

O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície (*The hot wire method: the hot wire parallel technique and the hot wire surface technique*)

W. N. dos Santos

Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa

Universidade Federal de S. Carlos - UFSCar

Rod. Washington Luiz, Km 235, C.P. 676, 13565-905, S. Carlos, SP

dwns@power.ufscar.br

Resumo

A condutividade térmica é uma das propriedades físicas mais importantes de um material. A sua determinação experimental apresenta algumas dificuldades e requer alta precisão na determinação dos fatores necessários para o seu cálculo. O método de medida de condutividade térmica para materiais refratários mais usado hoje em todo o mundo, tanto nos centros de pesquisa, quanto nos laboratórios industriais, é o Método do Fio Quente, onde a condutividade térmica é calculada a partir do transiente de temperatura gerado por uma fonte de calor ideal, infinitamente longa e fina num meio material infinito. Neste trabalho são comparados os resultados obtidos utilizando-se duas técnicas diferentes para a detecção do transiente térmico: numa delas, a temperatura é medida na superfície do fio quente, (técnica de fio quente de superfície), e na outra, a temperatura é medida a uma certa distância do fio quente (técnica de fio quente paralelo). Os resultados experimentais mostram uma grande vantagem da técnica de fio quente de superfície em relação a técnica de fio quente paralelo para materiais com condutividade térmica superior a 10 W/mK. O intervalo de tempo considerado no cálculo é bem maior que aquele que seria utilizado na técnica de fio quente paralelo, obtendo-se assim resultados mais precisos e confiáveis.

Palavras-chave: técnica de fio quente paralelo, técnica de fio quente de superfície, condutividade térmica.

Abstract

Thermal conductivity is one of the most important physical properties of a material. However, its experimental evaluation may presents some specific troubles, and high precision in the determination of the factors involved in its calculation is required. Specifically for refractory materials, the experimental technique employed worldwide for thermal conductivity calculations is the hot wire technique, in which the thermal conductivity is calculated starting from the temperature transient generated by an ideal, infinitely thin and long heat source embedded in an infinite surrounding material. In this work comparisons are made when two different techniques for the transient temperature detection are employed: in one of them, the temperature is detected and recorded at the surface of the hot wire (hot wire surface technique), while in the other, the measuring point is located at a fixed distance from the hot wire (hot wire parallel technique). Experimental results show a great advantage when using the hot wire surface technique for materials with thermal conductivity higher than 10 W/mK. The time interval which is taken into account in calculations is bigger than that one that would be employed in the hot wire parallel technique in the same experimental conditions, proportioning in this case higher accuracy and reliability in the experimental results obtained.

Keywords: hot wire parallel technique, hot wire surface technique, thermal conductivity.

INTRODUÇÃO

A condutividade térmica é uma das propriedades físicas mais importantes de um material. A sua determinação experimental apresenta algumas dificuldades e requer alta precisão na determinação dos fatores necessários para o seu cálculo. Esta propriedade assume um papel crítico no desempenho de materiais refratários em processos que envolvem altas temperaturas: fornalhas, fornos, retortas e outros. Baixos valores de

condutividade térmica são exigidos, quando se pretende minimizar as perdas de calor. Por outro lado, a transferência de calor de uma parte para outra em uma olaria (desejável em certas operações de aquecimento) é obtida mais facilmente usando refratários de condutividade térmica mais alta. Esta característica é também desejável, se não crítica, para evitar falhas devido ao choque térmico. Assim sendo, dados confiáveis de condutividade térmica são essenciais na seleção de um material, para que o mesmo possa ter o melhor desempenho possível em uma dada aplicação. A

condutividade térmica é a propriedade que estabelece os níveis de temperatura de trabalho de um material, sendo um parâmetro importante em problemas envolvendo transferência de calor em regime estacionário.

Hoje são conhecidos vários métodos para a determinação da condutividade térmica de um material. Esses métodos podem ser divididos em duas grandes classes: métodos diretos, e métodos indiretos.

Os métodos diretos são aqueles que medem diretamente a condutividade térmica a partir dos resultados experimentais, e como exemplo pode ser citado o método calorimétrico de placa quente-placa fria.

Os métodos indiretos são aqueles que medem experimentalmente uma determinada propriedade do material, e a partir dessa propriedade obtém-se o valor da condutividade térmica. Como exemplo pode ser citado o método de pulso de energia. Nesse caso, é determinado experimentalmente o valor da difusividade térmica, e a partir do conhecimento ou medida do calor específico e da densidade do material, determina-se a condutividade térmica.

Quanto à utilização ou não de padrões, os métodos experimentais podem ser classificados em duas categorias: comparativos e absolutos.

Os métodos comparativos são aqueles que requerem um ou mais corpos calibrados, que são tomados como referência. Como exemplo pode ser citado o método da coluna fracionada, que utiliza dois corpos padrão como referência.

Os métodos absolutos, como o próprio nome indica fazem a medida da condutividade térmica diretamente, dispensando o uso de padrões de comparação, e como exemplo de ser citado o método do fio quente.

De acordo com o regime de troca de calor utilizado, os métodos existentes podem ainda ser classificados em dois grandes grupos: métodos estacionários e não estacionários.

Métodos estacionários são aqueles que medem a condutividade térmica num regime estacionário de troca de calor. Como exemplos podem ser citados todos os métodos calorimétricos. Já os métodos não estacionários medem a condutividade térmica durante um regime transiente de troca de calor.

Os métodos não estacionários podem ainda ser divididos em duas categorias: métodos de fluxo de calor periódico, e métodos de fluxo de calor transiente.

Os métodos de fluxo de calor periódico são aqueles onde as condições nas extremidades de uma barra ou de uma placa variam com um período conhecido. Quando o estado estacionário é atingido, as temperaturas em certos pontos pré-estabelecidos são registradas, e a difusividade térmica é calculada a partir dessas temperaturas. Como exemplo desse método, pode ser citado o método de Amgstrom. A condutividade térmica pode então ser calculada, desde que se conheça o calor específico e a densidade do material.

Nos métodos de fluxo de calor transiente um pulso de energia de curta duração incide na face frontal da amostra a ser ensaiada, e a difusividade térmica é calculada a partir do registro da história da temperatura na face posterior da amostra. A partir da difusividade térmica medida experimentalmente, e conhecendo-se o calor específico e a densidade do material, determina-se então a condutividade térmica. A técnica de pulso de energia introduzida

por Parker e cols. é, sem dúvida, o exemplo mais conhecido dessa classe de métodos.

O método de medida de condutividade térmica para materiais refratários mais usado hoje em todo o mundo, tanto nos centros de pesquisa, quanto nos laboratórios industriais, é o Método do Fio Quente, que aliás foi normalizado especificamente para essa classe de materiais.

O método do fio quente, descrito por Schieirmacher [1] em 1888, é um método absoluto, direto e não estacionário. Van Der Held e Van Drunen [2] em 1949 foram os que pela primeira vez fizeram uso prático dessa técnica de medida. Entretanto, foi Haupin [3] em 1960 que utilizou pela primeira vez o método do fio quente na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos, e seu trabalho formou a base de todas as variantes do método.

Hoje em dia o método do fio quente é considerado como uma técnica precisa na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos. Além disso, nesta técnica de medida o conceito de “temperatura média” entre a face quente e a face fria de uma amostra, utilizados nos cálculos dos métodos calorimétricos é eliminado, uma vez que o cálculo da condutividade é feito a uma dada temperatura fixa. Nesta técnica, o gradiente de temperatura através da amostra é muito baixo, o que é sem dúvida outra virtude deste método uma vez que um método ideal de medida de condutividade térmica seria aquele capaz de medir essa propriedade segundo um gradiente de temperatura zero através da amostra.

Entretanto, este método tem duas limitações: materiais condutores elétricos, e materiais de alta condutividade térmica. No primeiro caso a solução seria obtida isolando-se eletricamente o fio quente e as amostras. Já para o caso de materiais de alta condutividade térmica, o tempo de registro do transiente térmico torna-se bastante pequeno, comprometendo assim a confiabilidade dos resultados obtidos, a menos que as dimensões das amostras sejam suficientemente grandes, o que por outro lado inviabiliza o processo de medida.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Se um material é isotrópico, a condutividade térmica é a mesma em qualquer direção.

A temperatura T , no instante t e no ponto (x,y,z) , num sólido infinito, devido a uma quantidade de calor q que é instantaneamente gerada no tempo $t=0$ no ponto (x',y',z') , é dada pela equação [4]:

$$T = \frac{q}{8\rho c(\pi at)^{3/2}} \exp\left\{-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4at}\right\} \quad (A)$$

onde: ρ = densidade, c = calor específico, $a = k/\rho c$ = difusividade térmica.

Para uma fonte linear instantânea de calor, se uma quantidade de calor $q'dz$ é instantaneamente gerada no instante $t=0$, em todos os pontos sobre uma linha infinita paralela ao eixo z , e passando pelo ponto (x',y') , a temperatura no ponto (x,y) no instante t é obtida substituindo-se q na equação A por $q'dz$, e integrando com respeito a z :

$$T = \frac{q'}{4\pi kt} \exp\left\{-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4at}\right\} \quad (B)$$

sendo q' a quantidade de calor gerada por unidade de comprimento da fonte.

Se uma fonte gera calor a partir do instante $t=0$, a uma taxa $q'(t)$ por unidade de tempo e por unidade de comprimento de uma linha paralela ao eixo z passando pelo ponto (x', y') , a temperatura no ponto (x, y) no instante t é obtida substituindo-se q' na equação B por $q'(t)dt$ e integrando com respeito a t :

$$T = \frac{q'}{4\pi k} \int \frac{e^{-u}}{r^2/4at} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q'}{4\pi k} [-Ei(-\frac{r^2}{4at})] \quad (C)$$

onde $r^2 = (x-x')^2 + (y-y')^2$, e q' é a quantidade de calor gerada por unidade de comprimento da fonte.

A função $-Ei(-x)$, chamada função exponencial integral é definida por:

$$-Ei(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt \quad (D)$$

e pode ser aproximada pela seguinte série de potências:

$$-Ei(-x) = E1(x) = -\gamma - \ln x - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^n}{n!} \quad (E)$$

desde que $|\arg x| < \pi$, e $\arg x = \arctan(x_2/x_1)$, sendo $x = x_1 + ix_2$, e $\gamma = 0,5772156649\dots$ é a constante de Euler.

Para uma formulação matemática do método, o fio quente é assumido ser uma fonte de calor ideal (massa = 0, e portanto capacidade térmica = 0), infinitamente longa e fina (diâmetro = 0), a qual é circundada até o infinito pelo material cuja condutividade térmica pretende-se determinar [5]. Ao passar uma corrente elétrica constante através do fio, uma quantidade constante de calor, por unidade de tempo e por unidade de comprimento, é liberada pelo fio e vai se propagar através do material. Essa propagação de calor num meio infinito gera, no material, um campo transiente de temperaturas.

Na prática, a fonte teórica linear é aproximada por uma resistência elétrica fina, e o sólido infinito é substituído por uma amostra finita. Assim sendo, a capacidade térmica do fio, a resistência de contato entre ele e a amostra, e o tamanho finito da amostra são fatores que impõem um tempo mínimo e um tempo máximo a serem utilizados no cálculo da condutividade térmica.

Hoje são conhecidas quatro variações do método de fio quente [6], duas das quais foram normalizadas. O modelo teórico é o mesmo, sendo que a diferença básica entre essas variações está no procedimento de medida da temperatura. A técnica padrão de fio quente, também conhecida como cruz de medição, foi normalizada em 1976 pela norma DIN 51046-Parte 1 [7], e é indicada para a medida de condutividade térmica até 2 W/mK, tendo os corpos de prova a forma de um paralelepípedo retangular com as dimensões de 230x114x64 mm³. A técnica de fio quente paralelo foi normalizada em 1978 pela norma DIN 51046-Parte 2 [8]. As dimensões dos corpos de prova são as mesmas fixadas na Parte 1, e esta técnica é indicada para medida de condutividade térmica até 25 W/mK.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho pretende-se comparar os resultados obtidos utilizando-se duas técnicas diferentes para a detecção do transiente térmico: numa delas, a temperatura é medida na superfície do fio quente, e será designada por técnica de fio quente de superfície, e na outra, a temperatura é medida a uma certa distância do fio quente (técnica de fio quente paralelo, já normalizada). A Fig. 1

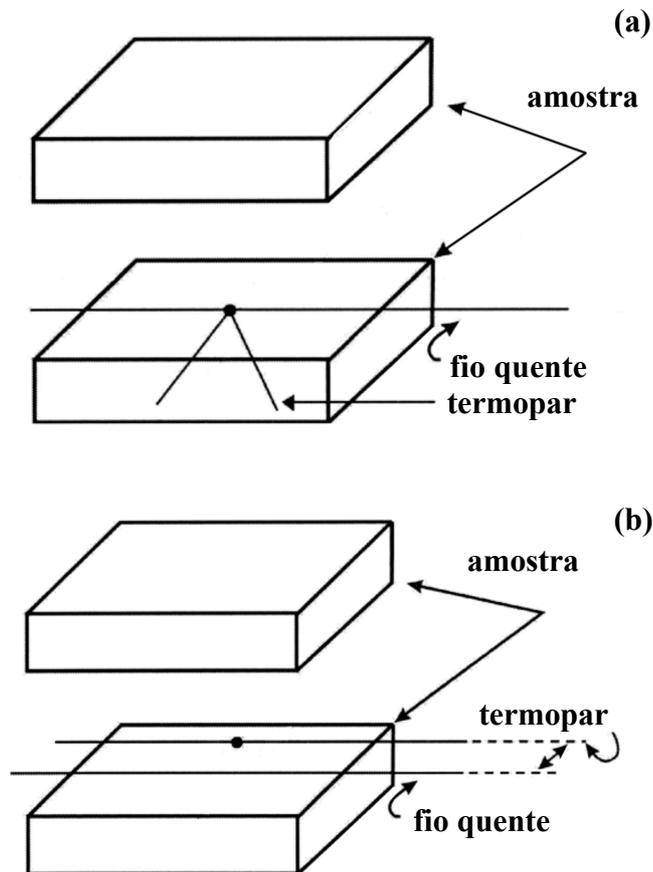


Figura 1: Arranjo dos corpos de prova: (a) técnica de fio quente de superfície, (b) técnica de fio quente paralelo.

[Figure 1: Experimental set-up: (a) hot wire surface technique, (b) hot wire parallel technique.]

ilustra o arranjo experimental dos corpos de prova.

Na técnica de fio quente paralelo a condutividade térmica é calculada pela equação C, a qual é reescrita aqui:

$$k = \frac{-q'}{4\pi T} Ei(-\frac{\rho c r^2}{4kt}) \quad (F)$$

onde: k = condutividade térmica (W/mK), q' = densidade linear de potência (W/m), T = excesso de temperatura em relação à temperatura inicial de referência (K), ρ = densidade do material (kg/m³), c = calor específico (J/kgK), r = distância radial a partir do fio quente (m), t = tempo, contado a partir do início da liberação de calor (s) e $-Ei$ = função exponencial integral.

Quando a temperatura é medida na superfície do fio quente (técnica de fio quente de superfície), a equação final para o cálculo da condutividade térmica é obtida a partir das equações C e E, fazendo-se a seguinte aproximação [9]:

Se $r^2/4at$ é muito pequeno, a função $-Ei(-x)$ pode ser aproximada apenas pelos termos $-\gamma - \ln(x)$. Assim sendo, a temperatura próximo ao fio quente é dada por:

$$T = \frac{q'}{4\pi k} \left[\ln \frac{4at}{r^2} - \gamma \right] \quad (G)$$

A equação G mostra que a temperatura próximo ao fio quente é proporcional ao logaritmo do tempo, e a condutividade térmica do meio está contida na constante de proporcionalidade. Isso indica que a condutividade térmica k pode ser calculada a partir do coeficiente angular da reta temperatura versus logaritmo do tempo. Entretanto, como a fonte de calor (fio quente) não é ideal, e portanto tem uma certa capacidade térmica, e existe uma resistência de contato entre o fio e a amostra, o trecho inicial da curva não é linear, e portanto não deve ser considerado no cálculo da condutividade térmica. A amostra também não é infinita como pressupõe o modelo teórico, e como consequência após um certo tempo começa haver perda da linearidade da curva, devido a troca de calor entre a amostra e o meio ambiente, caracterizando também um tempo máximo de medida. Esses tempos mínimo e máximo são determinados experimentalmente a partir do registro da temperatura na superfície do fio quente em função do tempo.

Foram selecionados 6 materiais diferentes, com condutividade térmica variando desde aproximadamente 0,25 até 13 W/mK. Os corpos de prova utilizados são tijolos comerciais, com as dimensões aproximadas de 230 x 114 x 65 mm³, que serão designados por A1, A2, ..., A6. O fio quente é uma resistência de Kanthal DS com diâmetro de 0,51 mm, e resistência de 6,49 Ω/m, e o termopar é do tipo K, cromel-alumel tendo também 0,51 mm de diâmetro. No caso da técnica em paralelo, a distância entre o fio quente e o termopar foi de 16 mm. Em ambas as técnicas, o fio quente e o termopar são embutidos em sulcos com a profundidade aproximada do diâmetro desses fios, os quais em seguida são preenchidos com uma massa feita com o pó do próprio material, adicionando-se 2% de dextrina e água.

O sistema de aquisição e processamento de dados é totalmente automatizado: o transiente de temperatura que é detectado pelo termopar é processado em um microcomputador, via um conversor analógico-digital. No caso da técnica de fio quente paralelo é feito um duplo ajuste por regressão não linear, obtendo-se simultaneamente, a partir do mesmo transiente térmico experimental, a condutividade térmica e o calor específico [10]. No caso da técnica de fio quente de superfície a condutividade térmica é calculada a partir do coeficiente angular da reta temperatura versus tempo, de acordo com a equação H. A Fig. 2 mostra o arranjo experimental da técnica de fio quente.

$$k = \frac{-q'}{4\pi T} \quad (H)$$

onde $q' = RI^2$ é densidade linear de potência (W/m), R é a resistência do fio quente (Ω/m), I é a corrente elétrica (A), e α é o coeficiente angular da reta.

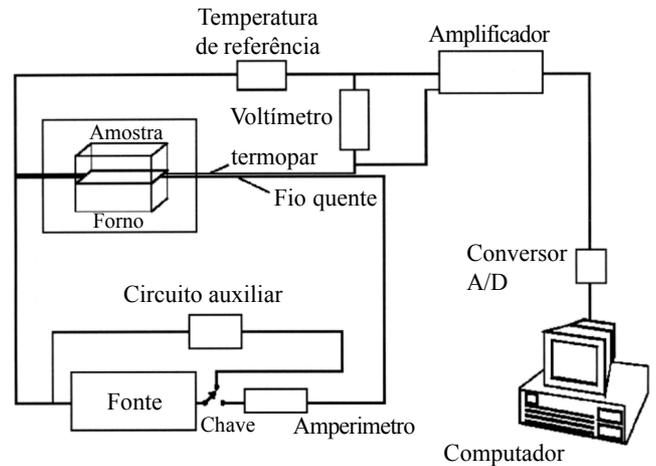


Figura 2: Diagrama esquemático da técnica de fio quente.

[Figure2: Schematic of hot wire equipment.]

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando, então, o arranjo experimental da Fig. 2 foi registrado experimentalmente o transiente de temperatura na superfície da fonte de calor (método de fio quente de superfície),

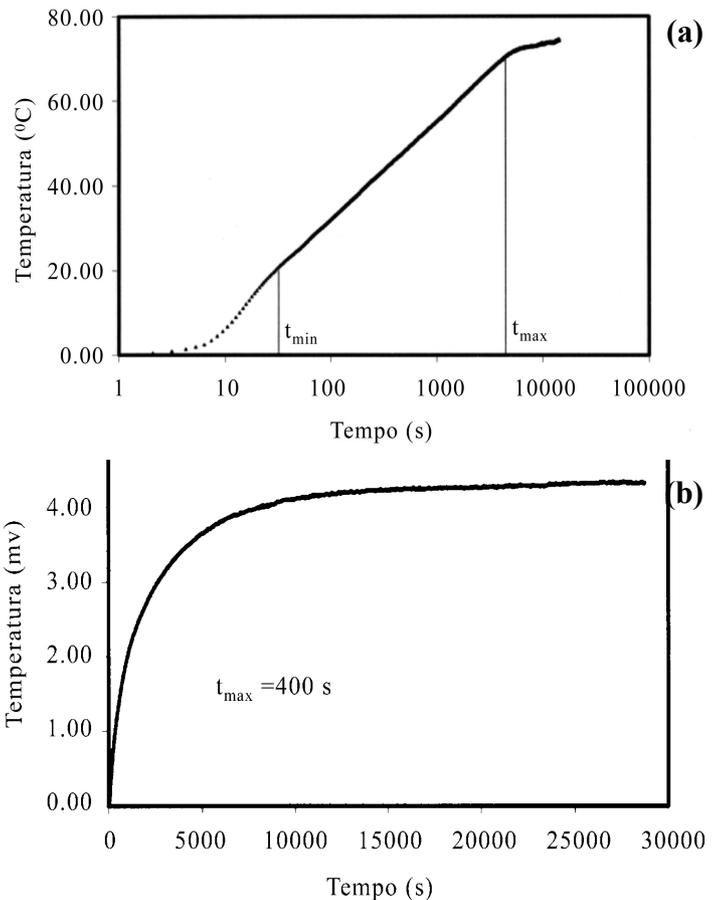


Figura 3: Perfil de temperatura no ponto de medida-amostra A1: (a) técnica de fio quente de superfície, (b) técnica de fio quente paralelo.

[Figure 3: Temperature profile at measuring point-sample A1: (a) hot wire surface technique, (b) hot wire parallel technique.]

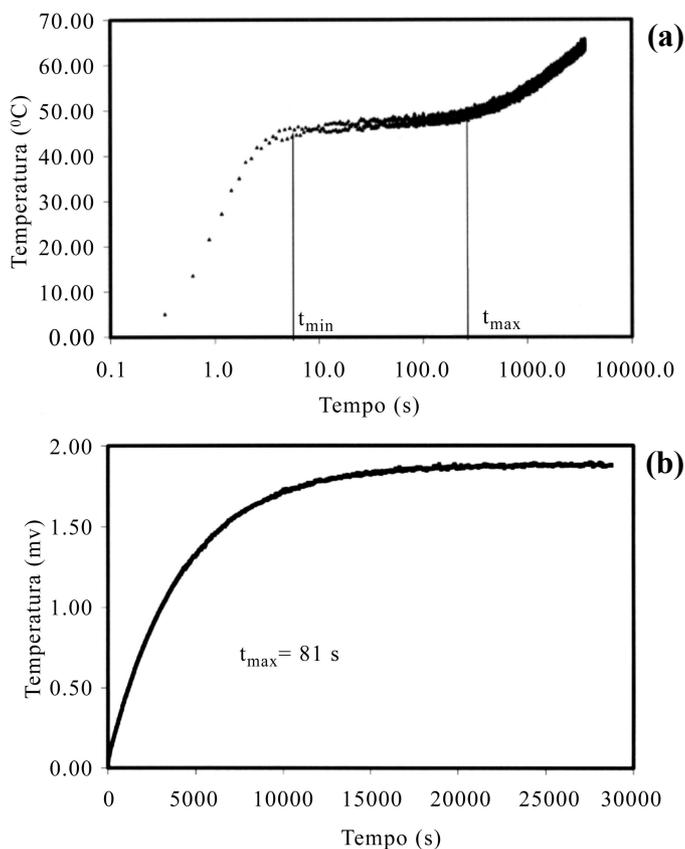


Figura 4: Perfil de temperatura no ponto de medida-amostra A6: (a) técnica de fio quente de superfície, (b) técnica de fio quente paralelo.
 [Figure 4: Temperature profile at measuring point-sample A6: (a) hot wire surface technique, (b) hot wire parallel technique.]

e a 16 mm da mesma (técnica de fio quente paralelo). As Figs. 3 e 4 mostram esses transientes de temperatura, os quais foram registrados durante um intervalo de tempo bem maior do que aquele utilizado nos cálculos, para duas amostras selecionadas: amostra A1 de menor condutividade térmica (0,25 W/mK) e amostra A6, de maior condutividade térmica (13 W/mK).

No caso da técnica de fio quente paralelo a condutividade

térmica é calculada pela equação F, e no caso da técnica de fio quente de superfície, a condutividade térmica é calculada pela equação H. A Tabela I mostra os resultados obtidos, bem como os tempos mínimos e máximos utilizados nos cálculos, para ambas as técnicas. O coeficiente de correlação R, bem como a variação percentual δ entre as duas técnicas de medida, também são mostrados nessa tabela.

A Tabela I mostra que os resultados obtidos pela técnica de fio quente de superfície, proposta neste trabalho estão em excelente concordância com os resultados obtidos pela técnica de fio quente paralelo, já normalizada.

A norma DIN 51046 prevê que com a técnica em paralelo é possível medir condutividade térmica até 25 W/mK. Entretanto, para materiais com condutividade térmica superior a 15 W/mK, a medida dessa propriedade torna-se problemática em termos do arranjo experimental. A técnica de embutimento do fio quente e do termopar passam a desempenhar um papel importante no valor da condutividade térmica medida experimentalmente [5], e neste caso, o embutimento adequado do fio quente e do termopar é de fundamental importância na determinação de valores confiáveis de condutividade térmica. Entretanto, o fator que limita a técnica de fio quente paralelo, para materiais de alta condutividade é o tempo máximo permissível para o registro do transiente térmico experimental, uma vez que esses dados devem ser registrados antes que comece a haver troca de calor entre a amostra e o meio ambiente. Quanto maior for a condutividade térmica do material, como regra geral maior será também a sua difusividade térmica, e portanto menor será o intervalo de tempo do transiente térmico experimental a ser utilizado no cálculo da condutividade térmica, podendo neste caso haver um comprometimento na confiabilidade do resultado obtido. Já para condutividade térmica superior a 10 W/mK, o intervalo $[t_{\min}, t_{\max}]$ a ser considerado nos cálculos torna-se muito pequeno. Para exemplificar o exposto, para a amostra A6, com condutividade térmica de aproximadamente 13 W/mK, os tempos mínimos e máximos considerados nos cálculos utilizando a técnica de fio quente paralelo foram respectivamente 12 e 81 segundos. Para um material com condutividade térmica de 25 W/mK os tempos mínimos e máximos seriam aproximadamente 9 e 54 segundos, para amostras com as dimensões estabelecidas pela norma. Este intervalo de tempo

Tabela I - Resultados experimentais.

[Table I - Experimental results.]

	F.Q.P.	R	t_{\min}	t_{\max}	F.Q.S.	R	t_{\min}	t_{\max}	δ %
	k(W/mK)		(s)	(s)	k(W/mK)		(s)	(s)	
A1	0,2524	0,9999	42	400	0,2525	0,9997	33	5100	0,04
A2	1,2782	0,9997	42	338	1,2064	0,9918	125	1930	5,95
A3	4,1034	0,9996	22	177	3,8263	0,9511	70	850	7,24
A4	4,2704	0,9996	17	140	4,5445	0,9834	15	800	6,42
A5	11,0601	0,9990	11	88	10,3842	0,9987	10	400	6,51
A6	13,7431	0,9996	12	81	13,4626	0,9382	10	300	2,08

F.Q.P. = técnica de fio quente paralelo, F.Q.S. = técnica de fio quente de superfície.

estritamente pequeno limita o número de pontos experimentais a serem utilizados nos cálculos, e pode sem dúvida comprometer a precisão dos resultados. Esta limitação é parcialmente resolvida quando se utiliza a técnica de fio quente de superfície, pois o tempo disponível para o registro do transiente térmico é maior. Para a amostra A6, tomada como exemplo, o intervalo de tempo considerado nos cálculos foi 10-300 segundos ao invés de 12-81 segundos na técnica de fio quente paralelo. Assim sendo, o intervalo de tempo, bem como o número de pontos experimentais considerados no cálculo da condutividade térmica é bem maior, garantindo assim um resultado mais preciso e confiável.

Esta é, sem dúvida, a grande vantagem da técnica de fio quente de superfície em relação a técnica de fio quente paralelo. O intervalo de tempo considerado no cálculo é bem maior que aquele que seria utilizado na técnica de fio quente paralelo, obtendo-se assim resultados mais precisos e confiáveis. Acredita-se que com a técnica de fio quente paralelo seja difícil a obtenção de resultados precisos e confiáveis para materiais com condutividade térmica superior a 15 W/mK.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Proc. 300186/89-4 RN) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] A. L. Schieirmacher, Wiedemann Ann. Phys. **34** (1888) 38.
- [2] E. F. M. Van Der Held and F.G. Van Drunen, Physics, **15**, **10** (1949) 865.
- [3] W. E. Haupin, Am. Ceram. Soc. Bull. **39**, 3 (1960) 139.
- [4] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, Oxford (1959) 255.
- [5] J. Boer, J. Butter, B. Grosskopf, P. Jeschke, Refractories Journal **55** (1980) 22.
- [6] W. N. Dos Santos, J. S. Cintra Filho, Cerâmica **37**, 252 (1991) 101.
- [7] P. R. E. Staff, Bull. Soc. Fr. Ceram. E1-E2/N3 (1977) 9.
- [8] P. R. E. Staff, Bull. Soc. Fr. Ceram. **126**, 15 (1980) 15.
- [9] K. Hayashi, M. Wacamatsu, Proc. Sec. Int. Conf. Refract., Kyoto, Japão, (1987) 983.
- [10] W. N. dos Santos, J. Mat. Sci. **35** (2000) 3977.

(Rec.29/01/02, Ac. 19/04/02)