

MERCOFRIO 2000 – CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E FÍSICAS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO PARA A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

CARMEN L. da R. PIETROBON - carmen@cybertelecom.com.br

Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química
87020-900 – Maringá, PR, Brasil

CLÁUDIO E. PIETROBON - carmen@cybertelecom.com.br

Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil
87020-900 – Maringá, PR, Brasil

***Resumo.** Este artigo apresenta o desenvolvimento de instrumentação apropriada para se determinar as propriedades : calor específico médio e condutividade térmica, de diversos materiais de construção Civil. As normas utilizadas são, respectivamente, a ASTM C-351 (1982) de origem norte americana e a DIN 51406 (1976), pelo método do fio quente, de origem alemã, além de sondas térmicas cujos princípios de modelagem físico-matemática foram definidos por CARSLAW-JAEGER (1960). O objetivo destes procedimentos é a obtenção de dados termo-físicos para a aplicação em softwares de simulação do desempenho termo-energético de edificações.*

Palavras-chave: Instrumentação, Calor Específico, Condutividade Térmica, Materiais de Construção, Conservação de Energia.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades termo-físicas é de suma importância para a correta aplicação dos materiais de construção, quer seja em nível de projeto ou de simulação computacional na área de desempenho térmico e energético. No Brasil, não há procedimentos sistemáticos para a determinação e divulgação dessas propriedades nos moldes de um *handbook*, nem tampouco apresentam-se disponíveis nas condições de interesse para a correta utilização. Via de regra, os profissionais reportam-se a manuais de origem estrangeira, diminuindo a confiabilidade do resultado final da utilização, devido às peculiaridades e diferenças intrínsecas dessas propriedades dos materiais de construção. Desta forma apresentam-se a descrição de três aparatos para a medição de duas grandezas físicas e os resultados obtidos para alguns tipos de materiais de construção.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação do calor específico médio, o aparato desenvolvido é constituído de: um calorímetro, um aquecedor, um termômetro de precisão e acessórios periféricos para a sua sustentação e aquisição de dados. O calorímetro consiste de um frasco de DEWAR (500 a 750 ml), contendo um agitador mecânico e um termômetro de precisão (resolução de 0,01° C e amplitude de 19° C a 25° C). Como complemento, apresenta um aquecedor elétrico composto de um tubo cilíndrico de latão (26 cm de comprimento e 14 cm de diâmetro) coberto

com uma folha de mica onde foram dadas 70 voltas de um fio para resistência elétrica de níquel-cromo (30 AWG) e posteriormente isolado com lã de vidro. A temperatura do forno é controlada através de um VARIAC. Contém ainda termopares de cobre-constantan (fios de 0,1 mm) aferidos e ligados a um milivoltímetro digital (4 1/2 dígitos - 199,99 mV). Além disto, há uma cápsula que compreende um cilindro vazado de latão (5,08 cm de comprimento e 2,54 cm de diâmetro) com tampa removível e uma cavidade para o termopar. O ensaio de calor específico consiste, basicamente, em aquecer uma amostra localizada no interior da cápsula, no forno a uma temperatura de 90° C, controlando a temperatura da água em 20° C no frasco de DEWAR. Após o forno estabilizar-se em torno de 90° C, mantém-se o forno por 15 minutos nestas condições, sendo que no quinto minuto lê-se a temperatura da água no frasco de DEWAR e liga-se a agitação. Do sexto minuto ao décimo quinto minuto, lê-se a temperatura da água e do forno a cada minuto

No décimo sexto minuto, transfere-se a cápsula do forno para o frasco de DEWAR e a cada minuto lê-se a temperatura da água até o equilíbrio térmico.

Na seqüência, após a experimentação, monta-se um gráfico cartesiano com o tempo (minuto) na abcissa e a temperatura (° C) na ordenada, do qual extrai-se através de uma regressão linear dos últimos pontos a temperatura T16, que é a temperatura da água extrapolada para o instante do décimo sexto minuto, conforme a figura 1.

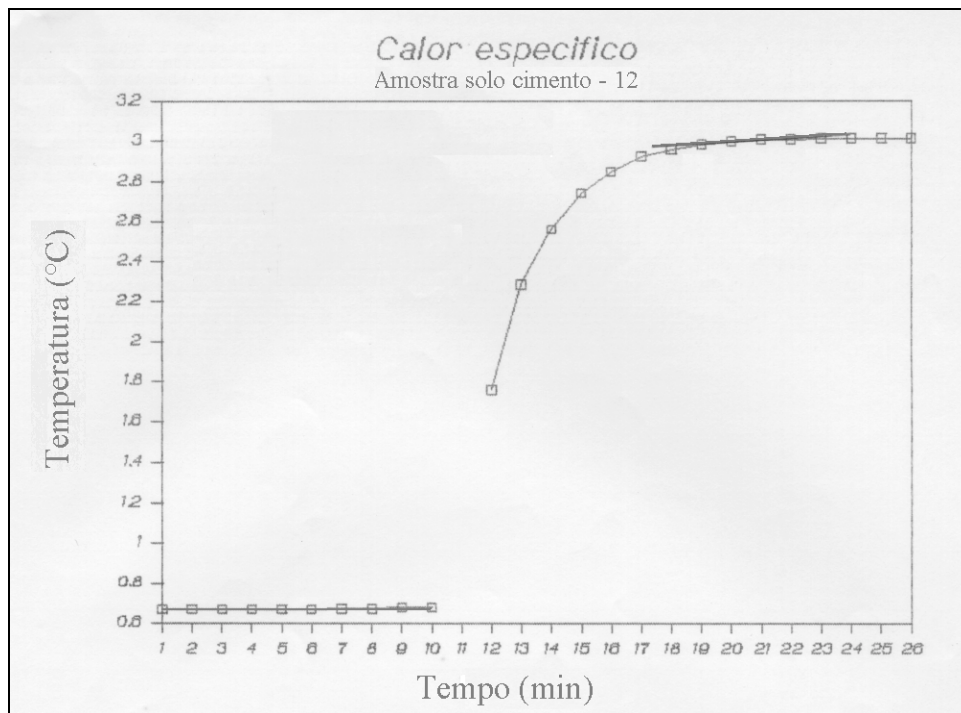


Figura 1 Curva Típica de um Ensaio Padrão.

Mediante as massas da amostra e da água, através do modelo físico-matemático segundo a equação 1, pela qual, determina-se o calor específico da amostra, sendo que o Equivalente grama do calorímetro e acessórios é determinado na calibração do equipamento.

Apresenta-se na figura 2, um esquema do aparato e a indicação dos seus componentes.

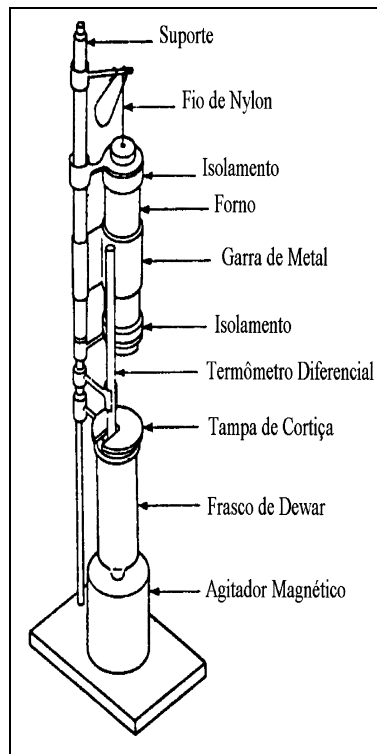


Figura 2. Aparato para Determinação do Calor Específico Médio.

$$C_p = \frac{\left[\frac{(M_w + E) \times C_w \times (T_m - T_c)}{(T_h - T_m)} \right] - M_c \times C_c}{M_s}$$

Onde:

M_s = Massa da amostra de teste (g);

E = Equivalente grama do calorímetro e Acessórios (g);

M_w = Massa da água (g);

C_w = Calor específico da água (1 Cal/g °C);

T_h = Temperatura média da cápsula contendo a amostra no aquecedor (°C);

T_m = Temperatura da mistura extrapolada, $(T_{16} - T_6 + T_{\text{água inicial}})$ (°C);

$M_c \times C_c$ = Capacidade térmica da cápsula (2,5 Cal/°C);

T_c = Temperatura do fluido calorimétrico, água, $(T_{15} - T_6 + T_{\text{água inicial}})$.

Para a determinação de condutividade térmica, foram desenvolvidos dois aparatos funcionando em regime transiente (fio quente e sondas lineares). O primeiro constitui-se um circuito de aquecimento formado por um fio do tipo KANTHAL (diâmetro menor ou igual a 0,35 mm e comprimento de 200 mm), denominado de fio quente. Ele é ligado a uma fonte de tensão estável (corrente contínua) por meio de condutores de cobre (diâmetro menor ou igual ao fio quente). Em seus terminais deve ser medida a voltagem para determinação da potência dissipada, com um voltímetro de precisão adequada. O circuito de medidas de temperatura é formado por um par termelétrico de cobre-constantan (diâmetro semelhante ao do fio

quente). Este par é ligado a outro semelhante, chamado de referência. Ambos se encontram ligados a um sistema de aquisição de dados do tipo datalogger. Tanto o fio quente como o par termelétrico, são colocados paralelamente, entre dois corpos de prova monolíticos bem ajustados. O processo consiste em medir o aumento da temperatura a uma certa distância do fio quente. Plotando-se o aumento da temperatura com o logaritmo do tempo, obtém-se uma curva da qual se extrai o coeficiente de condutividade térmica do material de teste através da equação simplificada de CARSLAW e JAEGER (1959), conforme apresentada a seguir, na equação 2:

$$k = \frac{q}{\frac{4\pi}{d \ln t} \frac{d\Delta T}{d \ln t}}$$

A figura 3 apresenta uma curva típica de ΔT em função de $\ln t_2 / t_1$, tendo-se uma porção linear cujo coeficiente angular será: $q/4\pi k$. Com os valores da tensão aplicada por unidade de comprimento da sonda (q/l) e do coeficiente angular ($q/4\pi k$) calcula-se o valor da condutividade térmica desejada.

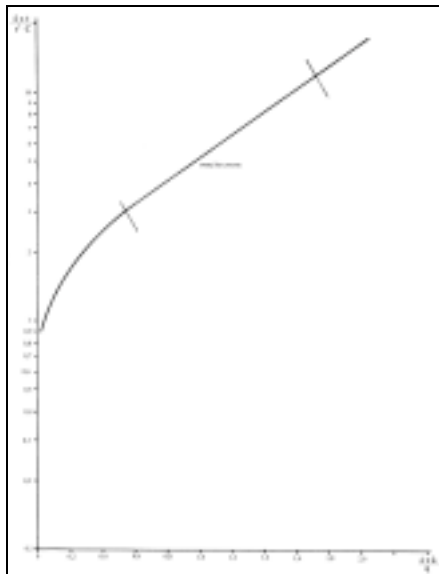


Figura 3. Curva Típica da Relação T=F (T)

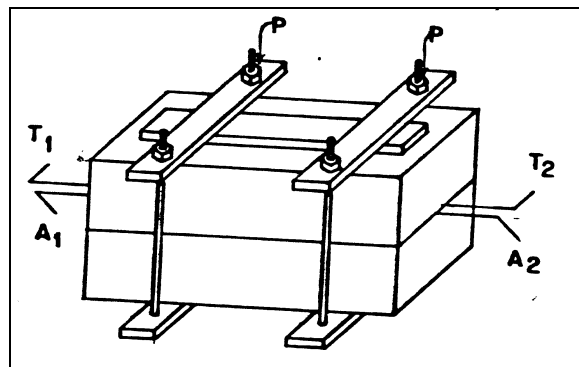


Figura 4. Aparato para Determinação da Condutividade Térmica pelo Método do Fio Quente

Apresenta-se na figura 4 o esquema completo do aparato do fio quente para as medidas da condutividade térmica em regime transiente. A sonda constitui-se de microtubos de aço inoxidável, vazados, de diâmetro máximo de 3 mm, contendo no seu interior uma resistência elétrica (fio do tipo níquel-cromo enrolado de modo bi-filar de pequeno diâmetro). Ainda, um par termelétrico de cobre-constantan com diâmetro menor que 0,1 mm. Ambos devem ser isolados eletricamente, e todo o espaço interno remanescente deve ser preenchido com uma resina de baixa resistência térmica. O conjunto para a medição inclui, também, uma fonte de tensão elétrica estável ligada aos terminais da resistência elétrica, e um sistema de aquisição de dados de variação de temperatura por um registrador potenciométrico. O procedimento de teste consiste em inserir a sonda na amostra com diâmetro de 15 cm e 30 cm de altura, aplica-se a tensão adequada e registra-se a variação da temperatura com o logaritmo do tempo. Deste gráfico, em sua porção linear extrai-se o valor da condutividade térmica, através da equação 2.

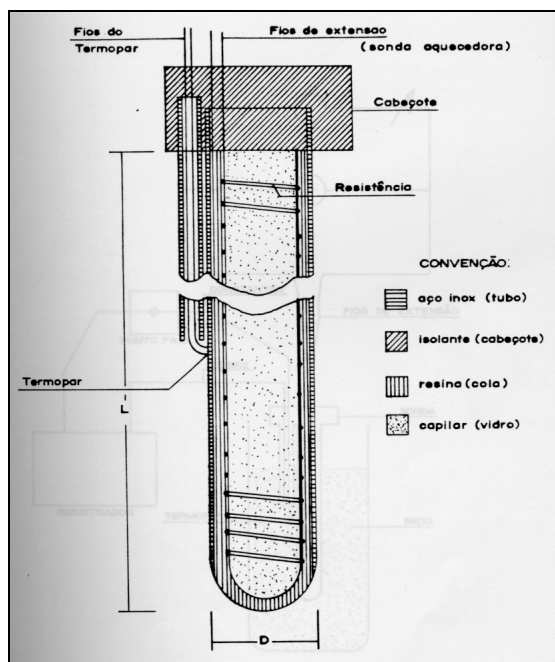


Figura 5. Aparato para determinação da Condutividade Térmica por Sonda Linear

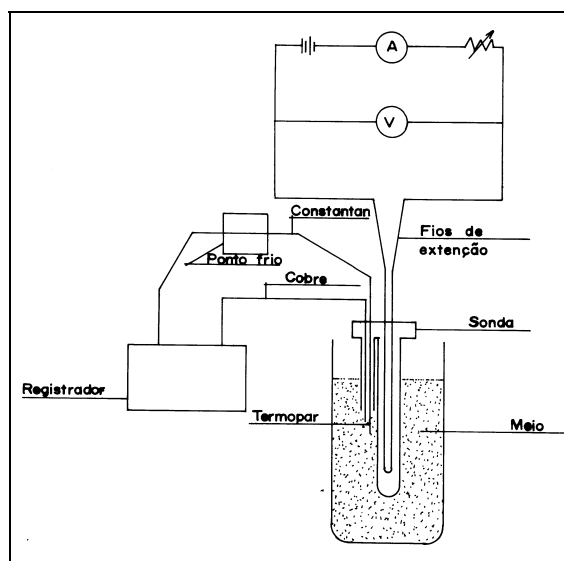


Figura 6. Sistema de medição da condutividade térmica por sondas.

Tabela 1. Características das sondas

Sonda	ϕ_i (mm)	ϕ_e (mm)	l (cm)	l/ ϕ	Ω (ohm)
I	1,75	2,00	9,40	47,0	44,0
II	1,75	2,00	7,20	36,0	34,0
III	2,15	2,16	15,50	56,2	98,5
IV	1,95	2,41	20,40	84,6	43,0
V	1,26	1,65	18,50	112,0	48,0
VI	0,85	1,24	19,20	154,8	66,0

Considerando que as sondas devem ser fabricadas de acordo com o meio a ser testado, tem-se as seguintes considerações

A sonda I com resistência revestida por um micro tubo de aço inoxidável e termopar revestido por outro micro tubo de diâmetro menor apresentou porção linear, e os resultados foram bons, quando testada com areia de várias granulometrias.

A sonda II, similar à sonda I apresentou porção linear e os resultados obtidos nos testes com areias foram melhores do que com a sonda I, comprovando as recomendações de projeto de BLACKWELL (1953).

As sondas III e IV, com resistência e termopar inseridos em um mesmo micro tubo de aço inoxidável, apresentaram bons resultados, quando testadas com madeiras.

As sondas V e VI construídas com termopar inserido no micro tubo de aço inoxidável e a resistência enrolada externamente com um plástico isolando-a do metal apresentaram defeito de construção, o termopar entrou em curto circuito elétrico com o metal.

2.2 Calibração

Os equipamentos foram calibrados através de padrões, em laboratório credenciado do IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas, localizado em São Paulo -SP, por meio de recomendações normativas de instrumentação laboratorial desenvolvidas por este instituto.

2.3 Materiais

Os materiais escolhidos são : agregados miúdos de concreto, gesso, cimento, blocos cerâmicos vazados, solo-cimento, pisos cerâmicos, azulejos lisos brilhantes e acetinados, chapas de cimento-amianto, chapas de fibras de madeira e madeira beneficiada de essências arbóreas nativas da região: Peroba Rosa (*Aspidosperma polineuron*) e Canafístula (*Pelthoforum dubium*), além de outras madeiras menos comuns.

3. RESULTADOS

3.1 Calor Específico

Para o caso de materiais de construção não moldados in loco foi necessário testar vários arranjos de formas variadas (material granular de moagem, cubos, irregulares, e cilíndricas fatiadas). Destes arranjos a forma cujos melhores resultados se obtiveram foi a de cilindros fatiados em relação ao material moldado in loco, no caso, o material solo-cimento. Os resultados apresentam-se na tabela 3.1, a seguir. Para o solo-cimento moldado in loco , na calibração o desvio máximo foi de 3,2% e no caso dos cilindros fatiados foi 13,0%, ambos com relação ao padrão do IPT.

3.2 Condutividade Térmica

A fim de verificar o desempenho das sondas construídas segundo BLACKWELL (1953,1954) utilizaram-se materiais granulares (areia, solo-cimento moído cimento *portland* e gesso) para a calibragem . As madeiras : Ipê, Castanheira, Cedrilho, Tamboril, foram medidas e calibradas segundo os padrões do IPT. Os resultados apresentam-se na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2. Resultados de Calor Específico

Tabela 3. Resultados de Condutividade Térmica Obtidos com Sondas Lineares .

AMOSTRA	Cp (Cal/ g ° C)	AMOSTRA	k (W/m ° C)
Solo-Cimento (7%)	0,206	Solo-Cimento (7%)	0,270
Piso Cerâmico	0,222	Areia Lavada Grossa	0,300
Cimento-Amianto	0,285	Gesso em Pó	0,130
Madeira Aglomerada	0,428	Cimento Portland Pó	0,110
Azulejo Acetinado	0,229	Ipê	0,240
Azulejo Brilhante	0,211	Cedrilho	0,140

-	-	Tamboril	0,140
---	---	----------	-------

Os resultados dos testes de desempenho das sondas construídas, em meios porosos e granulares, mostram que em condições similares, os desvios são significativos e dependem do próprio tipo de sonda e do meio poroso. Entretanto no caso das madeiras, que são meios sólidos, em que pese a sua anisotropia os resultados apresentam-se com desvios não significativos em relação aos padrões do IPT. Neste caso os desvios são da ordem de 1%

O protótipo do aparato do Fio Quente, está em fase de calibração, conforme sugere a norma alemã DIN 51406 (1976) e até o presente momento os ensaios foram efetuados com amostras de madeira: Peroba Rosa e Canafístula.

Os ensaios iniciais foram feitos com uma amostra de cada tipo de madeira. Os resultados apresentam-se na Tabela 4 e foi feita uma comparação com uma correlação empírica indicada para madeira seca em estufa e no volume verde. O sentido de medição adotado é longitudinal em relação às fibras. Tal correlação definida por TYE (1969), apresenta-se a seguir na equação 3.

$$k = \rho (0,1159 + 0,00316 M) + 0,01375$$

Onde:

ρ = densidade da madeira (g/cm³);

M = umidade da madeira (%);

k = condutividade térmica (Btu/h ft °F).

Tabela 4. Resultados Obtidos com o Protótipo do Aparato de Fio Quente.

AMOSTRA	k(W/m K)	k (correlação)	DESVIO (%)
PEROBA	0,343	0,354	3,1%
CANAFÍSTULA.	0,322	0,330	2,4%

Apresenta-se, ainda, na figura 7, a relação $T = f(t)$, para um ensaio com amostra de Peroba Rosa.

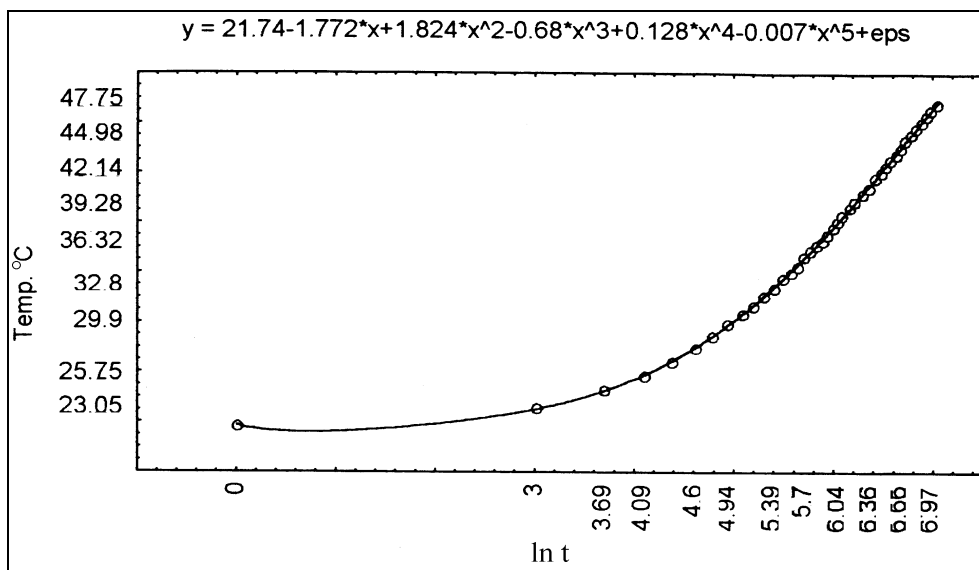


Figura 7. Curva Típica da Relação $T=f(t)$

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os aparatos desenvolvidos tem dupla finalidade, a primeira destina-se para o uso em disciplinas laboratoriais do nível de graduação, e a segunda para a pesquisa e no nível de pós-graduação. A pesquisa em pauta pretende o desenvolvimento dos aparatos, a sua calibração e a obtenção de um banco de dados dos materiais de construção mais comumente empregados na construção civil para aplicação em *softwares* de simulação do desempenho termo-energético de edificações, além de outros de interesse da engenharia química.

Os resultados, até o presente momento, têm sido comparados com padrões do IPT, cujo laboratório é credenciado para tais atividades, e o desempenho dos aparatos desenvolvidos tem sido periodicamente comparado e apresentam resultados consistentes.

Pretende-se continuar, tanto com o desenvolvimento de aparatos desta natureza quanto ampliar o tipo e a qualidade de materiais a serem ensaiados, buscando o conhecimento de suas características termo-físicas.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE -ASHRAE Handbook and Products Directory-1977. “**Fundamentals**”, New York. (1977)
- ASTM - 303 - 72., “**American Society for testing and Materials**”. (1972).
- ASTM - C - 351 - 82.,” Standard Test method for mean specific heat of thermal insulation .(1982).
- BLACKWELL J.H.,” A transient - flow method for determinations of thermal constants of insulation materials in bulk.” **J. of Apply. Phys.** 25, 2 (1954).
- BLACKWELL J.H., “Radial - Axial heat flow in regions bounded internally by circular cylinders. “ **Can. J. Phys.** 31, 472. (1953)
- CARSLAW H.S., J.C. JAEGER “**Conduction of heat in solids.** “, Oxford, Oxford Univ. Press. (1959.)
- DEUTSH INSTITUT FUR NORMUNG-DIN 51046.”**Determination of thermal conductivity according to the heating wire method.**” (1976).
- ERKELENS H.J., ”Development of a probe for measuring the coefficient of thermal conductivity in building materials. **J.I-HVE.**, 281 (96), (1960).
- PIETROBON C.L.R. “**Desenvolvimento de sistemas para determinação da condutividade térmica.**” São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, Dissertação de Mestrado. (1988).

TYE R.P. "Thermal conductivity. ", v.1 and 2, Academic Press, London and New York. (1969).

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CONSTRUCTION MATERIALS
THERMAL AND PHYSICS PROPERTIES FOR ENERGY CONSERVATION**

ABSTRACT

This paper presents the development of appropriate instruments to obtain the following properties: medium specific heat and thermal conductivity of some construction materials. The standards used are: ASTM C-351 (1982) from USA, DIN 51406 (1976) from Germany and thermal probe with mathematical and physical model was defined by CARSLAW-JAEGER (1960). The aim of this procedures is to use it in buildings thermal and energetic performance softwares .