

Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*

Characteristic drying curve for *Eucalyptus grandis* lumber

Gilson Roberto Vasconcelos dos Santos
Ivaldo Pontes Jankowsky
Ariel de Andrade

RESUMO: A combinação da secagem natural com a secagem convencional tem sido indicada como alternativa para a madeira de *Eucalyptus grandis*, mas a literatura é controversa quanto ao momento mais adequado para a transição entre processos. De acordo com a teoria clássica sobre a secagem de materiais porosos, esse momento coincidiria com a predominância do fenômeno de difusão na movimentação da umidade, e que poderia ser determinado conhecendo-se a curva característica de secagem do material. Visando maior conhecimento sobre o comportamento da madeira de *Eucalyptus grandis*, foi determinada, experimentalmente, a sua curva característica de secagem. Os resultados comprovaram que a madeira de *Eucalyptus grandis* é impermeável ao fluxo de líquidos. É possível, com base na curva característica, sugerir a interrupção da secagem ao ar quando a madeira estiver com um teor de umidade entre 35% e 40%, iniciando-se, então, a secagem artificial.

PALAVRAS-CHAVE: Pré-secagem, Secagem convencional, Umidade, *Eucalyptus grandis*

ABSTRACT: To combine air and kiln drying has been suggested as an alternative to dry *Eucalyptus* lumber, but there is no agreement in literature regarding the most adequate point to move from one process to the other. According classical theory about drying of porous material, this point should coincide with the predominance of diffusion phenomena in the moisture movement, which could be determined through the characteristic drying curve of the material. With the objective to get better knowledge about the drying of *Eucalyptus grandis* lumber, its characteristic drying curve was determined. The results proved that *Eucalyptus grandis* lumber is not permeable to liquid flow. Based on its characteristic drying curve it is possible to suggest air drying interruption when lumber moisture content is between 35% and 40%, then starting artificial drying.

KEYWORDS: Seasoning, Kiln drying, Moisture content, *Eucalyptus grandis*

INTRODUÇÃO

Do ponto de vista físico, a secagem de madeiras pode ser definida como um balanço entre a transferência de calor da corrente de ar para a superfície da madeira e a transferên-

cia de umidade da superfície da madeira para a corrente de ar.

Durante a secagem da madeira a água se movimenta de zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade, significando que a parte

externa deve estar mais seca que o interior da madeira (Ponce Herrero e Watai, 1985). Embora não explicado pelos autores, esse conceito é válido para os processos de secagem por convecção, independente do material a ser seco.

De acordo com Kollmann e Cotê (1968); Rosen (1983) e Jankowsky (1995), durante o processo de secagem por convecção ocorrem três fases ou estágios distintos (Figura 1), caracterizados pela variação na taxa da perda de umidade e que determinam a curva característica de secagem do material.

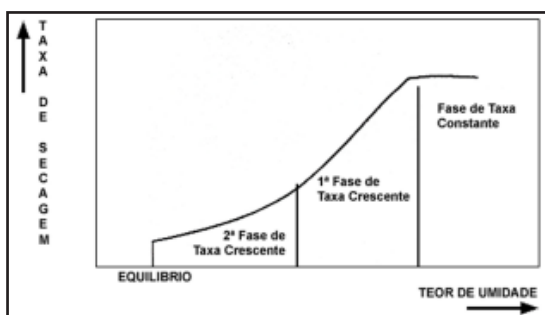


Figura 1
Curva característica de secagem para materiais porosos (Rosen, 1983).
(Characteristic drying curve for porous materials (Rosen, 1983))

No primeiro estágio ocorre taxa de secagem constante, com movimentação da água livre ou capilar até a superfície, provocada pelas forças de capilaridade.

Pela superfície ocorre o deslocamento de uma corrente de ar, caracterizando uma secagem por convecção. A energia (calor sensível) da corrente de ar é transferida para a superfície da madeira, promovendo a vaporização da água ali existente e que, no estado de vapor, é transferida para a corrente de ar. As condições externas exercem um grande efeito sobre o processo nessa fase, regulando a taxa de secagem desse período.

Parte da energia recebida pela superfície provocará o aumento da temperatura nessa re-

gião, iniciando a transferência de calor para o centro da peça.

No momento em que restrições ao fluxo capilar impedem que a água livre alcance a superfície da madeira, o teor de umidade nessa região atinge o Ponto de Saturação das Fibras (PSF), caracterizando o início da primeira fase de taxa decrescente.

A madeira atinge um teor de umidade no qual a linha de evaporação da água se desloca em direção ao centro da peça. A vaporização da água presente na superfície gerará um gradiente de umidade, principalmente no sentido da espessura, dando início à movimentação da água do interior até a superfície por difusão, a qual também é influenciada pelo fluxo de calor que ocorre no sentido inverso.

A movimentação interna da água ocorre nas fases de líquido, de vapor e como água higroscópica (quimicamente ligada aos componentes da parede celular). A movimentação na fase líquida é fundamentalmente um fenômeno de capilaridade, sendo afetado pela estrutura anatômica da madeira. A movimentação nas outras fases é basicamente um fenômeno difusivo, afetado não só pelas condições termodinâmicas da corrente de ar como também por características da própria madeira, tornando-se, esta última, significativa no controle da taxa de secagem.

No estágio final (segunda fase de taxa decrescente), iniciado quando a linha de evaporação de água se restringe ao centro da peça, não há mais água livre no material e a taxa de secagem é regulada pelas características do material, até que o teor de umidade de equilíbrio seja alcançado.

A secagem artificial, quando executada em secadores convencionais e seguindo um programa de secagem, busca compensar a redução na taxa de secagem do material com alte-

rações contínuas no meio de secagem (corrente de ar). Porém, para várias espécies do gênero *Eucalyptus*, dentre elas o *Eucalyptus grandis*, a capacidade de secagem do secador não pode ser utilizada devido à possibilidade de desenvolvimento de colapso e rachaduras na madeira.

Para estas espécies é recomendável o uso de um baixo potencial de secagem e de temperaturas iniciais que não excedam a 45°C, conforme preconizam autores como Pratt (1974); Northway (1996); Ciniglio (1998); Martins et al. (1999) e Andrade (2000).

Portanto, a secagem convencional seria um método eficaz, desde que seja adotado um programa suave e que resulte em uma secagem lenta. Esta limitação implica em tempos de secagem (permanência da madeira no secador) que tornam o processo anti-econômico, principalmente quando há necessidade de secar grandes volumes de madeira.

Como alternativa para reduzir o tempo de permanência da madeira no secador, diversos autores (Stöhr, 1977; Campbell e Hartley, 1988; Northway, 1996; Ciniglio, 1998 e Franzoni, 2001), têm sugerido, como métodos aplicáveis a madeira de *Eucalyptus grandis*, o uso da pré-secagem ou a combinação da secagem ao ar com posterior secagem convencional. Esta combinação proporcionaria redução de custos e otimização do processo, através da maior operacionalidade dos secadores.

Apesar da aceitação generalizada que a literatura registra sobre os efeitos positivos da pré-secagem na qualidade da madeira serrada, não há concordância entre os autores sobre o teor de umidade a partir do qual a madeira deveria ser submetida à secagem convencional. Stöhr (1977), considera que esse teor estaria entre 20% e 25% de umidade; Campbell e Hartley (1988), relatando trabalhos de vários autores, consideram que a madeira deveria secar ao ar até atingir uma umidade em torno de 30%;

enquanto que Northway (1996), recomenda umidades entre 40% e 50%; e Franzoni (2001), entre 30% e 40%.

Visando obter informações para otimizar o processo de secagem, o objetivo principal do presente trabalho foi determinar experimentalmente a curva característica de secagem para a madeira de *Eucalyptus grandis* e, dessa forma, indicar o teor de umidade mais adequado para a transição da secagem ao ar para o processo de secagem convencional.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizada madeira serrada de *Eucalyptus grandis*, fornecida pela empresa CAF - Companhia Agro-Florestal Santa Bárbara Ltda. A matéria-prima foi proveniente de florestas com 16 anos de idade, localizadas no município de Martinho Campos, MG.

A partir de 20 tábuas coletadas ao acaso foram cortadas amostras conforme esquema da Figura 2, com dimensões 490 x 80 x 20 mm, comprimento, largura e espessura, respectivamente. Todas as amostras eram peças tangenciais e de cerne.

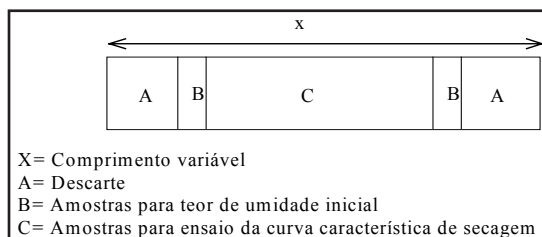


Figura 2
 Esquema de corte das amostras.
 (Sampling diagram)

O ensaio foi conduzido em um secador Hildebrand modelo HD 4004, com controle automático, mantendo-se o meio de secagem constante com temperatura de 35°C, umidade de equilíbrio de 14% e velocidade do ar de 1,2 m/s.

As amostras foram distribuídas dentro do secador em 2 colunas com 10 peças cada, utilizando-se separadores com 13 mm de espessura. A perda de massa foi acompanhada por pesagens periódicas de todas as amostras até que o teor de umidade da madeira estivesse próximo ao teor de umidade de equilíbrio (14%) do meio de secagem.

Após o término do ensaio as amostras foram secas em estufa sem ventilação de ar, a 103°C(±2), até atingirem massa constante (massa anidra). A taxa de secagem foi calculada com a equação (1).

$$ts = \frac{\Delta m_{\text{água}}}{\Delta t}$$

onde:

ts= taxa de secagem (g/h)

$\Delta m_{\text{água}}$ = variação da massa de água (g)

Δt = variação de tempo (h) em que ocorreu $\Delta m_{\text{água}}$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da perda de massa das amostras (Tabela 1) mostram o comportamento característico do material madeira, com a taxa de secagem decrescendo com o tempo, ou seja, à medida em que diminui o teor de umidade. Na faixa de umidade capilar a taxa média de secagem foi de 1,44 g/h, decrescendo para uma taxa média de 0,31 g/h quando da retirada da água higroscópica.

Os resultados da variação na taxa de secagem, também ilustrada na Figura 3, seguem o mesmo padrão observado na perda de massa, refletindo a dificuldade na retirada tanto de água capilar quanto da água higroscópica.

Tabela 1

Varição na massa de água (g) e da taxa de secagem (g/h) em função do tempo (h) de secagem. (Water content (g) and drying rate (g/h) variation related to drying time (h))

Tempo (h)	Massa de Água(g)	Teor de Umidade(%)	Taxa de Secagem(g/h)	Tempo (h)	Massa de Água(g)	Teor de Umidade(%)	Taxa de Secagem(g/h)
0	664,1	51	-	81	562,9	28	0,60
2	654,9	49	4,58	84	561,2	27	0,57
4	649,4	48	2,77	96	555,0	26	0,52
6	644,3	46	2,52	108	549,7	25	0,44
8	640,0	45	2,16	120	545,0	23	0,39
11	633,7	44	2,09	126	542,9	23	0,34
14	627,9	43	1,93	132	540,8	23	0,35
21	616,9	40	1,56	144	536,9	22	0,32
24	613,0	39	1,32	150	535,2	21	0,27
27	608,9	38	1,36	156	533,6	21	0,28
30	604,6	37	1,42	168	530,5	20	0,25
36	597,3	36	1,15	174	529,2	20	0,21
38	595,3	35	1,04	180	527,8	20	0,23
48	585,8	33	0,95	192	525,4	19	0,19
54	581,0	32	0,80	198	524,2	19	0,19
60	576,7	31	0,71	204	523,1	19	0,18
62	575,0*	30	0,83	216	521,2**	18	0,16
72	568,3	29	0,67				

*massa de água correspondente a 30% de umidade

**massa de água correspondente a 18% de umidade

De acordo com Rosen (1983), o primeiro estágio da curva característica apresenta taxa constante de secagem, o que significa que a movimentação de umidade do interior da madeira até a superfície tem a mesma magnitude (ou taxa de transferência) que a evaporação superficial. Para o material madeira a taxa constante de secagem significa que a movimentação da água livre, por capilaridade, está ocorrendo sem impedimentos, ou seja, que a madeira é permeável. Se a quantidade de água que chega até a superfície é igual à quantidade de água que está sendo vaporizada (taxa constante de secagem), a taxa de secagem em si depende exclusivamente das condições externas (meio de secagem).

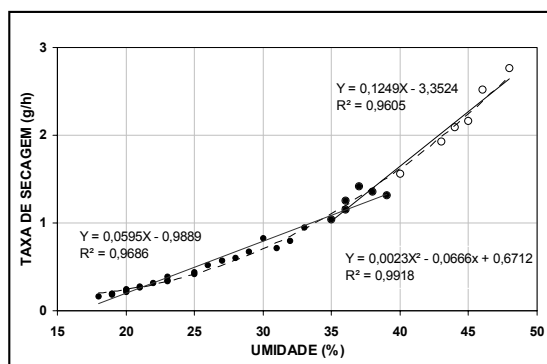


Figura 3

Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*.

(Characteristic drying curve for *Eucalyptus grandis* lumber)

Observa-se na Figura 3 que a curva característica de secagem, para a madeira de *Eucalyptus grandis* usada no ensaio, não apresenta a região ou fase em que a taxa de secagem é constante, mesmo com teores de umidade acima do PSF.

A movimentação da água capilar ocorre de uma célula para outra pelas aberturas naturais (Kollmann e Cotê, 1968; Siau, 1984). Porém, para as espécies do gênero *Eucalyptus* esse movimento sofre restrições pelas características anatômicas da espécie, com predomínio de

pontuações de pequenos diâmetros e com vasos usualmente bloqueados por tiloses.

Essa característica define a madeira de *Eucalyptus grandis* como impermeável, conforme descrito por outros autores como Stöhr (1977); Campbell e Hartley (1988) e Vermaas (2000). A baixa permeabilidade da madeira de eucalipto é tida como a principal responsável pela dificuldade da secagem e alta incidência de defeitos, principalmente o colapso.

A primeira fase de taxa de secagem decrescente inicia quando o teor de umidade da superfície está abaixo do PSF, quando a magnitude da vaporização superficial supera a do deslocamento interno. Nesse ponto a água capilar não se desloca até a superfície (por restrições ao fluxo capilar) e tem início a movimentação difusiva da água higroscópica.

A taxa de secagem passa a ser dependente da taxa de movimentação interna, a qual, por sua vez, dependerá do gradiente de umidade que se forma da superfície em direção ao centro. Como o teor médio de umidade da madeira ainda está acima do PSF, pode-se afirmar que a movimentação interna é condicionada pelas características do material, principalmente permeabilidade e massa específica.

Stöhr (1977) salienta que o gradiente de umidade acentuado é vantajoso para obter o aumento na taxa de secagem, porém essa afirmação será válida para a madeira de eucalipto apenas quando não houver mais a presença de água no estado líquido. Para madeiras impermeáveis, como o *Eucalyptus grandis* em estudo, forçar um aumento na taxa de secagem enquanto houver uma quantidade considerável de água líquida na madeira, implica em aumentar a incidência de defeitos como o colapso (que poderá ocorrer nas fibras internas que ainda contenham água livre) e as rachaduras de superfície (devido à retração diferenciada entre a superfície mais seca e a parte central ainda saturada).

O estágio final (segunda fase de taxa decrescente) da secagem tem início quando, na movimentação interna, passa a predominar o processo de difusão (Rosen, 1983). Isto significa que praticamente não há mais água livre na madeira e o processo de secagem estará controlado unicamente pelas características do material, principalmente a massa específica.

Contudo, observando a Figura 3, o ponto de inflexão da curva corresponde a um teor de umidade de aproximadamente 35%. Se a umidade média da madeira está acima do PSF, com certeza a parte central da peça ainda conterá uma quantidade razoável de água no estado líquido (água livre). Este fato comprova a impermeabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, pois a inflexão na curva característica de secagem está provando indiretamente que a água capilar contida na parte central da madeira não se movimenta por capilaridade (muito provavelmente devido a restrições anatômicas do material), e passa a predominar a movimentação por difusão.

Com base nesses resultados é possível inferir que parte da água capilar contida na madeira de *Eucalyptus grandis* se transforma em água higroscópica e passa a se movimentar em direção à superfície de evaporação por difusão.

Do ponto de vista prático, ou operacional, tem-se como indicativo que a madeira deverá permanecer em pré-secagem ao ar até um teor de umidade entre 35% e 40%, independentemente das considerações teóricas que possam ser feitas a respeito dos fenômenos de movimentação da água na madeira de *Eucalyptus grandis*. Este valor (35% a 40% de umidade) está em desacordo com as recomendações de Stöhr (1977) e Campbell e Hartley (1988), aproxima-se da citação de Northway (1996) e está dentro da faixa preconizada por Franzoni (2001) como um procedimento operacional.

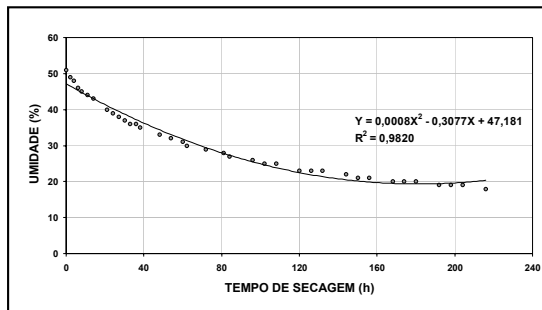


Figura 4

Perda de umidade em função do tempo, para madeira de *Eucalyptus grandis*.

(Drying curve for *Eucalyptus grandis* lumber)

Nas condições do ensaio, a umidade de equilíbrio dentro do secador foi de 14%, o que significa um potencial de secagem entre 3,6 (no início do ensaio) e 2,1 (quando a madeira estava com 30% de umidade). Na Figura 4, que apresenta a curva tradicional de secagem, observa-se que mesmo em condições mais severas de secagem (potencial de secagem acima de 3,0, para madeira de eucalipto), a taxa de perda de umidade é reduzida (0,43% de umidade / hora de secagem). Dessa observação pode-se concluir que, mesmo aumentando as condições do meio secante, o material não responderia na mesma proporção, corroborando a característica de secagem lenta do material em questão.

Caso a madeira de *Eucalyptus grandis*, com teor de umidade acima do PSF, seja submetida à secagem em estufa convencional acima do PSF, terá como característica uma secagem lenta, e a tentativa de acelerar o processo poderá acarretar, neste caso, maior ocorrência de defeitos.

CONCLUSÕES

Com base na análise e discussão dos resultados obtidos, é possível concluir :

✓ a curva característica de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* não apresenta a taxa

de secagem constante, o que permite caracterizar a espécie como sendo impermeável;

✓ é recomendável que a secagem natural seja interrompida quando o teor de umidade da madeira estiver entre 35% e 40%, ponto a partir do qual seria mais eficiente a secagem convencional.

AUTORES E AGRADECIMENTOS

GILSON ROBERTO VASCONCELOS DOS SANTOS é Mestre em Ciência e Tecnologia da Madeira pela ESALQ / USP; Bolsista do CNPq - FUNTAC - Fundação de Tecnologia do Estado do Acre - Av. das Acácias, L-01, Zona "A" - Distrito Industrial - Rio Branco, AC - 69917-100 - E-mail: grvsantos@yahoo.com

IVALDO PONTES JANKOWSKY é Professor Doutor do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ / USP - Av. Pádua Dias, 11 - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13418-900 - E-mail: ipjankow@esalq.usp.br

ARIEL DE ANDRADE é Mestre em Ciência e Tecnologia da Madeira pela ESALQ / USP - ANPM - Associação Nacional dos Produtores de Pisos de Madeira - Rua Campos Sales, 1818 - s.64 - Piracicaba, SP - 13416-310 - E-mail: ariel@anpm.org.br

Os autores agradecem à CAF - Cia. Agro-Florestal Santa Bárbara Ltda. pelo apoio na concessão do material utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, A. **Indicação de programas para secagem convencional de madeiras**. Piracicaba, 2000. 72p. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- CAMPBELL, G.S.; HARTLEY, J. Drying and dried wood. In: HILLIS, W.E.; BROWN, A.G. **Eucalyptus for wood production**. Melbourne: Academic Press, 1988. cap. 16, p.328-336
- CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. Piracicaba, 1998. 69p. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- FRANZONI, J.A. Utilização da madeira de eucalipto na indústria de móveis e padrões de qualidade de madeira para móveis de exportação. In: SEMINÁRIO MADEIRA DE EUCALIPTO: TENDÊNCIAS E USOS, Curitiba, 2001. **Anais**. Curitiba: FUPEF, 2001. p.50-52.
- JANKOWSKY, I.P. Equipamentos e processos para a secagem de madeiras. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, São Paulo, 1995. **Anais**. Piracicaba: IPEF, 1995. p.109-118.
- KOLLMANN, F.F.P.; COTÊ, W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v.1, 592p.
- MARTINS, V.A.; GOUVEIA, F.N.; MARTINEZ, S. Secagem convencional de madeira de eucalipto. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE ECOSISTEMAS FLORESTAIS, 5, Curitiba, 1999. **Anais**. Curitiba: Biosfera, 1999 (Poster).
- NORTHWAY, R.L. Drying strategies for plantation-grown eucalypts. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 5, Quebec, 1996. **Proceedings**. Quebec: IUFRO, 1996. p.289-296.
- PONCE HERRERO, R.; WATAI, L.T. **Manual de secagem da madeira**. Brasília: MIC / STI / IPT, 1985. 70p. (Série documentos, 22).
- PRATT, G.H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment, Building Research Establishment, 1974. 152p.
- ROSEN, H.N. Recent advances in the theory of drying lumber. In: IUFRO DIVISION V CONFERENCE, Madison, 1983. **Proceedings: wood drying working party**. Carbondale: Southern Illinois University, USDA, 1983. p.32-62.
- SIAU, J.F. **Transport processes in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245p.
- STÖHR, H.P. The seasoning of South African grown *Eucalyptus grandis* and *E. saligna*. **South African forestry journal**, n.102, p.61-66, 1977.
- VERMAAS, H.F. A review of drying technology for young fast-grown eucalypts. In: IUFRO, THE FUTURE OF EUCALYPTS FOR WOOD PRODUCTS, Tasmania, 2000. **Proceedings**. Tasmania: IUFRO, 2000. p.225-237.