

FERNANDES, C.P. - Eng. Mecânica - UFSC  
 PHILIPPI, P.C. - Eng. Mecânica - UFSC  
 PEDRINI, A. - Eng. Mecânica - UFSC

A condutividade térmica aparente de um dado material poroso é função da geometria da matriz porosa, do conteúdo de umidade e da temperatura. Neste trabalho, é investigada a influência do conteúdo da umidade sobre a condutividade térmica de uma argamassa de cal e cimento, utilizando-se o método da sonda térmica. O método é apresentado, bem como uma descrição física da sonda térmica. Procede-se ainda, uma análise simplificada de erros na medição da condutividade térmica.

For a given porous body, the apparent, thermal conductivity is a function of the porous matrix geometry, water content and temperature. The influence of water content over the thermal conductivity is analyzed in this paper, for a lime mortar commonly used as a coating material in buildings. The thermal probe method is used which is fully described in the paper. A simplified error analysis for the measuring process is also presented and compared with the scattering found in the experiments.

## INTRODUÇÃO

A condutividade térmica aparente dos materiais que constituem as paredes das edificações, meios porosos consolidados, depende fortemente do conteúdo de umidade.

A presença de umidade nas edificações é decorrente de vários fatores, dentre os quais citamos:

- adsorção ou dessorção de vapor de água presente no ar, conforme as condições higrotérmicas;
- migração de água do solo para as paredes através das fundações;
- infiltração de água líquida quando ocorrem chuvas.

Por outro lado, a condutividade térmica é um parâmetro físico de grande importância no cálculo de cargas térmicas nas peças da habitação. Dada a presença da umidade, torna-se interessante o conhecimento de sua influência sobre a condutividade térmica, para um melhor projeto de climatização, implicando em um uso racional de energia elétrica.

O método da sonda térmica é utilizado para a medição da condutividade térmica aparente de uma argamassa de cal e cimento. Vários pesquisadores têm-se utilizado deste método: Perrin [1], Van der Kooi [2], Kasubuchi [3], entre outros.

Este é um método transiente que não promove grande interferência no meio que se deseja medir a condutividade térmica. De fato, o pequeno tempo de medição, e o pequeno acréscimo de temperatura que sofre o meio, não ocasionam migração de umidade por gradiente de temperatura.

O conhecimento da relação de dependência entre o conteúdo e a condutividade pode também ser utilizado como um método de medição de conteúdo de umidade, muito útil, p.ex., em estudos de migração de água em meios porosos, [1], [4].

## PRINCÍPIOS DO MÉTODO DA SONDA TÉRMICA

A sonda térmica, esquematizada na Fig. 01, é um elemento filiforme que é colocada no meio que se deseja medir a condutividade térmica.

Calor é dissipado na resistência elétrica que percorre internamente o corpo da sonda, e mede-se a evolução de temperatura com o tempo através do termopar.

A condutividade térmica do meio é determinada através do modelo matemático que a relaciona com a evolução de temperatura na sonda.

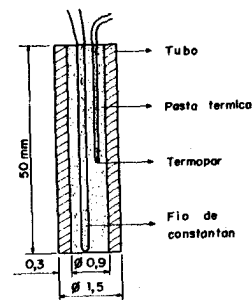


Figura 01 - A sonda térmica.

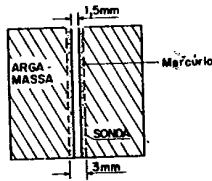


Figura 02 - Modo de inserção da sonda na argamassa.

#### DETALHES CONSTRUTIVOS DA SONDA TÉRMICA

O corpo da sonda é feito com um tubo de aço inoxidável com as dimensões indicadas na Fig. 01. É importante o uso de um material resistente à corrosão, pois a sonda irá atuar em meios úmidos.

A dissipação de calor é feita através de um fio de constantan de 0,18 mm de diâmetro, isolado eletricamente (com uma resina do tipo usada no isolamento de fios de cobre para transformadores elétricos).

O constantan apresenta um baixo coeficiente de variação da resistividade elétrica com a temperatura: isto é necessário, pois o modelo matemático para a evolução de temperatura na sonda, que será apresentado a seguir, supõe dissipação de calor constante.

O termopar utilizado é de chromel-constantan, com isolamento de teflon, com diâmetro de 0,20 mm (externo do isolamento).

A junção quente do termopar (posicionada no centro da sonda) também é isolada eletricamente com resina. Os espaços vazios existentes no interior do corpo da sonda, após a colocação do fio de constantan e do termopar, são preenchidos com uma pasta de alta condutividade térmica, com a finalidade de evitar a convecção do ar e atenuar as resistências térmicas de contacto.

Após a colocação da pasta térmica, estica-se o fio de constantan, posiciona-se o termopar no centro da sonda, e tampa-se o seu fundo com resina epóxi.

#### CÁLCULO TEÓRICO DA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA COM O TEMPO NA SONDA TÉRMICA

Na Fig.02 mostra-se uma maneira de inserção da sonda em materiais consolidados, que foi a utilizada neste trabalho. Foi feito um furo de aproximadamente 3 mm de diâmetro e o espaço vazio foi preenchido com mercúrio para evitar a convecção de ar e atenuar a resistência de contacto sonda-material.

O modelo matemático para a condução de calor, para o sistema da Fig. 02, foi desenvolvido por Perrin [1], que utilizou as seguintes hipóteses: i) taxa de dissipação de calor constante e uniforme na sonda; ii) temperatura da sonda uniforme; iii) fluxo de calor radial e apenas por condução; iv) equilíbrio térmico entre a sonda e o meio para o instante  $t=0$ .

O resultado da evolução de temperatura com o tempo na sonda é:

$$T_s(t) = A \ln t + B + \frac{C}{t} (\ln t + D) \quad (1)$$

A resistência térmica de contacto e a capacidade térmica da sonda são representadas no terceiro termo do lado direito da Eq.(01), e é proporcional a  $t^{-1}$ . Após um tempo suficientemente longo a contribuição desse termo é desprezável e a Eq.(01) toma a forma linear:

$$T_s(t) = A \ln t + B \quad (2)$$

Isto pode ser visto na Fig.03 que mostra o aspecto de uma curva experimental típica de evolução de temperatura na sonda.

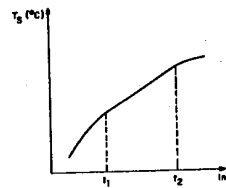


Figura 03 - Evolução de temperatura na sonda.

A condutividade térmica é calculada a partir da inclinação da reta, entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$ , dada por  $Q/4\pi\lambda$  onde:

$Q$  = Potência dissipada na sonda por unidade de comprimento, [W/m];  
 $\lambda$  = Condutividade térmica [W/mK].

Para  $t < t_1$  têm-se os efeitos de capacidade térmica e resistência de contacto; para  $t > t_2$  as condições do contorno que envolve a amostra modifica a curva de evolução de temperatura.

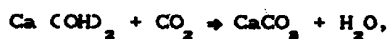
#### DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA DE CAL E CIMENTO

As amostras da argamassa foram confeccionadas utilizando uma proporção em massa de 8:2:1 (areia:cal:cimento).

A água adicionada representa 20% da massa total.

O tempo de cura foi de 28 dias, sendo que a desmoldagem foi feita no 5º dia.

A reação química de carbonatação



ocorre com as amostras expostas ao ar livre. É uma reação que progride lentamente a partir da superfície do material e depende da temperatura e umidade relativa. Após os períodos de cura e secagem das amostras, fez-se testes com o indicador ácido-base fenolftaleína e observou-se uma espessura de camada carbonatada em torno de 4 mm.

Um parâmetro importante a se definir é o de massa seca, que influi na determinação da densidade aparente, porosidade e conteúdo de umidade. A massa seca depende das condições higrotérmicas dentro da estufa e do tempo de secagem.

Secou-se as amostras em estufa ventilada a 75°C na presença de sílica-gel por um intervalo de tempo suficientemente longo, tal que não mais se observe variação de massa.

Não se utilizou temperaturas mais elevadas para não promover a evaporação da água quimicamente adsorvida na pasta de ligantes (cal, cimento e água).

As amostras assim obtidas apresentam densidade aparente de  $1,73 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$  e porosidade de  $0,31 \pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ .

#### DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM FUNÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE

A sonda térmica descrita anteriormente foi usada para obter a influência do conteúdo de umidade sobre a condutividade térmica para a argamassa de cal e cimento. A sonda mede a condutividade térmica aparente,  $\lambda$ , um parâmetro que engloba transferência de calor por condução de Fourier e também os efeitos de calor latente devido a migração de vapor.

O aparato experimental utilizado na medição de condutividade é mostrado na Fig. 04.

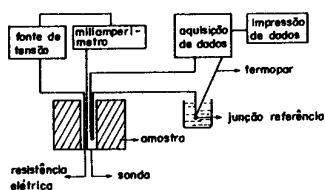


Figura 04 - Arranjo experimental para medição da condutividade térmica aparente.

Diversas amostras cilíndricas com 80 mm de diâmetro e 100 mm de altura são secas como descrito anteriormente. Após a determinação da massa seca elas são imersas em água destilada por períodos de tempo diferentes para que se obtenham conteúdos em massa variando de 1% a 15%. Duas amostras ficaram imersas em água destilada por um período de 3 semanas, sendo que o conteúdo de água assim obtido foi de 17,5% (em massa). Após o processo de umidificação as amostras são seladas com várias camadas de papel celofane e papel alumínio, por um período de tempo de 30 a 45 dias, para que ocorra a homogeneização do campo de conteúdo de umidade. As massas seca e úmida são medidas com balança digital de resolução  $10^{-2} \text{ g}$ .

A condutividade térmica foi então medida para vários conteúdos à temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , utilizando-se duas sondas diferentes.

Os resultados obtidos são mostrados na Fig. 05.

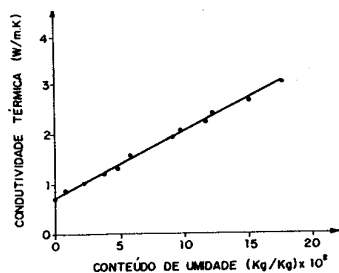


Figura 05 - Dependência da condutividade térmica aparente com o conteúdo de umidade ( $25^\circ\text{C}$ ).

Para cada amostra foram realizadas seis medições de condutividade: três com cada sonda. Na tabela 01 mostra-se os desvios padrões obtidos para o conjunto de medidas em cada conteúdo. Estes valores serão comparados com o erro aleatório teórico, que será avaliado a seguir.

Tabela 1 -

Conteúdo de Umidade (Kg/Kg)%	$\bar{\lambda}$ (W/m K)	Desvio Padrão (%)
0,0	0,72	1,30
0,8	0,88	2,75
2,1	1,02	0,45
2,2	1,03	2,81
3,8	1,22	1,64
4,8	1,33	0,81
8,8	1,57	2,18
8,9	1,96	0,81
9,6	2,09	0,50
11,5	2,25	1,51
12,0	2,41	0,75
14,9	2,68	1,84
17,5	3,08	2,75

#### AValiação Teórica da Incerteza de Medição da Condutividade Térmica

Como foi dito, a condutividade é calculada a partir da inclinação da curva experimental de evolução de temperatura. A inclinação foi avaliada através da regressão linear dos pontos experimentais. Como a linearidade da curva experimental é muito boa, o valor da inclinação, calculado usando apenas os dois pontos extremos da reta - entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$  - é muito próximo daquele obtido através da regressão linear.

Assim, para a avaliação do erro na medição de condutividade, utilizaremos a relação:

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (3)$$

onde:

$T_2$  e  $T_1$  correspondem às temperaturas nos instantes  $t_2$  e  $t_1$ , respectivamente.

Utilizando  $(T_2 - T_1)$  como variável dependente, escrevemos a relação funcional:

$$(T_2 - T_1) = f(Q, \lambda, t_2/t_1) \quad (4)$$

Dessa maneira,

$$\Delta \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 - T_1} \right) = \frac{\Delta Q}{Q} - \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\frac{\Delta t_2}{t_2} - \frac{\Delta t_1}{t_1}}{\ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right)} \quad (5)$$

Escrevendo a potência dissipada  $Q$ , em termos da resistência do fio de constantan  $R$ , e da intensidade de corrente  $i$  que o percorre, vem a expressão para o erro na condutividade:

$$\left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta R}{R} \right| + 2 \left| \frac{\Delta i}{i} \right| + \left| \frac{\Delta T_2}{T_2 - T_1} \right| + \left| \frac{\Delta T_1}{T_2 - T_1} \right| + \left| \frac{\Delta t_2 / t_2}{\ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right)} \right| + \left| \frac{\Delta t_1 / t_1}{\ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right)} \right| \quad (6)$$

Na Eq.(06), adicionou-se os valores em módulo das várias parcelas de erro, tendo-se assim, uma incerteza  $\Delta \lambda$  máxima.

As componentes de erros aleatórios de cada termo do lado direito da Eq.(06) foram assim avaliadas:

$$\left( \frac{\Delta R}{R} \right) = 0 \quad ; \quad \left( \frac{\Delta i}{i} \right) \cong 0,1\%$$

$\Delta T_1 = \Delta T_2 = 0,08^\circ \text{C}$  e  $T_2 - T_1 \cong 3^\circ \text{C}$ , daí:

$$\frac{\Delta T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta T_2}{T_2 - T_1} \cong 1,7\%$$

$\Delta t_1 = \Delta t_2 = 0,1 \text{ s}$ ,  $t_1 = 10 \text{ s}$  e  $t_2 = 60 \text{ s}$

$$\frac{\Delta t_1 / t_1}{\ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right)} \cong 0,6\% \quad \text{e} \quad \frac{\Delta t_2 / t_2}{\ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right)} \cong 0,1\%$$

O erro aleatório sobre a condutividade térmica será então:

$$\left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| \text{ aleatório} \cong 4,3\%$$

#### CONCLUSÕES

No uso da sonda térmica, para que se obtenha resultados experimentais com baixa incerteza de medição, é importante:

- evitar a convecção do ar;
- utilizar amostras de volume suficientemente grande (para retardar efeito de borda);
- atenuar resistências de contacto.

Os desvios-padrão obtidos para o conjunto de seis medidas são menores que 3%, ver tabela 01, o que assegura uma boa reprodutibilidade do método. O valor teórico do erro aleatório é superior aos obtidos experimentalmente. Provavelmente as parcelas de erros não exerçam influência sobre  $\left( \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)$  da maneira como é ditado pela Eq.(06).

#### BIBLIOGRAFIA

- [1]. Perrin, B., Etude des Transferts Couplés de Chaleur et de Masse dans des Matériaux Poreux Consolidés non Saturés Utilisés en Génie Civil, Thèse Docteur d'Etat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1985.

- [2]. Van der Kooij, Moisture Transport in Cellular Concrete Roofs, Ph.D. Thesis, University of Technology, Waltman Delft, 1971.

- [3]. Kasubuchi, T., Twin Transient - State Cylindrical - Probe Method for the Determination of the Thermal Conductivity of Soil. Soil Science, Vol.124, n°5, p.255-258, 1977.

- [4]. Fernandes, C.P., Philippi, P.C., Pedrini, A., Brincas, C.R., Contribuição ao Estudo da Migração de Água em Materiais Porosos Consolidados. Análise de uma Argamassa de Cal e Cimento. Anais do X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, p. 565-568, 1989.

- [5]. Blackwell, J.H., The Axial Flow Error in the Thermal Conductivity Probe, Can.J. Physics 34, 1956.