

## O PROJETO DE EXPERIMENTOS PARA A CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE POLÍMEROS COM A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS INVERSOS

Antônio J. Silva Neto<sup>1</sup>

Gil de Carvalho<sup>2</sup>

Instituto Politécnico – UERJ, CP 97282, CEP 28601-970, Nova Friburgo, RJ, Brasil

<sup>1</sup>ajsneto@iprj.uerj.br, <sup>2</sup>gilde@iprj.uerj.br

**Resumo.** *Com o desenvolvimento de novos materiais visando o atendimento de aplicações específicas, torna-se imperativo o desenvolvimento e uso de técnicas adequadas para a caracterização dos mesmos. Neste trabalho é descrita uma abordagem que combina a atividade laboratorial com a solução de problemas inversos para a caracterização térmica de novos materiais poliméricos. Com esta abordagem é feito um melhor uso de dados experimentais já adquiridos, bem como está se buscando o projeto de novos experimentos. No trabalho também são apresentados os resultados obtidos para uma espuma fenólica com lignina, tendo as propriedades térmicas sido estimadas a partir de dados experimentais reais.*

**Palavras-chave:** *Problemas inversos, Transferência de calor, Propriedades térmicas, Método do fio quente, Polímeros.*

### 1. INTRODUÇÃO

A análise de problemas inversos possui inúmeras aplicações relevantes em engenharia e medicina, bem como em outros ramos da ciência, e tem sido observado um aumento recente na publicação, em revistas técnicas, de resultados de pesquisas originais (Li, 1998, Yang, 1998, Al-Khalidy, 1998, Blanc et al., 1998).

Como exemplos da aplicação prática de problemas inversos, citamos a estimativa da intensidade de fontes térmicas com dependência funcional no tempo, em problemas de transferência de calor, a partir da medida transiente de temperaturas (Silva Neto e Özisik, 1994, Rezende et al., 1998, Silva Neto et al., 1999) e a estimativa da condição inicial de problemas transientes em transferência de calor por condução (Silva Neto e Özisik, 1994a).

A estimativa de propriedades utilizadas na modelagem matemática de sistemas físicos constitui por si só uma classe especial de problemas inversos. Huang e Özisik (1990) estimaram a condutividade térmica de materiais em função da temperatura e Artyukhin et al. (1984, 1993) estimaram as propriedades térmicas com dependência na temperatura usando expansões em funções conhecidas.

Os problemas inversos têm a característica de serem mal-postos (Tikhonov e Arsenin, 1977), e diversas técnicas de solução têm sido desenvolvidas e aplicadas (Beck et al., 1985,

Hensel, 1991, Murio, 1993, Alifanov et al., 1995, Silva Neto e Roberty, 1998, Kauati et al., 1999).

O desenvolvimento de novos materiais tem sido uma área de pesquisa intensa que tem recebido uma demanda tecnológica crescente. Com aplicações tanto em engenharia quanto em medicina, a tendência recente tem sido o desenvolvimento de materiais específicos para o atendimento de novas aplicações, com estas sendo criadas em primeiro lugar. Fica óbvia, portanto, a necessidade do uso de técnicas adequadas para a caracterização destes novos materiais, através da determinação de suas propriedades.

Durante o desenvolvimento e a operação de um aparato experimental usualmente procura-se controlar os vários graus de liberdade, de forma a estimar as propriedades desejadas. Frequentemente, com este procedimento, são impostas limitações de ordem prática que podem levar ao aproveitamento de apenas uma fração do potencial do experimento.

Usando uma abordagem teórico-experimental, onde a determinação das grandezas desconhecidas é feita através do acoplamento do experimento com a solução de problemas inversos, um número maior de graus de liberdade pode ser manipulado, envolvendo até mesmo a determinação simultânea de novas incógnitas introduzidas no problema através das modelagens física, matemática e computacional mais precisas (Carvalho e Silva Neto, 1999).

O método do fio quente tem sido usado com sucesso na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos, sendo hoje a técnica padrão adotada mundialmente para valores até 25 W/m °C (Santos et al., 1995). Para materiais poliméricos, a técnica de fio quente paralelo é substituída pela técnica em cruz, onde a junção de um termopar é soldada ao fio quente, que funciona como fonte térmica no centro da amostra para a qual se deseja determinar as propriedades térmicas (Carvalho et al., 1995, 1996, Carvalho, 1997).

Nas seções seguintes é feita uma comparação entre o enfoque experimental tradicional, com o uso do método do fio quente, e a abordagem aqui proposta usando a solução de problemas inversos. São também apresentados os resultados da solução do problema inverso de condução de calor para a determinação da condutividade térmica e da capacidade térmica de uma espuma fenólica com lignina, a partir de dados experimentais reais.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 O enfoque experimental tradicional

Considere uma fonte térmica linear que começa a liberar calor por efeito Joule no instante  $t=0$ , no interior de um meio infinito que se encontra inicialmente na temperatura  $T=T_0$ . Para instantes de tempo suficientemente posteriores a  $t=0$  e para distâncias radiais,  $r$ , próximas à fonte linear, o acréscimo na temperatura,  $\theta(r,t)$ , apresenta a seguinte dependência com o tempo (Bejan, 1993)

$$\theta(r,t) = T(r,t) - T_0 \propto \frac{q'}{4\pi k} \ln t \quad (1)$$

onde  $T(r,t)$  é a temperatura,  $q'$  é a densidade linear de potência e  $k$  é a condutividade térmica do meio. Esta dependência está representada na Fig. 1.

Da Eq.(1) e da Fig. (1) obtém-se então para um determinado ponto do meio,

$$\text{inclinação} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln t_2 - \ln t_1} = \frac{q'}{4\pi k} \quad \rightarrow \quad k = \frac{q'}{4\pi} \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{\theta_2 - \theta_1} \quad (2a,b)$$

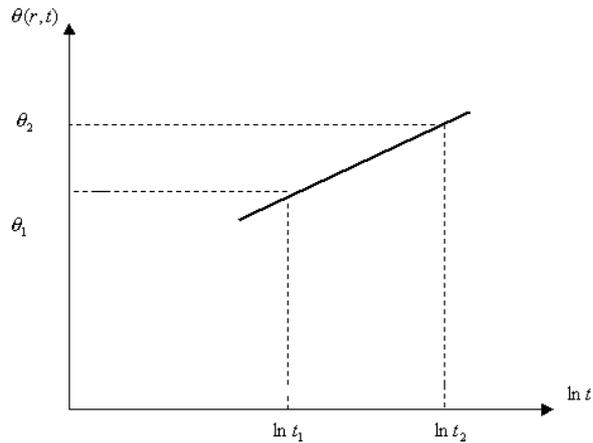


Figura 1- Acréscimo na temperatura  $\theta(r,t)$  em função do tempo.

No enfoque experimental tradicional são medidas, portanto, as temperaturas em diferentes instantes de tempo,  $(t_i, T_i)$ , para  $i = 1, 2, \dots, I$ , onde  $I$  é o número total de medidas experimentais, e a partir do ajuste por mínimos quadrados dos pontos  $(\ln t_i, \theta_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ , obtém-se o coeficiente angular da reta, calculando-se então a condutividade térmica do material.

Na Fig. 2 são representadas a curva teórica para um meio infinito e a curva obtida experimentalmente para uma amostra finita. Observa-se que para valores de tempo relativamente pequenos ( $t < t_1$ ) e para valores de tempo relativamente grandes ( $t > t_2$ ) ocorrem desvios da linearidade, sendo evitadas, portanto, medidas experimentais nestas situações. O desvio para  $t < t_1$  é devido à resistência térmica entre o fio quente e a amostra.

Como em um experimento real as dimensões da amostra são finitas, para materiais com alta difusividade térmica,  $\alpha = k / \rho c_p$ , onde  $\rho$  é a densidade e  $c_p$  é o calor específico, o intervalo de observação onde ocorre a linearidade pode se tornar muito pequeno, inviabilizando a realização do experimento dentro de um grau de precisão adequado.

Este desvio da linearidade para  $t > t_2$ , ocorre quando o calor chega à superfície da amostra, iniciando-se então o processo de transferência de calor por convecção desta para o meio ambiente.

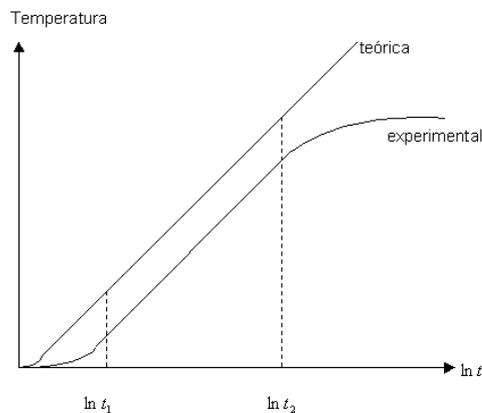


Figura 2- Curva teórica e curva experimental.

## 2.2 O enfoque do problema inverso

Para a abordagem de problema inverso de transferência de calor por condução aqui empregada, considere a amostra como um cilindro de raio  $R$ , com uma fonte linear de calor no centro, trocando calor com o ambiente que o envolve, na temperatura  $T_{amb}$ . Para manter a descrição aqui apresentada o mais simples possível, será considerado que a cilindro é longo o bastante para que a transferência de calor seja dependente espacialmente apenas da direção radial. A formulação matemática deste problema é dada por

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + g(r,t) \delta(r-0) = \rho c_p \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad \text{em } 0 \leq r \leq R, \text{ para } t > 0 \quad (3a)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_{amb}) \quad \text{em } r = R, \text{ para } t > 0 \quad (3b)$$

$$T(r,0) = T_{amb} \quad \text{para } t = 0 \quad (3c)$$

onde  $g(r,t)$  é a densidade volumétrica de potência,  $h$  é o coeficiente de troca térmica por convecção, e os outros símbolos já foram definidos anteriormente.

Quando a geometria, as propriedades materiais, as condições de contorno, a condição inicial e o termo fonte são conhecidos, o problema (3) pode ser resolvido, determinando-se então a distribuição transiente de temperaturas no meio. Este problema é conhecido então como problema direto. Quando alguma destas grandezas, ou uma combinação das mesmas, não é conhecida, mas dados experimentais da temperatura medida no interior e/ou no contorno do meio estão disponíveis, tem-se um problema inverso, que permite então a determinação das grandezas desconhecidas, desde que estes dados contenham informação suficiente.

Na maioria das técnicas desenvolvidas para a solução do problema inverso, necessita-se da solução do problema direto com valores estimados para as grandezas que se deseja determinar. Como usualmente estes procedimentos são iterativos, o problema direto é resolvido várias vezes. É desejável, portanto, que se tenha um método para a solução do problema direto que seja preciso e que demande um tempo computacional relativamente pequeno. Com este propósito foi usado neste trabalho o método de diferenças finitas para a solução do problema de transferência de calor por condução através da amostra.

**Estimativa de Parâmetros.** Na descrição aqui apresentada será considerada a estimativa da condutividade térmica da amostra simultaneamente à determinação do calor específico. Será aqui descrita, portanto, de forma sucinta, a estimativa dos seguintes parâmetros

$$\vec{P} = \begin{Bmatrix} k \\ c_p \end{Bmatrix} \quad (4)$$

usando o Método de Levenberg-Marquardt (Marquardt,1963), que consiste em uma variante do método de mínimos quadrados. Uma descrição mais detalhada da aplicação do método é apresentada por Silva Neto e Özisik (1995) para problemas inversos em transferência de calor por radiação térmica em meios participantes. Deve ser observado que outros parâmetros poderiam ser estimados simultaneamente à condutividade térmica e ao calor específico, como

por exemplo o coeficiente de transferência de calor por convecção da amostra para o meio ambiente.

Considere a norma dada pelos quadrados dos resíduos entre as temperaturas calculadas,  $T_{calc}(r_m, t_l)$ , e as temperaturas medidas,  $T_{med}(r_m, t_l)$ , nas posições  $r_m$ , com  $m = 1, 2, \dots, M$  e nos instantes  $t_l$ , com  $l = 1, 2, \dots, L$ ,

$$R(\vec{P}) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L [T_{calc}(r_m, t_l) - T_{med}(r_m, t_l)]^2 \quad \text{ou} \quad R = \sum_{i=1}^I (T_i - Z_i)^2 = \vec{F}^T \vec{F} \quad (5)$$

onde  $M$  é o número de sensores de temperatura utilizados,  $L$  é o número de medidas efetuadas por cada sensor e  $T_i$  e  $Z_i$  são notações compactas respectivamente para a temperatura calculada e para a temperatura medida para um mesmo sensor, no mesmo instante de tempo, com  $I = M \times L$  e  $F_i = T_i - Z_i$ .

O problema inverso é resolvido como um problema de otimização onde busca-se minimizar a norma  $R$ ,

$$\frac{\partial R}{\partial \vec{P}} = \frac{\partial}{\partial \vec{P}} (\vec{F}^T \vec{F}) = 0 \quad (6)$$

Fazendo uma expansão de Taylor,

$$F(\vec{P}|_0 + \Delta \vec{P}) = F(\vec{P}|_0) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial F(\vec{P})}{\partial P_n} \Big|_0 \Delta P_n + O(\Delta P^2) \quad (7)$$

onde  $N$  é o número de incógnitas, i.e. no caso aqui considerado  $N=2$ , e retendo apenas os termos de primeira ordem, obtém-se das Eqs. (6) e (7) a equação normal,

$$J^T J \Delta \vec{P} = -J^T \vec{F} \quad (8)$$

onde os elementos do Jacobiano são

$$J_{ps} = \frac{\partial T_p}{\partial P_s}, \quad p = 1, 2, \dots, I \quad \text{e} \quad s = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

Adicionando um fator de amortecimento  $\lambda$  para melhorar as condições de convergência obtém-se o método de Levenberg-Marquardt

$$(J^T J + \mathfrak{S} \lambda) \Delta \vec{P} = -J^T \vec{F} \quad (10)$$

onde  $\mathfrak{S}$  representa a matriz diagonal.

A Eq.(10) é escrita na forma a ser usada em um procedimento iterativo,

$$\Delta \vec{P}^k = -\left(J^{kT} J^k + \mathfrak{S} \lambda^k\right)^{-1} J^{kT} \vec{F}^k \quad (11)$$

onde  $k$  representa o contador de iterações. Uma nova estimativa dos parâmetros,  $\vec{P}^{k+1}$ , é calculada usando

$$\vec{P}^{k+1} = \vec{P}^k + \Delta\vec{P}^k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

Deve ser observado que o problema dado pela Eq.(10) é diferente do problema original dado pela Eq.(8). Ao longo do procedimento iterativo busca-se, portanto, reduzir o valor do fator de amortecimento,  $\lambda$ , para que ao se atingir a convergência tenha-se a solução do problema original.

O procedimento iterativo é iniciado com uma estimativa para os parâmetros,  $\vec{P}^0$ , e novas estimativas são obtidas calculando-se  $\Delta\vec{P}^k$  com a Eq. (11) e  $\vec{P}^{k+1}$  com a Eq. (12), seqüencialmente, até que o critério de convergência

$$\left| \frac{\Delta P_n^k}{P_n^k} \right| < \varepsilon, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

seja satisfeito, onde  $\varepsilon$  é um número pequeno, por exemplo  $10^{-5}$ .

Os elementos do Jacobiano, bem como o termo do lado direito da Eq. (10), são calculados a cada iteração usando a solução do problema direto dado pelas Eqs. (3) empregando as estimativas para as incógnitas obtidas na iteração anterior.

**Intervalos de confiança.** Os intervalos de confiança para as estimativas  $\vec{P}^k$  são calculados usando o procedimento desenvolvido por Gallant (1987). Empregando a notação utilizada por Huang e Özisik (1990),

$$\sigma_{\vec{P}} = \sigma \left\{ \text{diag} \left[ \frac{\partial \vec{T}^T}{\partial \vec{P}} \frac{\partial \vec{T}}{\partial \vec{P}^T} \right]^{-1} \right\}^{1/2} \quad (14)$$

onde  $\vec{T}$  é o vetor contendo os elementos  $\{T_i\}$  e  $\sigma$  é o desvio padrão dos erros experimentais.

Assumindo uma distribuição normal para os erros experimentais, e 99 % de confiabilidade, os limites de intervalos de confiança para as estimativas  $P_n$  são calculados por (Flach e Özisik, 1989)

$$(P_n - 2,576 \sigma_{P_n}) < P_n < (P_n + 2,576 \sigma_{P_n}) \quad (15)$$

### 3. APARATO EXPERIMENTAL: MÉTODO DO FIO QUENTE

Na seção 2.1 foi descrito do ponto de vista teórico o enfoque experimental tradicional com o método do fio quente. Nesta seção é feita uma breve descrição do aparato experimental empregado.

O método do fio quente é uma técnica de transiente baseada na medida da variação de temperatura de uma fonte linear de calor embutida no material a ser testado. É considerado que o calor gerado pela fonte é constante e uniforme ao longo do comprimento do corpo de prova. A partir da variação de temperatura, em um intervalo de tempo conhecido, calcula-se a condutividade térmica da amostra. Na prática, a fonte térmica linear é aproximada por uma

resistência elétrica fina e o sólido infinito é substituído por uma amostra finita.

Alguns cuidados devem ser tomados ao se trabalhar com o método do fio quente, para assegurar a confiabilidade dos resultados: (i) utilizar uma resistência que se aproxime o máximo possível da fonte de calor teórica; (ii) assegurar o melhor contato possível entre a amostra e o fio quente; (iii) não considerar para efeito de cálculo, o trecho inicial da curva, eliminando-se assim os efeitos de contato térmico entre a resistência elétrica e o material da amostra; e (iv) limitar o tempo de ensaio para assegurar que o tamanho finito da amostra não afete as temperaturas medidas.

Os elementos básicos do aparato experimental são apresentados esquematicamente na Fig. 3.

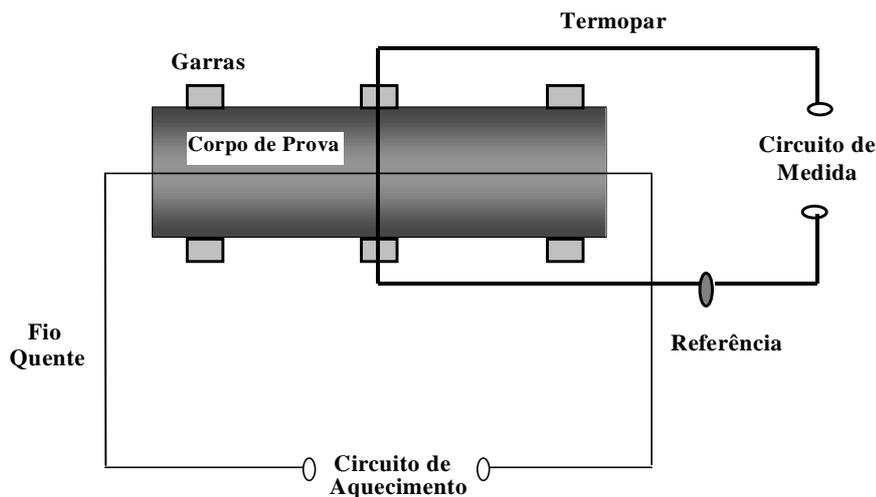


Figura 3. Arranjo experimental da técnica padrão do Fio Quente (corpo inferior).

O arranjo é constituído de dois corpos de prova. Na face superior do primeiro corpo de prova são usinadas duas ranhuras ortogonais para receber a cruz de medição. A profundidade destas ranhuras deve corresponder ao diâmetro dos fios a serem aí inseridos.

A cruz de medição é formada pelo fio quente e pelo termopar, que tem suas junções soldadas perpendicularmente ao fio. Após a colocação da cruz de medição nas ranhuras, o segundo corpo de prova é sobreposto a este, envolvendo a cruz de medição. Os dois corpos de prova devem ter as superfícies de contato suficientemente planas para assegurar um bom contato térmico. Neste sentido são utilizadas ainda garras, comprimindo um corpo de prova contra o outro.

#### 4. RESULTADOS

Já obtivemos um volume significativo de dados experimentais com o método do fio quente para novos materiais poliméricos, principalmente para resinas e espumas fenólicas com e sem lignina. A lignina foi obtida a partir do bagaço de cana e usada como um comonomero na produção dos materiais poliméricos (Carvalho,1997).

Usando a abordagem tradicional descrita na seção 2.1, para uma espuma fenólica com 25 % (em massa) de lignina em substituição ao fenol, foi obtido o seguinte valor para a condutividade térmica :  $k=0,072 \pm 0,002$  W/m °C.

Com a abordagem usando a solução do problema inverso de condução de calor descrita na seção 2.2, foram obtidos, do mesmo conjunto de dados experimentais, não só a

condutividade térmica, como também o calor específico da amostra. Para a condutividade térmica foi obtida a estimativa  $k=0,07319 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$  com o seguinte intervalo de confiança (99%) :  $(0,07313;0,07325) \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ . Este valor está em excelente concordância com o valor obtido com a abordagem tradicional.

Para o calor específico, determinado simultaneamente com a condutividade térmica, foi obtida a estimativa  $c_p = 1563,0 \text{ J/ kg } ^\circ\text{C}$ , com o seguinte intervalo de confiança (99%) :  $(1559,6;1566,4) \text{ J/ kg } ^\circ\text{C}$ . Vega (1984) apresenta um valor esperado de  $1590 \text{ J/ kg } ^\circ\text{C}$  para resinas fenólicas, o que está em excelente concordância com o valor obtido com a solução do problema inverso.

Conforme pode ser visto na Fig.4 convergência para a mesma solução foi obtida considerando diversas estimativas iniciais  $\bar{P}^0$ .

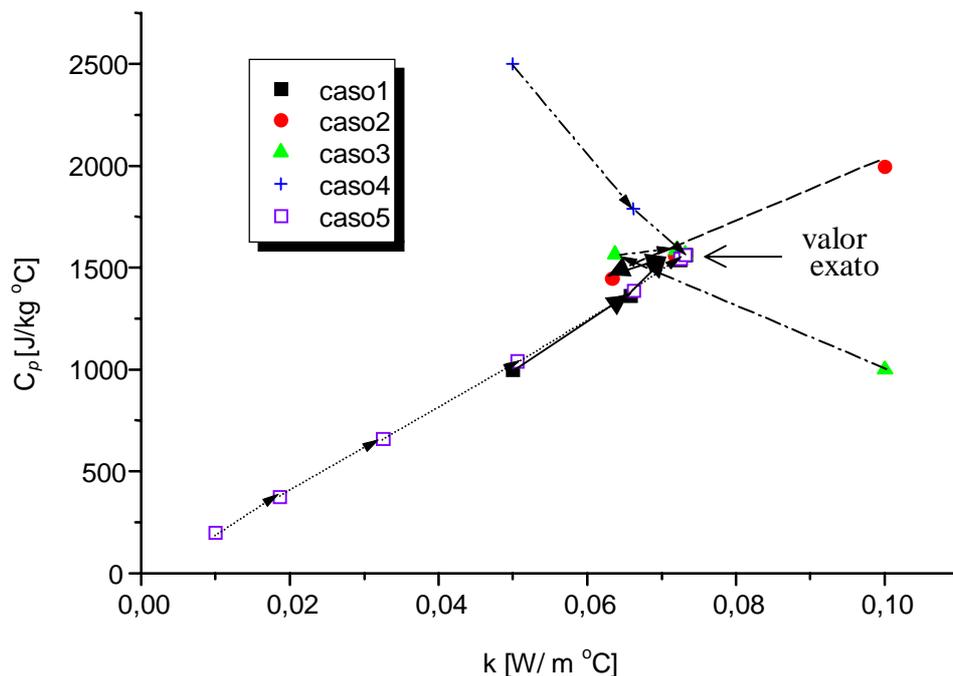


Figura 4- Resultados das simulações considerando diferentes estimativas iniciais.

## 5. PROJETO DE EXPERIMENTOS

Neste trabalho foi apresentada uma abordagem que permite extrair uma maior quantidade de informações de um conjunto de dados experimentais já obtidos, dentro da região de linearidade apresentada nas Figs.1 e 2.

Com os novos experimentos a serem realizados em prosseguimento às nossas atividades nesta linha de pesquisa, as medidas de temperatura não estarão limitadas à região de linearidade. Com a abordagem de problemas inversos, novas incógnitas trazidas pela modelagem mais adequada dos fenômenos envolvidos poderão ser estimadas simultaneamente às propriedades térmicas da amostra, como por exemplo o coeficiente de troca térmica por convecção. Neste exemplo, em particular, serão necessárias medidas experimentais em  $t > t_2$ .

Até o momento buscou-se a otimização no uso, ou pelo menos um melhor uso, de dados experimentais já adquiridos. O foco está agora sendo direcionado para o projeto de experimentos propriamente dito, onde buscando-se, por exemplo, a minimização de uma região contida nos intervalos de confiança, poder-se-á definir os melhores locais para

posicionamento dos sensores de temperatura, bem como o melhor intervalo de tempo em que as medidas de temperatura devem ser feitas de forma que sejam obtidas as melhores estimativas possíveis para as grandezas que se deseja determinar (Taktak et al.,1993).

### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem o suporte financeiro parcial da FAPERJ- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro.

### **REFERÊNCIAS**

- Alifanov, O. M., Artyukhin, E. A. e Rumiantsev, S. V., 1995, *Extreme Methods for Solving Ill-Posed Problems with Applications to Inverse Heat Transfer Problems*, Springer Verlag.
- Al-Khalidy, N., 1998, On the solution of parabolic and hyperbolic inverse heat conduction problems, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, No. 23, pp. 3731-3740.
- Artyukhin, E. A., Killikh, V. E. e Okhapkin, A. S., 1984, Reconstructing the effective coefficient of thermal conductivity of asbestos-textolite from the solution of the inverse problem, *J. Engng. Phys.*, Vol. 45, No. 5, pp. 1281-1286.
- Artyukhin, E. A., Ivanov, G. A. e Nenarokomov, A. V., 1993, Determining the set of thermophysical properties of materials from unsteady-state temperature measurements, *High Temperature*, Vol. 31, No. 2, pp. 199-202.
- Beck, J. V., Blackwell, B. e St. Clair Jr., C. R., 1985, *Inverse Heat Conduction*, Wiley, New York.
- Bejan, A., 1993, *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- Blanc, G., Raynaud, M. e Chau, T. H., 1998, A guide for the use of the function specification method for 2D inverse heat conduction problems, *Rev. Gén. Therm.*, Vol. 37, pp. 17-30.
- Carvalho, G., 1997, *Lignina em Espumas Fenólicas*, Tese de Doutorado, São Carlos, IQSC-USP.
- Carvalho, G. e Silva Neto, A. J., 1999, An inverse analysis for polymers thermal properties estimation, *Proc.3rd International Conference on Inverse Problems in Engineering*.
- Carvalho, G., Frollini, E. e Santos, W. N., 1995, Medida de condutividade térmica de polímeros, *Anais 3º Congresso Brasileiro de Polímeros*, Rio de Janeiro.
- Carvalho, G., Frollini, E. e Santos, W. N., 1996, Thermal conductivity of polymers by hot-wire method, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 62, pp. 2281-2285.
- Flach, G. P. e Özisik, M. N., 1989, Inverse heat conduction problem of simultaneously estimating spatially varying thermal conductivity and heat capacity per unit volume, *Numer. Heat Transfer*, Vol. 16, pp. 249-266.
- Gallant, A. R., 1987, *Nonlinear Statistical Models*, Wiley, New York.
- Hensel, E., 1991, *Inverse Theory and Applications for Engineers*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Huang, C. H. e Özisik, M. N., 1990, A direct integration approach for simultaneously estimating spatially varying thermal conductivity and heat capacity, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 11, pp. 262-268.
- Kauati, A. T., Silva Neto, A. J. e Roberty, N. C., 1999, A source-detector methodology for the construction and solution of the one-dimensional transport equation, *Proc.3rd International Conference on Inverse Problems in Engineering*.
- Li, H. Y., 1998, Estimation of thermal properties in combined conduction and radiation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42, No. 3, pp. 565-572.

- Marquardt, D. W., 1963, An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, J. Soc. Industr. Appl. Math., Vol. 11, pp. 431-441.
- Murio, D. A., 1993, The Mollification Method and the Numerical Solution of Ill-Posed Problems, John Wiley & Sons, New York.
- Rezende, F. C., Regis, C. R., Silva Neto, A. J. e Su, J., 1998, Estimativa do termo fonte para a equação de condução unidimensional com condições de contorno convectivas, Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Vol. II, pp. 951-956.
- Santos, W. N. dos, Cintra Filho, J. S. e Baldo, J. B., 1995, The measurement of thermal conductivity of refractories by the hot-wire method, Proc. 4<sup>th</sup> Unified Technical Conference of Refractories, Kyoto, Japan.
- Silva Neto, A. J. e Özisik, M. N., 1994, The estimation of space and time dependent strength of a volumetric heat source in a one-dimensional plate, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 37, No. 6, pp. 909-915.
- Silva Neto, A. J. e Özisik, M. N., 1994a, An inverse heat conduction problem of unknown initial condition, Proc. 10th International Heat Transfer Conference, Vol. 6, pp. 421-426.
- Silva Neto, A. J. e Özisik, M. N., 1995, An inverse problem of simultaneous estimation of radiation phase function, albedo and optical thickness, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, Vol. 53, No. 4, pp. 397-409.
- Silva Neto, A. J., Roberty, N. C., 1998, A abordagem fonte-detector na solução de problemas inversos em meios participantes, Anais do V Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, Vol. III, pp. 340-347.
- Silva Neto, A. J., Gomes, J. L. M. A. e Su, J., 1999, Estimativa da intensidade da fonte térmica em varetas combustíveis cilíndricas, Anais do VII Congresso Geral de Energia Nuclear.
- Taktak, R., Beck, J. V. e Scott, E. P., 1993, Optimal experimental design for estimating thermal properties of composite materials, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 12, pp. 2977-2986.
- Tikhonov, A. N. e Arsenin, V. Y., 1977, Solutions of Ill-Posed Problems, Winston, Washington D.C.
- Vega, J. A., 1984, Ingeniería de la Producción y Transformación de Polímeros, Instituto de Plásticos y Caucho, Madrid, España.
- Yang, C. Y., 1998, The determination of heat sources in an inverse heat conduction problem, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 42, No. 2, pp. 345-356.

## **THE PROJECT OF EXPERIMENTS FOR POLYMERS THERMAL CHARACTERIZATION WITH THE SOLUTION OF INVERSE PROBLEMS**

**Abstract:** *With the development of new materials in order to attend specific applications, becomes imperative the development and use of proper techniques for their characterization. In this work it is described an approach that combines the experimental activities with the solution of inverse problems for the thermal characterization of new polymeric materials. With this approach a better use of experimental data already acquired is made, and the project of new experiments can be done. In the work the results obtained for phenolic foam with lignin are also presented, with the thermal properties being estimated from real experimental data.*

**Key-words:** *Inverse problems, Heat transfer, Thermal properties, Hot wire method, Polymers.*