

## MÉTODOS TRANSIENTES PARA A MEDIÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE MATERIAIS

Guimarães, G\* e Philippi, P. C.  
Departamento de Engenharia Mecânica.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Tel: 0482 - 319397 Fax : 55-482-341519 Caixa Postal,  
476 Florianópolis, SC 88049 Brazil

### RESUMO

Apresenta-se uma revisão de métodos transientes usados na obtenção da condutividade térmica,  $K$ , calor específico,  $c$ , e difusividade térmica,  $\alpha$ . Analisa-se métodos conhecidos como os métodos flash e sonda térmica, e técnicas eficientes de cálculo de propriedades como a técnica de estimativa de parâmetros. O conceito de processamentos de sinais na identificação de sistemas térmicos através de suas propriedades é introduzido, e propõe-se um novo método para a obtenção simultânea de  $K$  e  $\alpha$ .

### ABSTRACT

This paper presents some experimental methods for simultaneous determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of non metallic materials. Flash method and methods that uses a hot wire are analysed. Parameter estimation techniques and a new experimental method that uses signal treatment developed for obtaining, simultaneously, the thermal conductivity and thermal diffusivity is also presented.

### INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas experimentais para a determinação de propriedades térmicas, e.g., calor específico,  $c$ , condutividade,  $K$ , e difusividade térmica,  $\alpha$ , de diferentes materiais tem interessado muitos pesquisadores devido a sua larga aplicação em problemas de engenharia [1-6]. A caracterização térmica de novos materiais, materiais compostos ou ainda materiais convencionais de estrutura complexa, como materiais porosos, são alguns exemplos da importância do desenvolvimento de técnicas experimentais para a determinação de parâmetros térmicos.

Esse trabalho é voltado ao estudo e desenvolvimento de métodos capazes da obtenção da condutividade, e difusividade térmica de materiais não metálicos. A atenção direcionada especificamente ao desenvolvimento de técnicas que possibilitam a caracterização térmica de materiais porosos cujas características variam essencialmente com a estrutura da matriz sólida e com o conteúdo de umidade. Normalmente mede-se a condutividade térmica através de métodos normalizados em regime permanente, [7]. O estudo em regime permanente para medição da condutividade térmica é um procedimento de longa duração, levando aproximadamente 4 horas para que se alcance o regime em laboratório (medições em campo podem ultrapassar 24 horas). Esse procedimento pode acarretar uma redistribuição de umidade da matriz porosa além de representar uma limitação na aplicação em materiais novos que se degradam quando aquecidos. Torna-se assim necessário a aplicação de métodos transientes rápidos capazes da determinação das propriedades térmicas,  $K$ ,  $\alpha$  e  $c$ .

Descreve-se a seguir alguns dos métodos transientes mais importantes usados na determinação

de propriedades térmicas.

O procedimento básico usado na determinação de propriedades como condutividade e difusividade térmica é, usualmente, a concepção de um modelo teórico, a partir da equação da difusão de calor que descreve um campo térmico no material (amostra) investigado. Uma vez estabelecido e identificado o campo, obtém-se as propriedades a partir da comparação com os dados experimentais e teóricos previstos no modelo - geralmente histórias de temperaturas medidas e calculadas no interior ou superfície da amostra. Para o estabelecimento do campo térmico torna-se necessário a aplicação de uma fonte de calor na amostra. Observa-se assim que a definição do modelo ou método usado completa-se a partir da escolha da localização da fonte de calor, bem como dos sensores e variáveis e. g., temperatura ou fluxo de calor, medidas e calculadas.

A maioria dos trabalhos sobre a medição de condutividade térmica são relativas a medição em regime permanente, enquanto, para a medição da difusividade térmica somente técnicas transientes permitem a sua determinação [8]. Acrescenta-se ainda que para a determinação da condutividade térmica, o fluxo de calor e as temperaturas devem ser conhecidos. Entretanto para a difusividade somente histórias de temperaturas são necessárias [8-9].

Pode-se analisar os métodos de medição a partir de dois aspectos: o modelo matemático que fornece a solução da equação da difusão de calor e as técnicas usadas para a realização experimental do problema. Parker et al [10] descreveram pela primeira vez um dos métodos atualmente mais empregados para obtenção da difusividade térmica - o método flash, [10-16]. Nele utiliza-se um pulso de alta intensidade e curta duração sobre uma superfície enegrecida da amostra, medindo-se a história da temperatura na face oposta, mantendo-a isolada, como mostrado na figura 1.

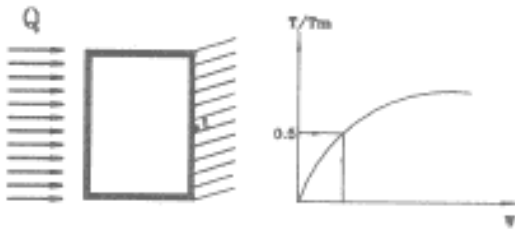


figura 1 - Apresentação esquemática do método Flash

A solução unidimensional analítica, relativamente simples, obtida por Carslaw & Jaeger [17], é então usada para obtenção da difusividade e condutividade térmica. Assim a evolução transiente da temperatura na face isolada,  $T(L,t)$ , é dada por

$$V = \frac{T(L,t)}{T_m} = 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp(-n^2 \cdot w) \quad (1)$$

onde,  $T_m$  é o valor máximo da temperatura nessa face e  $w = \pi^2 \cdot \alpha \cdot t / L^2$ , sendo  $t$  o tempo e  $L$  a espessura da amostra (veja figura 1). Uma das maiores vantagens desse método é a obtenção da difusividade térmica sem a necessidade de se computar o valor do calor imposto na superfície,  $x = 0$ . Para isso, um procedimento é plotar a curva  $V$  versus  $w$  a partir da história da temperatura experimental e obter o tempo,  $t_{1/2}$  correspondente ao valor de  $V = 0.5$ . Assim, obtém-se a difusividade da expressão

$$\alpha = 1.38 \cdot L^2 / \pi^2 \cdot t_{1/2} \quad (2)$$

Para se determinar a condutividade térmica torna-se necessário o conhecimento da energia absorvida na face frontal da amostra. Nesse caso obtém-se  $K$  através da definição da difusividade térmica,

$$K = \alpha \cdot \rho \cdot c \quad (3)$$

sendo a capacidade térmica,  $p.c$ , do material dado por

$$\rho \cdot c = Q / L \cdot T_m \quad (4)$$

onde  $Q$  é calor imposto na superfície frontal da amostra e  $p$  a sua massa específica. Observa-se que a dificuldade do método flash reside na implementação do aparato experimental. O calor de alta magnitude e curta duração, da ordem de 600-1000 J e 10-20 ms, respectivamente, imposto na superfície tornam onerosos os custos de equipamentos, como laser, capazes de atender essas especificações. Outra limitação é a alta sensibilidade e rapidez de resposta necessários aos equipamentos para a medição da temperatura. Quanto às amostras, essas devem possuir espessuras da ordem de 2 mm. Entretanto, se for usado fontes de menor intensidade de energia (e.g., lâmpadas Xenônio), ou amostras de materiais não metálicos as espessuras devem ser ainda menores, o que dificulta o trabalho com materiais porosos. Dentre as principais fontes de erros sistemáticos desse método, inclui-se os erros associados aos

desvios das condições experimentais em relação às condições de contorno assumidas no modelo matemático,[16]. Cita-se, nesse caso erros associados à determinação efetiva da espessura da amostra; erros associados à medição do tempo que a superfície isolada alcança determinada porcentagem da temperatura máxima (normalmente 50%) o que envolve também a determinação do tempo inicial da ação do laser (ou similar) além da resposta de tempo dos detectores e amplificadores. Shoemaker [18] aponta ainda como as maiores fontes de erro: o efeito do pulso finito; as perdas de calor e a não uniformidade no aquecimento. Acrescenta-se também as perdas de calor na superfície isolada - uma condição de difícil execução experimental, bem como a identificação das perdas ou ganhos de calor por radiação e convecção no aquecimento. A obtenção de  $K$  a partir do valor medido da difusividade térmica também representa uma fonte de erro que deve ser evitada. O método de cálculo dessa propriedade, nesse caso, deve ser modificado.

Uma outra técnica, muito usada na medição de propriedades térmicas é o método da sonda térmica, inicialmente apresentada por Blackwell,[19]. Esse método envolve, normalmente, a colocação de um elemento filiforme (sonda) no centro axial do meio que se deseja medir, geralmente em forma cilíndrica. A sonda tem a função de dissipar calor (efeito joule) e medir a temperatura no interior da amostra atuando como um termômetro de resistência. Adicionalmente pode-se instalar termopares no corpo da sonda. A figura 2 mostra o esquema de uma sonda térmica típica.

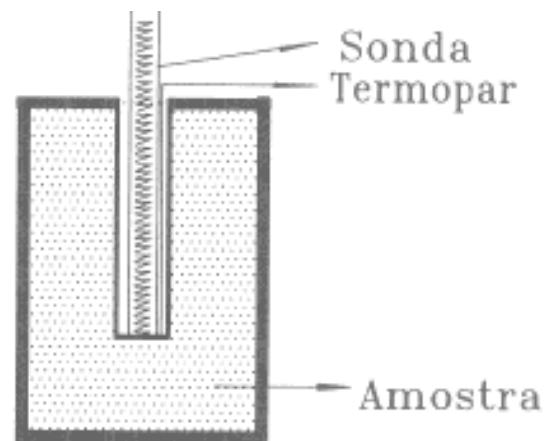


figura 2 - Esquema de uma sonda térmica típica

Variações desse método tem sido usadas para medir propriedades térmicas de sólidos, e líquidos [20-27). O método baseia-se na solução da equação da difusão de calor para uma fonte de calor em forma de linha infinita imersa num meio suposto infinito. A solução desse problema, dada por Carslaw & Jaeger [10] é:

$$\Delta T = T - T_i = (Q / 4\pi \cdot k) \cdot \ln(4 \alpha t / r^2 C), \quad (5)$$

onde  $T$  é a temperatura da sonda  $T_i$  a temperatura inicial da sonda,  $Q$  o calor imposto por unidade de comprimento de elemento,  $r$  o raio do elemento e  $C$  a constante de Euler. Observa-se ainda que a equação é válida somente quando a expressão adimensional

$$r^2 / (4 \alpha t) \leq 1. \quad (6)$$

é satisfeita. Para a determinação da difusividade e condutividade térmica Glatzmaier & Ramirez [23] manipularam a equação (5), obtendo os valores de  $K$  e  $\alpha$  a partir de dados experimentais. Para isso, plota-se a história da temperatura em função de  $\ln(t)$  é plotada usando-se uma curva de regressão linear obtida pelo método dos mínimos quadrados. Assim, se  $A$  é a inclinação e  $B$  a intersecção da ordenada da reta, então as equações para  $K$  e  $a$  são dadas por

$$K = q / (4\pi \cdot A), \tag{7}$$

$$a = C r^2 / (4 \exp(B / A)) \tag{8}$$

Analisa-se a seguir algumas fontes de erro sistemáticos desse método. Knibbe [281] observa que a temperatura da sonda suposta uniforme, normalmente é mais baixa em suas extremidades devido aos efeitos de resfriamentos causados por seus suportes. Consequentemente, um aumento de temperatura menor acarretaria um valor maior na condutividade térmica estimada. Além disso, supõe-se que a sonda possa ser representada teoricamente como uma linha de fonte de calor. A grande dificuldade experimental é a obtenção de uma sonda suficientemente fina aliadas aos aspectos práticos de sua instalação. Outros fatores como comprimento mínimo da sonda para se assegurar a hipótese de condição de fluxo radial deve ser considerada na execução experimental da sonda. Salienta-se novamente, a dificuldade prática de inserção da sonda no meio investigado. O método apresenta a vantagem da simplicidade das equações e a forma direta da obtenção das propriedades. A dificuldade está na realização do experimento para que as hipóteses simplificativas usadas sejam satisfeitas. Uma desvantagem é o caráter destrutivo do experimento. Contudo, para medições em campo a previsão de sondas na construção do meio a ser explorado tornam o método eficiente e não destrutivo.

Na procura de métodos transientes alternativos, Clarke & Kingston [291], indicam alguns caminhos para obtenção de  $K$  e  $\alpha$ , figura 3.

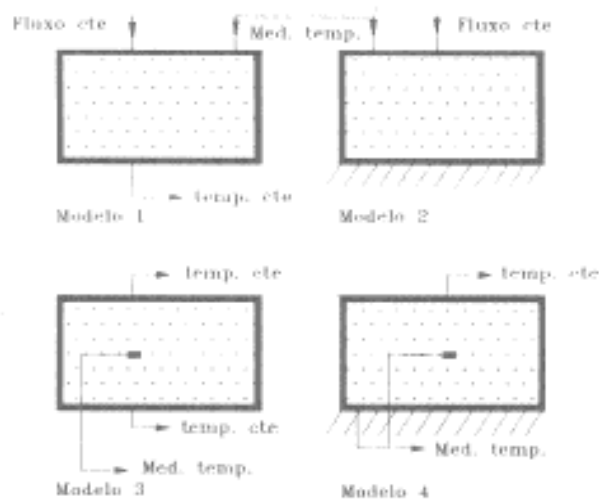


figura 3 - Modelos para obtenção de propriedades térmicas em métodos transientes

Todavia, somente os modelos envolvendo o conhecimento do calor imposto (figs. 1 e 2) são capazes da obtenção simultânea de  $K$  e  $\alpha$  (ou  $c$ ) [8]. A escolha de um método em particular depende da simulação das condições térmicas assumidas numa bancada experimental. O modelo teórico representado pela fig. 2, usado no método flash, é normalmente o mais aplicado. As condições práticas de execução do fluxo de calor imposto na superfície são responsáveis pela variação desse método. Clarke, & Kingston [291] apresentam uma forma alternativa ao método flash, cuja aplicação do fluxo de calor é feito através do uso de aquecedores de resistência, por efeito joule. A condição de isolamento é obtida através do uso de duas amostras e duas fontes de calor idênticas, dispostas como mostrado na figura 4.



figura 4 - Modelo para obtenção experimental da condição de isolamento

A obtenção das propriedades  $K$  e  $a$  se dá a partir da manipulação gráfica da solução teórica e da evolução transiente da temperatura na superfície isolada. A dificuldade do método está na obtenção de amostras idênticas e da geração de fluxo de calor constantes e iguais nurn mesmo instante, tornando o método muito suscetível a erros.

Entretanto, a simplicidade de concepção da bancada experimental desperta, assim, o interesse de vários autores [8,30]. Todavia, os métodos de cálculo para obtenção das propriedades têm sofrido bastante alterações. Trabalhando no desenvolvimento de um método de cálculo mais eficiente e automatizado para determinação de  $K$  e  $a$  simultaneamente, Beck & Arnold [31] desenvolveram o método de estimação de parâmetros, aplicando-o em diversos modelos físicos figura 4, além de outros, com corpos semi-infinitos. A estimação de parâmetros também chamada estimação não linear é um procedimento iterativo que busca determinar parâmetros envolvidos na modelagem de algum fenômeno físico. Assim, obtém-se os parâmetros através da minimização da diferença de uma grandeza medida com o seu valor teórico calculado. A minimização é feita em relação aos parâmetros estimados. Assim, Beck & Arnold obtém a condutividade e a difusividade térmica minimizando a diferença entre as temperaturas medidas e calculadas nas superfícies e/ou no interior da amostra descritas pela solução do problema térmico do modelo. Esse método de cálculo é usado nos dois métodos propostos desse trabalho. Uma aplicação do método de estimação de parâmetros, foi apresentado por esse autor [32]. Nesse caso, a condição de isolamento da modelo 2 foi substituída por uma condição de temperatura constante e permitiu-se a variação transiente do fluxo de calor imposto na amostra dando maior flexibilidade à simulação experimental. Entretanto, algumas fontes de erro como erro na medição de fluxo de calor através

de fluxímetros e na obtenção da temperatura constante devem ser analisados com cuidado.

Observa-se assim que um método ideal do ponto de vista da simulação experimental não deve impor nenhuma restrição nas condições de contorno, ou seja, nas evoluções de temperatura e/ou fluxo de calor. O uso de fluxímetros de calor representam um avanço nesse sentido, uma vez que os fluxos impostos nas amostras além de controlados são também medidos. A dificuldade no uso de um fluxo de calor variável está na obtenção da solução analítica do modelo proposto. No entanto, técnicas de solução como funções de Green ou transformadas de Laplace são excelentes para esses casos. Dessa forma, a aplicação de fluxos de calor através de aquecedores por resistência tornam-se visíveis. Observa-se entretanto que a fonte de erro devido a medição do fluxo de calor com fluxímetro representa, nesse caso, a principal fonte de erro, sendo a calibração dos transdutores bastante delicada, dentro do ponto de vista de propagação de erros.

Kougbeadjo & They [36] apresentam exemplo da aplicação de fluxímetros de calor. Os autores aplicam princípios da correlação cruzada entre dois processos estocásticos na análise de problemas de transferência de calor, obtendo-se a difusividade térmica. Os fluxos de calor impostos e resultantes que atravessam as superfícies frontal e oposta de uma parede são detectados usando-se fluxímetros de calor de alta sensibilidade [33]. Determina-se o tempo de difusão a partir do atraso para o qual o fluxo de calor alcança o seu valor máximo. Mede-se o tempo de difusão através da função correlação cruzada entre o pulso de calor injetado e a resposta a esse pulso - o valor máximo dessa função se dá com um atraso igual ao tempo de difusão do pulso de calor através da parede. Determina-se assim a difusividade térmica do material da parede a partir da identificação do tempo do difusão do sinal do pulso de calor através da parede. Nesse caso, identificando-se o valor máximo, da correlação cruzada determina-se o tempo de difusão e consequentemente a difusividade térmica.

A modelagem física desse método baseia-se na temperatura constante da face oposta e no pulso de calor de forma quadrado instantâneo na face frontal. O pulso de calor aplicado através de uma folha de resistência assume experimentalmente formas exponenciais ou formas de pulsos quadrados com decaimento. Observa-se então que os desvios das formas de geração de calor são fundamentais para análise de erros uma vez que, a obtenção da expressão teórica da correlação cruzada deve-se ao pulso quadrado. Os autores [36], entretanto consideram que a obtenção do valor máximo da correlação cruzada não é alterada sensivelmente pela forma do pulso. Os dois métodos propostos neste trabalho usam dois fluxímetros de calor de rápida resposta e alta sensibilidade, desenvolvidos por Leclerq & They [33] e dois sensores de temperatura (termopares) aplicados nas superfícies para o registro da evolução transiente dos fluxos de calor e temperaturas da amostra. A figura 5 representa o modelo. Assim, substitui-se a hipótese de isolamento ou temperatura constante na superfície oposta à superfície aquecida pela condição real de perda de calor transiente a ser medida pelo fluxímetro. Da mesma forma, o aquecimento imposto na superfície frontal é monitorado pelo sensor de fluxo de calor. No primeiro método as duas temperaturas medidas na superfície são usadas para a obtenção simultânea de  $K$  e  $\alpha$  a partir da solução do problema da difusão de calor usando-se a técnica de funções de Green. O método de cálculo é baseado na técnica de estimação de parâmetros. O segundo método que também utiliza o modelo da figura 5, usa como base de cálculo para as propriedades a aplicação de conceitos de processamento de sinais, estimação de parâmetros e uma abordagem matemática do modelo que

permite o uso de conceitos de entrada/saída de sinais em um sistema.

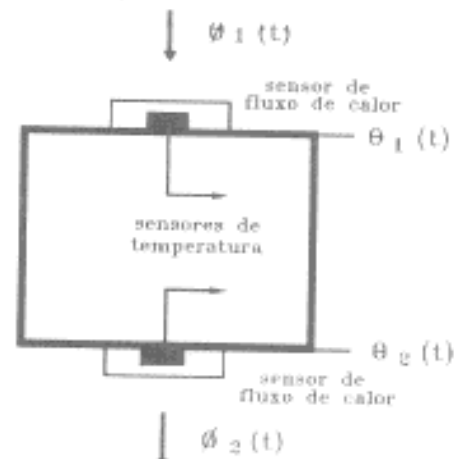


Figura 5 - Amostra sujeita à evoluções transientes de fluxo de calor e temperaturas nas superfícies. Aplicação de sensores superficiais.

Observa-se que as fontes de erro sistemáticas são bastante minimizadas. Identifica-se ainda como fontes de erro, as hipóteses de fluxo de calor unidimensional e material homogêneo, usadas para a solução do problema térmico e da própria definição da difusividade térmica.

#### MÉTODO 1 - ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

A figura (6a) apresenta uma amostra plana homogênea sujeita a uma temperatura inicial  $\theta_0$ . Impõe-se um fluxo de calor transiente,  $\theta_1$  num instante  $t_0$  na superfície superior da amostra, permitindo-se que o fluxo de calor atravesse a superfície oposta, como mostrado na figura. Sob estas condições o problema apropriado a valor de contorno pode ser dado por

$$\theta(x,t) = \text{função} ( X, \alpha, t, \text{ geometria} ) \quad (9)$$

ou seja, a temperatura encontrada é uma função dos Parâmetros estimados - o tempo e as variáveis geométricas nas superfícies da amostra. Tendo estabelecido a solução formal do problema direto equação (9), estima-se os parâmetros  $K$  e  $\alpha$  das medições de temperatura ( $Y$ ) tomadas nas superfícies da amostra. No método descrito por Beck & Arnold a condutividade e difusividade térmica são encontradas minimizando-se a função soma quadrática

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 [ y_{ji} - \theta_{ji} ]^2 \quad (10)$$

com respeito aos parâmetros envolvidos. Neste caso,  $K$  e  $\alpha$  são os parâmetros estimados para a obtenção da melhor concordância entre os valores medidos e estimados e, os subíndices  $i$  e  $j$  representam o número de sensores, (neste caso 2 termopares) e o tempo discreto de medição, respectivamente. Uma forma de se minimizar  $S$ , dada pela equação (10) é fazer suas primeiras derivadas em relação aos parâmetros iguais a zero [31]. Desse modo obtém-se um conjunto

de equações em  $K$  e  $\alpha$  ser resolvido simultaneamente para as incógnitas. Obtém-se assim, através do método de Gauss, as equações de recorrência para a obtenção de  $X$  e  $\alpha$ , ou seja

$$X = X + AX \quad (11)$$

$$X = a + Aa \quad (12)$$

onde  $X$  e  $\alpha$  são os valores atuais estimados para a condutividade térmica e difusividade térmica obtidas através dos seus respectivos valores anteriores, até, a convergência, considerada alcançada quando a diferença relativa entre os valores estimados seja inferiores a 0.0001, entre a última e penúltima iteração.

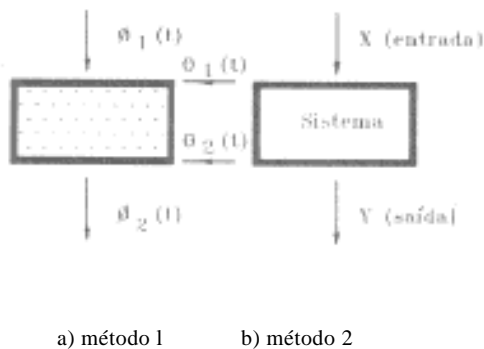


Figura 6 - Problema térmico proposto

## MÉTODO II - PROCESSAMENTO DE SINAIS NA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

O problema térmico modelado pela figura 6b pode ser abordado de forma diferente. ou seja a identificação das propriedades  $X$  e  $\alpha$  da amostra pode se dar a partir de seu tratamento como um sistema sujeito a um sinal de entrada do tipo

$$\Sigma \dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = X \quad (13)$$

correspondente à soma dos fluxos de calor nas mesmas superfícies e à um sinal de saída do tipo

$$\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1 = Y, \quad (14)$$

correspondente à diferença de temperatura nas superfícies da amostra.

Obtém-se do teorema da convolução aplicado ao sistema

$$Z(f) = \frac{\Delta \theta}{\Sigma \dot{Q}} = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (15)$$

onde  $Z(f)$  é conhecida como impedância generalizada [37].  $Z(f)$  representa a transformada de Fourier de  $Z(t)$  que é obtida através da solução do problema térmico resolvido de forma sistêmica pelo método da transformada de Laplace [41].

Devido a característica dinâmica do sistema

(entrada/saída) o procedimento aqui idealizado será o da estimação dos parâmetros  $Z$  e  $\alpha$  através da comparação da função mínimos quadrados de  $Z$  em suas formas experimental e estimada no domínio da frequência, ou seja a identificação se dá através da aplicação da transformada de Fourier em  $Z(t)$  nos dados experimentais e teóricos, denominados  $Z(f)$  e  $\bar{Z}(f)$ , respectivamente.

$$S = \sum (|Z| - |\bar{Z}|)^2 \quad (16)$$

## CONCLUSÃO

A escolha de um método transiente para obtenção de propriedades térmicas como difusividade térmica e condutividade térmica depende principalmente do material a ser investigado. A partir da definição da faixa de operação ( i.e, materiais isolantes ou condutores) busca-se o método adequado. O método Flash e método da sonda são de largo uso na obtenção da difusividade e condutividade térmica, respectivamente, porém para a obtenção simultânea de  $K$  e  $\alpha$  outros caminhos devem ser seguidos. Nesse sentido são propostos os métodos que utilizam a estimação de parâmetros e processamento de sinais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kamiuto, K. and Twamoto, M., Inversion Method for Determining Effective Thermal, Conductivities of Porous Materials, *Journal of Heat Transfer*, Vol 109, pp 831-834
- [2] Vos, B. H., Measurements of Thermal Conductivity by a Non-Ste-ady-State Method *Appl.Sri.Res.* Vol 5, pp 425-438, 1955
- [3] - Lee. T. Y. R.. and Taylor, R. E., Thermal Diffusivity of Dispersed materials, *Journal of Heat Transfer.* vol 100. pp 720-724, nov 1978
- [4] - Taylor, R. E., Kelsic, B. H.. Parameters Governing Thermal Diffusivity Measurements of Unidirectional Fiber-Reinforced composites, *Journal of Heat Transfer* vol 108, pp 161-165, feb 1986 ,
- [5] - Degiovanni. A., Diffusivité et Méthode Flash, *Revue Generale de Thermique.* n 185, pp 416-442, mai 1977
- [6] - Laurent, M., Comparative and Critical Study of Some Methods for Determining the Thermophysical Properties of Heat Conducting Solids, *International Chemical Engineering*, vol 23, pp 31-47, jan 1983
- [7] - Standard Test Method for Steady-State Thermal Transimission Properties by means of the Guarded Hot Plate, *ANSI/ASTM C 177-76*, vol 18,1980
- [8] - Beck, J. V., The Optimum Analytical Design of Transient Experiments for Simultaneous

Determinations of Thermal conductivity and Specific Heat, Ph. D. Thesys, *Michigan State University*, 1964

- [9] - Audibert, S., Détermination des Caractéristiques Thermocinétiques des Milieux Poreux. Analyse Théorique, Mesures et Résultats, Thèse Docteur 3 Cycle, *L'Institut National Polytechnique de Grenoble*, avril 1985
- [10]- Parker, W. J., Jenkins, R. J., Butler, C. P. and Abbott, G. L., Flash method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity, *Journal of Applied Physics*, vol 32, pp 1679-1684, set 1961
- [11]- Degiovanni, A., Une Nouvelle Technique D'Identification de la Diffusivité Thermique pour la Méthode Flash, *Revue Phys. Appl.*, vol 21, pp 229-237
- [12]- Andrieu, J., Laurent, M., Puaux, J. P. and Oshita, S., Mesure Automatique de la Diffusivité Thermique des Denrées Alimentaires par la Méthode Impulsionnelle, *IAA Cahier Scientifique et Technique*, pp 905-909, octobre 1988
- [13]- Macqueron, J. L., Sinicki, G., Durand, G. and Rinaldi, D., Mesure de la Diffusivité Thermique par la Méthode du Signal Bref, *C. R. Acad. Sc. Paris*, t.265, pp 440-443, aout 1967
- [14]- Jamos, H. M., Theory of Pulse Measurement of Thermal Diffusivity on Two-Layer Slabs, *High Temperatures -High Pressures*. vol 17, pp 481-496, 1985
- [15]- Jonza, J. M. and Porter, S., Comparison of Two Methods for Flash Thermal Diffusivity on Drawn Low-Density Polyethylenes, *Rev. Sci. Instrum.*, vol 10, pp 1654-1659, oct 1984
- [16]- Taylor, R., Heat-Pulse Thermal Diffusivity Measurements, *High Temperatures - High Pressures*, vol 11, pp 43-58, 1979
- [17]- Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, New York, 1959
- [18]- Shoemaker, R. L., Limitations of the Pulse Diffusivity Method as Applied to Composite materials, *High Temperatures - High Pressures*, vol 18, pp 645-654,
- [19]- Blackwell, J. H., A Transient-Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Materials in Bulk, *Journal of Applied Physics*, vol 25, pp 137-144, feb 1954
- [20]- Laurent, J. P., Contribution à la Caractérisation Thermique des Milieux Poreux Granulaires, Thèse Docteur, *L'Institut National Polytechnique de Grenoble*, oct 1986
- [21]- Fernandes, C. P., Estudo dos Processos de Condensação e Migração de Umidade em Meios Porosos Consolidados. análise Experimental de uma Argamassa de Cal e Cimento, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, março 1990
- [22]- Fernandez, M. and Banda, C., Heat Pulse Line-Source Method to Determine Thermal Conductivity of Consolidated Rocks, *Rev. Sci. Instrum.*, vol 11, pp 2832-2836, nov 1986
- [23]- Glatzmaier, G. C. and Ramirez, W. F., Simultaneous measurement of the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Unconsolidated Materials by the Transient Hot Wire Method, *Rev. Sci. Instrum.*, vol 7, pp 1394-1398, july 1985
- [24]- Mohammade, S. S., Graboski, M. S. and Sloan, E. D., A Mathematical Model of a Ramp Forced Hot-Wire Thermal Conductivity Instrument, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol 24, pp 671-683, 1981
- [25]- McGinnis, D. S., Automated Line-Heat Source System for the Measurement of Thermal Conductivity and Diffusivity, *Canadian Agricultural Engineering*, vol 29, pp 201-207, 1987
- [26]- Batty, W. J., Probert, S. D., Ball, M. and O'Callaghan, P.W. Use of the Thermal-Probe Technique of the Measurement of the Apparent Thermal Conductivities of Moist Materials, *Applied Energy*, vol 18, pp 301-317, 1984
- [27]- Desmons, J. Y., Madieta, E., Martin, M., Torguet, R. and Le Ray, M., Nouvelle Method de Mesure de la Conductivité Thermique, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol 27, pp 511-517, 1984
- [28]- Knibbe, P. G., The End-Effect Error in the Determination of Thermal Conductivity using a Hot-Wire Apparatus, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol 29, pp 463-473, 1986
- [29]- Clarke, L. N. and Kingston, S. T., Equipment for the Simultaneous Determination of Thermal Conductivity and Diffusivity of Insulating Material Using a Variable-State Method, *Australian Journal of Applied Science*, pp 172-187, 1950
- [30]- Vernotte, P., Détermination Simultanée de la Chaleur Spécifique et de la Conductivité Thermique des Isolants. Méthode du Signal, *C. R. Acad. Sci. Paris*. vol 204, p.563, 1937
- [31]- Beck, J. V., and Arnold, K. J., *Parameter Estimation in Engineering and Science*, Wiley. N. Y., 1977
- [32]- Guimarges, G., On the Estimation of Thermal Properties of Non-Metallic materials, III *ENCrT*, vol 2, pp 1 1990
- [33]- Leclercq, D. and Thery, P. Apparatus for Simultaneous Temperature and heat-Flow Measurements under Transient Conditions, *Rev.Sci.Instrum.*, v 54, pp 374-380, mar 1983
- [34]- Guimarães, G., Calibração de Sensores de Fluxo de Calor e Temperatura para Medição de Propriedades Termofísicas, Relatório Interno, Departamento Engenharia Mecânica, UFSC, (em desenvolvimento)
- [35]- Ozisik, N., *Heat Conduction*, Wiley, New York, 1980

- [36]- Kougbeardjo, R. A. and They, P., Thermal Diffusivity Determination by Cross Correlation Injected and Transmitted Heat Pulses Through a Wall, *J. Appl. Phys.*, Vol 53, pp 2875 -2886, april 1982
- [37]- Kougbeardjo, R. A., Identification de la Diffusivité Thermique par Traitement Du Transfert de Chaleur A Travers une Paroi Homogène en Régimes impulsionnel et Pseudo-aléatoire. Application des méthodes de Correlation en Thermocinétique, *These Docteur-Ingenieur*, Université des Sciences et Techniques de Lille, 171p, 1981
- [38]- Schaun, M. R., *Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas*, Mc Graw-hill do Brasil, 1974
- [39]- Brigham, E. O., *The Fast Fourier Transform*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc, New Jersey, USA, 252p, 1974
- [40]- National Physical Laboratory, -Certificate of Calibration. Thermal Conductivity of a Pair Polythene Specimens, Reference 12321/90/021, England, 1991.
- [41]- Beck, J. V. and Blackwell, B., Inverse Problems, *Handbook of Numerical Heat Transfer*, pp 787-834, 1990
- [42]- Bendat, J. S. and Piersol, A. G., *Analysis and Measurement Procedures*, Wiley - Interscience, 2-Ed. USA, p.566, 1986