

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 17

Avaliação dos gradientes de umidade formados durante a secagem da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii*

José Carlos Duarte Pereira
Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz
Ivan Tomaselli

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, km 111

Caixa Postal 319

Fone: 41 666-1313

Fax: 41 666-1276

Home page: <http://www.cnpf.embrapa.br>

E-mail (sac): sac@cnpf.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Luciano Javier Montoya Vilcahuaman

Secretária-Executiva: Cleide da S. N. Fernandes de Oliveira

Membros: Antônio Carlos de S. Medeiros, Edilson Batista de Oliveira, Erich Gomes Schaitza, Honorino Roque Rodigheri, Jarbas Yukio Shimizu, José Alfredo Sturion, Patricia Póvoa de Mattos, Sérgio Ahrens, Susete do Rocio C. Penteado

Supervisor editorial: Luciano Javier Montoya Vilcahuaman

Normalização bibliográfica: Lidia Woronkoff e Elizabeth Câmara Trevisan

Imagem da capa: madeira de *Pinus elliottii*

Revisão gramatical: Ralph D. M. de Souza

Editoração eletrônica: Cleide da S. N. Fernandes de Oliveira

1ª edição

1ª impressão (2004): 500 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

CIP – Brasil. Catalogação na Publicação
Embrapa Florestas

Pereira, José Carlos Duarte.

Avaliação dos gradientes de umidade formados durante a secagem da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* / José Carlos Duarte Pereira, Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz, Ivan Tomaselli. – Colombo : Embrapa Florestas, 2004.

14 p. - (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Florestas, ISSN 1676-9449 ; 15)

1. Madeira - Secagem. 2. Relação água-madeira. 3. *Pinus elliottii*. I. Ferraz, Epaminondas Sansigolo de. II. Tomazelli, Ivan. III. Série.

CDD (21. ed.) 674.38

© Embrapa 2004

Sumário

RESUMO	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. MATERIAL E MÉTODOS	7
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
4. CONCLUSÕES	13
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

Avaliação dos gradientes de umidade formados durante a secagem da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii*

*José Carlos Duarte Pereira*¹

*Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz*²

*Ivan Tomaselli*³

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o propósito de compreender melhor o processo de secagem da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii*, através do estudo dos gradientes de umidade, como subsídio para o controle da mancha marrom. A técnica utilizada foi a de atenuação de raios gama. Observou-se que a secagem inicia-se pelo lenho inicial, evolui da superfície para o interior das peças e, posteriormente, para o lenho tardio. A água capilar encontra-se presente na superfície da madeira, mesmo em estágios mais avançados do processo de secagem.

Palavras-chave: *Pinus elliottii*; relação água-madeira.

Evaluation of moisture gradient produced during slash pine sawn wood kiln drying

Abstract

This research was carried out in order to obtain a more comprehensive understanding on the drying process of slash pine sawn wood through the study of capilar water flow in order to permit brown stain control. Gamma ray

¹ Engenheiro-Agrônomo, Doutor, Pesquisador da Embrapa Florestas. jcarlos@cnpf.embrapa.br

² Físico, Doutor, Pesquisador do CENA/USP.

³ Engenheiro Florestal, Doutor, Professor da Universidade Federal do Paraná.

attenuation technic was used. The results indicated that drying started in the earlywood layers where moisture content was gradually reduced from the surface to the center of the sample. Drying also proceeded from springwood towards latewood layers. Even in an advanced stage of drying, capilar water was present at layers very close to the surface.

Key words: Slash pine; water-wood relation.

1. INTRODUÇÃO

A quantidade de água contida em uma árvore viva é substancialmente superior àquela que se observa no interior da madeira, em condições normais de uso, podendo atingir teores superiores a 200%, com base no peso seco. Depois de serrada, a madeira começa a perder água quando exposta a condições atmosféricas nas quais a pressão de vapor é menor que a pressão do seu interior (Panshin & Zeeuw, 1970).

A madeira seca de fora para dentro. Quando uma peça úmida é submetida ao processo de secagem, a água superficial se evapora e as forças capilares puxam mais água livre para a superfície (Denig et al., 197-). Cedo ou tarde, a taxa de fluxo de massa de água livre torna-se inferior à taxa de evaporação superficial e o teor de umidade da superfície cai abaixo do ponto de saturação das fibras (Hart, 1975; Galvão & Jankowsky, 1985). Formam-se, então, gradientes caracterizados por um decréscimo do teor de umidade do centro para a superfície da madeira, como aqueles obtidos por Jankowsky & Henriquez (1983), Bai & Garrahan (1984) e por Aguiar & Ferraz (1981). A linha que separa as regiões nas quais os teores de umidade encontram-se abaixo e acima do ponto de saturação das fibras, respectivamente, chama-se linha úmida ou linha de vaporização. Com a evolução da secagem, a linha úmida recua da superfície para o interior da peça e a água passa a mover-se, por difusão, dessa linha para a superfície (Denig et al., 197-).

Por ser um meio poroso heterogêneo, no entanto, a madeira deve ser encarada como tal nos processos de secagem. Em face da diferença de densidade, o percentual de água passível de acumular-se nos lenhos iniciais é superior àquele dos lenhos tardios (Plumb et al., 1984; Mortatti & Ferraz, 1981;

Queméré, 1982). Por outro lado, em decorrência do tamanho reduzido do diâmetro do lúmen e das aberturas existentes nas paredes das fibras do lenho tardio, as forças de retenção da água aí localizada são maiores do que a localizada no lenho inicial. Essas diferenças justificam os resultados obtidos por Petty (1975) e por Spolek & Plumb (1981), que sugerem fluxos distintos nos lenhos inicial e tardio. Os dados obtidos pelos últimos autores sugerem que a água livre permanece retida no lenho tardio ao mesmo tempo em que é liberada no lenho inicial. Esses dados foram reforçados por Queméré (1982), ao observar que o lenho inicial parece secar mais rapidamente que o tardio.

Os conceitos tradicionais anteriormente descritos não são compatíveis com as observações relativas à formação da mancha marrom durante a secagem da madeira de *Pinus* spp. Para que tal mancha ocorra, é necessário a presença de água capilar na superfície da madeira quando esta é submetida a altas temperaturas. Assim, esperava-se que o uso de temperaturas moderadas no início do processo de secagem, até que ocorresse o recuo da linha úmida para o interior da madeira, poderia ser suficiente para permitir o uso de altas temperaturas, sem que esse defeito fosse observado. No entanto, essa expectativa não é real: as altas temperaturas só podem ser empregadas quando o teor de umidade da madeira encontra-se próximo ou abaixo do ponto de saturação das fibras (Tomaselli, 1988; Pereira et al., 1993), sugerindo que o conceito tradicional é incorreto.

Este trabalho foi desenvolvido com os objetivos de compreender melhor o processo de formação da mancha marrom durante a secagem de madeira serrada de *Pinus elliottii* var. *elliottii*, através do estudo dos gradientes de umidade formados, como subsídio para a identificação de medidas de controle.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para este estudo foi utilizada madeira serrada imediatamente após o abate de árvores de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii*, com 12 anos de idade, plantadas nas dependências do Centro Nacional de Pesquisa de Florestas - CNPF/ EMBRAPA, com o propósito de se estudar o fluxo de água capilar através dos gradientes de umidade formados quando a madeira é seca sob altas temperaturas (110 °C).

Os gradientes de umidade foram determinados por atenuação de radiação gama de baixa energia, conforme Ferraz (1976), tendo-se utilizado um colimador com área circular de 2,0 mm de diâmetro e um detector de 50 mm.

Peças de 50 mm por 50 mm por 450 mm, após terem suas superfícies transversais impermeabilizadas com cola (à base de resina epoxi e polimercaptana) e papel alumínio, foram submetidas a secagens a 110 °C, em estufa de aquecimento elétrico, com circulação forçada de ar e sem controle de umidade relativa. Amostras com 25 mm de espessura, distanciadas entre si em 80 mm, foram retiradas ao início e em diferentes estágios da secagem para a avaliação de gradientes de umidade. Em cada uma dessas oportunidades as superfícies então expostas foram novamente impermeabilizadas e as peças devolvidas à estufa. As amostras removidas foram imediatamente pesadas, com precisão de 0,01g (PU), envoltas em filme transparente de PVC para evitar variações no teor de umidade, e submetidas aos feixes de raios gama. Na forma de varredura, em passos iguais de 1,13 mm, esses raios foram aplicados paralelamente à direção das fibras, na superfície e no centro das amostras. O tempo de contagem, em cada ponto, foi 30 segundos.

Para a obtenção dos gradientes de umidade, cada amostra foi submetida às varreduras logo após a retirada e, posteriormente, quando secas em estufa com circulação forçada de ar, a 110 °C, até peso constante (PS). Os teores de umidade (U) médios de cada amostra foram calculados pela expressão $U = 100(PU-PS)/PS$.

Antes dos cálculos relativos à radiação gama procedeu-se a um ajuste das leituras para a correção dos erros decorrentes da contração da madeira e daqueles observados nos pontos iniciais e finais de cada varredura, nos quais os feixes atravessaram a amostra apenas parcialmente. Dois critérios foram utilizados: (a) eliminação das leituras iniciais e finais que destoavam do conjunto de dados e (b) eliminação de algumas leituras com valores médios do lenho inicial para a obtenção de melhor correspondência entre os picos observados nas amostras úmidas e secas.

Os cálculos basearam-se na lei de Beer-Lambert que, no caso de amostras de madeira úmidas, pode ser expressa pela equação

$$I = I_0 \cdot e^{-(\mu_m \cdot \rho_m \cdot x_m + \mu_a \cdot \rho_a \cdot x_a)}$$

na qual:

I = leitura relativa ao feixe de radiação emergente da amostra;

I_0 = leitura relativa ao feixe de radiação incidente na amostra, determinada através de três repetições ao início e ao final de cada varredura;

μ_m e μ_a = coeficientes de atenuação de massa da madeira e da água (cm^2/g);

ρ_m e ρ_a = densidades da substância madeira ($1,53 \text{ g}/\text{cm}^3$) e da água ($1,0 \text{ g}/\text{cm}^3$);

x_m e x_a = espessuras das camadas de madeira e de água (cm).

A partir das leituras relativas às amostras secas calcularam-se, inicialmente, as espessuras da camada de substância madeira (x_m) em cada ponto. Nessas amostras, x_a é muito próximo a zero, de forma que a equação anterior se reduz a:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho_m \cdot x_m} \quad e \quad x_m = \ln(I_0/I) / \mu_m \cdot \rho_m$$

Numa segunda etapa, calcularam-se as espessuras das camadas de água (x_a), utilizando-se as leituras referentes às amostras úmidas e os valores de x_m calculados anteriormente. As espessuras das camadas de ar (x_{ar}) foram obtidas através da expressão:

$$x_{ar} = x_{am} - (x_m + x_a),$$

na qual x_{am} é a espessura total da amostra, cuja medição foi feita com precisão de 0,002 cm. Finalmente, estimaram-se as quantidades de água capilar e higroscópica, assumindo-se o valor 27% como o ponto de saturação das fibras das amostras com a umidade inicial e 21% para aquelas submetidas a 110 °C, valores estes relatados por Stamm & Nelson Junior (1961). As equações utilizadas foram

$$x_{ah} = 0,27 \cdot 1,53 \cdot x_m,$$

$$x_{ah} = 0,21 \cdot 1,53 \cdot x_m, \quad e$$

$$x_{ac} = x_a - x_{ah}$$

nas quais x_a e x_m são as espessuras das camadas de água capilar e higroscópica, respectivamente, 1,53 é a densidade da substância madeira (Panshin & Zeeuw, 1970; Foelkel et al., 1971) e as demais variáveis já foram definidas. Os teores de umidade (U), em cada passo, foram calculados pela expressão

$$U = 100 \cdot x_a (1,53 \cdot x_m).$$

Os resultados obtidos foram expressos na forma de gráficos. O estudo do movimento da água capilar foi feito através da observação dos gradientes formados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

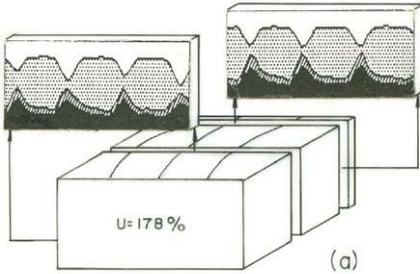
Os resultados confirmam aqueles obtidos por Mortatti & Ferraz (1981) e mostram que a técnica de atenuação de raios gama é adequada para localizar e acompanhar o fluxo de água, através dos gradientes formados, auxiliando no estudo do processo de secagem. Essa técnica é particularmente eficiente quando se estuda o movimento capilar, uma vez que sua precisão decresce com a redução do teor de umidade (Aguiar & Ferraz, 1983; Plumb et al., 1984).

Na amostra úmida, os teores de umidade dos lenhos inicial e tardio encontravam-se ao redor de 270% e 45%, respectivamente, enquanto a média da amostra era 180%, base peso seco. Resultados semelhantes foram, também, relatados por Mortatti & Ferraz (1981), Queméré (1982) e Plumb et al. (1984).

A Figura 1 mostra as proporções entre as espessuras das camadas de madeira, de água higroscópica e capilar e de ar, ao início e em diferentes fases da secagem a 110 °C.

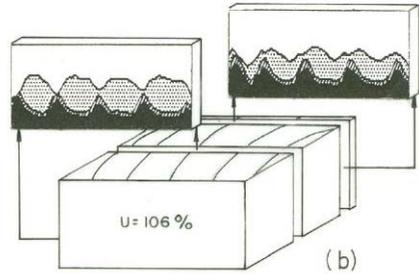
Em nenhuma oportunidade foi observado um recuo homogêneo da linha úmida da superfície para o interior da madeira, conforme descreve Denig (197-). Essa forma de secagem, diferenciada em função das variações anatômicas no interior da madeira, é teoricamente compreensível e esperada. Nos lenhos iniciais, os lumens das fibras apresentam diâmetros superiores e as

pontuações são maiores e mais numerosas. Como conseqüência, as forças de retenção da água capilar são menores nesses lenhos (Spolek & Plumb, 1981). A diferença é acentuada pela maior quantidade de ar presente nos lenhos tardios, diminuindo seus índices de saturação e aumentando a pressão capilar. Em adição, os coeficientes de difusão são superiores nos lenhos iniciais - menos densos - especialmente quando a madeira é seca a altas temperaturas (Stamm, 1964). Como resultado, os lenhos iniciais secam mais rápido que os tardios, conforme já observara Quemeré (1982). Para Plumb et al. (1984), o fluxo pode ocorrer por dois caminhos: a água livre pode mover-se do lenho inicial para o tardio, via ação capilar, ou diretamente para a superfície, através do lenho inicial. No caso do transporte radial, esses autores ponderam que a água livre deve cruzar regiões de lenho inicial e tardio e que a ação capilar parece ser o único mecanismo capaz de explicar esse fluxo. No entanto, o grande volume de ar encontrado no lenho tardio (Figura 1a), associado a suas características anatômicas, parece dificultar o fluxo capilar no sentido radial. Essa hipótese é consubstanciada pela evolução da secagem de cada anel de crescimento, de forma relativamente independente. A presença de água capilar na superfície da madeira, mesmo em estágios mais avançados do processo de secagem, explica porque as altas temperaturas, nos programas de secagem em dois estágios, só podem ser utilizadas quando o teor de umidade encontra-se abaixo do ponto de saturação das fibras.

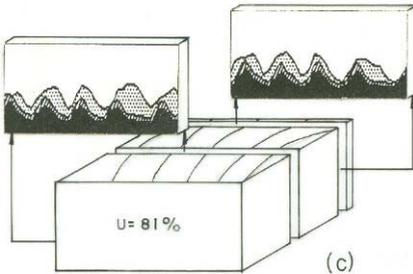


Na amostra úmida, os lenhos iniciais continham água capilar em quantidade equivalente a 75% daquela que poderiam conter quando em estado de completa saturação. Os tardios, apenas 35%; neles, havia grande quantidade de ar (Figura 1a).

Na face radial das amostras, o processo de secagem iniciou-se pelas primeiras camadas de fibras do lenho inicial (Figura 1b), nas quais os lumens apresentam diâmetros superiores e as pontuações são maiores e mais numerosas.



Nessas camadas, a redução do conteúdo de água evoluiu da superfície para o interior da amostra (Figura 1c), resultando numa região com teor de umidade próximo ao do ponto de saturação das fibras.



Posteriormente, com o decorrer da secagem, essa região foi evoluindo na direção do lenho tardio (Figura 1d). Todos os anéis de crescimento, quando completos, secaram de forma semelhante.

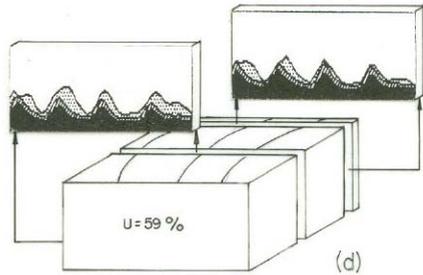


Figura 1. Proporções volumétricas entre (■) madeira, (□) ar, (▨) água higroscópica e (▩) capilar, na região central e na superfície das amostras, em diferentes fases da secagem, a 110 °C.

4. CONCLUSÕES

A secagem da madeira de *Pinus* oriunda de plantios de rápido crescimento, como aquela utilizada neste trabalho, não ocorre de forma homogênea, nos moldes que a literatura tradicionalmente relata, mas de forma diferenciada e em conformidade com as variações das características anatômicas. Observou-se a presença de água capilar na superfície da madeira, mesmo em estágios mais avançados do processo de secagem, o que explica a necessidade de uma redução do teor de umidade bastante acentuada, antes que se aumente a temperatura, para que a mancha marrom seja controlada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, O.; FERRAZ, E. S. B. Uso da radiação gama na determinação de gradientes de umidade em madeira. **Energia Nuclear na Agricultura**, v. 3, n. 2, p. 87-99, 1981.

AGUIAR, O. de; FERRAZ, E. S. B. Análise teórico-experimental dos erros envolvidos na determinação da umidade da madeira por atenuação de radiação gama. **Revista Ceres**, v. 30, n. 172, p. 399-407, 1983.

BAI, G. L.; GARRAHAN, P. The temperature and moisture content in lumber during preheating and drying. **Wood Science and Technology**, v. 18, n. 2, p. 121-135, 1984.

DENIG, J.; HANOVER, S. J.; HART, C. A. **Kiln drying southern yellow pine lumber**. Raleigh: The North Carolina Agricultural Extension Service, [197-]. 36 p. (Publication, AG-402).

FERRAZ, E. S. B. Determinação da densidade de madeiras por atenuação de radiação gama de baixa energia. **IPEF**, n. 12, p. 61-68, 1976.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, n. 2/3, p. 65-74, 1971.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111 p.

HART, C. A. **The drying of wood**. Raleigh: The North Carolina Agricultural Extension Service, 1975. 36 p. (Extension Circular, 471).

JANKOWSKY, I. P.; HENRIQUEZ, E. Z. Gradiente de umidade e desenvolvimento de tensões da secagem artificial da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **IPEF**, n. 24, p. 27-32, 1983.

MORTATTI, J.; FERRAZ, E. S. B. Localização da água nos anéis de crescimento de *Pinus taeda* durante a secagem. In: ENCONTRO NACIONAL DE SECAGEM, 3., 1981, Viçosa. **Anais...** Viçosa: CENTREINAR: Universidade Federal de Viçosa, 1981. p. 108-118.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. de. **Textbook of wood technology**. 3rd. ed. New York: McGraw-Hill, 1970. v. 1.

PEREIRA, J. C. D.; TOMASELLI, I.; CORRÊA, J. B. C. Ocorrência da mancha marrom em madeira serrada de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 26/27, p. 41-47, 1993.

PETTY, J. A. Relation between immersion time absorption of petroleum distillate in a vacuum-pressure process. **Holzforschung**, v. 29, p. 113-118, 1975.

PLUMB, O. A.; BROWN, C. A.; OLMSTEAD, B. A. Experimental measurements of heat and mass transfer during convective drying of southern pine. **Wood Science and Technology**, v. 18, n. 3, p. 187-204, 1984.

QUEMÉRÉ, Y. Mesure ponctuelle de l'humidité du bois. **Holzforschung**, v. 36, p. 287-294, 1982.

SPOLEK, G. A.; PLUMB, O. A. Capillary pressure in softwoods. **Wood Science and Technology**, v. 15, n. 3, p. 189-199, 1981.

STAMM, A. J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press, 1964. 549 p.

STAMM, A. J.; NELSON JUNIOR, R. M. Comparison between measured and theoretical drying diffusion coefficients for southern pine. **Forest Products Journal**, v. 11, n. 11, p. 536-543, 1961.

TOMASELLI, I. Brown stain in *Pinus elliottii* sawn wood. In: IUFRO DIVISION 5 CONFERENCE, 1988, São Paulo. **All division 5 conference: proceedings**. São Paulo: IBDF, 1988. v. 2, p. 128. Poster.