



## ESTIMAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS A PARTIR DE UM SINAL NATURAL USANDO O MÉTODO TDMA

**Martin Ordenes(1); Roberto Lamberts(1); Saulo Guths(2)**

(1) LabEEE – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail: martin@labeee.ufsc.br  
(2) LMPT - Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

### RESUMO

Os mecanismos de condução de calor através de elementos opacos na envolvente definem o desempenho térmico da edificação e suas repercussões no consumo energético e conforto térmico dos usuários. A envolvente pode ser caracterizada termicamente a partir de dois parâmetros: a condutividade térmica ( $\lambda$ ) e a capacidade térmica volumétrica ( $\rho \cdot c$ ). Estimar estas propriedades térmicas em campo permite caracterizar componentes construtivos em situações reais, isto é, considerando seu desempenho sob condições climáticas específicas, as variações na qualidade dos materiais construtivos, as diferentes técnicas de construção local e o desgaste dos materiais. O artigo apresenta o programa kC, uma ferramenta computacional baseada no método numérico TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm), que permite estimar as propriedades térmicas de um componente homogêneo usando como dados de entrada as variações de temperatura e fluxo de calor nas superfícies internas e externas. Utilizou-se uma amostra de concreto com dimensões e propriedades térmicas conhecidas. Primeiramente, o programa kC foi validado teoricamente apoando-se na solução analítica para a equação de difusão de calor no domínio da freqüência para um sinal periódico. Logo, a amostra foi analisada com três dias de medição em condições de céu nublado, parcialmente nublado e claro para uma mesma semana. As variações térmicas superficiais registradas a cada 15 segundos foram sintetizadas de acordo com os principais componentes espectrais de um sinal natural. Os resultados obtidos na análise teórica fornecem as propriedades térmicas do material com uma acuracidade de 11,66%, observando-se a maior sensibilidade na capacidade térmica volumétrica. Para as medições em campo o programa apresenta variações maiores na estimativa da condutividade térmica. A ferramenta desenvolvida pode ser utilizada para obter as propriedades térmicas de componentes construtivos a partir de um ensaio não destrutivo em que são medidas em campo as temperaturas e fluxos de calor superficiais.

**Palavras-chave:** Propriedades térmicas, Método numérico TDMA, Medição in situ.

### ABSTRACT

Conduction heat transfer through opaque envelope components defines the thermal performance of buildings and their consequences in energy consumption and thermal comfort. The envelope can be thermally described by two parameters: thermal conductivity ( $\lambda$ ) and thermal capacity ( $\rho \cdot c$ ). Estimate these thermal properties in situ allows characterizing real constructive elements considering different aspects such as thermal behavior under a specific weather conditions, quality variation in materials, local constructive technologies and material deterioration. This work presents a method to estimate thermal properties of building elements by a non destructive test applied in situ considering natural thermal periodic variations. Surface temperature a heat flux are measured in a concrete sample (with known thermal properties) and data is processed with a TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) based on finite difference. Theoretical analysis shows an 11.66% precision and the highest variation is observed for the thermal capacity. For real measurements, the algorithm shows a larger variation (mainly for the thermal conductivity). The proposed method can be implemented as a complement for other non destructive test like infrared thermography.

**Keywords:** Thermal properties, Numerical method TDMA, In situ measurements.

## 1 INTRODUÇÃO

A envolvente da edificação integra todos os elementos que separam os ambientes internos das condições climáticas externas (paredes, janelas, telhado e piso). Ela funciona como uma espécie de filtro ou barreira em que ocorrem trocas de energia térmica (calor), umidade e ar (infiltração e ventilação). Os mecanismos de transferência de calor através de elementos opacos na envolvente definem o desempenho térmico da edificação e suas consequências no consumo energético e conforto térmico dos usuários.

As edificações residenciais, comerciais e públicas são responsáveis por 44,2% da energia elétrica consumida no país, sendo o setor residencial responsável por 21,9% e o setor comercial e público por 13,9% e 8,4%, respectivamente. Para o período de 1990 a 2000 observou-se um crescimento anual de 6,1% para o setor residencial e de 7,1% para o comercial. Durante a crise energética de 2001 o consumo chegou a cair em até 20%, mas hoje em dia observa-se uma recuperação das taxas de crescimento anteriores (BEN, 2005).

SINPHA (1999), apresenta a distribuição percentual dos materiais mais utilizados nas paredes de construções residenciais (unifamiliares e multifamiliares), de acordo com o consumo mensal de energia elétrica. Em média, 92,9% dos projetos são construídos com sistemas de alvenaria (blocos cerâmicos ou de concreto) e 4,9% com estruturas de madeira. Isto tem consequências no desempenho térmico da edificação porque as propriedades térmicas da madeira e materiais cerâmicos são diferentes. A condutividade térmica da madeira é 7,5 vezes menor se comparado com a condutividade térmica da cerâmica e 12,5 se comparado com a do concreto (ABNT, 2003).

Os ensaios realizados em laboratórios para estimar as propriedades térmicas têm sido uma contribuição importante na caracterização de diferentes materiais construtivos e no estudo do desempenho térmico de componentes na envolvente. No entanto, o fato de utilizar amostras preparadas e condições controladas para estimar estas propriedades, pode levar a informações inadequadas na análise térmica de edificações já construídas devido a que estes ensaios não consideram questões como desgaste de materiais, práticas locais de construção, condições de uso dos materiais e variações na qualidade.

A busca de um método capaz de obter a condutividade térmica e a capacidade térmica volumétrica, a partir de um ensaio não destrutivo que utilize as informações contidas nas oscilações climáticas foi a primeira motivação desse trabalho.

A norma ISO 9869 (1994), apresenta o procedimento para medir o fluxo de calor em campo para estimar a resistência térmica de componentes. Porém, não existe nenhum método in situ normalizado para a obtenção de propriedades térmicas ( $\lambda$  e  $\rho \cdot c$ ), sendo esse trabalho uma contribuição para o aperfeiçoamento dessas técnicas.

## 2 OBJETIVO

O objetivo geral é explorar as informações contidas na transferência de calor através de um componente homogêneo devidas às variações climáticas (sinal natural) para estimar suas propriedades térmicas: condutividade térmica ( $\lambda$ ) e capacidade térmica volumétrica ( $\rho \cdot c$ ). Pretende-se desenvolver um ensaio não destrutivo para medir as oscilações de temperatura e fluxo de calor nas superfícies do componente e a análise destes sinais naturais será feita a partir do modelo de condução de calor no domínio do tempo, utilizando o método TDMA para resolver o sistema de diferenças finitas.

## 3 METODOLOGIA

A condução de calor em regime transiente está relacionada ao transporte de energia térmica em um meio sólido devido ao gradiente de temperatura ( $T$ ). A pesquisa considera um modelo simplificado, isto é, considerando fluxo de calor unidirecional em uma parede plana, com parâmetros constantes e sem geração de calor interno. A partir do balanço energético é possível determinar a relação de difusão de calor (ou equação de Fourier), uma equação diferencial (1), dependente do tempo e posição.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{d^2T}{dx^2} \quad (\text{eq.1})$$

### 3.1 Método numérico de diferenças finitas

A solução numérica para a equação de difusão de calor utiliza uma discretização do componente (Figura 1), e é conhecida como o método de diferenças finitas. Esta alternativa supõe uma distribuição linear de temperatura entre os pontos que representam o componente construtivo.

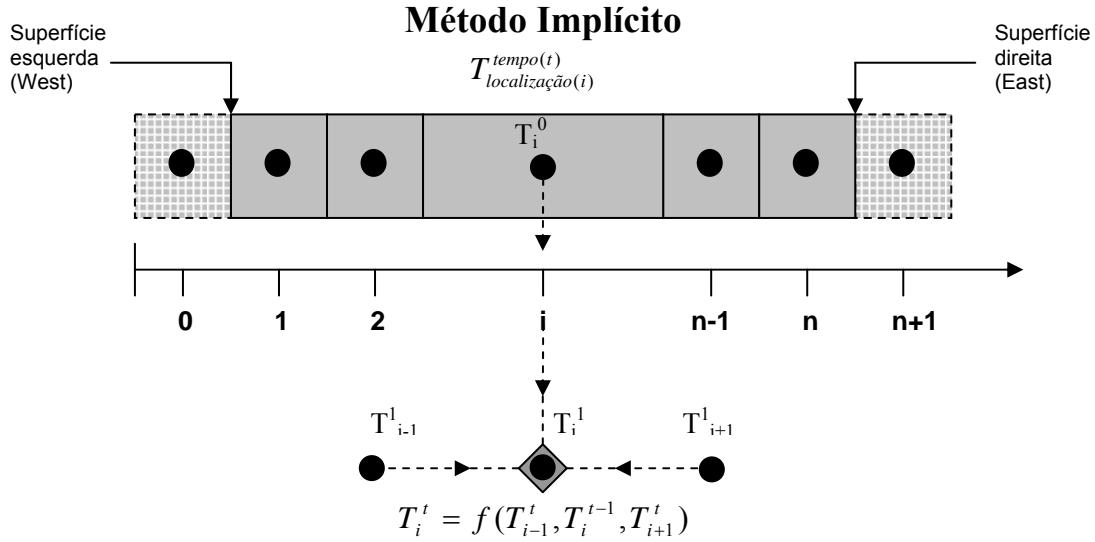


Figura 1 – Discretização para diferenças finitas.

O foco de interesse encontra-se no método implícito de solução, em que a temperatura desconhecida ( $T_i^1$ ) para o tempo futuro é determinada implicitamente pelas temperaturas nos pontos vizinhos no mesmo tempo e a temperatura conhecida no ponto do tempo anterior (Figura 1).

A partir da análise de balanço energético, a relação no ponto i seria:

$$\underbrace{\lambda \cdot \frac{T_{i-1}^1 - T_i^1}{\Delta x}}_{\text{Energia entra}} - \underbrace{\lambda \cdot \frac{T_i^1 - T_{i+1}^1}{\Delta x}}_{\text{Energia sai}} = \rho \cdot c \cdot \Delta x \cdot \underbrace{\frac{T_i^1 - T_i^0}{\Delta t}}_{\text{Energia armazenada}} \quad (\text{eq.2})$$

Os parâmetros conhecidos podem ser agrupados, para cada ponto i, como:

$$a_i \cdot T_i^1 = b_{i+1} \cdot T_{i+1}^1 + c_{i-1} \cdot T_{i-1}^1 + d_i^0 \quad (\text{eq.3})$$

O sistema de equações da forma (3), para todos os pontos, pode ser resolvido a partir do método TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) utilizado por Güths (1994) que é baseado em um processo de substituição da forma:

$$T_i = P_i \cdot T_{i+1} + Q_i$$

Usando a equação (3) é possível determinar os coeficientes  $P_i$  e  $Q_i$  como

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i \cdot P_{i-1}}$$

$$Q_i = \frac{d_i + c_i \cdot Q_{i-1}}{a_i - c_i \cdot P_{i-1}}$$

As relações ( $P_i$  e  $Q_i$ ) permitem calcular os coeficientes  $P_i$  e  $Q_i$  para todos os pontos do componente a partir das condições de contorno em uma superfície que determinam os coeficientes  $P_0$  e  $Q_0$ . Tendo todos os coeficientes  $P$  e  $Q$ , as temperaturas podem ser calculadas a partir das condições de contorno na outra superfície que determinam a temperatura  $T_{n+1}$ . Para facilitar a representação do algoritmo, os pontos extremos do domínio de cálculo são definidos de 1 a N (Figura 1). Para resolver este sistema de equações é necessário conhecer as condições de contorno do sistema (temperaturas ou fluxos de calor nas duas superfícies).

O método numérico por diferenças finitas apresenta uma abordagem mais física do problema. A qualidade de seus resultados depende do detalhe na discretização dos intervalos de tempo e espessura do material. Para a solução implícita no método de diferenças finitas, não existe um valor máximo para o parâmetro  $F_o$  (4), mas a acuracidade diminui quando este parâmetro aumenta (DAVIES, 1995).

$$F_o = \frac{\lambda \cdot \Delta t}{\rho \cdot c \cdot (\Delta x)^2} \quad (\text{eq.4})$$

Foi desenvolvida uma análise de sensibilidade a partir de uma função de sensibilidade definida como a derivada de  $P_i$  e  $Q_i$  para cada parâmetro (5). Cada função foi avaliada em um intervalo de tempo ( $n \cdot \Delta t$ ) para analisar a sensibilidade que estas relações ( $P_i$  e  $Q_i$ ) apresentam para os dois parâmetros de interesse ( $\lambda$  e  $\rho \cdot c$ ).

$$\frac{\partial(P, Q)}{\partial p} \quad (\text{eq.5})$$

### 3.2 O programa kC

Para realizar os cálculos descrito em 3.1 foi desenvolvido o programa kC em conjunto com o LMPT (Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas). O algoritmo permite estimar as propriedades térmicas, dentro de um intervalo pré-definido, a partir do método de mínimos quadrados em que a diferença ( $\Delta$ ) observada entre os valores medidos e calculados (6). Para cada simulação podem ser comparados as temperaturas ou fluxos de calor em diferentes superfícies, dependendo dos dados de entrada.

$$\Delta p = \sum \sqrt{(p_{medido} - p_{calculado})^2} \quad (\text{eq.6})$$

O método de otimização utilizado para estimar as propriedades térmicas da mostra é conhecido como busca exaustiva e consiste em estabelecer uma faixa de variação e intervalos de teste para a condutividade ( $\lambda$ ) e a capacidade térmica volumétrica ( $\rho \cdot c$ ). As equações de solução no método TDMA serão utilizadas para cada combinação de condutividade e capacidade térmica, estabelecendo como propriedades do material aquela combinação que apresentar a menor diferença entre os valores calculados e os valores medidos em campo.

Para avaliar a convergência dos algoritmos usados no programa foram realizados testes usando a solução analítica no domínio da freqüência (CARSLAW e JAEGER, 1959) para gerar dados periódicos de temperatura e fluxo de calor usados como condições de contorno no programa kC.

### 3.3 Ensaio não destrutivo em campo

Foi utilizada uma amostra de concreto com dimensões de 30x30x5 cm, fornecida por FURNAS Centrais Elétricas. As propriedades térmicas foram previamente estimadas a partir do método de placa quente. A condutividade térmica ( $\lambda$ ) foi estimada em 1,23 W/m K e a capacidade térmica volumétrica ( $\rho \cdot c$ ), do material em 2015 kJ/m<sup>3</sup> K.

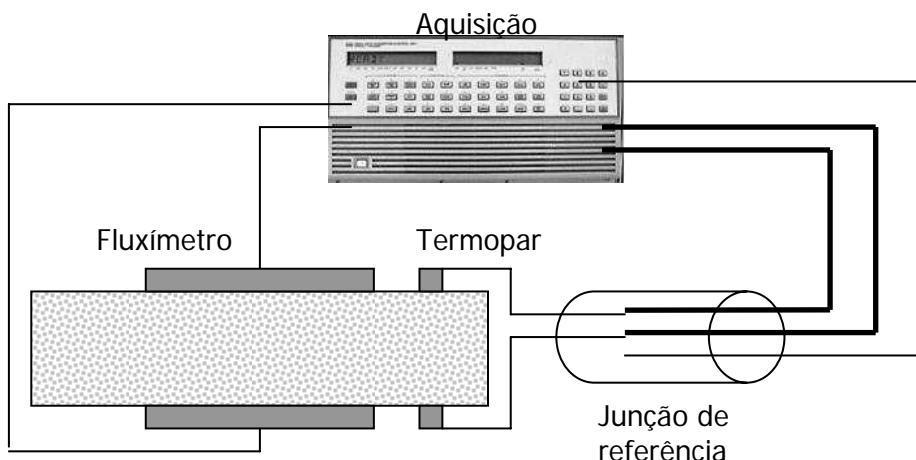
Para evitar a influência das variações de umidade no material foi aplicada uma película de resina acrílica incolor como impermeabilizante de alta resistência (HYDRONORTH, 2005). A amostra também foi pintada com uma tinta preta e com uma superfície orientada para o norte, tentando

aumentar a influência da radiação solar incidente. Para as medições em campo, a amostra foi protegida da chuva e orientada a Norte.

Medições in situ apresentadas em diferentes publicações (WEBER ET AL, 2005; PFAFFEROTT ET AL, 2005; DEFER, 2002) indicam que as principais componentes espectrais que descrevem o sinal natural são compostas por períodos de 24, 12, 8 e 6 horas. As experiências também revelam a dificuldade para interpretar as variações de fluxo de calor e recomendam o uso de ferramentas de processamento de sinais. Assim, os dados obtidos nas medições foram processados através da análise de Fourier (DFT, Discrete Fourier Transform) para sintetizar o sinal nos principais componentes harmônicos, eliminar o ruído no sinal e evitar divergências nos algoritmos de cálculo do programa kC.

O equipamento requerido para realizar as medições em campo consiste principalmente de 4 termopares tipo K compostos pelo conjunto cromel/alumel (poder termoelétrico:  $\alpha = 40,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  para temperatura de  $25^\circ\text{C}$ ) e 2 transdutores de fluxo de calor de gradiente tangencial (superfície de  $10 \times 10$  cm, uma sensibilidade de  $20 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$  e uma espessura de  $300 \mu\text{m}$ ). Os sinais foram registrados por um sistema de aquisição de dados HP 3852A e armazenados por um computador PC Pentium.

A Figura 2 apresenta um esquema da bancada experimental a utilizar para estimar as propriedades térmicas da amostra escolhida a partir de variações climáticas.



**Figura 2 - Esquema de bancada para realizar as medições em campo.**

Para diminuir as incertezas devidas ao gradiente de temperatura que existe dentro do equipamento de aquisição, utilizou-se uma junção de referência em que a temperatura é medida diretamente em um único ponto do sistema de aquisição e as temperaturas superficiais são obtidas a partir da diferença de temperatura com a junção de referência.

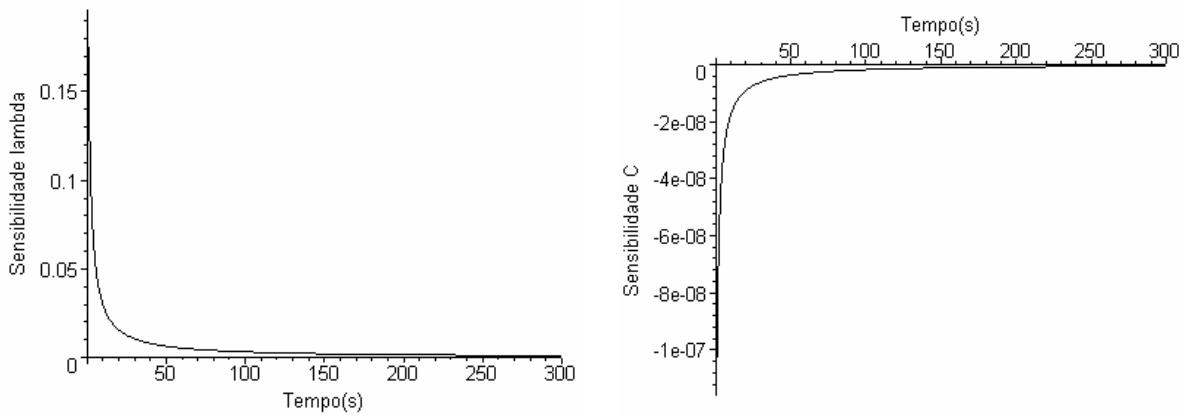
Os dados de temperatura e fluxo de calor superficial serão registrados a cada 15 segundos. Cada ensaio tem uma duração de 24 horas.

Para conferir a condição de fluxo de calor unidirecional na amostra, foi utilizado o programa FEHT (INCROPERA e DEWITT, 2003) para simular as condições internas da amostra a partir das condições de contorno medidas em ambas as superfícies.

## 4 RESULTADOS

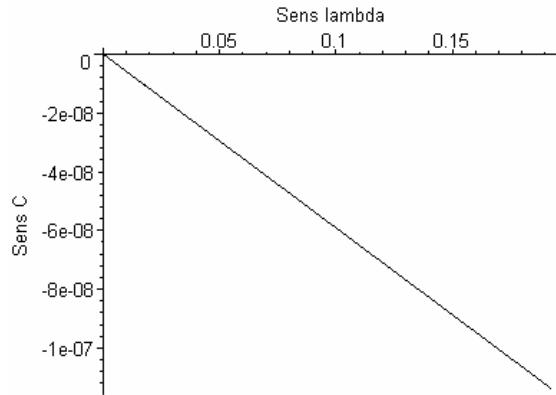
### 4.1 Análise de sensibilidade

A Figura 3 apresenta estas duas funções de sensibilidade ao longo do tempo. Observa-se que as funções apresentam sensibilidade até os 100 s. Para um tempo maior a 100 s as funções não apresentam variações. Embora a importante sensibilidade de  $\lambda$  e  $\rho \cdot c$  as funções apresentam um comportamento similar.



**Figura 3 – Variações na sensibilidade da função  $P_i$  para os parâmetros  $\lambda$  e  $\rho \cdot c$ .**

A Figura 4 apresenta a variação de sensibilidade de  $\lambda$  em função da variação de sensibilidade de  $\rho \cdot c$ . Observa-se que a relação é uma reta passando pela origem, isto significa que estes dois parâmetros são linearmente dependentes e não é possível a determinação simultânea destes parâmetros através do método TDMA. Assim, o método de otimização por busca exaustiva é apropriado para a determinação das propriedades térmicas porque são testadas diferentes combinações destes parâmetros dentro de uma faixa pré-determinada pelo usuário. A mesma análise foi observada na sensibilidade da função  $Q_i$ .



**Figura 4 – Sensibilidade de  $\lambda$  em função da sensibilidade de  $\rho \cdot c$ .**

#### 4.2 Testes do programa kC

Para uma camada de espessura definida e homogênea, a solução formulada por Carslaw e Jaeger (1959) estabelece uma matriz de transferência de calor que entrega a relação entre as variações de temperatura ( $\tilde{\theta}$ ) e fluxo de calor ( $\tilde{\phi}$ ) nas superfícies limites para uma determinada freqüência. A matriz de transferência de calor apresentada na equação (7) é apropriada ao tratamento de problemas de condução de calor na forma de um sistema de entrada e saída de sinais. A, B, C e D são números complexos que resumem as propriedades térmicas do componente.

$$\begin{bmatrix} \tilde{\theta}_1 \\ \tilde{\phi}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_0 \\ \tilde{\phi}_0 \end{bmatrix} \quad (\text{eq.7})$$

A partir desta solução analítica (e considerando as propriedades térmicas da amostra selecionada), foram gerados dados de fluxos de calor e temperatura superficial para duas condições internas de contorno: isoterma ( $\tilde{\theta}_1 = 0$ ) e correspondente com a oscilação externa ( $\tilde{\theta}_1 = \tilde{\theta}_0$ ).

As equações de solução no método TDMA serão utilizadas para cada combinação de condutividade e capacidade térmica (Tabela 1), estabelecendo como propriedades do material aquela combinação que apresentar a menor diferença entre os valores calculados e os valores medidos em campo.

**Tabela 1 – Intervalos de variação para testes de estimativa do programa kC.**

	<b>Mínimo</b>	<b>Delta</b>	<b>Máximo</b>
Condutividade [W/m K]	0,5	0,01	2,5
Capacidade [J/m <sup>3</sup> K]	1500	10	3000

Os resultados que apresentaram maior confiança foram obtidos usando como dados de entrada as temperaturas em ambas as superfícies. Assim, a comparação entre valores medidos e calculados foi realizada em base ao fluxo de calor. A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos para as diferentes condições de contorno interno. A diferença obtida por mínimos quadrados ( $\Sigma_{\text{Erro}}$ ) foi dividida pelo número de intervalos de cada simulação para obter a diferença média (Erro\_Med). A diferença percentual (Erro\_Med %) foi obtida comparando a diferença média com a amplitude média gerada como dado de entrada ( $A_{\text{q''}}$ ).

A estimativa da condutividade térmica ( $\lambda$ ) apresenta estabilidade para as diferentes simulações e consegue acertar o valor definido nas simulações (1,23 W/m K). A estimativa da capacidade térmica volumétrica ( $\rho \cdot c$ ) apresenta variações nos diferentes casos com um desvio máximo de 11,66%, sem ultrapassar o valor definido nas simulações (2015 kJ/m<sup>3</sup> K).

**Tabela 2 – Principais resultados obtidos a partir de simulações realizadas para o programa kC.**

<b>Input</b>	<b><math>A_{\text{q''}}</math></b> [W/m <sup>2</sup> ]	<b><math>\lambda</math></b> [W/m K]	<b><math>\rho \cdot c</math></b> [kJ/m <sup>3</sup> K]	<b><math>\Sigma_{\text{Erro}}</math></b> [W/m <sup>2</sup> ]	<b>Erro_Med</b> [W/m <sup>2</sup> ]	<b>Erro_Med</b> %
$\tilde{\theta}_1 = 0$	$A_0=15[^\circ\text{C}] P=24[\text{h}]$	371.67	1.23	1800	7625.6	6.61
	$A_0=10[^\circ\text{C}] P=24[\text{h}]$	247.78	1.23	1800	5139.2	4.46
	$A_0=7[^\circ\text{C}] P=12[\text{h}]$	177.33	1.24	1780	7392.3	6.41
	$A_0=5[^\circ\text{C}] P=12[\text{h}]$	126.67	1.24	1780	5378.9	4.67
$\tilde{\theta}_1 = \tilde{\theta}_0$	$A_0=10[^\circ\text{C}] A_1=09[^\circ\text{C}] P=24[\text{h}]$	44.01	1.25	2000	1586.2	1.38
	$A_0=10[^\circ\text{C}] A_1=07[^\circ\text{C}] P=24[\text{h}]$	81.58	1.24	1960	2267.1	1.97
	$A_0=10[^\circ\text{C}] A_1=09[^\circ\text{C}] P=12[\text{h}]$	76.15	1.30	2000	3535.6	3.07
	$A_0=10[^\circ\text{C}] A_1=05[^\circ\text{C}] P=12[\text{h}]$	140.14	1.24	1930	5896.4	5.11

#### 4.3 Medições em campo

A Figura 5 apresenta o experimento após a montagem e durante a medição de temperatura e fluxo de calor superficial na amostra de concreto. A bancada experimental foi montada no brise do prédio da Engenharia Mecânica com orientação norte.

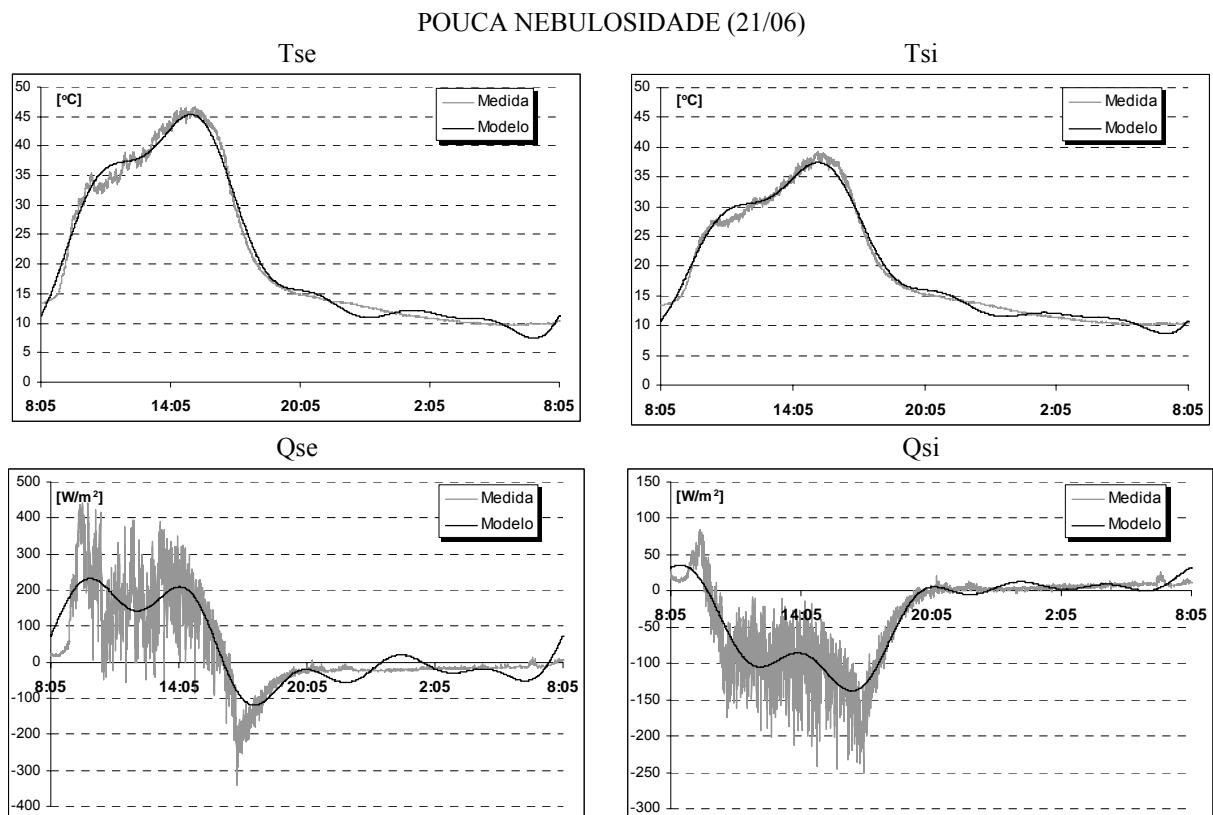


**Figura 5 – Arranjo final do ensaio.**

As medições foram realizadas na terceira semana de junho, apresentando três dias com características diferentes de radiação solar incidente. Assim, os ensaios para cada dia foram classificados de acordo com a nebulosidade (nebulosidade total, nebulosidade variável e pouca nebulosidade).

A Figura 6 apresenta as temperaturas superficiais externas (Tse) e internas (Tsi), assim como o fluxo de calor (Qse e Qsi) medidos em cada superfície para o dia de pouca nebulosidade e o comportamento das oscilações térmicas para as quatro freqüências principais que caracterizam as variações devidas a estímulos naturais (Modelo). Esta análise foi realizada para os 3 dias de medição.

No caso das temperaturas, o modelo representa satisfatoriamente as temperaturas medidas, observando-se diferenças extremas de 3,4 e 2,1 °C nos três dias de medição. Para o fluxo de calor observa-se que as medições registradas a cada 15 segundos variam rapidamente em amplitudes consideráveis durante o dia por causa dos movimentos de ar que acontecem na superfície. Este fenômeno se observa mais claramente nos dias com maior radiação solar. O modelo apresenta um comportamento coerente entre os fluxos de calor medidos nas superfícies. A superfície externa responde de maneira rápida às variações de radiação solar, principalmente nos dias de pouca nebulosidade e nebulosidade variável. Já a superfície interna apresenta certo atraso na resposta devido à resistência térmica do material.



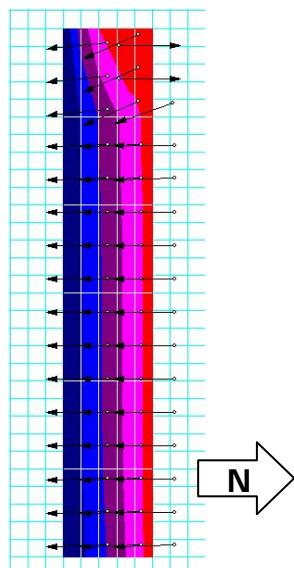
**Figura 6 – Temperatura e fluxo de calor medidos e modelados nas superfícies da amostra.**

A Tabela 3 apresenta os principais componentes harmônicos, para os modelos de temperatura e fluxo de calor superficial para o dia de pouca nebulosidade. Os componentes são organizados de acordo com as amplitudes mais importantes. Em geral, para os três dias, observa-se que as oscilações que definem o comportamento térmico são as variações dia/noite de 24 horas ( $f=11,6 \mu\text{Hz}$ ), as oscilações de 12 horas ( $f=23,2 \mu\text{Hz}$ ) e o valor médio ( $f=0,0 \mu\text{Hz}$ ). Observa-se também que aparece a freqüência de 57,9  $\mu\text{Hz}$  (4,8 h) como componente harmônico importante para o dia de pouca nebulosidade.

**Tabela 3 - Amplitudes térmicas para as principais freqüências no dia de pouca nebulosidade.**

	Tse		Tsi		Qse		Qsi	
	°C	µHz	°C	µHz	W/m <sup>2</sup>	µHz	W/m <sup>2</sup>	µHz
1	21,3	0,0	19,3	0,0	108,5	11,6	61,8	11,6
2	15,9	11,6	11,9	11,6	79,7	23,2	32,7	23,2
3	7,1	23,2	5,0	23,2	42,9	57,9	30,0	0,0
4	2,5	46,3	2,0	46,3	36,4	46,3	18,7	46,3
5	1,9	57,9	1,4	57,9	34,4	0,0	15,7	57,9

A Figura 7 apresenta o perfil da amostra utilizada modelada com as condições de contorno medidas. Os resultados do programa FEHT mostram que durante todo o período de medição o fluxo de calor ( $\leftarrow$ ) se mantém unidirecional no centro da amostra, onde se encontram os sensores de fluxo de calor. A única condição de fluxo bidirecional foi observado no canto superior com orientação norte, devido à radiação solar incidente durante o dia.



**Figura 7 – Condições térmicas ao interior da amostra simuladas a partir de medições.**

#### 4.4 Estimação de propriedades térmicas

A Tabela 4 apresenta o resultado da estimação de propriedades térmicas para a amostra de concreto. Observa-se que a capacidade térmica volumétrica ( $\rho \cdot c$ ) apresenta valores próximos ao valor definido inicialmente, com um desvio de 50 kJ/m<sup>3</sup>K e um valor médio de 2200 kJ/m<sup>3</sup> K. No entanto, a condutividade térmica ( $\lambda$ ) apresenta um desvio de 0,2 W/m K e um valor médio de 1,02 W/m K.

A temperatura média do material para os dias de nebulosidade total, pouca nebulosidade e nebulosidade variável é de 20,7 °C, 20,3 °C e 23,4 °C respectivamente. As amplitudes de temperatura na amostra para estes dias são de 1,38 °C, 21,07 °C e 18,87 °C. No entanto, os ensaios em laboratório normalizados para estimar a condutividade térmica utilizam uma temperatura média de 24,0 °C em regime permanente. Esta situação pode explicar as diferenças nos resultados obtidos, dado que a condutividade térmica varia com a temperatura de ensaio (INCROPERA e DEWITT, 2003).

**Tabela 4 – Estimação de propriedades térmicas para a amostra a partir de sinais naturais.**

	A <sub>q''</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	$\lambda$ [W/m K]	$\rho \cdot c$ [kJ/m <sup>3</sup> K]	$\Sigma$ Erro [W/m <sup>2</sup> ]	Erro <sub>Med</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Erro <sub>Med</sub> %
Neb. TOTAL (15/06)	48,55	1,25(1,6%) <sup>*</sup>	2250(11,7%) <sup>*</sup>	6371,9	22,05	45,41%
POUCA Neb.(21/06)	351,8	0,90(26,8%) <sup>*</sup>	2150(6,7%) <sup>*</sup>	6475,9	22,41	6,37%
Neb. VARIAVEL (22/06)	366,7	0,90(26,8%) <sup>*</sup>	2200(9,2%) <sup>*</sup>	9266,4	32,06	8,74%

\* Erro percentual na estimação de propriedades térmicas

## 5 CONCLUSÕES

O método numérico TDMA permite estabelecer uma relação entre as oscilações térmicas em cada superfície e pode ser utilizado para estimar as propriedades térmicas de componentes construtivos homogêneos.

Utilizar os principais componentes harmônicos no domínio da freqüência permite trabalhar com um método numérico que oferece vantagens em termos de tempo e recursos para realizar os cálculos computacionais associados.

Os componentes harmônicos de temperatura e fluxo de calor superficial observados nos três dias de medição são coerentes com os valores encontrados na bibliografia estudada e com os valores esperados na metodologia de trabalho. As principais freqüências que modelam o comportamento das oscilações térmicas naturais são 11,6  $\mu\text{Hz}$  (24 h), 23,1  $\mu\text{Hz}$  (12 h) e 46,3  $\mu\text{Hz}$  (6 h).

Na estimação a partir de medições feitas na amostra de concreto, as condições com melhor resultado foram as de menor oscilação de temperatura e fluxo de calor (dia de nebulosidade total). Falta estabelecer uma metodologia para determinar quais são as condições climáticas mais apropriadas para cada componente construtivo.

## 6 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15220-2. **Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2:** Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações. Janeiro, 2003.

ABNT NBR 15220-3. **Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3:** Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. Janeiro, 2003.

BEN (Balanço Energético Nacional).  
[http://www.mme.gov.br/site/menu/select\\_main\\_menu\\_item.do?channelId=1432&pageId=4060](http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=4060). 2005.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of heat in solids.** 2.ed. Oxford: At the Clarendon, 1959. 510p.

DEFER, D. **Non-destructive testing of a building wall by studying natural thermal signs.** Energy and Buildings 34, 2002. 7 p.

GUTHS, S. **Anémomètre à effet Peltier et fluxmètre thermique: conception et réalisation, application à l'étude de la convection naturelle.** Tese de Doutorado. Université d'Artois, 1994.

HYDRONORTH. **Produtos** – Divisão de impermeabilizantes. Cambé, Paraná. Disponível em: [http://www.hydronorth.com.br/produtos3.asp?id\\_produto=92](http://www.hydronorth.com.br/produtos3.asp?id_produto=92) Acessado em Junio de 2005.

INCROPERA, F; DEWITT, D. **Transferência de Calor e Massa.** Quinta edição. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2003. 698 p.

ISO 9869. **Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.** 1994. 24 p.

PFAFFEROTT ET AL. **Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models.** Energy and Buildings 37, 2005. 9 p.

SINPHA. Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo. PROCEL / ELETROBRÁS. Núcleo de Estatística Computacional, PUC/Rio. Rio de Janeiro, 1999. CD-ROM.

WEBER ET AL. **Validation of a FEM-program (frequency-domain) and a simplified RC-model (time-domain) for thermally activated building component systems (TABS) using measurement data.** Energy and Buildings 37, 2005. 18 p.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro deste trabalho.