



PROTÓTIPO NACIONAL DE UM EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Moura, L.M.; Lamberts, R.; Philippi, P.C.; Souza, R.V.C.

Grupo de Análise Térmica de Edificações

Universidade Federal de Santa Catarina

Tel: 0482-319397, Fax: 0482-341519, Cx 476

Florianópolis, SC H8040-900, Biasil

RESUMO

Apresenta-se um equipamento para medição de condutividade térmica de materiais, com valores inferiores a 3.5W/mK , através do método de Placa Quente Protegida. Faz-se uma descrição do equipamento, método de medição e calibração, além de uma análise de erros inerente ao método experimental.

ABSTRACT

This paper presents an experimental method for measuring the thermal conductivity of insulating materials, ($\lambda < 3.5\text{W/mK}$), using a guarded hot-plate apparatus. The apparatus, is described with measurements and calibration. An error analysis is performed.

INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, com o advento da crise mundial de energia, houve um grande estímulo às pesquisas na área de conservação de energia, tanto em aplicações industriais quanto residenciais. Como resultado, novos materiais foram desenvolvidos e geometrias otimizadas para a utilização como isolantes térmicos, um exemplo são os plásticos celulares.

No Brasil, em projetos de climatização e refrigeração, nem sempre se utiliza isolantes térmicos adequados, uma vez que não se encontra valores precisos referentes às suas propriedades. A propriedade que define a capacidade isolante de um material, é a condutividade térmica. Esta propriedade relaciona o fluxo de calor que atravessa um corpo com a diferença de temperatura entre suas faces, em regime permanente. Para a medição de baixos valores de condutividade térmica (material isolante) o sistema mais adequado é o método da Placa Quente Protegida.

Descreve-se neste trabalho o método de Placa Quente Protegida utilizado para a medição da condutância térmica de materiais isolantes, com uma condutividade térmica inferior a 3.5W/mK [1], obedecendo fundamentalmente às normas ASTM C177-76[2], BS-8-74[3] e, AFNOR NFX10-021[1].

O equipamento, construído com tecnologia nacional através de um projeto FINEP-PADCT, possibilitará a implantação de um laboratório de referência para a medição de condutividade térmica no Brasil, bem como fornecerá dados para a validação de métodos transientes de medição desenvolvido no nosso laboratório por

Güths [4] e Guimarães [5]

O método Placa Quente Protegida pode ser empregado em três diferentes categorias de materiais isolantes [3]: material homogêneo e isotrópico, onde o calor é transportado somente por condução, como plásticos densos, borrachas e vidros opacos; material termicamente não homogêneo, como materiais isolantes misturados ou sobrepostos em camadas; material poroso termicamente homogêneo, onde o fluxo de calor é transmitido pelas partes sólida e gasosa que constituem o material, exemplos típicos são os materiais fibrosos, celulares e granulares.

Materiais termicamente homogêneos, neste contexto, são materiais cuja condutividade térmica, para uma dada temperatura, não é afetada pelo gradiente de temperatura, espessura ou áreas das amostras. Materiais que possuem uma distribuição randômica de inclusões ou cavidades cujas dimensões são relativamente pequenas em relação às dimensões da amostra são tratados como homogêneos, sendo que macroscopicamente não distorcem o fluxo de calor.

PRINCÍPIO

Para a determinação da condutividade térmica utiliza-se o princípio de Placa Quente Protegida, sendo o equipamento constituído por uma placa de aquecimento central, denominada placa Quente. Dispostas simetricamente, sobre esta há as amostras e as Placas de refrigeração denominadas placas frias, figura 1.

Submete-se as amostras de espessuras conhecidas a uma densidade de fluxo de calor

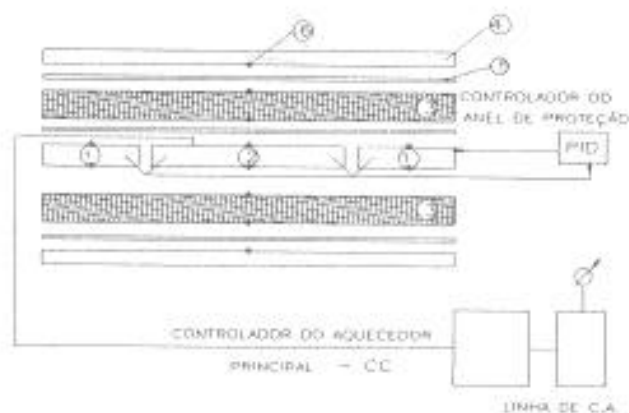
unidimensional e quando o experimento atinge o regime permanente mede-se o gradiente de temperatura nas amostras.

A condutividade térmica pode ser calculada pela seguinte equação (Equação de Fourier):

$$\lambda = \frac{qL}{2.A.\Delta T}$$

onde, λ é a condutividade térmica; q é a potência elétrica dissipada no núcleo da placa quente; L é a espessura média das amostras; A é a área efetiva de geração do fluxo de calor, corresponde a área do núcleo da placa quente;

ΔT é a diferença média de temperatura entre as faces opostas das amostras.



- 1-Anel de proteção
- 2-Placa de aquecimento
- 3-Amostra
- 4-Placas de refrigeração
- 5-Espuma de silicone
- 6-Pontos com termopares

Figura 1: Esquema do Equipamento de Placa Quente Protegida

Placa Quente

Divide-se em duas partes, a central ou núcleo e o anel de guarda ou proteção. Confeccionada na forma de duas placas de duralumínio com dimensões de 300x300x20ritm, possui elementos aquecedores independentes localizados em seu interior uniformemente distribuídos. O desvio máximo de planicidade de sua superfície é 0.09mm, inferior ao recomendado pela norma BS874 [31 (desvio máximo de 0.1mm) . A dimensão do núcleo, área efetiva para o cálculo da condutividade térmica, é de 200x200mm, sendo separado do anel de guarda por uma folga de 1.5mm, figura 21. O anel de guarda possibilita a obtenção de um fluxo de calor unidimensional, variando-se a potência dissipada neste, de modo a compensar as perdas laterais de calor. O núcleo dissipa um potência máxima de 100w. A variação de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda da placa quente máxima desejável é $\pm 0.1K$.

Realiza-se medições de temperaturas na superfície da placa através de termopares localizados em rasgos de 2mm de profundidade. Na figura 2, nota-se que a direção das ranhuras usinadas para os termopares do anel de guarda é sempre perpendicular à face a uma

maior distância (exemplo: segmento A-P). Reduzindo-se assim o efeito aleta, que é um efeito comum em medições de temperatura com estes sensores[6].

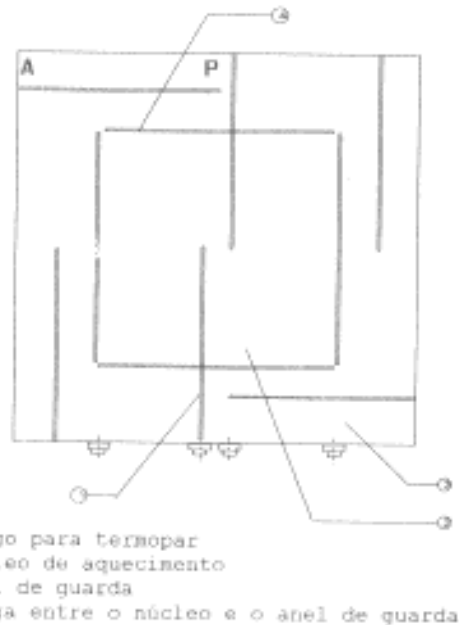
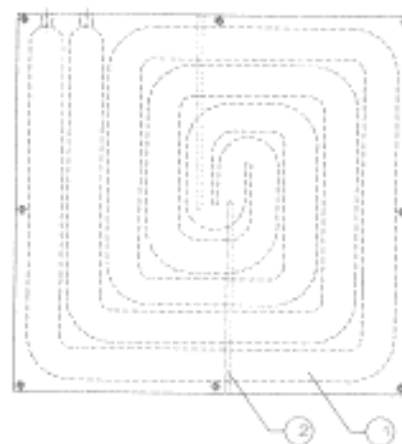


Figura 2: placa quente

Placa Fria

Sendo em número de duas são confeccionadas também em duralumínio e com mesmas dimensões da placa quente. Possuem rasgos usinados em forma de uma espiral dupla para a circulação de um fluido com temperatura controlada por um banho termostatzado. Com este formato procura-se minimizar gradientes térmicos que possam existir nas superfícies das placas. A temperatura das placas é medida por termopares localizados em rasgos de 2mm de profundidade nas superfícies das placas, figura 3.



- 1-Rasgos para circulação do fluido termostatzado
- 2-Rasgo para termopares

Figura 3: placa fria

Amostras

As amostras são confeccionadas com dimensões nominais de 300x300mm e espessuras variando com o tipo de material a ser medido, usualmente 50mm. Em geral, a espessura deve ser representativa para o material. O gradiente térmico sobre a amostra deve ser de aproximadamente de 15K, não podendo exceder em muito por causa de problemas de deformação térmicas. Troussart [7] demonstrou numericamente que é necessário manter a espessura das amostras a menor possível. Simulou o equipamento de placa quente protegida com desbalanceamentos de temperatura entre o anel de guarda e o núcleo de aquecimento com perdas de calor através das faces laterais das amostras. Como resultado obteve erros significativos na medição de condutividade térmica quando existe uma diferença de temperatura. As temperaturas efetivas utilizadas para o cálculo de condutividade térmica são medidas através de termopares achatados (tipo T), com espessura de 0.05mm, presos à superfície.

Amostras de materiais moldáveis com argamassa e concreto são confeccionadas em uma matriz construída em aço com superfícies internas retificadas a fim de que se possa obter amostras com um bom acabamento superficial e planas. A matriz é constituída de elementos móveis sendo possível rioldagens com espessuras de até 120mm.

Sistema de Aquisição e Controle

O equipamento é monitorado por um sistema de aquisição e controle de sinais com interface para PC, desenvolvido pela empresa Microquímica Ind. eCom..

O sistema realiza leituras de quarenta sinais de termopares, dois sinais de termoresistores, um sinal de tensão CC, um sinal de corrente CC e quatro sinais de termofluxímetros. Possui ainda uma saída de potência para o anel de guarda fazendo seu controle através de um sistema PID implementado por software é chaveado com tiristor tipo TRIAC.

O sistema de aquisição e controle de sinais possui um conversor Analógico/Digital de 3 1/2 dígitos e as seguintes características metrológicas, tabela 1:

Tabela 1. Características metrológicas do sistema de aquisição de sinais

SINAL	F.O.	Resolução	I.M.
Termopar	At = 25K	0.01K	0.15K
Termoresistor	0°C a 51.3°C	0.01K	0.05K
Corrente	0A a 1.5A	0.0004A	0.25% da leitura
Tensão	0V a 100V	0.02V	0.1% da leitura

onde,

F.O. : Faixa de Operação

I.M. : Incerteza de Medição

A aquisição de sinais e controle é automática

não sendo necessária a operação do equipamento durante a realização do ensaio. O software possui saídas gráficas em tela em tempo real possibilitando o acompanhamento da medição, detecção de erros e problemas que possam ocorrer.

Utiliza-se uma fonte estabilizada de corrente contínua, marca DAWER FC-10002D, para a alimentação das resistências de aquecimento do núcleo da placa quente. Sobre estas resistências mede-se a corrente (i) e a tensão (V) para o cálculo da potência térmica (q) dissipada ($q = V \cdot i$). A temperatura das placas frias é mantida constante através de banho termostatizado, marca MQBTZ99-20 da Microquímica. Possui a faixa de operação entre -10 a 40°C e uma flutuação de temperatura inferior a $\pm 0.05^\circ\text{C}$. Leituras de temperatura são realizadas em 40 pontos diferentes no equipamento, os, sensores, termopares tipo T ($\phi = 0.2\text{mm}$), são calibrados individualmente. O termopar tem como princípio de funcionamento a geração de uma diferença de potencial elétrico proporcional a diferença de temperatura de suas junções, chamadas juntas quente e fria. A junta quente é o ponto onde efetivamente se deseja saber a temperatura. A junta fria é uma temperatura de referência, usualmente uma mistura de água e gelo fundente (0°C). Mas, pela dificuldade de elaboração desta referência, optou-se pela utilização de um bloco de referência isotérmico onde se mede a temperatura deste bloco. Construído em aço, possui furos usinados os quais são inseridos as junções dos termopares. Em razão da grande capacidade térmica do bloco, e uma isolamento externa existente, consegue-se uma grande estabilidade na temperatura do mesmo. Para a medição da temperatura do bloco, utiliza-se um sensor tipo termoresistor (PT-100). A propriedade deste sensor é variar suas resistividade com a temperatura, com uma grande linearidade. Realiza-se medições a quatro fios, evitando erros causados pela influência da variação da resistividade dos cabos elétricos, figura 4.

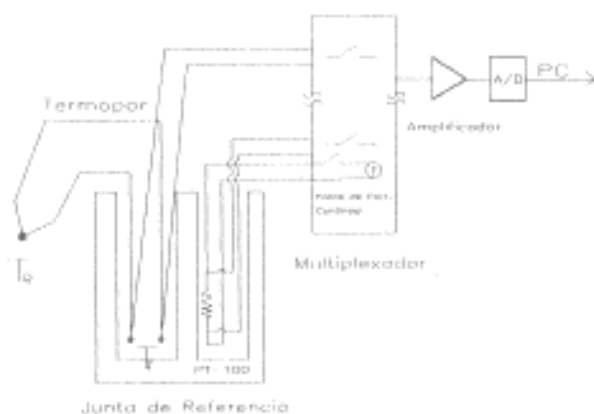


Figura 4: Esquema do sistema de medição de temperatura

Um dos principais problemas encontrados neste sistema foi o auto-aquecimento no termoresistor, em torno de 3°C, ocasionado pela corrente elétrica (10mA) que nele circula para a realização da medição. Como solução o canal de corrente é chaveado, ficando fechado somente no instante da leitura.

MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE

Para minimizar perdas laterais de calor o conjunto experimental é acondicionado em uma caixa revestida, em seu interior, com placas de poliestireno expandido (EPS). O espaço vazio que há entre a caixa e o equipamento é preenchido com pequenas esferas de EPS. A sala em que é realizada os experimentos é climatizada a uma temperatura de 25°C com uma variação de ±0.5K.

Devido a alta capacidade térmica do equipamento as medições duram entre 12 a 24 horas, dependendo do material. Considera-se o regime permanente alcançado quando nenhuma variação é detectada no gradiente de temperatura da amostra a partir de três leituras sucessivas em um intervalo não inferior a duas horas. As variações de temperatura indicadas devem ser randômicas, e a dispersão no valor de condutividade térmica calculada deve ser inferior a 0.5%. Para que o teste seja válido todas as leituras de temperatura em uma face individual, tanto das placas, quente ou frias, quanto das amostras, devem apresentar uma variação inferior a ±0.2K, em relação a temperatura média da face em questão[3].

Para materiais que apresentam um conteúdo de umidade, deve-se medir a massa da amostra imediatamente antes e depois da realização do ensaio e então determinar a variação do conteúdo de umidade. Se a variação for superior a 0.2% em volume, deve-se fazer um ajuste, ou invalidar o ensaio.

CALIBRAÇÃO

Os sensores utilizados foram calibrados individualmente utilizando como sistema de referência um Data Acquisition/Control Unit HP-3852A [10].

Para calibração final do equipamento, que está em andamento como dissertação demostrado, utiliza-se amostras com certificados de calibração emitidas pelo NPL (National Physical Laboratory), London, England[11,12,13,14]. Os valores de condutividade térmica foram medidos de acordo com as normas BS-874 e ISO 8302, para os seguintes materiais:

-fibra de vidro:	$\lambda = 0.0315 \pm 0.0005$ W/mK
-perspex:	$\lambda = 0.1870 \pm 0.004$ W/mK
-nylon:	$\lambda = 0.3440 \pm 0.007$ W/mK
-polythene:	$\lambda = 0.4434 \pm 0.009$ W/mK

ANÁLISE DE ERROS

A condutividade térmica medida através do método de Placa Quente Protegida é obtida indiretamente através da medição de outros parâmetros, da equação 1, aos quais estão

associados uma incerteza de medição. A tabela 2 lista a incerteza de parâmetro.

Tabela 2. Erro dos parâmetros medidos

termo	$\delta \text{ termo} / \text{ termo}$
ΔT	0.011
A	0.0007
q	0.0027
L	0.002

Pela teoria de propagação de erro aplicada a equação 1, tem-se o erro na medição da condutividade térmica pela equação 2:

$$\left(\frac{\delta \lambda}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{\delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 \quad (2)$$

$$\left(\frac{\delta \lambda}{\lambda}\right)^2 = (0.011)^2 + (0.0007)^2 + (0.0027)^2 + (0.002)^2$$

$$\frac{\delta \lambda}{\lambda} = 0.0115$$

Otém-se então um erro para a condutividade térmica em um valor um pouco superior a 1%. Nota-se que a parcela mais significativa para o erro na equação (2) é o termo $\delta(\Delta T) / \Delta T$. Este termo é composto pelas incertezas na medição de temperatura dos sensores tipos termopar e termoresistor. O erro determinado acima é válido somente se as hipóteses adotadas para a equação (1) forem satisfeitas, isto é, que as medições sejam realizadas em regime permanente e fluxo de calor unidimensional. A norma BS874[3] estima o aumento da incerteza de medição de condutividade térmica devido principalmente a estes fatores, para valores inferiores a 3%.

CONCLUSÃO

o método da Placa Quente Protegida é o mais adequado para medição de condutividade térmica em materiais utilizados principalmente na construção civil. Para materiais de alta condutividade térmica recomenda-se outros métodos, em função dos erros de medição aumentarem significativamente.

O equipamento, construído com tecnologia nacional, permitiu a capacitação técnica do nosso laboratório para a medição de condutividade térmica de materiais isolantes. Com um princípio de medição e execução experimental simples, este método apresenta a medição de temperatura como principal fonte de erros. Outros problemas encontrados são a obtenção de regime permanente e fluxo de calor unidimensional.

O equipamento será aplicado para medições em amostras de argamassa e concreto, pretendendo-se ainda o estudo da variação da condutividade térmica com o conteúdo de umidade destes materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AFNOR NFX10-021, 1972, Determination de conductivité thermique avec la **plaque chaude** gardée pour des **échantillons** symétriques.
2. ASTM C177-76: **Standard** test Method for Means Steady-State Thermal Transmission Properties by of the Guarded Hat Plate.
3. BSI BS-874: Guarded Hot Plate, Section 2.1, 1986.
4. GOTHES, S. Um método transiente para a medição de propriedades térmicas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, maio, 1990.
5. GUIMAPIÃES, G. Desenvolvimento de métodos transientes para a determinação simultânea da condutividade térmica e difusividade térmica de materiais. Tese de Doutorado Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, em desenvolvimento.
6. SPARROW, E. m., Error estimates in temperature measurement Measurement in Heat Transfer, Segunda Edição, Hemisphere Publishing Corporation, 1976, MacGrawHill.
7. TROUSSART, L.R. Analysis of Error in Guarded Hot Plate Measurements as Compiled by the Finite Element Method. Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology, ASTM STP 879, p.7-28, 1985.
8. RENNEX, B. Summary of Error Analysis for the National Bureau of Standards 1016mm Guarded Hot Plate and Considerations Regarding Systematic Error for the Heat Flow Meter Apparatus. Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology, ASTM STP 879, p.69-85, 1985.
9. LEIDENFROST, W. Measurement of Thermophysical Properties - Determination of Thermal Conductivity, Measurement in Heat Transfer, Segunda Edição, Hemisphere Publishing Corporation, 1976, MacGraw-Hill.
10. HP3852A DATA ACQUISITION/CONTROL UNIT. Command Reference Manual, Volume 1 e 2, USA, Hewlett-Packard Company, 1996, 1987.
11. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Certificate of calibration. Thermal Conductivity of a Pair of Glass Fibre Specimens, Reference 1231/90/022, England, 1991.
12. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Certificate of calibration. Thermal Conductivity of a Pair of Nylon

of calibration. Thermal Conductivity of a Pair of Perspex Specimens, Reference 1231/90/024, England, 1991.