

MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA \*

FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR \*\*

São apresentados os resultados da experimentação realizada com o objetivo de determinar a condutividade térmica da madeira de algumas espécies de eucalipto em função da densidade e da umidade, para possibilitar uma utilização mais adequada da madeira de eucalipto na habitação.

Results of experimentation are presented with the objective to determine the values obtained in test of specific thermal conductivity of some species of Eucalyptus Wood in function of density and humidity, to enable a more appropriate utilization of the wood from eucalyptus in dwelling construction.

## 1- INTRODUÇÃO

Uma construção deve obedecer, entre uma série de outros requisitos, a função de proporcionar conforto aos seus usuários, desde o conforto térmico até o lumínico. Este trabalho está diretamente ligado ao conforto térmico das construções de madeira.

Podemos considerar uma pessoa em conforto térmico quando está satisfeita com o ambiente térmico que o circunda.

Esta condição é resultado da interação de três fatores principais:

- o clima;
- a construção;
- próprio do homem.

O objetivo mais amplo e geral deste estudo é a determinação da condutividade térmica nas madeiras de eucaliptos, com a finalidade de permitir o uso adequado, garantindo o conforto térmico nas edificações.

Segundo a DIN 51046 (1978):

"A condutividade térmica ( $\lambda$ ) é uma propriedade do material, a qual indica a grandeza do fluxo de calor que dentro de um dado de temperatura, atravessa a superfície de madeira sob efeito de um gradiente de temperatura na direção normal a superfície".

## 2- BASES TEÓRICAS DAS METODOLOGIAS

Para uma correta análise do transiente térmico determinado através do método do fio quente paralelo, faz-se necessário o conhecimento de sua fundamentação teórica que parte das seguintes considerações:

- fonte de calor (fio quente) é assumido como

\* Engenheira Civil. Pós-graduanda em Mestrado do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) EESC-USP. Av. Dr. Carlos Botelho nº 1465. Caixa Postal 359. São Carlos, SP, Brasil - CEP 13560.

\*\*Professor Doutor, do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) EESC-USP. Av. Dr. Carlos Botelho nº 1465. Caixa Postal 359. São Carlos, SP, Brasil. CEP 13560.

- sendo uma fonte ideal de calor, no caso como dimensões infinitamente fina e longa, em relação às dimensões do corpo de prova em estudo;
- admite-se que o material, cuja condutividade térmica está sendo estudada, circunda a "Linha geradora de calor" até o infinito;
- quantidade de calor liberada por unidade de tempo e por unidade de comprimento é constante; isto se consegue mantendo a corrente elétrica constante;
- material em estudo deve ser homogêneo e uniforme.

Estabelecida estas condições, o coeficiente de condutividade térmica ( $\lambda$ ) pode ser determinado através da equação:

$$\lambda = \frac{R \cdot I^2}{4 \pi \ell} - \frac{Ei\left(\frac{r^2}{4at}\right)}{\Delta T(t)}$$

onde:

- $\lambda$  = coeficiente de condutividade térmica (W/m.<sup>0</sup>K)
- R = resistência elétrica do fio ( $\Omega$ /m)
- I = intensidade de corrente elétrica (A)
- $\ell$  = comprimento do fio (m)

$\Delta T(t)$  = gradiente de temperatura em K, calculado a partir de um polinômio associado ao tipo de termopar usando, o tipo T (<sup>0</sup>K)

$$-Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right) = \text{integral exponencial } \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \text{ obtida em}$$

$$\frac{\Delta T(2t)}{\Delta T(t)}$$

## 3- CONHECIMENTOS EXISTENTES

Há na bibliografia sobre o assunto, citações a diversos métodos para a determinação da condutividade térmica de materiais. Podemos destacar as literaturas européia, americana e alemã, que já tem desenvolvido estudos a respeito do assunto. No Brasil está se inici

ando agora o interesse pela condutividade térmica da madeira.

BEGER (1986) afirma que as propriedades térmicas da madeira são extremamente importantes. Entretanto, o calor específico da madeira é de menor importância comparando com a condutividade térmica.

Devido a estrutura anatômica, a madeira é pouco condutora de calor. A condutividade térmica da madeira varia com a direção das fibras, densidade, umidade, distribuição, espécies e quantidade de extrativos, características como trincas, nós e fibras atravessadas. A condutividade térmica é aproximadamente a mesma nas direções radial e tangencial, mais geralmente 2,5 vezes maior ao longo das fibras.

Em uma mesma direção aumenta significativamente com o teor de umidade, talvez de um terço para um aumento de 40% do teor de umidade.

A norma NBR 6488 (1980) da ABNT diz o seguinte:

"Prescreve que deve ser aplicada para a determinação da condutância e transmitância térmica de painéis, projetada para medição em painéis não homogêneos representativos de construções tais como janelas, paredes, tetos e pisos de edifícios".

Vale, ainda salientar que se aplica também para qualquer componente sendo possível construir um painel razoavelmente representativo de tamanho apropriado à aparelhagem.

A ASTM C177-63 (1963)<sup>(1)</sup> visa a determinação de existência de condutividade térmica de espécies secas isoladas, construção e outros materiais. Nessa aparelhagem de placas quentes elas são protegidas por superfícies metálicas e geralmente usadas para medições em instrumentos de temperaturas semelhantes. Essa temperatura pode ser de superfície fria a  $-100^{\circ}\text{F}$  ou de superfície quente a  $+500^{\circ}\text{F}$ .

Já o IPT (1986) fez uma adaptação dos métodos usados em países estrangeiros. O método a ser aplicado, em geral é determinado pelo material a ser ensaiado.

Os métodos adaptados são os seguintes:

- a) placas quentes;
- b) linha geradora de calor;
- c) caixa quente protegida,

A norma DIN 51046 (1978)<sup>(2)</sup> considera o método do fio quente como método de medidas dinâmica onde o princípio é a medida da elevação de temperatura de uma fonte de calor linear contida no corpo de medida, com a fonte emitindo energia constante.

No campo de prova a fonte que dissipa calor é um fio que denominamos de fio quente e fica paralelo ao termopar. A variação da temperatura do fio quente, após fechamento de aquecimento, é função consequentemente da condutividade térmica do material.

#### 4- CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO UTILIZADO

O método utilizado foi o "Método não estacionário: Fio Quente".

Consiste em fazer as determinações de difusividade térmica ( $\alpha = \text{m}^2/\text{s}$ ), de condutividade térmica ( $\lambda = \text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{K}$ ) e do calor específico ( $cp = \text{J}/\text{Kg}\cdot^{\circ}\text{K}$ ) de materiais isolantes térmicos. Isto é, problema de condução de calor em que o material sofre variação de temperatura.

SANTOS & CINTRA FILHO (1986) compararam os métodos ASTM e Fio Quente, e concluíram que o método do fio quente foi melhor que o da ASTM. Porém cabe lembrar

(1) Tradução da Norma ASTM C177-63 (1963) - Thermal conductivity of materials by means of the guarded hot plate. Philadelphia. 1963.

(2) Tradução da Norma DIN 51046 parte 2, novembro de 1987. Essai des matières premières et produits céramiques. Détermination de la conductivité thermique jusqu'à  $1600^{\circ}\text{C}$  par la méthode du fil chaud. Conductivité thermique  $\leq 25 \text{ W}/\text{K}\cdot\text{m}$ . Méthode en parallèle. Paris.

que a escolha de um ou de outro método deve considerar o material e as suas particularidades quando em uso, bem como a disponibilidade de equipamentos e técnicos especializados.

O método do fio quente é de fácil manuseio e de implementação rápida. Não exige equipamentos sofisticados, dispensando importações pois todos os equipamentos são produzidos no Brasil. As determinações são rápidas e com boa precisão. Apesar do método do fio quente possuir outros arranjos experimentais, neste trabalho utilizou-se a "Técnica do Fio Quente Paralelo".

A preocupação em testar a aplicação do método em madeiras, deve-se ao fato de que quando esta é empregada em construção de habitações, influencia no conforto térmico proporcionado aos usuários. Esta influência acontece ao longo das 24 horas do dia.

#### 5- MATERIAL E MÉTODOS

Este método é aplicado a corpos de prova homogêneos porosos ou densos bem como aos materiais pulverulentos, em grãos ou às espumas inorgânicas. Completa a DIN 51046 que a medida do coeficiente de condutividade é  $\leq 25 \text{ W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{K}$

##### 5.2- Materiais

O estudo realizado utilizou corpos de prova da madeira de "eucalipto microcorys, saligna e tereticornis" com as seguintes dimensões  $240 \times 120 \times 60$  (mm).

As madeiras foram obtidas no Horto de Itatíngá localizado no município de Itatíngá, São Paulo, na latitude de  $23^{\circ}10'5$  e  $48^{\circ}40'$  de longitude a oeste de Greenwich, a uma altitude de 857m.

O clima da região, citada pelo Departamento de Silvicultura da ESALQ/USP (1989) é um Cwa, com temperatura média anual de  $21^{\circ}\text{C}$  e uma precipitação anual de 1296 mm.

Na área predominam solos "Latossóis e Podzóis", e o relevo é suave e ondulado.

Os materiais usados foram:

- a) 01 Fonte estabilizadora de corrente TCA 40-10;
- b) 0,25 metros de fio Khantal ( $R = 7,88\Omega/\text{m}$ ) - "fio quente";
- c) 01 Termopar tipo (cobre-constantan);
- d) 01 Milivoltímetro (monitoração);
- e) 01 Registrador gráfico tipo x-t;
- f) corpos de provas de madeiras com dimensões nominais de  $240 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ .
- g) Madeiras usadas para os corpos de prova: "eucalipto microcorys, saligna e tereticornis" com 30%, 20% e 12% de umidade.

##### 5.2- Métodos

LIMA (1989) em seu trabalho exploratório, utilizou a técnica denominada "Fio Quente Paralelo", que é uma das variações do método fio quente ou linha geradora de calor. Esta técnica necessita de 4 corpos de prova (cps) para a determinação do coeficiente de condutividade térmica do material, nas dimensões citadas acima. Tomando-se a dimensão de 240 mm no sentido para lelo às fibras (axial), será determinado o coeficiente de condutividade térmica na direção transversal às fibras da madeira. Em um dos corpos de provas são feitas duas ranhuras paralelas sendo uma central com diâmetro ligeiramente inferior ao fio (fonte), e a outra distanciada da primeira 15 mm e com diâmetro ligeiramente inferior ao do termopar. Sobre este corpo de prova é então colocado um segundo corpo de prova sendo que as faces justapostas devem ser perfeitamente polidas (planas), para evitar a formação de bolsões de ar que mascaram o transiente térmico e consequentemente diminuir a precisão dos resultados.

Para uma maior precisão é necessário que os corpos de provas estejam com temperatura e umidade equilibradas no início do ensaio.

A fonte, com tensão constante e corrente contínua deve ser ligada ao fio de Khantal. O termopar deverá estar ligado ao registrador gráfico x-t. A escala do registrador gráfico deverá estar adequadamen-

te ajustada.

A figura 1 mostra o arranjo experimental e se encontra no anexo 1.

6- ENSAIOS REALIZADOS E RESULTADOS.

Foram realizados ensaios com três espécies de eucalipto: microcorys, saligna, tereticornis, com densidade baixas, médias e alta respectivamente.

O arranjo se encontra montado no LAMEM ele consta de um fio Khantal, resistência de 7,88  $\Omega$ /m, ligado através de um condutor de cobre a uma fonte estável de corrente contínua. A potência dissipada na resistência é diretamente medida por um wattímetro. O circuito de leitura de temperaturas consta de dois termopares, um de leitura e outro de referência, conectados a um sistema de aquisição de dados.

Os termopares são de cobre - constantan,  $\phi = 0,226$  mm e estão ligados a uma placa de aquisição de dados para termopares (HP-44421-A) conectada a um "Sistema de Aquisição de Dados", HP-3497A e a um micro computador HP-9825B. Deste modo pode-se obter a conversão direta dos milivolts acusados pelo termopares em temperatura, graus Kelvin.

TABELA DOS RESULTADOS

AMOSTRA	CONDUTIVIDADE (W/m.K)	UMIDADE %
TERETICORNIS	0,692	30%
	0,263	
	0,311	
	0,349	
	0,348	
	0,409	
	0,345	
	0,437	
	0,406	
	0,506	
	0,351	
	0,413	
	0,368	
0,342		
SALIGNA	0,392	30%
	0,276	
	0,471	
	0,260	
	0,427	
	0,275	
	0,321	
	0,291	
	0,441	
MICROCORYS	0,209	30%
	0,270	
	0,229	
	0,520	
	0,224	
	0,319	
	0,217	
0,323		

AMOSTRA	CONDUTIVIDADE (W/m.K)	UMIDADE %
TERETICORNIS	0,135	20%
	0,397	
	0,568	
	0,349	
	0,423	
	0,294	
	0,406	
	0,381	
	0,434	
	0,338	
	0,666	
	0,192	
	0,639	
	0,251	
SALIGNA	0,181	20%
	0,511	
	0,221	
	0,213	
	0,425	
	0,156	
	0,353	
	0,321	
	0,415	
	0,172	
0,309		
MICROCORYS	0,294	20%
	0,235	
	0,154	
	0,275	
	0,433	
	0,184	
	0,295	
0,326		
TERETICORNIS	0,387	12%
	0,162	
	0,581	
	0,454	
	0,490	
	0,271	
	0,525	
	0,336	
	0,429	
	0,162	
	0,644	
	0,323	
	SALIGNA	
0,184		
0,205		
0,336		
0,182		
0,280		
0,105		
0,434		
0,243		
0,247		
0,380		
MICROCORYS	0,186	12%
	0,229	
	0,246	
	0,175	
	0,231	
	0,122	
	0,327	

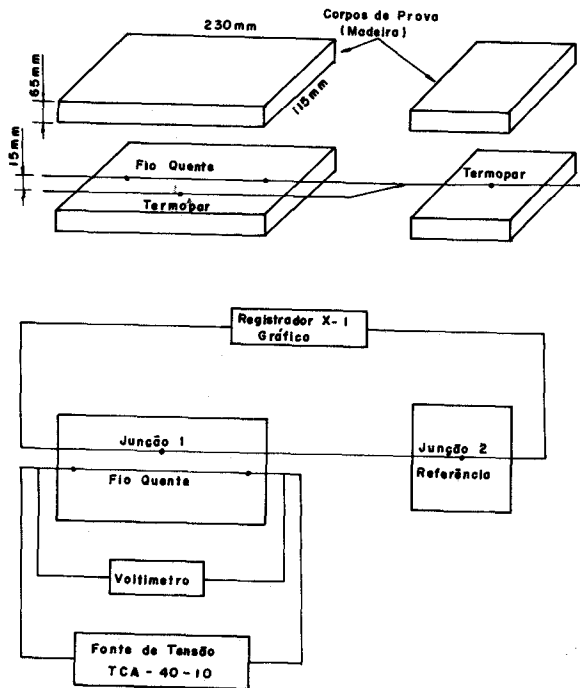
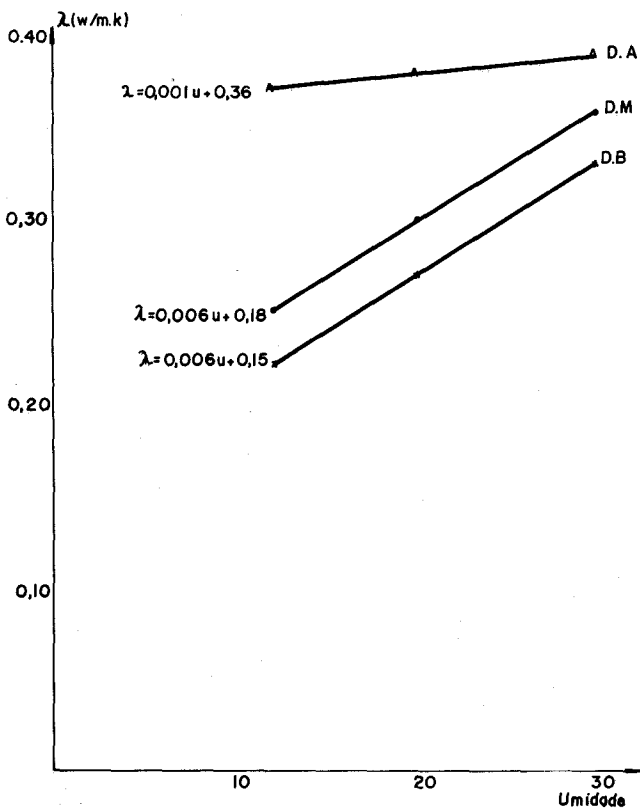


Fig.01 - Arranjo Experimental

## 7- ANÁLISE DOS RESULTADOS



D.A. = Eucalipto com densidade alta - Tereticornis.  
 D.M. = Eucalipto com densidade média - Saligna.  
 D.B. = Eucalipto com densidade baixa - Microcorys.

## 7.1- Equações:

Eucalipto Tereticornis

$$\lambda = 0,001 u + 0,36$$

$$R^2 = 0,99$$

$$\rho \cong 1,0 \text{ g/cm}^3$$

Eucalipto Saligna

$$\lambda = 0,006 u + 0,18$$

$$R^2 = 1$$

$$\rho \cong 0,7 \text{ g/cm}^3$$

Eucalipto Microcorys

$$\lambda = 0,006 u + 0,15$$

$$R^2 = 0,99$$

$$\rho \cong 0,6 \text{ g/cm}^3$$

## 8- CONCLUSÃO:

Os resultados obtidos com o método do fio quente mostraram-se satisfatórios para teores de umidade de até 30%, ou o ponto de saturação das fibras na madeira. Acima deste valor começa a ocorrer encharcamento das superfícies de contato dos corpos de prova, causando grande interferência na leitura das temperaturas pelo termopares.

Os valores obtidos com a aplicação deste método mostram:

- a influência crescente da densidade do material na condutividade térmica;
- a influência também crescente da umidade na condutividade térmica;
- no que se refere a dispersões encontradas, pode-se dizer que as amostras foram retiradas de árvores de diferentes idades, acarretando grande variação nos valores da condutividade térmica.

Para umidades elevadas, acima do ponto de saturação, num trabalho subsequente, será interessante fazer uma verificação mais minuciosa do comportamento da condutividade térmica. Esta condição costuma ocorrer somente após o corte da árvore e não em condições normais de uso da madeira.

Através do método do fio quente, há condições de determinar a condutividade térmica, o calor específico e a difusividade térmica.

Os equipamentos utilizados são simples e disponíveis no mercado nacional, e possibilitam maior rapidez na determinação da condutividade térmica, principalmente quando realizada com aquisição e processamento automático dos dados.

## 9- LITERATURA CITADA:

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS - Thermal conductivity of materials by means of the guarded hot plate. C177-63 Philadelphia. ASTM, 1963.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Componentes de construção. Determinação da condutância e transmitância térmica: Método da caixa quente protegida - ABNT, Dezembro 1980. 9p.

BEGER, S.B. - Propriedades térmicas da madeira e seus derivados. São Carlos, SP, LaMEM-EESC-USP, 1980. 229p. pp. 181-202.

FÉDÉRATION EUROPÉENNE DES FABRICANTES DE PRODUITS RÉFRATAIRES - Essai des matières premières et produits céramiques. Détermination de la conductivité thermique jusqu'à 1600°C par la méthode du fil chaud. Conductivité thermique 25 W/K.m.

Methode en parallèle. Paris, s.d. (trad. DIN 51046 parte 2, novembro de 1978). pp. 15-24.

LIMA, C.R. Método do fio quente: aplicabilidade ao estudo das propriedades térmicas de madeira. São Carlos, SP. LaMEM-EESC-USP, 1989. 305p.

SANTOS, W.N. dos & CINTRA FILHO, J.S. - Método do fio quente com ajuste não linear na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos. Rio de Janeiro, RJ, 1986. 346p. pp. 70-95.

#### 10- BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

FOREST PRODUCTS LABORATORY - Computed thermal conductivity of common wood. USDA-FS-FPL, Mad, Wis. Dec. 1952. (Technical note nº 248).

KOENIGSBEGER, O.H. et alii - Viviendos y edificacion en zonas acclidas y tropicales. Madrid, Paraninfo, 1977. 403p.

KOLLMANN, F. - Tecnologia de la madera y sus aplicaciones. Madrid, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicios de la Madera, 1959. pp. 70-83.

Holz und Wärme. Holz-Zentralblatt. 108 (144): 76-77. 1982.

TYE, R.P. - Thermal conductivity. London, Academic Press, 1969. v. 1.

SILVIA, P.M. - Determinação da condutividade térmica em regime variável. Lisboa, LNEC, 1971. (Memória nº 376).