

**Fenômenos de transferência de calor e massa em cavacos de madeira -
Parte 1**

MFN -0706

N CHAMADA:

TITULO: Fenômenos de transferência de calor e massa em
cavacos de madeira - Parte 1

AUTOR(ES): ASSUMPÇÃO, R.M.V.LIMA, A.F.JORDAO, M.C.S.PARK,
S.W.YOJO, L.M.NEVES, J.M.

EDICAO:

IDIOMA: português

ASSUNTO:

TIPO: Congresso

EVENTO: Congresso Anual da ABCP, 16

PROMOTOR: ABTCP

CIDADE: São Paulo

DATA: 21-26.11.1983

IMPRESSÃO: Sao Paulo, 1983, ABTCP

PAG/VOLUME: p.671-683, v.3

FONTE: Congresso Anual da ABCP, 16, 1983, São Paulo, v.3,
p.671-683

AUTOR ENTIDADE:

DESCRIPTOR:

RESUMO:

FENÔMENOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM
CAVACOS DE MADEIRA - PARTE I



Assumpção, R.M.V.; Lima, A.F.; Jordão, M.C.S.; Park, S.W.;
Yojo, L.M. e Neves, J.M.

Centro Técnico em Celulose e Papel - CTCP do
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT -
São Paulo, Brasil.

I. Introdução

A produção de pastas mecânicas de alto rendimento já é antiga, porém o grande impulso em sua utilização foi dado com o advento da pasta termomecânica e suas sucedâneas, como quimotermomecânica e quimomecânicas.

O processo termomecânico originou-se do processo Asplund para produção de pasta para chapa de fibra. Utilizando-se condições mais brandas de pressão e temperatura foi possível obter a ruptura da estrutura da madeira na parede celular, conseguindo-se um material mais flexível, com melhores possibilidades de fibrilação e de formação de uma folha fina, além de propriedades mecânicas melhores que a pasta de m^o. Para que isso seja obtido alguns pontos são básicos: a lignina deve estar numa temperatura ligeiramente inferior ao ponto de amolecimento e a energia mecânica deve ser transferida da maneira mais eficiente possível à parede da fibra. A temperatura de amolecimento da lignina depende da espécie e também da umidade da mesma na estrutura da madeira.

A energia é transferida pelos discos e, principalmente, através de compressão e relaxamento (vibração) da estrutura, além de esforços de cisalhamento e corte.

Eriksen e col. (1) estudaram a influência do teor de umidade do cavaco nas características das pastas termomecânicas. Verificaram que, para os cavacos abaixo do ponto de saturação das fibras, a pasta obtida tinha propriedades mecânicas inferiores àquelas obtidas com cavacos com teores de umidade acima do ponto de saturação da fibra. Isso foi praticamente uma comprovação experimental de que madeiras verdes, portanto com alto teor de água, produzem pastas mecânicas mais uniformes, mais claras e com menor consumo de energia de desfibramento.

No processo termomecânico, o tratamento com vapor é de aproximadamente 2 a 3 min, e, dependendo da umidade inicial do cavaco alimentado, pode não ser suficiente para que este atinja condições ideais de desfibramento. Essas condições envolvem temperatura e umidade uniformes em todos os cavacos. A temperatura no centro de um cavaco depende basicamente de transferência de calor enquanto que a umidade depende da transferência de massa, e tanto um como outro, dependem das características anatômicas do material.

Trabalho apresentado no III Congresso Latino-Americano de Celulose e Papel - em São Paulo - Brasil - de 21 à 26 de Novembro de 1983.

Assim, com vistas a obter dados básicos para desenvolvimento de processos de alto rendimento, aplicados a espécies brasileiras, foi iniciado um programa de estudos sobre fenômenos de transporte de calor e massa em madeiras de coníferas e folhosas brasileiras.

Neste trabalho são apresentados e discutidos os primeiros resultados obtidos para P.elliottii, P.taeda, E.grandis e E.saligna com referência aos tempos necessários para transferência de massa e de calor em cavacos dessas madeiras partindo-se de diferentes valores de umidades iniciais.

II. Considerações Gerais

O tempo para que o interior de um bloco de madeira, ou mesmo um cavaco, atinja temperatura próxima à temperatura de superfície, depende das propriedades do material como: condutividade térmica (K); calor específico (c); massa específica (ρ), temperatura inicial e temperatura da superfície (2, 3).

Considerando um sólido de faces planas, paralelas a um sistema de coordenadas cartesianas com origem no centro do sólido (fig. 1), e que, este sólido, com uma temperatura inicial T_0 , seja colocado num fluido mais quente à temperatura T_s , que sua superfície atinja imediatamente a temperatura T_s , é possível estimar o tempo necessário para que o centro do sólido atinja qualquer temperatura entre T_0 e T_s através da expressão (I) obtida por Carslaw e Jaeger (3).

$$v = \frac{64}{\pi^3} \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\ell+m+n}}{(2\ell+1)(2m+1)(2n+1)} e^{-\alpha_{\ell,m,n} t}, \text{ onde (I)}$$

$$v = \frac{T_s - T}{T_s - T_0}, \quad \begin{array}{l} T_s = \text{temperatura de superfície (}^\circ\text{C)} \\ T_0 = \text{temperatura inicial do sólido (}^\circ\text{C)} \\ T = \text{temperatura do centro de sólido em relação ao tempo de aquecimento (}^\circ\text{C)} \end{array}$$

$$\alpha_{\ell,m,n} = \frac{\pi^2}{4} \left[D \frac{(2\ell+1)^2}{a^2} + D \frac{(2m+1)^2}{b^2} + D \frac{(2n+1)^2}{c^2} \right]$$

a, c = metade das arestas do paralelepípedo, perpendiculares à direção longitudinal da fibra (cm).

b = metade da aresta do paralelepípedo, paralela à direção longitudinal da fibra (cm).

t = tempo (s).

com as condições de contorno:

$$cc_1 : p/t = 0 \implies v = 1$$

$$cc_2 : p/x = a; y = b; z = c \implies v = 0$$

O coeficiente de difusividade térmica D, por sua vez, é dado por:

$$D = \frac{K}{\rho \cdot c}, \quad \text{onde (II)}$$

K = coeficiente de condutividade térmica (cal/cm^oC sec).

ρ = massa específica (g/cm³).

c = calor específico do material (cal/g^oC).

A madeira é um sólido anisotrópico, do ponto de vista da transferência de calor pois o seu coeficiente de condutividade térmica (K) e, conseqüentemente, o coeficiente de difusividade térmica (D), dependem da direção considerada.

De acordo com MacLean(4), citado por Siau(5), para diversas madeiras o coeficiente de condutividade térmica (K), na direção longitudinal paralela às fibras é 2,5 vezes maior que na direção transversal à fibra. Com isto:

$$K_{\ell} = 2,5 \cdot K_t, \text{ onde} \quad \text{(III)}$$

K_{ℓ} = coeficiente de condutividade térmica na direção longitudinal, paralela às fibras

K_t = coeficiente de condutividade térmica na direção transversal à fibra

Assumindo ρ e c constantes, tem-se:

$$D_{\ell} = 2,5 \cdot D_t, \text{ onde} \quad \text{(IV)}$$

D_{ℓ} = coeficiente de difusividade térmica na direção longitudinal

D_t = coeficiente de difusividade térmica na direção transversal

Substituindo-se a expressão (IV), na expressão (I), a função α passará a ser:

$$\alpha_{\ell, m, n} = \frac{D_t \pi^2}{4} \left[\frac{(2\ell+1)^2}{a^2} + 2,5 \frac{(2m+1)^2}{b^2} + \frac{(2n+1)^2}{c^2} \right] \quad \text{(V)}$$

Por outro lado, MacLean(4), propõe as expressões VI e VII para o cálculo do coeficiente de difusividade térmica na direção transversal (D_t), em função da massa específica, umidade e volume de vazios.

Para valores de umidades menores que 40% base seca, tem-se:

$$D_t = \left[\frac{\rho(4,80 + 0,090 U) + 0,57}{\rho(0,01 U + 0,324) \rho_w} \right] \times 10^{-4} \quad \text{(VI)}$$

Para valores de umidades acima de 40% base seca, tem-se:

$$D_t = \left[\frac{\rho(5,18 + 0,131 U) + 0,57 \cdot V_a}{\rho(0,01 \cdot U + 0,324) \cdot \rho_w} \right] \times 10^{-4} \quad \text{(VII)}$$

onde:

D_t = coeficiente de difusividade térmica na direção transversal às fibras (cm^2/sec).
 ρ = massa específica da madeira na umidade U (g/cm^3)
 U = umidade da madeira, base seca (%)
 ρ_w = massa específica da água (g/cm^3)
 V_a = porosidade = $1 - \rho(0,685 + 0,01 U/\rho_s)$ onde ρ_s é massa específica da água ligada, de acordo com Siau(5).

Com o objetivo de verificar a aplicabilidade das equações I, VI e VII, anteriormente citadas, para avaliação do tempo necessário para que um cavaco, utilizado em processos termomecânicos, atingisse condições uniformes de tempe

ratura, foram feitos ensaios preliminares com um bloco de madeira de 5 x 5 x 5 cm. Foi acompanhada a variação de temperatura no centro do cubo de madeira quando este estava imerso num fluxo de vapor. Isso foi necessário, porque as medidas experimentais de variação de temperatura no centro de cavacos reais, apresentavam um erro experimental grande, devido dificuldades de colocação de termopar em cavacos finos. Por esse motivo, os valores de variação de temperatura foram estimados teoricamente após verificada a aplicabilidade das equações.

No caso da impregnação com água, a determinação experimental é mais fácil, e com menor erro experimental, razão porque a variação da umidade dos cavacos com o tempo de vaporização foi determinado apenas experimentalmente, conforme descrito na parte a seguir.

III. Parte Experimental

III.1 Amostras

Foram estudadas as seguintes espécies de madeiras: P.elliottii e P.taeda, de 13 anos de idade, provenientes da região de Itapeva, São Paulo e E.grandis e E.saligna, de 7 anos de idade, provenientes da região de Mogi-Guaçu, São Paulo, sendo coletadas quatro árvores por espécie na forma de toretes cortadas no DAP (diâmetro à altura do peito).

De cada torete, foram retirados discos nas posições inferior, média e superior. Do centro e das bordas destes discos, prepararam-se corpos de prova, na forma de cubo de 2 cm de lado, utilizados para determinação da umidade de saturação de fibras. Prepararam-se também, cubos de 5 cm de lado, do centro dos discos retirados da parte média dos toretes, para os ensaios de transferência de calor. O material restante, separado por espécie, foi transformado em cavacos em picador industrial e empregada a fração entre 2,22 cm (7/8") e 1,59 cm (5/8"), para os ensaios de impregnação com vapor.

III.2 Determinação do Ponto de Saturação das Fibras

O ponto de saturação das fibras pode ser determinado através do levantamento da curva experimental da variação em volume da madeira versus umidade na base seca. A umidade da madeira, na base seca, acima da qual a variação do volume é praticamente desprezível, pode ser considerada como uma medida deste ponto.

No decorrer do ensaio de secagem foram medidas as umidades e os volumes dos corpos de prova. A secagem foi iniciada ao ar livre e concluída em estufa de laboratório com circulação de ar, às temperaturas de 60, 80 e 105°C. Os volumes foram determinados pelo método do deslocamento com mercúrio.

Para cada uma das espécies, P.elliottii e P.taeda, foram ensaiados 60 cubos de madeira. Quarenta e oito cubos foram cortados na borda dos discos e doze, em sua parte central. As medidas foram realizadas em 8 níveis de umidades diferentes. Para as espécies de Eucalyptus grandis e saligna, foram secados doze cubos retirados da borda dos discos e doze retirados da parte central.

A partir dos valores experimentais obtidos foi cal

culada a variação dimensional, usando-se a relação:

$$R_i = \frac{V_v - V_i}{V_v} \times 100, \text{ onde} \quad (\text{VIII})$$

R_i = variação de volume, em porcentagem

V_v = volume da amostra verde, em cm^3

V_i = volume da amostra na umidade (U_i) medida em cm^3

A correlação linear entre R_i e U_i foi calculada, obtendo-se o ponto de saturação das fibras $i(U_s)$ através da extrapolação da reta para $R_i = 0$.

III.3 Impregnação dos Cavacos com Vapor

Para realização destes ensaios foram utilizadas 2 amostras diferentes de cavacos: cavacos verdes e secos ao ar. De cada amostra foram preparados cestos de cavacos, contendo aproximadamente 100 g de madeira seca, que foram colocados em autoclaves e expostos ao fluxo de vapor de água, à pressão de 1 atm. Os tempos de tratamento com esse vapor foram de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60 e 80 minutos. Os resultados foram expressos em termos de umidade final.

III.4 Tempo de Aquecimento de Madeira

Cubos de 5 cm de aresta foram perfurados até o centro e aí inseridos termopares com ajuste sem folga. As superfícies entre os furos e o termopar foram vedadas com parafina para impedir a penetração livre de vapor. As medidas de temperaturas foram tomadas ao longo de tempo, com uma precisão, de 1°C . O número total de ensaios foi igual a 8, sendo 2 por espécie de madeira. Durante cada ensaio, foram também, determinadas as umidades iniciais de cada cubo.

IV. Resultados e Discussão

Nas figuras 2 e 3 tem-se as curvas de variação de volume com a umidade, das madeiras estudadas para amostras provenientes da parte lateral e central. Na tabela I tem-se os valores calculados para o ponto de saturação de fibras dessas amostras, através das equações de regressão obtidas.

Tabela I. Umidade no ponto de saturação de fibras, (% base seca).

	Idade (anos)	Lateral	Central	Média
<u>P. elliotii</u>	13	27,2	30,1	28,7
<u>P. taeda</u>	13	27,9	30,8	29,4
<u>E. saligna</u>	7	32,6	35,6	34,1
<u>E. grandis</u>	7	29,3	31,0	30,2

Na tabela II estão indicados os valores de densidade básica, massa específica no ponto de saturação de fibras e massa específica correspondente à umidade seca ao ar, de cada uma das amostras estudadas.

Com base nesses valores e utilizando-se as equações (VI) e (VII), dependendo se a umidade era maior ou menor que 40%, foram calculados os valores do coeficiente de difusividade térmica indicados na tabela III.

Tabela II. Densidade básica (DB) e massas específicas da amostra no ponto de saturação de fibras (ρ_s) e seca ao ar (ρ_a).

	DB (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	Umidade da amostra seca ao ar (% b.s.)	ρ_a (g/cm ³)
<u>P.elliottii</u>	0,38	0,62	11,5	0,45
<u>P.taeda</u>	0,46	0,60	10,0	0,55
<u>E.saligna</u>	0,50	0,67	10,0	0,61
<u>E.grandis</u>	0,49	0,64	10,0	0,59

Tabela III. Difusividade térmica transversal (D_t).

	D_t (cm ² /seg) seca ao ar	D_t (cm ² /seg) ponto de saturação
<u>P.elliottii</u>	16,2 10^{-4}	13,6 10^{-4}
<u>P.taeda</u>	15,9 10^{-4}	13,6 10^{-4}
<u>E.saligna</u>	15,7 10^{-4}	13,4 10^{-4}
<u>E.grandis</u>	15,6 10^{-4}	13,1 10^{-4}

Na figura 4 tem-se a curva teórica de variação da temperatura no centro de um bloco de madeira de 5 x 5 x 5 cm, baseada nas equações (I) e (V). Estão indicados também os valores experimentais obtidos com as amostras estudadas. Pode-se observar que o ajuste foi satisfatório. O fato dos tempos experimentais serem ligeiramente inferiores ao tempo teórico, pode ser atribuído ao fato que há introdução de água no material o que auxilia a transferência de calor. As equações (I) e (V) consideram apenas a transferência de calor e não a eventual contribuição da impregnação com água. No caso de estudos de cavacos, isso não traz inconveniente nenhum pois o tempo teórico é o tempo máximo para que a temperatura no centro do cavaco se torne próxima à da superfície.

O ajuste entre a curva teórica e os dados experimentais foi bastante bom e as diferenças podem ser atribuídas basicamente aos seguintes fatos: - impregnação do corpo de prova com água, tendendo a diminuir o tempo de aquecimento; - a curva teórica foi calculada apenas para $D_t = 13,6 \times 10^{-4}$ cm²/s, e os valores não eram iguais para todas as amostras conforme indica a tabela III.

Na figura 5 tem-se, como ilustração, a curva de variação da temperatura no centro de um cavaco de 0,3 x 2,5 x 1,5 cm, calculada com base nas equações (I) e (V), e para coeficientes de difusividade de $13,6 \times 10^{-4}$ cm²/seg e $16,0 \times 10^{-4}$ cm²/seg., correspondentes ao ponto de saturação de fibras e seco ao ar.

Na prática, os cavacos não estão isolados no vapor, conforme as hipóteses das equações teóricas. Com o objetivo de verificar esse aspecto, foram feitas medidas da variação da temperatura com o tempo de exposição em vapor. Essas medidas foram tomadas no centro de um cavaco colocado, por sua vez, no centro de uma coluna de cavacos submetida à passagem do fluxo de vapor. Apesar da maior dificuldade de acesso do vapor, o tempo determinado foi próximo ao teórico.

Nas figuras 6, 7, 8 e 9 tem-se as curvas de impregnação dos cavacos das amostras estudadas, para duas umidades diferentes de partida.

Nas figuras 6 e 7 pode-se observar que partindo-se de madeira de Pinus elliottii, e de Pinus taeda, seca ao ar, o tempo necessário para atingir o ponto de saturação de fibras é da ordem de 1,0 a 2,0 min. Se, porém, pretende-se madeira com maiores teores de água, por exemplo, 80 a 100% na base seca, serão necessários tempos de vaporização da ordem de 5 minutos, para Pinus elliottii. Para Pinus taeda o tempo variará de 7,5 a 15 min., com um valor médio de 10 min.

Caso se pretenda umidades ainda maiores, os tempos de vaporização serão também maiores, conforme se vê nas figuras 6 e 7. Observa-se ainda, nessas figuras que o P.elliottii tende a atingir umidades de encharcamento superiores ao P.taeda, ou seja, cerca de 150% e 135%, respectivamente. Isso está relacionado com o fato da densidade básica ser superior no caso do P.taeda. Para o caso das amostras de eucalipto ensaiadas (fig. 8 e 9), também se observou comportamentos diferentes para E.saligna e E.grandis. Partindo-se de amostras secas ao ar (ao redor de 10% de umidade), os tempos para atingir a umidade no ponto de saturação de fibras foram da ordem de 2,0 a 3,5 min. para E.grandis e de 5,0 a 8,0 min. para E.saligna. O patamar de umidade para E.grandis foi de 95% enquanto que para o E.saligna foi superior a 100%.

No processo termomecânico recomenda-se que a consistência na entrada do desfibrador seja de 30 - 35%, ou seja correspondente a umidades de 42 a 53%. Para obter essas condições com coníferas são precisos tempos menores de vaporização, porém, para as folhosas estudadas, os tempos são bem maiores.

Para eucalipto, com tempos de pré-vaporização de 2 a 3 min. normalmente usados em processos de alto rendimento, partindo-se de madeira seca ao ar, serão atingidas umidades pouco superiores ao ponto da saturação das fibras. Para que a consistência recomendada no desfibramento seja alcançada, é necessário acrescentar água no "olho" do desfibrador, o que é uma dificuldade adicional na utilização dessa madeira em processos termomecânicos.

De uma maneira geral, para todas as amostras ensaiadas o fenômeno mais lento é a transferência de massa. As condições de temperatura são facilmente atingidas no interior dos cavacos sejam de coníferas, sejam de folhosas.

V. Conclusões

As principais conclusões do presente trabalho são:

- a) Verificou-se que as etapas de aquecimento e impregnação de cavacos de madeiras de P.elliottii, P.taeda, E.saligna e E.grandis, são controladas pela transferência de

massa, que é o fenômeno mais lento. Em menos de 1 min é possível atingir equilíbrio de temperatura no centro do cavaco para qualquer uma das amostras estudadas. A umidade de encharcamento, entretanto, é atingida em tempos e valores variáveis com a espécie de madeira e são todos superiores a 1 minuto.

- b) Os tempos para atingir o ponto de saturação de fibras, partindo-se de amostras de madeiras secas ao ar (~ 10% umidade), variaram com a espécie. Para madeiras de Pinus variou entre 1,0 a 2,0 min. Para Eucalyptus os tempos para se atingir a umidade no ponto de saturação de fibras foram de 2,0 a 8,0 min., dependendo da espécie. Tempos mais longos são necessários para E.saligna.
- c) Para atingir umidades de 42-55% na base seca, correspondentes a consistências de 30-35% na entrada do desfibrador, são precisos tempos de vaporização da ordem de 1,5 a 2,5 min para Pinus e de 7,0 a 17,5 min para Eucalyptus, partindo-se de madeira seca ao ar.
- d) Embora tenham sido detectadas diferenças no valor da umidade, no ponto de saturação de fibras entre as partes lateral e central do tronco, para efeito de cálculo do coeficiente de difusividade térmica (D_t), as diferenças não são significativas.
- e) A equação desenvolvida por Carslaw e Jaeger (3) para estudo do aquecimento de corpos na forma de paralelepípedos retangulares, combinada com valores de D_t calculados pelas equações propostas por MacLean (4), se ajustam razoavelmente aos dados experimentais encontrados para blocos de 5 x 5 x 5 cm e podem ser utilizados para estimativas do tempo de aquecimento de cavacos utilizados industrialmente. Apesar de na realidade o cavaco não se encontrar isolado, no vapor, as diferenças entre os valores teórico e o real não foram significativas.

Os trabalhos terão prosseguimento com amostras de P.elliptica, P.taeda, E.saligna e E.grandis de outras idades.

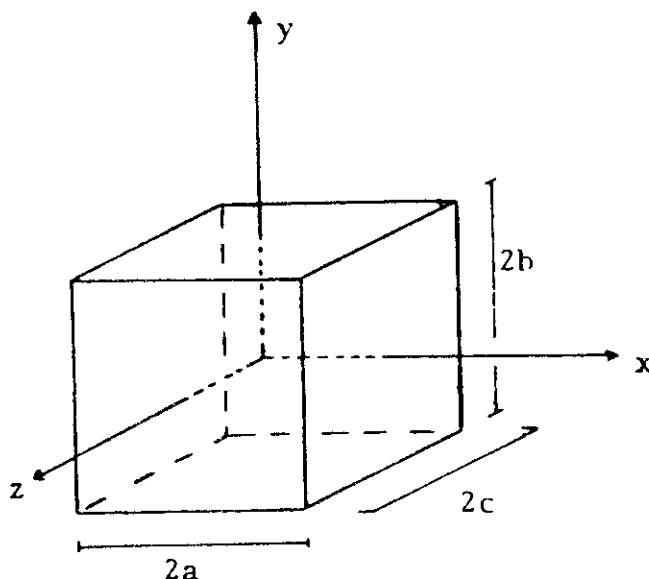
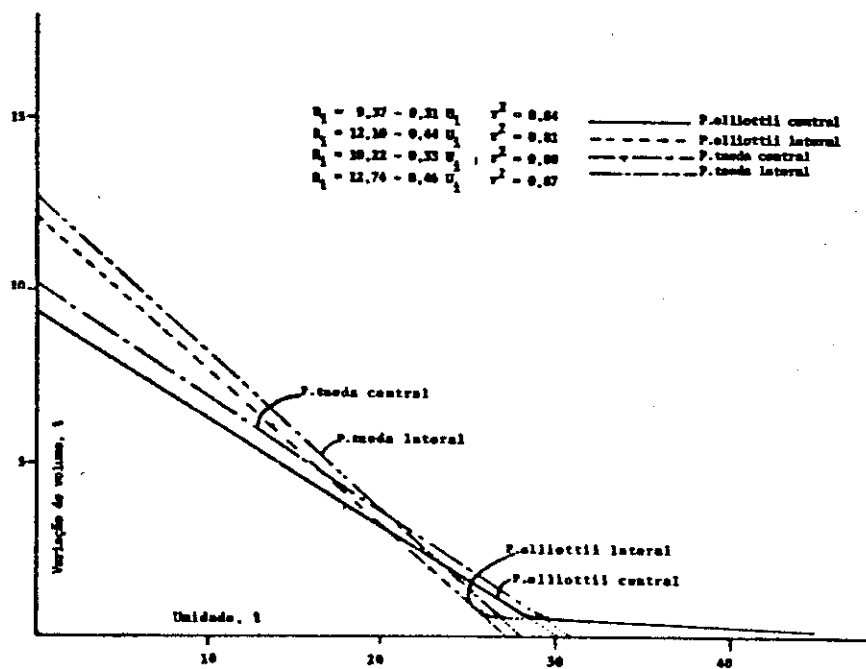
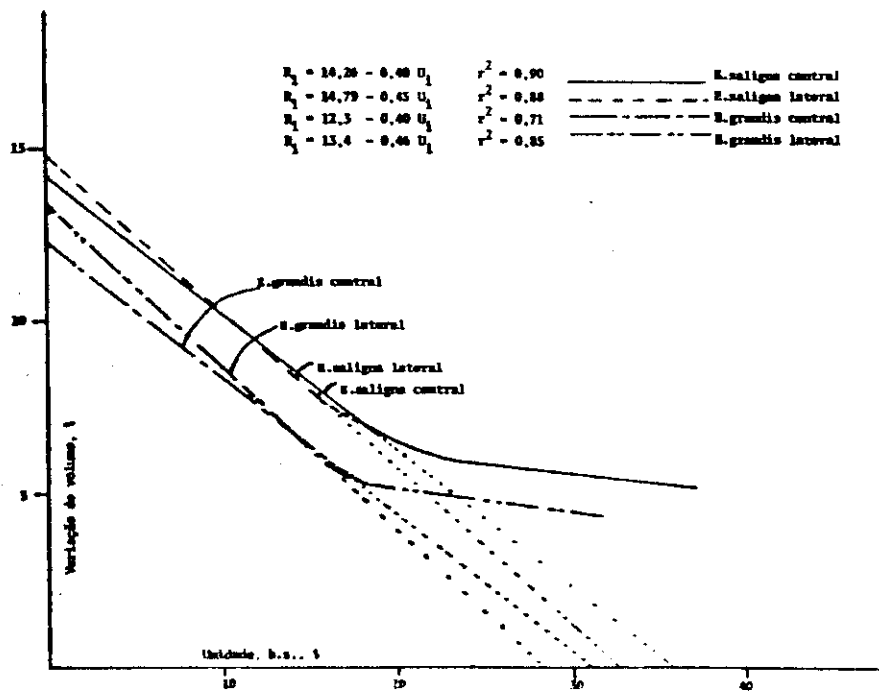


Fig.1 Coordenadas do sólido com origem no centro.

Fig.2 Variação do volume em função da umidade - Pinus.Fig.3 Variação do volume em função da umidade - Eucalyptus.

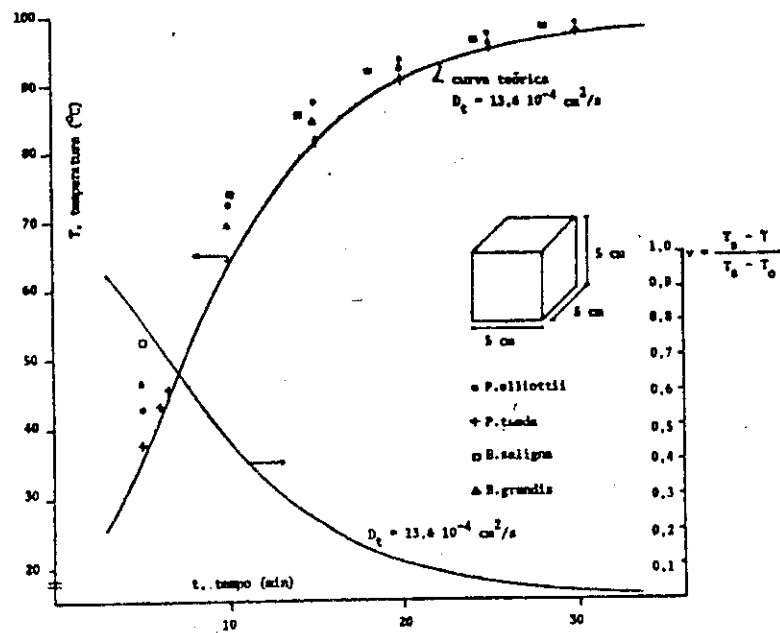


Fig.4 Variação da temperatura do centro de um cubo de madeira em função do tempo de aquecimento.

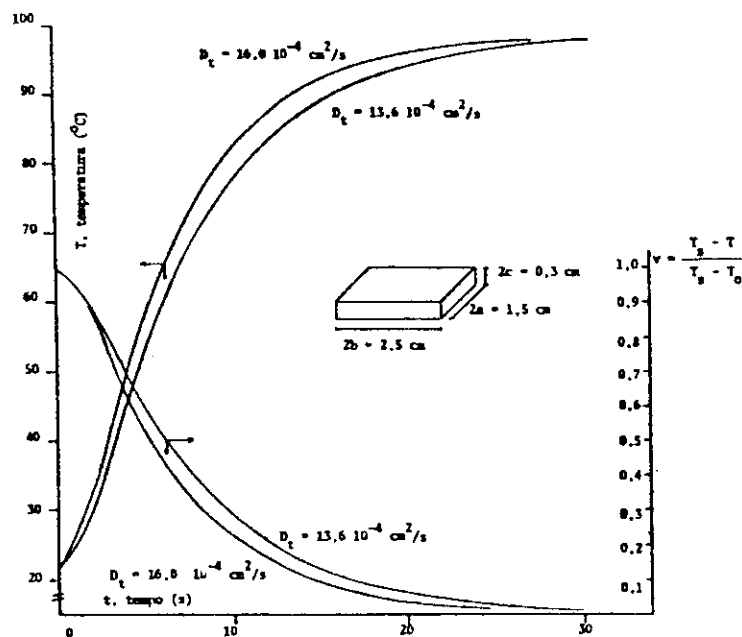


Fig.5 Variação da temperatura do centro de um cavaco de madeira em função do tempo de aquecimento.

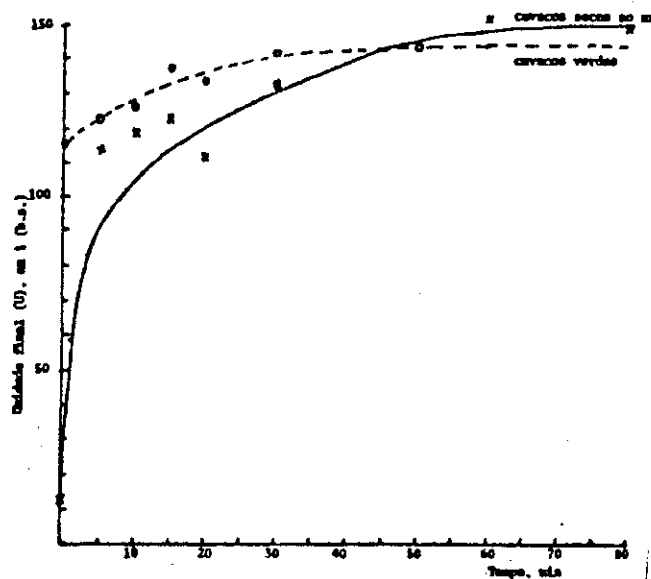


Fig.6 Impregnação de cavacos de P.elliottii, com vapor, em função do tempo.

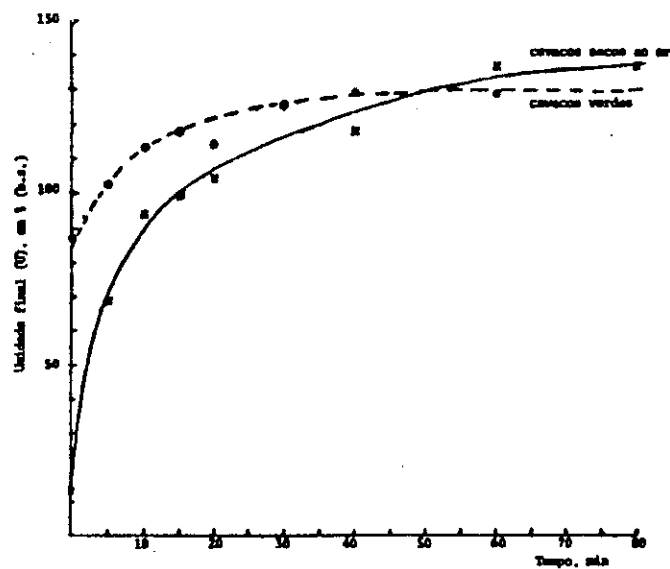


Fig.7 Impregnação de cavacos de P.taeda, com vapor, em função do tempo.

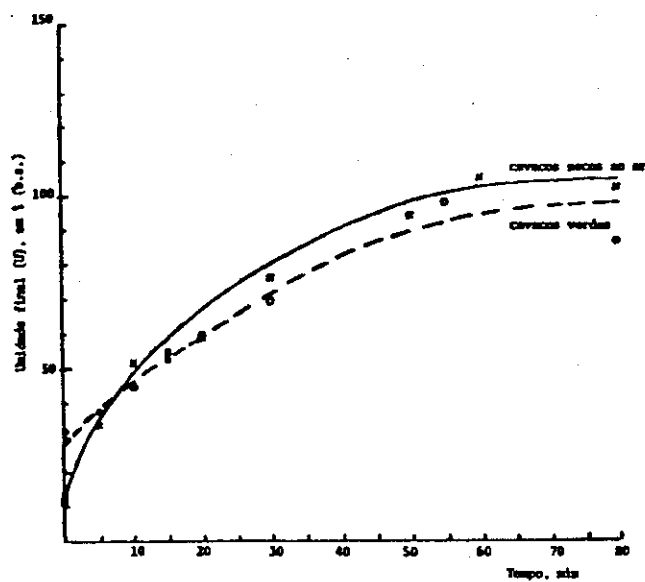


Fig. 8 Impregnação de cavacos de *E. saligna*, com vapor, em função do tempo.

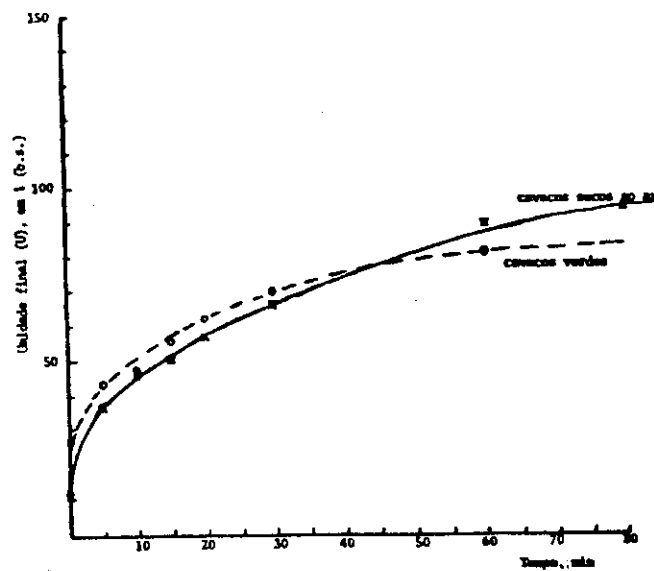


Fig. 9 Impregnação de cavacos de *E. grandis*, com vapor, em função do tempo.

VI. Bibliografia

- 01) Eriksen, J.T.; Hauan, S. et al. EUCEPA - Proceedings of Inter. Mechanical Pulp. Conf. Oslo, Jun. 16-19, Session II, pag. 1-19, 1981.
- 02) Byrd, R.B.; Stewart, W.E. et al. Transport Phenomena - John Wiley & Sons, 1960.
- 03) Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C. Conduction of heat in solids. Oxford University Press. Second Edition, 1959.
- 04) MacLean, J.D. Heating, piping, and air conditioning. 13(6):380-91, 1941.
- 05) Siau, J.F. Flow in wood. Syracuse University Press. First Edition, 1971.

Agradecimentos:

Os autores agradecem à Cia. Braskraft pelo fornecimento das amostras de Pinus e à Cia. Champion pelas amostras de Eucalyptus.