

Desenvolvimento de Métodos de Avaliação de Transferência de Calor em Materiais e Componentes de Edificações – Caixa Quente

Armelin, J.L., Oliveira, S.M. & Pinto, L.F.M., FURNAS; Güths, S. & Lamberts, R., UFSC.

Resumo—Este trabalho apresenta o dispositivo de medição denominado Caixa Quente Protegida. Esse dispositivo é adequado para determinação das propriedades térmicas de materiais com não homogeneidades, comuns em elementos de edificações. O princípio do método consiste em estabelecer condições conhecidas nos dois lados de uma amostra através de dispositivos de aquecimento e refrigeração nas duas câmaras. Conhecendo-se o fluxo de calor que atravessa a amostra e medindo a temperatura do ar nas duas câmaras opostas, pode-se obter a transmitância térmica da amostra. Se a amostra for homogênea pode-se obter a resistência térmica da mesma (ou a condutividade térmica). Esse trabalho apresenta o dispositivo construído nas dependências do Laboratório de Tecnologia do Ambiente Construído / DCT.T / FURNAS (GO) em colaboração com a Universidade Federal de Santa Catarina. Serão apresentados o dispositivo e os ensaios de validação em materiais homogêneos. Trata-se de um dispositivo com características inéditas no Brasil, abrindo um grande campo de atuação.

PALAVRAS-CHAVES: Caixa quente protegida, Fluxo de calor, Resistência térmica, Transmitância térmica.

I. INTRODUÇÃO

O embargo do petróleo na década de 70, os constantes aumentos de preços de energia e o despertar da consciência ecológica nos últimos anos estão forçando setores da sociedade a rever suas práticas quanto ao uso da energia. No setor da construção civil, a preocupação com a eficiência energética tornou-se evidente [8]. Em São Paulo, nos setores público e comercial, o condicionamento de ar e a iluminação artificial respondem por 20% e 44% do consumo de energia elétrica, respectivamente [5].

Com a crescente evolução dos microcomputadores pessoais, a simulação computacional vem sendo utilizada a fim de se verificar possíveis melhorias no desempenho energético de edifícios. Entretanto, para poder quantificar o consumo energético de uma edificação é indispensável o conhecimento das propriedades térmicas dos elementos construtivos. Tais propriedades podem ser obtidas por ensaios experimentais com equipamentos e procedimentos normalizados [1,2,3,4,6,9,10,14]. Para materiais homogêneos a propriedade básica é a condutividade térmica, medida por equipamentos como a placa quente protegida ou pelo método fluximétrico.

Entretanto os elementos que constituem as edificações são, em geral, sistemas não-homogêneos e não-isotrópicos, com propriedades térmicas que dependem de uma forma complexa da composição das propriedades dos componentes. Neste caso é conveniente utilizar o conceito de transmitância térmica (U), ou coeficiente global de transferência de calor.

O equipamento "Caixa Quente Protegida" é um método estacionário para a medição de propriedades de transmissão térmica de componentes de edificação ou componentes si-

milares para uso industrial [12, 15]. O princípio básico consiste em submeter o painel a um fluxo de calor conhecido (q) e medir a diferença de temperatura (ΔT) nas faces opostas do painel. Caso a diferença de temperatura seja medida na superfície do painel (Figura 1a), o resultado é chamado de Resistência Térmica (R).

$$R = \Delta T / q \quad (1)$$

Caso a diferença de temperatura seja medida no ar (Figura 1b), o resultado é chamado de Transmitância Térmica (U) (ou Coeficiente Global de Transferência de Calor) calculado por:

$$U = q / \Delta T \quad (2)$$

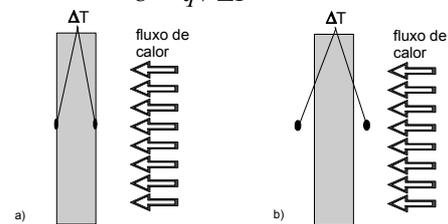


Figura 1 - Princípios de medição:

- a) Resistência Térmica;
b) Transmitância Térmica.

Esse trabalho apresenta o dispositivo construído nas dependências do Laboratório de Tecnologia do Ambiente Construído / DCT.T / FURNAS (GO) em colaboração com a Universidade Federal de Santa Catarina. Serão apresentados o dispositivo e os ensaios de validação em amostras de concreto e madeira ensaiadas no dispositivo Caixa Quente Protegida e no dispositivo Placa Quente Protegida considerado padrão de referência.

II. A CAIXA QUENTE PROTEGIDA

No dispositivo Caixa Quente Protegida o fluxo de calor (q) é gerado por uma resistência aquecedora instalada no interior de uma câmara de cinco lados chamada "caixa de medição". As perdas de calor ao ambiente são anuladas por uma "caixa de guarda" cuja temperatura é controlada de forma a permanecer idêntica à temperatura da caixa de medição durante todo o ensaio.

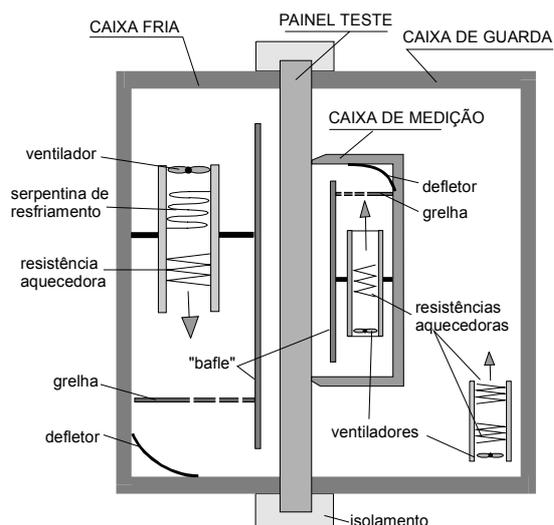


Figura 2 - Arranjo geral da Caixa Quente Protegida

A face oposta da amostra é mantida a uma temperatura constante e inferior à temperatura das caixas de medição e de guarda. É chamada de "caixa fria".

O tamanho do aparelho deve ser projetado de tal forma que possa testar a maior variação possível de painéis representativos em tamanho e configuração de elementos de edificações. Optou-se por um dispositivo com área de medição igual a 1 m x 1 m e região de guarda de 1 m, resultando em uma área total de amostra igual a 3 x 3 m. A fim de simular as condições ambientais, o ar deve circular nas superfícies da amostra de uma maneira previsível. A movimentação do ar é obtida por uma circulação forçada por ventiladores, retificada por uma grelha, condicionada por um defletor e confinada por um "baffle". O movimento de ar à jusante dos ventiladores passa pelas resistências aquecedoras (2000 W), confinado em um invólucro isolante e com superfícies reflexivas para minimizar gradientes de temperatura nas paredes das caixas. Na caixa fria o princípio é semelhante, exceto que o ar varre inicialmente a serpentina de resfriamento (potência igual a 02 TR) para em seguida sofrer um leve reaquecimento na resistência aquecedora (2000 W), controlada por um dispositivo PID.

A figura a seguir mostra o equipamento Caixa Quente Protegida instalado nas dependências do Laboratório de Tecnologia do Ambiente Construído (LASC) do Departamento de Apoio e Controle Técnico (DCT.T) de FURNAS/GO.



Figura 3 - Caixa Quente Protegida - Vista fechada



Figura 4 - Caixa Quente Protegida - Vista aberta

A instrumentação é baseada principalmente na medição da temperatura, que por sua vez utiliza termopares Tipo T, AWG 26 flexíveis. A junta de referência é única para todos os termopares, situada em uma caixa isotérmica localizada no lado externo. A aquisição é realizada por um equipamento AGILENT (modelo 34970A), com 60 canais de entrada analógica, resolução de 0,5 μ V.

Cada face da superfície de medição recebe 09 termopares superficiais e 09 termopares no escoamento. Outros 10 termopares são distribuídos no dispositivo fornecendo informações adicionais.

O isolamento térmico, dito ativo, consiste na manutenção da temperatura da Caixa de Guarda exatamente igual à temperatura da Caixa de Medição, durante todo o ensaio. As temperaturas são medidas por termopares em modo diferencial, sendo que uma das juntas é fixada à superfície interna da caixa de medição, e outra junta mede a temperatura do ar, dentro da Caixa de Guarda. Ao total são 5 termopares diferenciais ligados em série, melhorando assim a resolução de leitura.

A alimentação da caixa de medição exige grande estabilidade, que é obtida por uma fonte de potência da Agilent (modelo E3633A), fornecendo tensão DC, faixa de 0-20 V, 0-10 A.

Nos ensaios de validação da Caixa Quente apresentados

nesse trabalho, a amostra foi instrumentada com transdutores de fluxo de calor a gradiente tangencial (fluxímetros). Trata-se de sensores de fluxo extremamente finos ($300\ \mu\text{m}$), grande sensibilidade e dimensão de $10 \times 10\ \text{cm}$ [7], colados na região central da amostra (um na face quente e outro na face fria). A figura a seguir mostra o fluxímetro e os termopares fixados sobre uma amostra de madeira.



Figura 5 - Termopares e fluxímetro em amostra de madeira

O canal de escoamento da Caixa Fria apresenta forma retangular ($0,15\ \text{m} \times 3,0\ \text{m}$) e, segundo a Norma ASTM, necessita apresentar velocidade de $3,3\ \text{m/s}$ em condição de verão e $6,7\ \text{m/s}$ na condição de inverno. Entretanto, nos primeiros ensaios, foi detectado que a velocidade ficou abaixo dos valores requeridos e apresentando grande não-homogeneidade ($0,2\ \text{m/s}$ a $0,6\ \text{m/s}$). A baixa velocidade foi devido à baixa potência do ventilador instalado ($1\ \text{CV}$), e também ao tipo de ventilador (axial), que não suporta perda de carga elevada. Para aumentar a pressão de insuflamento o ventilador foi trocado por outro modelo mais potente ($5\ \text{CV}$), do tipo centrífugo, apropriado para perdas de carga mais elevadas.

Para homogeneização da velocidade criou-se um plenum, induzindo uma perda de carga ao longo da região de saída, através da instalação de uma placa perfurada e uma manta (filtro de ar condicionado) junto à entrada do escoamento.

A figura a seguir mostra um esquema do dispositivo de insuflamento modificado, onde a bandeja abaixo do evaporador recolhe a água condensada. Foram instaladas resistências aquecedoras à montante e à jusante do evaporador com controles independentes, de forma a possibilitar o controle da umidade relativa no interior da caixa fria.

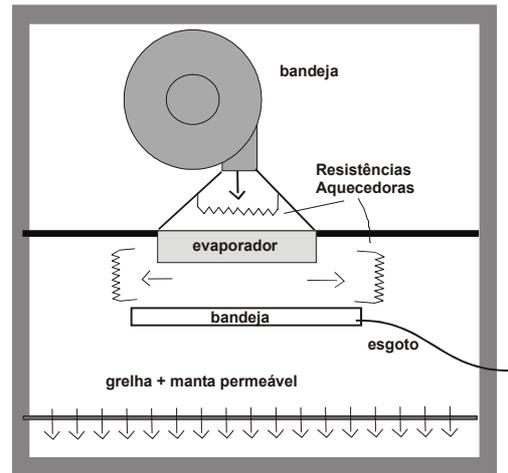


Figura 6 - Esquema do sistema de insuflamento na caixa fria

A Figura 7 mostra o resultado das medições do campo de velocidades em várias configurações.

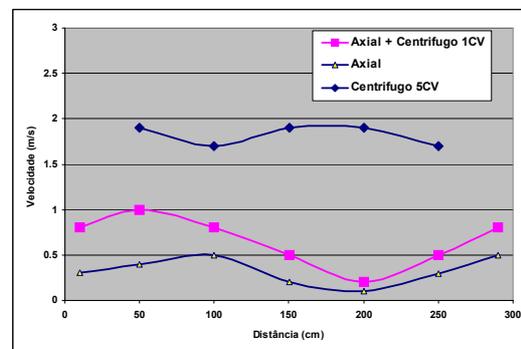


Figura 7 - Distribuição da velocidade ao longo do canal

Pode-se notar que a implementação da manta e placa perfurada melhoraram a distribuição de velocidade e a instalação de um ventilador centrífugo mais potente permitiu o acréscimo da velocidade média. Entretanto a variação ainda é superior à indicada pelas Normas, e o valor médio está abaixo do estipulado para as condições de inverno e verão ($6,7\ \text{m/s}$ e $3,3\ \text{m/s}$, respectivamente)

Pretende-se ainda aprimorar esse dispositivo, incorporando o princípio de um túnel de vento, que proporcionaria um escoamento mais uniforme e com baixa turbulência. Esse caminho já está sendo seguido por alguns novos dispositivos de Caixa Quente Protegida [15] e certamente merecerá uma revisão nas Normas Técnicas existentes.

III. CONSTRUÇÃO DAS AMOSTRAS

As Normas Técnicas (ISO 8302 e ASTM C-177) exigem que o desvio da planicidade das superfícies do corpo-de-prova não deve ser superior a $0,2\ \text{mm}$ sobre toda a largura do mesmo. Trata-se de uma exigência rígida e bastante complexa para ser alcançada em uma amostra de $3\text{m} \times 3\text{m}$. A primeira amostra construída foi de concreto auto-adensável. Para tanto se construiu um suporte em aço com grande rigidez, para que a amostra pudesse ser moldada na posição horizontal e, depois de curada, içada à posição vertical.



Figura 8 - Amostra de concreto sendo preparada



Figura 9 - Amostra de concreto sendo levantada

A espessura foi medida exatamente na posição de fixação dos termopares, minimizando dessa forma eventuais desvios de planicidade. A variação máxima da espessura ficou em 0,52 mm, equivalente a 0,5% do valor medido. Trata-se de um desvio ligeiramente superior ao estabelecido pela norma, mas dado a dimensão da amostra, pode-se considerar aceitável.

Com o mesmo traço foram fabricadas 04 amostras de concreto com 30 x 30 cm de largura e uma espessura de 52 mm (desvio de planicidade de 0,5 mm). Essas amostras foram ensaiadas no dispositivo Placa Quente Protegida do laboratório LMPT/UFSC, sendo considerado padrão de referência. Similarmente foi construído mais um grupo de amostras em madeira (compensado naval), com espessura igual a 27,2 mm (desvio de planicidade de 0,1 mm)

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A figura a seguir mostra o resultado do ensaio de medição da condutividade térmica, realizado na caixa quente protegida, da amostra de madeira (espessura de 27,2 mm) submetida a uma diferença de temperatura superficial igual a 24 °C. A curva superior mostra o valor da condutividade determinada através da potência dissipada na caixa de medição e a curva inferior, a condutividade determinada através do

fluxo de calor médio, medido pelos fluxímetros instalados no centro da amostra.

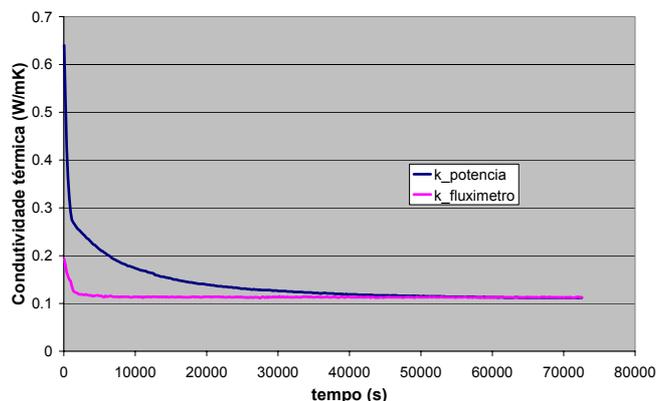


Figura 10 - Ensaio da condutividade térmica de uma amostra de madeira:
i) determinação pela potência;
ii) determinação pelo fluxo.

Nota-se uma excelente concordância entre os valores determinados através da potência dissipada na caixa de medição ($k_{potência}$), e a condutividade determinada através do fluxo de calor médio ($k_{fluximetro}$), medido pelos fluxímetros instalados no centro da amostra. Pode-se notar ainda que a condutividade determinada através dos fluxímetros é obtida muito mais rapidamente que a condutividade medida pelo método convencional da Caixa Quente ($k_{potência}$).

A condutividade térmica também foi determinada em um dispositivo Placa Quente Protegida no Laboratório LMPT do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Os valores encontrados estão apresentados na tabela a seguir.

TABELA 1- CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA MADEIRA MEDIDA NA CAIXA QUENTE PROTEGIDA (FURNAS) E PLACA QUENTE PROTEGIDA (LMPT/UFSC)

Dispositivo	Condutividade Térmica (W/mK)
Caixa Quente Protegida (potência)	0.112
Caixa Quente Protegida (fluxímetros)	0.112
Placa Quente Protegida	0.113

Pode-se constatar a boa performance da Caixa Quente Protegida para o caso analisado. A figura a seguir mostra o resultado do ensaio de medição da condutividade térmica da amostra de concreto (espessura de 99 mm) submetida a uma diferença de temperatura superficial igual a 12,6 °C. O resultado determinado pelos fluxímetros foi prejudicado devido a um mau contato térmico ocorrido durante o ensaio. As oscilações na curva da condutividade ocorreram devido a ajustes do valor da potência ao longo do ensaio.

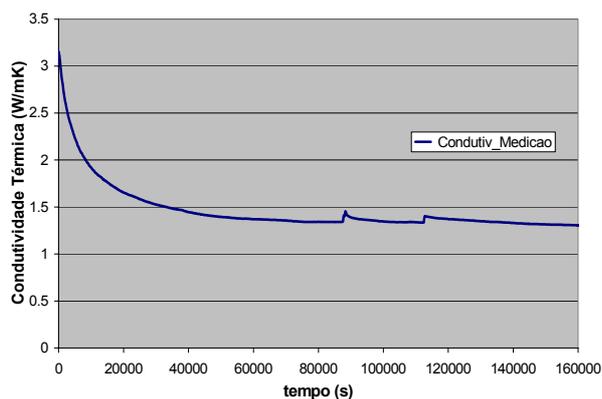


Figura 11 - Ensaio da condutividade térmica de uma amostra de concreto

A condutividade térmica convergiu para um valor igual a 1,30 W/mK. Comparado com o valor medido no LMPT ($k=1,25$ W/mK), a diferença ficou em torno de 4 %, o que é considerado aceitável para essa faixa de medição.

TABELA 2- CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO CONCRETO MEDIDA NA CAIXA QUENTE PROTEGIDA (FURNAS) E PLACA QUENTE PROTEGIDA (LMPT/UFSC)

Dispositivo	Condutividade Térmica (W/mK)
Caixa Quente Protegida (potência)	1,30
Placa Quente Protegida	1,25

V. CONCLUSÃO

O dispositivo Caixa Quente Protegida instalado nas dependências do Laboratório de Tecnologia do Ambiente Construído (LASC) do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS/GO em cooperação com a Universidade Federal de Santa Catarina foi avaliado através de ensaios de amostras homogêneas de concreto e madeira. As amostras foram igualmente ensaiadas em um dispositivo Placa Quente Protegida do Laboratório LMPT/UFSC, considerado padrão de referência. A diferença entre os valores de condutividade foi inferior a 1 % para a madeira e da ordem de 4 % para o concreto. Trata-se de resultados preliminares, mas já se pode afirmar que o dispositivo Caixa Quente Protegida está apto a realizar ensaios de resistência térmica de componentes de edificações. Na continuidade desse trabalho pretende-se aumentar a potência de insuflamento e melhorar a homogeneização do escoamento de forma a permitir a determinação da transmitância térmica com exatidão.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições do engenheiro Rodrigo Junqueira Calixto e dos técnicos Reinaldo de Oliveira Santos e Lúcio Sant'Ana Zimbres, recebidas durante esse projeto.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABNT: Projeto de Norma 02:135. 07-004: Desempenho Térmico de Edificações: Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2003.

[2] ABNT: NBR 6488: Determinação da condutância e da transmitância térmica de componentes de construção por meio do método da caixa quente protegida. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1980.

[3] ASTM: C177: Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the guarded hot plate. American Society of testing Materials, Philadelphia. 1985.

[4] ASTM: C236: Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the guarded hot box. American Society of testing Materials, Philadelphia. 1993.

[5] GELLER, Howard. O uso eficiente da eletricidade: uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil. Rio de Janeiro: INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. 1944. 226 p.

[6] GÜTHS, S. Um método transiente para determinação de propriedades térmicas. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. Florianópolis. 1990.

[7] Güths, S, Philippi, P.C., Gaviot, E. e Thery, P. - *Um Transdutor de Fluxo de Calor a Gradiente Tangencial*. XI Congresso Brasileiro em Engenharia Mecânica (COBEM), Belo Horizonte/MG, 1995.

[8] HIRST, E. et al. Energy efficiency in buildings: progress & promise. Washington: American Council for an energy-efficient economy. 1986. 328 p.

[9] ISO: ISO 8302: Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus. International Organization of Standardization. Geneva. 1991.

[10] ISO: ISO 8990: Thermal insulation - determination of steady-state thermal transmission properties – calibrated and guarded hot box. International Organization of Standardization. Geneva. 1994.

[11] Lamberts, R.; Dutra, L. e Pereira, F.O.R, 1997, "Eficiência Energética na Arquitetura", PW Editores.

[12] LAMBERTS, R. GÜTHS, S. Relatório de recomendações para construção do equipamento caixa quente protegida. Relatório interno. Universidade Federal de Santa Catarina. 2001.

[13] ORNL. Oak Ridge National Laboratory Web site. <www.ornl.gov>, acessado em 17/08/2004.

[14] PHILIPPI, P. C.; NICOLAU, V. P.; CUNHA NETO, J. A. B.; PERIN, M. G.; GÜTHS, S.; FERNANDES, C. P. : Procedimentos para a determinação das propriedades térmicas de materiais e elementos de edificações. Relatório do SITERPA, UFSC. Florianópolis. 1988.

[15] WILLIAMS, R. BALLARD, G. Validation of the NPL ratatata wall guarded hot box with horizontal heat flow. NPL Report CBTLM 25. National Physical Laboratory. 2003.