t)$ são obtidos de medições discretas, podem ser calculados diretamente aplicando-se a técnica de transformada rápida de Fourier usando-se o algoritmo de Cooley-Tukey (Bendat & Piersol, 1986). Subtraindo-se a Equação (15) da Equação (14) obtém-se

$$\frac{\theta_1(f) - \theta_2(f)}{\phi_1(f)} = \left(G_1^+(f) - G_2^+(f)\right) = Z(f), \quad (16)$$

onde $Z(f)$ é denominada função impedância. Verifica-se que a resposta em frequência $Z(f)$ é fortemente dependente das propriedades térmicas do sistema (Borges et al, 2004), ou seja:

$$Z(f) = \frac{\theta_1(f) - \theta_2(f)}{\phi_1(f)} = \frac{Y(f)}{X(f)} = \text{função}(\alpha, \lambda), \quad (17)$$

A manipulação de $Z(f)$, Eq. (17), em sua forma complexa (módulo/fase), dada pelas Eqs. (18) e (19), ou seja:

$$Z(f) = |Z(f)|e^{-j\varphi(f)}, \quad (18)$$

$$\varphi(f) = \arctang[\text{im}Z(f)/\text{re}Z(f)] \quad (19)$$

2.3 Análise da Sensibilidade

Análise da sensibilidade é uma ferramenta de suma importância para identificar as variáveis relevantes, ou seja, as variáveis que mais influenciam no processo a ser analisado. Define-se como sensibilidade ou coeficiente de sensibilidade a primeira derivada da função modelada em relação à variável de interesse. Os seguintes coeficientes de sensibilidade normalizados são analisados:

$$S_{\varphi, \lambda} = \frac{\lambda}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} \quad S_{\varphi, \alpha} = \frac{\alpha}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \quad S_{T, \lambda} = \frac{\lambda}{T} \frac{\partial T}{\partial \lambda} \quad (20)$$

onde $S_{\varphi, \lambda}$ representa a sensibilidade da fase em relação a λ , $S_{\varphi, \alpha}$ a sensibilidade da fase em relação a α e $S_{T, \lambda}$ a sensibilidade da temperatura em relação a λ . O objetivo da análise dos respectivos coeficientes de sensibilidade é para determinar a melhor região para se determinar as respectivas propriedades.

3. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS α E λ

3.1 Determinação de α

Uma vez verificado que a fase é só função de α pode-se determinar a difusividade térmica através da 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:

$$S_\varphi = \sum_{i=1}^{Nf} (\varphi_e - \varphi)^2, \quad (21)$$

onde φ_e e φ são respectivamente os valores experimentais e calculados da fase de $Z(f)$. Logo, os valores de α são os valores estimados que minimizam a Equação 21. A minimização foi feita usando-se o método da Seção Áurea com Aproximação Polinomial, Vanderplaats, (1986).

3.2 Determinação de λ

Determinada a difusividade térmica a condutividade térmica pode ser obtida através de uma função objetivo baseada no erro quadrático entre as temperaturas medidas experimentalmente, $T_e(t)$, e aquelas obtidas através do modelo teórico, $T(t)$. Da mesma forma anterior a minimização é feita utilizando o método da Seção Áurea com Aproximação Polinomial, Vanderplaats, (1986). Portanto o valor de λ ótimo será escolhido entre o menor valor que minimiza a função S_{mq} , definida como:

$$S_{mq} = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_t} [T_{e_{ij}} - T_{ij}]^2 \quad (22)$$

onde N_s é o número de sensores e N_t é o número de pontos.

4. PROPOSTA PARA MONTAGEM EXPERIMENTAL

Nesta parte descreve-se uma proposta para montagem experimental para a determinação de α e λ de materiais isolantes (Figura 3). Esse método é especialmente adequado a medição de propriedades térmicas *in situ*, uma vez que os sinais de temperatura e fluxo de calor são provenientes de somente uma superfície de acesso. O experimento envolve a aplicação de um fluxo de calor tipo pulso a um tempo inicial, $t = 0$, na superfície superior da amostra. A evolução da temperatura e fluxo de calor são medidos na superfície superior da amostra.

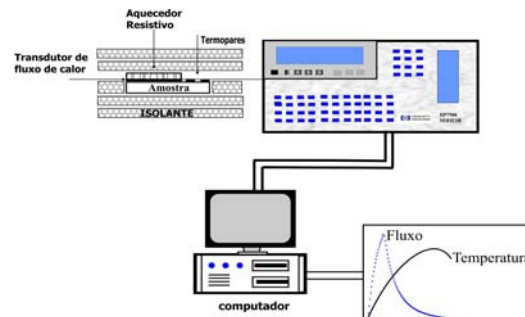


Figura 3. Esquema de montagem do aparato experimental a ser desenvolvido para obtenção de α e λ

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Apresenta-se nesta seção resultados preliminares para obtenção de α e λ , obtidos a partir de dados simulados de temperatura e fluxo de calor para uma amostra do Policloreto de Vinila (PVC). A amostra possui as seguintes dimensões: 100 x 20 x 70 mm. Para os dados simulados foram usados 1024 pontos, sendo que o intervalo de medição foi de 9,0 s, o tempo de duração do aquecimento foi de 150 s e o pulso de calor gerado foi de 900 W/m². Na Figura 4b apresenta-se os perfis de temperatura para cinco posições dos termopares (Figura 4a) como mostra a Tabela 1. A escolha de cinco termopares está associada a maior abrangência para se realizar o estudo da amostra, ou seja, descobrir regiões de maior sensibilidade. Na Figura 4b os termopares 1 e 2 apresentaram melhor comportamento do ponto de vista da utilização de técnicas no domínio da frequência. Ressalta-se que para o cálculo da transformada numérica de Fourier necessita-se desta condição, ou seja que a diferença entre estas duas temperatura tenda para zero. Uma vez que a fase é usada somente para determinação de α torna-se necessário analisar o coeficiente de sensibilidade da fase em relação a λ e α (Figuras 5a e 5b). Verifica-se na Figura 5a que a fase é realmente só função de α , permitindo a sua obtenção separadamente. Na Figura 5b determina-se quantos pontos são utilizados no cálculo de α , observa-se que a partir de 0,001 Hz o valor da fase tende a um valor constante. Uma análise nesta figura revela que apenas os sete primeiros pontos, tirando o primeiro são necessários para a determinação da difusividade térmica.

Tabela 1. Posições dos termopares

Posição dos Termopares (mm)	Termopar 1: x = 55, y = 20 e z = 25
	Termopar 2: x = 54, y = 20 e z = 55
	Termopar 3: x = 25, y = 20 e z = 55
	Termopar 4: x = 65, y = 20 e z = 25
	Termopar 5: x = 75, y = 20 e z = 65

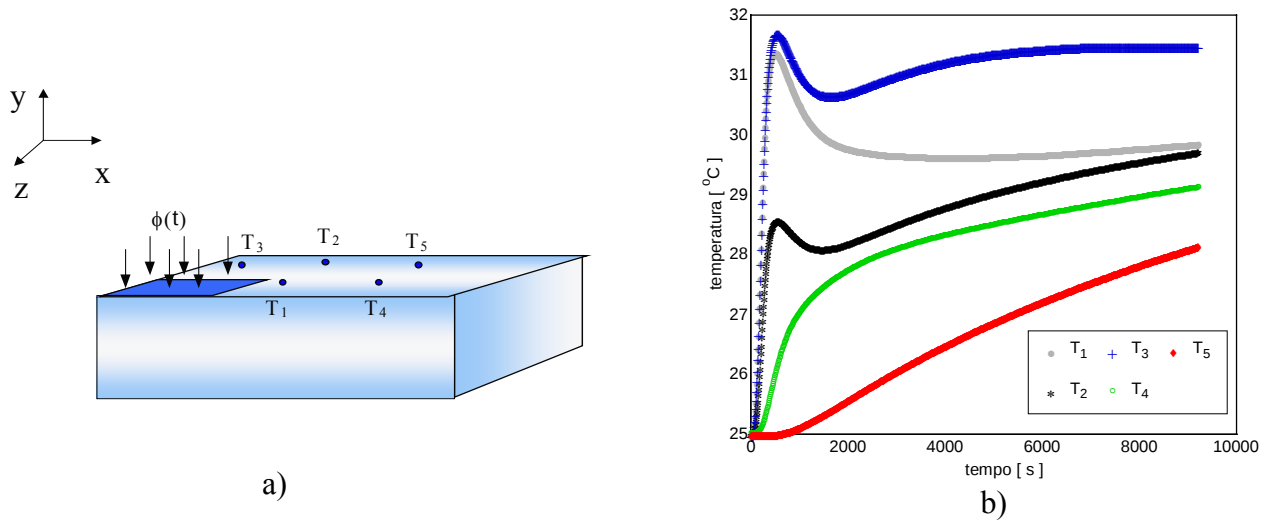


Figura 4. a) Esquema com a localização dos termopares b) temperaturas para o amostra de PVC

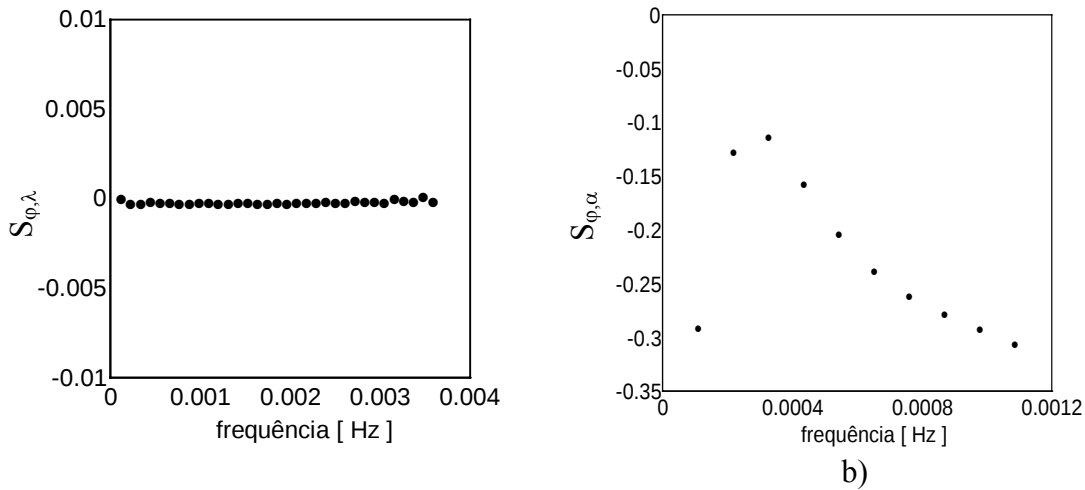


Figura 5. a) Sensibilidade da fase em relação a λ , $S_{\phi,\lambda}$ e b) sensibilidade da fase em relação a α , $S_{\phi,\alpha}$

Para determinação da condutividade térmica no domínio do tempo é necessário uma análise dos coeficientes de sensibilidade da temperatura em relação a λ para as temperaturas (T_1 e T_2) da Figura 4b. Observa-se que a partir de 500 s existe pouca informação para determinação da condutividade térmica, λ devido ao baixo coeficiente de sensibilidade.

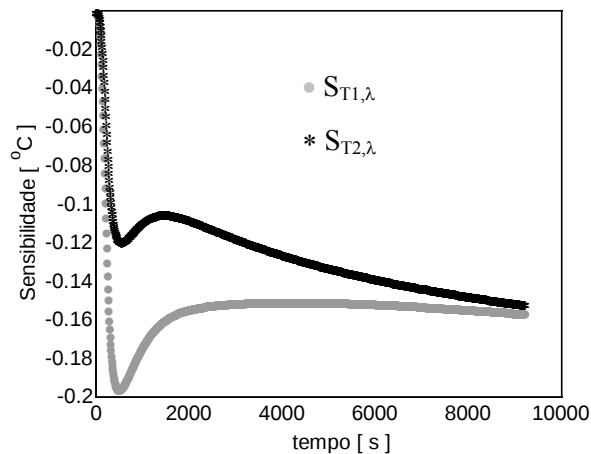


Figura 6. Sensibilidade da temperatura em relação a λ para T_1 e T_2

Os sinais de temperatura T_1 e T_2 apresentados na Figura 4b foram acrescidos erros aleatório, ε , de $\pm 0,25$. Assim, buscou-se tornar o procedimento usado neste trabalho para obtenção de α e λ o mais realista possível, ou seja os sinais de temperaturas experimental foram simulados, sendo a expressão para a temperatura dada por:

$$Y(x, y, z, t) = T(x, y, z, t) + \varepsilon, \quad (23)$$

onde $T(x, y, z, t)$ é a temperatura calculada numericamente a partir da solução da Equação 1.

A partir de cinco simulações dos sinais experimentais de temperatura foram obtidos os valores das propriedades α e λ . Na Tabela 2 apresenta-se os valores médios destas propriedades, pode-se observa uma boa concordância nos resultados obtidos de α e λ . O desvio quando comparado com Borges et al (2004) foi de 2,52 % e 4,40 % respectivamente para estas propriedades, para amostra de Policloreto de Vinila.

Tabela 2. Valores médios estimados de α e λ para o PVC

	Trabalho Atual	Borges et al (2004)	Erro (%)
$\alpha \text{ (m}^2\text{/s)} \times 10^7$	1,272	1,240	2,52
$\lambda \text{ W/m.K}$	0,159	0,152	4,40

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se resultados preliminares da metodologia proposta para obtenção de α e λ em meios já construídos (medição *in situ*). Neste sentido foram determinadas a melhor posição para os sensores de temperatura e as dimensões da amostra de polímero a ser usada. Também foram obtidos valores de α e λ a partir de dados experimentais simulados. O próximo passo para a continuidade deste trabalho e a obtenção destas propriedades a partir da montagem da bancada experimental proposta na Seção 4 deste trabalho.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo suporte financeiro.

8. REFERÊNCIAS

- Abramowitz and Stegun, 1968, "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables", Dover Publications, INC., New York, 1060p.
- Aviles-Ramos, C., Haji-Sheikh, A., Beck, J. V. and Dowding, K. J., 2001, "Estimation of Thermophysical Properties by the Spectral Method – Development and Evaluation", Journal of Heat Transfer, Copyright by ASME, vol. 123, pp 24-30.
- Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1986, "Analysis and Measurement Procedures", Wiley-Interscience, 2° ed., USA, 566p.
- Borges, V.L., 2004, "Um sistema Dinâmico para Identificação de Propriedades Termofísicas de Materiais Sólidos", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 105p.
- Haji-Sheikh, A., Hong, Y. S., You, S. M. and Beck, J. V., 1998, "Sensitivity Analysis for Thermophysical Property Measurements Using the Periodic Method", Journal of Heat Transfer, Copyright by ASME, vol. 120, pp 568-576.
- Lahoucine. C. O, and Khellaf. A, 2004, "Periodic Method: Correction for Thermocouple and Simultaneous Estimation of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity". Review of Scientific Instruments, vol.75, nº 7, pp. 2356-2361.

- Lima e Silva, S. M. M., Ong, T. H. and Guimarães, G, 2003, "Thermal Properties Estimation of Polymers Using Only One Active Surface", J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, Copyright 2003 by ABCM, vol. XXV/9, pp. 9-14.
- Malinarič, S., 2004, "Parameter Estimation in Dynamic Plane Source Method", Measurement Science Technology, vol. 15, pp. 807-813.
- Meukam P., Jannot.Y, Noumwe. A, and Kofane. T. C, 2004, "Thermo Physical of Economical Building Materials", Construction and Building Materials, vol.18, pp.437-443.
- Nicolau, V. P., Güths, S. and Silva M. G., 2001, "Thermal Conductivity and Heat Measurement of Low Conductivity Materials Using Heat Flux Meters", ECTP, 16th European Conference on Thermophysical Properties, Imperial College, London, UK.
- Ozisik, M. N., 1993, "Heat Conduction", John Wiley and Sons Inc, 2^o ed, 692p.
- Vanderplaats, G. N., 1986, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", McGraw-Hill Inc, 333p.

DEVELOPMENT AND CONSOLIDATION OF EXPERIMENTAL TECHNIQUES IN THE IDENTIFICATION OF THERMAL PROPERTIES OF SOLID MATERIALS

Amanda Ribeiro Tillmann

artillmann@mecanica.ufu.br

Valério L.Borges

vlborges@mecanica.ufu.br

Sandro M. M Lima e Silva

metrevel@mecanica.ufu.br

Gilmar Guimarães

gguima@mecanica.ufu.br

Federal University of Uberlândia - UFU, School of Mechanical Engineering - FEMEC,
Heat and Mass Transfer and Fluid Dynamics Laboratory - LTCM, Campus Santa Mônica,
João Naves de Ávila Av., 2160 - ZIP CODE 38408-100 Tel: (34) 3239-4148, Fax: (34) 3239-4206,
Uberlândia, Minas Gerais, Brazil.

Abstract: *This work proposes an experimental technique to simultaneously obtain the thermal diffusivity, α , and the thermal conductivity, λ , of insulating materials. The thermal model uses a transient three-dimensional heat transfer problem. The majority of the existent techniques to estimate the properties α and λ uses more than one access surface. Once some of the existent mediums, α and λ in situ measurements, possess only one access surface. In this sense, this work also intends to determine these properties using only one access surface. Several classic methods have been used for determining α and λ of metallic and non-metallic materials, as the Hot Wire and Flash Methods. The two methods can be used for simultaneous determination of these properties, but usually the Hot Wire method is indicated for λ determination, while the Flash method for α determination. An alternative to obtain these properties simultaneously is the Mixed technique. In this technique a phase angle objective function in the frequency domain is used for the estimation of α and a least square error objective function in the time domain is used for the estimation of λ . The main objective of this work is the estimation of α and λ in one access surface by using the Mixed technique. The theoretical temperature is obtained through the solution of the proposed three-dimensional heat diffusion equation. Analysis are also made for the determination of the location and optimum disposition of the sensors and applicability investigation of the technique as for the type of material.*

Keywords: *thermal properties determination, heat conduction, optimization, experimental methods.*