



CARACTERIZAÇÃO DE UM MÉTODO DE PULSO TÉRMICO PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS.

Marcio Gomes da Silva¹, José Maurício A. M. Gurgel², Jesus Marlinaldo Medeiros³.

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB. e-mail: mgcefet@gmail.com

²Universidade Federal da Paraíba – UFPB. e-mail: jm.gurgel@uol.com.br

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB. e-mail: jesus_medeiros@yahoo.com.br

Resumo: O presente trabalho contém o método do pulso de calor para a determinação simultânea das propriedades termofísicas. O pulso térmico é fornecido ao material através da dissipação de um fluxo de calor gerado por uma resistência elétrica. Uma simulação numérica da experiência é realizada com o objetivo de estudar a influência de diversos parâmetros envolvidos na determinação das propriedades, dentre eles a resistência térmica de contato existente entre a resistência elétrica (responsável pelo fluxo de calor) e a amostra do material a ser estudado. As propriedades são determinadas utilizando a formulação da solução analítica clássica para a equação da condução de calor em um sólido infinito, proposta por Carslaw e Jaeger (1959).

Palavras-chave: Pulso térmico, resistência, propriedades termofísicas.

1. INTRODUÇÃO

O setor industrial nas últimas décadas, tem alcançado um grande desenvolvimento tecnológico, tanto pela necessidade da modernização do setor produtivo como pela pressão provocada pelo mercado mundial que exige diariamente a melhoria dos produtos já existentes e a criação de novos produtos. Um dos ramos da ciência que mais evoluiu para atender estas exigências foi o dos materiais em virtude da necessidade do aperfeiçoamento de equipamentos e processos industriais. Essas necessidades levaram ao desenvolvimento de novos materiais os quais precisam ser caracterizados tanto no que diz respeito as suas propriedades mecânicas como em relação as suas propriedades termofísicas. Nesse sentido, as técnicas de caracterização dos materiais têm uma importância fundamental no desenvolvimento da ciência dos materiais.

No que concerne a caracterização térmica, as propriedades de transporte de calor como calor específico, difusividade e condutividade térmica, são as que despertam maior interesse dos pesquisadores que com o conhecimento destas podem melhor determinar as grandezas de interesse da engenharia térmica ou melhor estimar as taxas de transferência de calor nos processos que envolvam adição e remoção de energia.

As técnicas de caracterização de tais propriedades vêm evoluindo em paralelo com a necessidade de se estimar com maior precisão as características intrínsecas de cada material. As primeiras investigações para caracterização térmica dos materiais foram realizadas em regime estacionário o que só permitia a determinação de uma propriedade. A mais comum a ser obtida é a condutividade, através da Lei de Fourier, com o conhecimento prévio de algumas variáveis e com a medição de outras. Entretanto, apenas uma propriedade não é suficiente para a caracterização completa de um material. Nesse sentido, as técnicas foram aprimoradas e experiências em regime transitório foram introduzidas. Essas técnicas têm como vantagem a possibilidade de determinar duas ou mais propriedades simultaneamente a partir de uma única experiência transitória associada a modelos matemáticos e a recursos computacionais. Muitos pesquisadores têm desenvolvido várias técnicas em



regime transitório para a medição de propriedades de transporte térmico, utilizando como fonte geradora de calor o LASER, lâmpadas incandescentes, resistências elétricas, e para tratamento dos dados obtidos nos experimentos, usam ferramentas matemáticas diretas, que permitem a identificação de um número reduzido de parâmetros; ou ferramentas de inversão, que podem determinar vários parâmetros simultaneamente.

A fonte de calor usada na simulação é uma resistência elétrica plana com geometria circular e as temperaturas são medidas no interior da amostra em uma posição fixa e o fluxo de calor é por hipótese unidimensional.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Algumas técnicas são utilizadas para determinação de propriedades termofísicas para a determinação simultânea as técnicas em regime transitório são as mais utilizadas atualmente, e todas elas consistem em aplicar sobre um corpo de prova em equilíbrio uma perturbação, e medir a temperaturas ou o fluxo de calor, em função do tempo. O que diferencia as técnicas em regime transitório é: o tipo de perturbação, o ponto das medições de temperatura ou fluxo de calor e a geometria do problema.

A técnica dos cilindros concêntricos usada por Pereira *et al* (1991) é um exemplo desse método e foi utilizada por Gurgel e Kluppel (1993) para obter a condutividade em regime estacionário e a difusividade em regime transitório, de leitos granulares compostos por grãos de sílica gel e de esferas de vidro. A identificação é feita a partir de termogramas obtidos por sensores de temperaturas colocados no interior de uma amostra de geometria cilíndrica, considerando o fluxo de calor unidimensional.

Carlsaw e Jaeger (1959), resolveram a equação da condução de calor em coordenadas retangulares para um sólido infinito que sofre uma perturbação térmica em um curto intervalo de tempo. A partir desta solução analítica foi estabelecida a técnica do pulso de calor, de onde as propriedades de transporte térmico são determinadas em regime transitório de forma direta. Silas (1991) utilizou esta técnica para caracterizar materiais utilizando um plano de aquecimento (uma resistência elétrica de geometria circular), chamado de Disco Quente, o qual é ao mesmo tempo fonte de calor e sensor de temperaturas. As propriedades são determinadas baseando-se na variação da resistência elétrica do plano aquecedor. Silas *et al* (1979) modificaram a técnica anterior substituindo a fonte de calor por uma Fita Quente. A maior vantagem destes dois métodos é que as propriedades são determinadas a partir das temperaturas da superfície que recebe o fluxo de energia eliminando os erros devido a localização incorreta dos sensores de temperaturas, em contra partida os mesmos necessitam de equipamentos caros e sofisticados para provocar a perturbação térmica e aquisição de dados.

Chu *et al* (1980), utilizam o princípio do “flash” para determinar a difusividade de meios anisotrópicos, fornecendo um pulso de calor radial e uniforme sobre uma área circular menor que a área total da amostra, registra as temperaturas do centro e da borda, para calcular a difusividade radial enquanto que a difusividade axial é determinada usando apenas a temperatura do centro. A obtenção das propriedades se baseia na redução de dados da solução matemática proposta por Danaldson (1972). Lee e Taylor (1976) empregaram o método para a determinação de propriedades de paredes compostas. Propondo um método de redução de dados para modelos de duas e três camadas usando o ponto de meia elevação do termograma da superfície oposta a que recebe o fluxo de calor.

Batsale e Degiovanni (1988) apresentam uma forma de determinação da difusividade térmica de líquidos colocando um líquido entre dois cilindros de metal coaxiais, os autores impuseram um pulso gerado por uma lâmpada “flash” localizada no eixo do sistema e registraram as temperaturas sobre a face exterior.

Tischler *et al* (1988), propuseram um procedimento de redução de dados baseado no algoritmo iterativo multidimensional de Newton-Raphson. Usando o termograma inteiro da superfície traseira da amostra, a difusividade de um meio semitransparente pode ser obtida ao mesmo tempo em que o coeficiente de absorção, para um determinado comprimento espectral da fonte, para o qual considera-se o material como transparente.

Silva (1997) utilizou o método “Flash” para identificar propriedades térmicas e óticas de meios semitransparentes. O método de Levenberg-Maquardt foi utilizado como procedimento de identificação de parâmetros. Lemos *et al* (1998), determinam as propriedades medindo fluxo de calor e temperaturas na superfície da amostra que recebe o pulso de energia, por intermédio de um transdutor de fluxo e termopar. Utilizando técnicas de inversão matemáticas, os autores identificam vários parâmetros simultaneamente.

Neste trabalho o método do pulso térmico foi aplicado usando uma resistência elétrica como fonte de calor, a equação da transferência de calor em um sólido infinito foi resolvida. Nas simulações numérica foi usada discretização das equações por diferenças finitas e o método para a solução das matrizes geradas foi o TDMA.

O problema físico estudado consiste da transferência de calor por condução em um sólido infinito que sofre uma perturbação térmica perpendicular a sua seção transversal, como mostra a Figura 1.

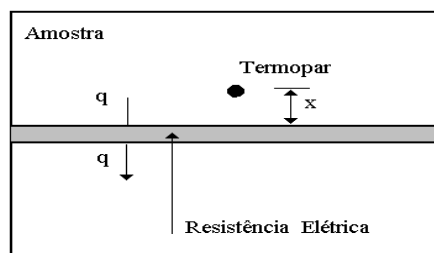


Figura 1. Esquema mostrando as condições do problema

A equação da energia é obtida considerando a ideia de um ponto como fonte instantânea de calor, isto é, uma quantidade finita de calor é liberada instantaneamente em uma face da amostra que pode ser aproximada de um sólido infinito. A ideia de uma fonte de calor pontual tem sido comprovadamente de muita utilidade no estudo de condução calor. Uma grande vantagem desta teoria é que a mesma esta baseada em uma ideia física de fácil entendimento, e isto a habilita como solução de um grande número de importantes problemas, que são escritos a partir do princípio da conservação da energia. A forma da equação 1, da energia nessas condições é apresentado por Carslaw e Jaeger (1959) como :

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t}, \quad -\infty < x < \infty, \quad t > 0 \quad (1)$$

A solução da equação diferencial acima é satisfeita pela equação 2:

$$T(x, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi\alpha t}} \exp\left\{-\left[\frac{(x-x')^2}{4\alpha t}\right]\right\} \quad (2)$$

A quantidade de calor liberada por unidade de área do plano é dada por $Q = \frac{\dot{q}}{\rho c A}$.

Esta equação fornece a distribuição de temperaturas ao longo de um sólido infinito qualquer submetido a uma fonte plana instantânea de potência Q no instante $t = 0$, paralelo ao plano $x = 0$ que passa através do ponto x' . Usando a equação (2) observa-se que após certo tempo, a temperatura interna do sólido em um ponto fixo, perturbado pelo processo de difusão de calor aumentará até um valor máximo e retornará a temperatura de equilíbrio. A figura 2 mostra a evolução da temperatura para uma posição no interior do sólido perturbado. Pode-se observar, que a temperatura aumenta rapidamente até um valor máximo $T_{\text{máx}}$ correspondente ao tempo t_m , para em seguida diminuir de forma lenta até atingir a temperatura inicial.

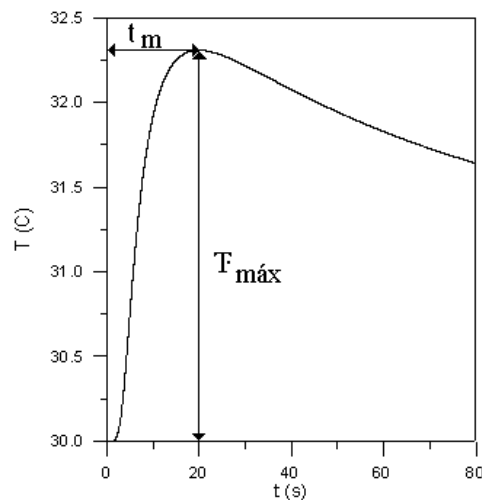


Figura 2, Temperatura em função do tempo.

Da observação desta curva nota-se que para cada ponto da amostra existe uma temperatura máxima que ocorre em um determinado tempo, função do pulso de energia e propriedades térmicas do material. O ponto de máximo da expressão da evolução da temperatura pode ser obtida por meio da primeira derivada da equação 2 em relação ao tempo. Então, derivando-se a equação 2 em relação ao tempo obtém-se:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\alpha \exp\left[\frac{-x^2}{4\alpha t}\right] \cdot q}{4A\rho c_p (\alpha)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\pi}} + \frac{\exp\left[\frac{-x^2}{4\alpha t}\right] \cdot q x^2}{8A\rho c_p t^2 \sqrt{\alpha \pi}} \quad (3)$$

Pela definição de um ponto de máximo, deve-se igualar a equação 3 a zero. Resolvendo a igualdade temos que:

$$t_m = \frac{x^2}{2\alpha} \quad (4)$$

A equação 4 é de fundamental importância para o presente trabalho, pois representa uma expressão direta para se estimar a difusividade térmica a partir de dois parâmetros conhecidos x e t_m (que são respectivamente a posição do sensor de medição das temperaturas e o tempo no qual a temperatura deste local atinge o valor máximo). Substituindo a equação 4 na equação 2, encontra-se outro importante resultado que é :



$$T_{m\acute{a}x}(x, t_m) = \frac{\dot{q}}{\rho c_p A x \sqrt{2\pi \exp(1)}} \quad (5)$$

Desta equação pode-se obter o calor específico como função apenas de parâmetros conhecidos, Os mais relevantes para o cálculo são a temperatura máxima $T_{m\acute{a}x}$, potência fornecida em um pulso \dot{q} e a duração do pulso Δt . A expressão para C_p torna-se, então:

$$C_p = \frac{\dot{q} \Delta t}{T_{m\acute{a}x}(x, t_m) \rho A x \sqrt{2\pi \exp(1)}} \quad (6)$$

Com as equações 4 e 6 a difusividade térmica e o calor específico são obtidos analiticamente em função da temperatura máxima e do tempo no qual esta temperatura é alcançada, em um ponto no interior da amostra próximo a fonte de calor. Como o fluxo de calor simulado é dissipado através de uma resistência elétrica plana, existe naturalmente entre ela e a amostra, uma resistência térmica de contato, que é grande para amostras de meios porosos, sobretudo granulares. Este parâmetro não é considerado na solução analítica apresentada. Então simulações numéricas foram realizadas com a consideração deste parâmetro e estudar seus efeitos sobre os valores das propriedades. O modelo que descreve o processo de transferência de calor em uma amostra que sofre uma perturbação térmica, perpendicular a sua seção transversal provocada por uma resistência elétrica plana e circular, é dado pela equação 7. Foram consideradas as seguintes hipóteses simplificativas para a obtenção e solução das equações: Fluxo de calor unidimensional; Propriedades termofísicas independentes da temperatura, Meio homogêneo e isotrópico. A equação da energia para o interior da amostra é dada por

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right), \quad 0 < x < 1, \text{ e } t > 0. \quad (7)$$

O balanço de energia para a fonte de calor é dado pela equação 8

$$h_{cr} A (T_{(x=0)} - T_{(r)}) + q = \rho_r \cdot c_{pr} \cdot A_{ss} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (8)$$

Onde q é o pulso de calor gerado pela fonte, h_{cr} a resistência de contato térmico, A_{ss} é a área da seção transversal e ρ_s a massa específica da resistência. As condições de contorno obtidas a partir de balanços de energia são apresentadas nas equações 9 e 10.

$$h_{cr} A (T_{(r)} - T_{(x=0)}) + kA \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\rho c_p A dx}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right), \quad x = 0 \quad (9)$$

$$h_a A (T_{(a)} - T_{(x=L)}) + kA \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\rho c_p A dx}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right), \quad x = L \quad (10)$$

Condição inicial

$$T(x, 0) = T_i, \quad (11)$$

A equação resultante do balanço de energia é resolvida numericamente. As equações em diferenças finitas serão obtidas através da aproximação do volume de controle descrito por Patanka (1980). O problema é resolvido através do método explícito. Essa formulação facilita o



dimensionamento da malha e a estimativa do intervalo de tempo Δt . Em contra partida tem-se que obedecer a um critério de estabilidade que está diretamente relacionado com a condição de contorno dada pela equação (12), Os valores estabelecidos por este critério influenciam diretamente no tempo de execução do programa, passo de tempo para os cálculos. Esta condição foi adotada para todo o modelo, pois o contorno é o local de maior instabilidade para a formulação proposta. Nesse sentido o critério de estabilidade escolhido é definido como:

$$1 + \frac{k}{h_{cr} dx} - \frac{\rho c_p dx}{h_{cr} 2\Delta t} > 0 \quad (12)$$

E o incremento de tempo é estabelecido por:

$$\Delta t = \left(\frac{\rho C_p dx^2}{h_{cr} dx + k} \right) \quad (13)$$

Um programa computacional escrito em linguagem FORTRAN, foi desenvolvido para solucionar o sistema de equações estabelecido acima. As linhas básicas do algoritmo de calculo são as seguintes: Estima as temperaturas em todos os nodos da malha estabelecida; Determina as temperaturas máximas e os tempos onde estes máximos ocorrem; Calcula as propriedades em posição estabelecidas; Calcula os erros das propriedades e de posicionamento de sensor de temperaturas para várias posições.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações numéricas realizadas neste trabalho tiveram o objetivo de testar o modelo matemático que leva em consideração a resistência térmica de contato existente entre a resistência elétrica e a amostra de onde se deseja obter as propriedades. Nas realizações das simulações também foram testadas a obtenção das propriedades para localização do sensor de temperatura em diferentes pontos da amostra. Os dados foram apresentados em função dos erros calculados para as propriedades, considerando as variáveis do problema físico e estão sumarizados nas figuras apresentadas a seguir.

Na Figura 3 pode ser observada a variação da temperatura em função do tempo, em três posições diferentes do sensor de temperatura, considerando um coeficiente térmico de contato de 30 W/m²K, obtida em uma simulação.

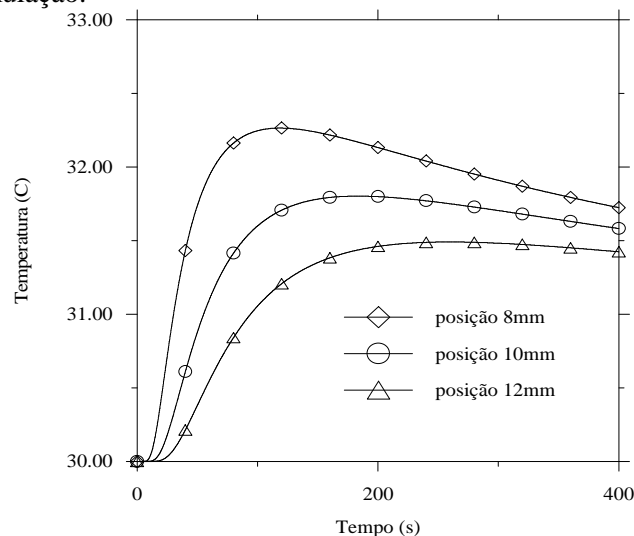


Figura 3. Perfil de temperaturas nos pontos 8, 10 e 12 mm, para um coeficiente de contato de 30 W/m²K.

Da análise da Figura 3 pode ser observado que, as curvas das temperaturas para qualquer ponto do interior da amostra aumentaram a um valor máximo, algum tempo depois do pulso de calor ser removido da face da amostra. O tempo em que a temperatura dos pontos próximos da fonte de energia atinge um valor máximo são inversamente proporcionais a difusividade térmica do material, e o calor específico é também inversamente proporcional a diferença de temperatura máxima entre a temperatura inicial e a temperatura de pico atingida na posição da amostra onde o sensor está localizado.

Na Figura 4 são mostradas curvas dos erros calculados para a difusividade térmica em função da posição onde foram medidas as temperaturas e coeficiente de contato térmico de $10 \text{ W/m}^2\text{K}$. A duração de pulso foi de 1, 2, 4, e 5 segundos e estão relacionadas respectivamente a pulsos de 25, 12.5, 6.25 e 5 W. Os erros foram calculados considerando as propriedades dadas como parâmetros de entrada no programa computacional e os valores das propriedades obtidos considerando a formulação para temperatura máxima e tempo no qual esta é obtida. É observado que para duração de pulsos de calor maiores, acarretam erros maiores na determinação da difusividade. O menor erro é obtido na posição de 12 mm, indicando que esta é a melhor posição para a localização do sensor de temperatura para a determinação da difusividade nas condições propostas na simulação. O erro negativo apresentado para a posição de 15 mm está apenas relacionado com a forma de cálculo do erro. Na Figura 5 são mostrados os erros para calor específico calculado em função da variação do coeficiente de contato térmico $h_c = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, em várias posições.

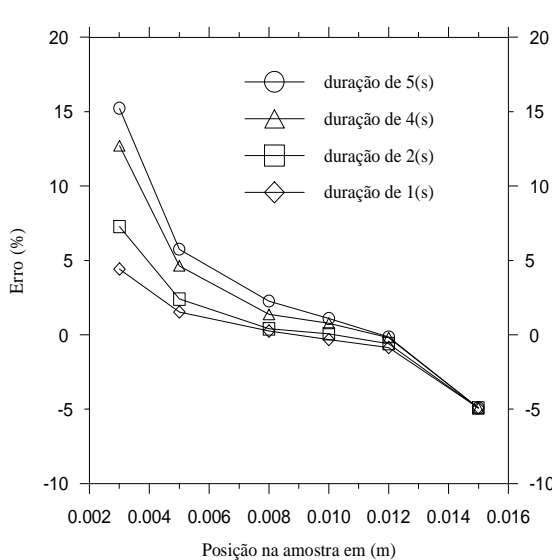


Figura 4. Erros para a difusividade α .

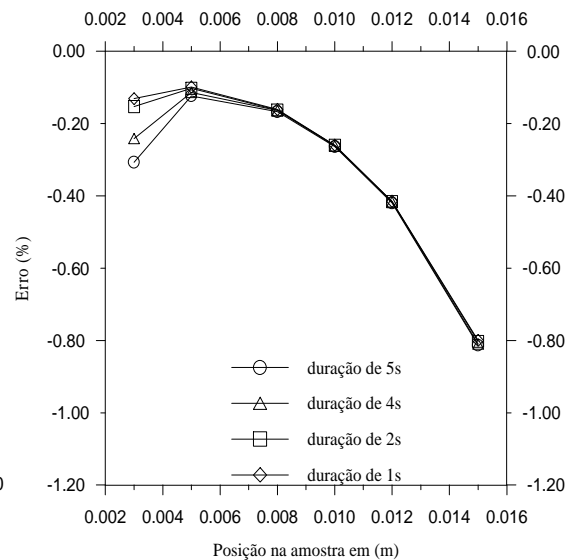


Figura 5. Erro calculado para C_p .

As propriedades usadas foram condutividade de 0,2, massa específica de 2000 kg/m^3 e calor específico de 400 J/kg K .

4. CONCLUSÕES

O trabalho mostrou que o método do pulso térmico usando uma resistência elétrica plana como fonte de calor permite a determinação de propriedades térmicas através de experimentos simples, de curta duração de tempo e necessitando de amostras pequenas de material.

Como a técnica consiste na dissipação de um pulso de calor instantaneamente pulsos de duração inferiores há 2 segundos são recomendados, uma vez que os erros para pulsos de duração maiores que isso são significativos. Em função da dispersão do fluxo de calor em mais de uma direção.



Como os erros para todos os testes realizados mostraram que a resistência de contato térmico tem pouca influência sobre as propriedades, este fato pode ser explicado pelo bom acoplamento entre a resistência e a amostra.

As propriedades foram determinadas considerando um meio contínuo isso pode acarretar erros quando usando a técnica na determinação de propriedades de materiais granulares, pois existem muitos espaços entre os grãos que podem ser preenchidos com ar.

A técnica usando uma resistência elétrica plana se mostra mais eficiente quando testando materiais com elevada condutividade térmica, pois podem ser usados pulsos de calor de menor intensidade e duração, o que diminui os erros e melhora a precisão da determinação das propriedades.

REFERÊNCIAS

BATSALE, J. L., e DEGIOVANNI, A., "In proceedings of rencontre soccete francois thermiciens", Societe Francaise thermiciens. P CPM, 14-1, 1988.

CARSLAW, H. S., JAEGER, J. C., "Conduction of Heat in Solids", Oxford at the cleredom press, London, 1959.

CHU, F. I., TAYLOR, R. E., DONALDSON, A. B., "Thermal diffusivity measurements at high temperatures by the radial flash method", J. Appl. Phys. **51**, 336, 1980 .

DONALDSON, A. B., "Radial conduction effects in the pulse method of measuring thermal diffusivity", Journal of Applied Physics, 1972.

LEE, H. J., e TAYLOR, R. E., "Thermal diffusivity of dispersed composites", J. Appl. Phys. **47**, 148, 1976.

LEMOES, S. M. M., GUIMARÃES, G., DUART, M. A. V., "Estimador de uma função objetivo de correlação na medição simultânea de propriedades térmicas" Anais COBEM, 1998.

PATANKAR, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow" Hemisphere, New York, 1980.

PEREIRA, C.P., GURGEL, J.M., KLUPPEL, R. P., "Aparelho para medição da difusividade térmica de materiais granulares" Anais do IX COBEM, São Paulo, 1991.

SILAS, E. G., "Transient Plane Source Techniques for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity Measurements of solid Materials", Sci Instruments. Vol 62 (3), 1991.

SILAS, E. G., Karawacki, E., Khan, M. N., "Transient Hot-strip method for simultaneously measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids and fluids", Journal Physic D: Appl. Phys., Vol 12, 1979.

SILVA, Z. E., "Aplicação do método *Flash* em meios semitransparentes", Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Ciências Aplicadas de Lyon, França, 1997.

TISCHLER M., KOHANOFF J.J., RANGUGNI G.A., ONDRACEK, G., "Pulse method of measuring thermal diffusivity and optical absorption depth for partially transparent materials", J. Appl. Phys., Vol. 63, No. 5, 1259-1264, 1988.