

ESTIMATIVA DO TEMPO DE VAPORIZAÇÃO DE TORAS DE *Eucalyptus grandis*¹

Fred Willians Calonego² e Elias Taylor Durgante Severo²

RESUMO – O objetivo deste estudo foi adequar o modelo geral de determinação do tempo de vaporização de toras, proposto por Steinhagen et al. (1980), para a madeira de *Eucalyptus grandis*. Para tanto, foram coletadas toras de 20 a <25, de 25 a <30 e de 30 a <35 cm de diâmetro de 14 árvores de *E. grandis* provenientes do Horto Florestal de Mandurí, SP, pertencente ao Instituto Florestal de São Paulo. Em cada uma das toras foi inserido um termopar próximo ao seu centro. Posteriormente, as toras foram vaporizadas a 90 °C e 100% de umidade relativa, durante 20 horas. Um coletor de dados registrou as temperaturas, no interior do material, durante o tratamento térmico. Conclui-se que o modelo de Steinhagen et al. (1980) não pode ser diretamente aplicado à espécie em estudo, e propõem-se fatores de correções para a utilização do modelo geral de determinação do tempo de vaporização de toras, desenvolvido por Steinhagen et al. (1980), para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

Palavras-chave: Vaporização, *Eucalyptus grandis* e termopares.

STEAMING TIMES ESTIMATES FOR *Eucalyptus grandis* LOGS

ABSTRACT – The aim this study was to adjust the general model for determining log steaming time, proposed by Steinhagen et al. (1980), for *Eucalyptus grandis* wood. In order to do so, logs with diameter from 20 to <25, 25 to <30 and 30 to <35 cm were collected from 14 trees of *Eucalyptus grandis* derived from the 'Horto Florestal' nursery, Manduri, São Paulo. A thermocouple was inserted into each log near its center. The logs were steamed during 20 hours at 90°C and 100% relative humidity. A data logger recorded the temperatures during the thermal treatment. It was concluded that the Steinhagen et al. (1980) model cannot be directly used for this species in study and corrections factors are proposed for the utilization of the general model for log steaming time, developed by Steinhagen et al. (1980), for *Eucalyptus grandis* wood.

Keywords: Steaming, *Eucalyptus grandis* and thermocouple.

1. INTRODUÇÃO

Em face da crescente dificuldade para a obtenção de madeira nativa, devido a pressões socioambientais, sugere-se sua substituição por outra oriunda de reflorestamento, com propriedades semelhantes. Entretanto, a carência de informações quanto às propriedades da madeira proveniente de espécies de rápido crescimento ainda é um entrave para a utilização mais nobre desse material.

Segundo Nicholson (1973), o gênero *Eucalyptus* é um exemplo de madeira comercial em que as tensões de crescimento longitudinais pode apresentar valores excessivamente altos, ocasionando elevadas rachaduras de topo.

Para Boyd (1972) e Sales (1986), a origem das tensões de crescimento está associada à lignificação das paredes celulares, pois a lignina provoca inchamento irreversível na parede secundária da célula. Segundo esses mesmos

¹ Recebido em 30.08.2004 e aceito para publicação em 05.04.2006.

² Departamento de Recursos Naturais/Ciências Florestais, Universidade Estadual Paulista, Fazenda Experimental Lageado, s/n – Caixa Postal 237 – 18603-970 Botucatu-SP.

autores, essa deformação no sentido transversal da fibra provoca diminuição do comprimento da célula, devido aos pequenos ângulos microfibrilares da camada S_2 , da parede secundária. Esses ângulos microfibrilares variam de 10 a 20° (DETIENNE, 1988). A contração longitudinal da célula em crescimento é dificultada pelas células vizinhas mais velhas, de maneira que desenvolve um estresse longitudinal de tração na periferia do tronco e um estresse de compressão próximo à medula.

Uma inovação tecnológica para o incremento da qualidade do desdobro e da secagem e para minimizar as perdas de matéria-prima é a vaporização em toras, aplicação de vapor ou água quente por determinado tempo, com o intuito de fornecer calor para as toras, plastificar o material e obter o alívio das tensões de crescimento.

Rozas Mellado (1993), estudando a madeira de *Eucalyptus grandis* com os mesmos propósitos, confirmou que o tratamento de vaporização das toras, previamente aneladas, foi efetivo na liberação das tensões de crescimento. Para tanto, o autor recomendou a vaporização das toras durante 18 horas, a uma temperatura de 90 °C.

Skolmen (1967) obteve reduções, de cerca de 50%, das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus saligna*, com diâmetro de 15-20 cm, após um tratamento de 24 horas em água quente. Severo (1998) concluiu que a vaporização das toras de *Eucalyptus dunnii*, durante 20 horas, proporcionou redução significativa, na ordem de 50%, das tensões de crescimento.

Langrish e Walker (1993) afirmaram que o conhecimento das propriedades térmicas da madeira é de fundamental importância para se estimar o tempo de vaporização de toras.

As propriedades térmicas da madeira mais importantes são: (1) calor específico que pode ser definido como sendo a quantidade de calor necessária para elevar em uma unidade de temperatura uma unidade de massa da madeira; (2) condutividade térmica, que é a medida do fluxo de calor por unidade de espessura do material devido a um gradiente de temperatura; e (3) difusividade térmica, definida pela velocidade em que o material recebe calor do meio ao seu redor (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999, e SIMPSON, 1991).

Steinhagen et al. (1980) desenvolveram um método para a determinação do tempo de aquecimento, levando

em consideração as propriedades térmicas e físicas da madeira, características anatômicas, dimensões das toras, temperatura de aquecimento, temperatura desejada e temperatura do meio ambiente, como mostrado nas equações 1 e 2.

$$t' = \frac{F * R^2}{D^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

t' = tempo de aquecimento das toras, horas;

F = número de Furier (em função das temperaturas inicial e desejada das toras e da temperatura do meio aquecedor), adimensional;

R = raio médio das toras, m; e

D = difusividade térmica média das toras, $m^2 \cdot h^{-1}$.

$$D = d * F_a \quad (\text{Eq. 2})$$

em que:

d = difusividade térmica (em função das temperaturas inicial e desejada das toras), $m^2 \cdot h^{-1}$; e

F_a = fator de ajuste (em função do teor de umidade e da massa específica básica das toras) e adimensional.

Steinhagen et al. (1987) desenvolveram um programa de computador denominado LOG-HEAT e chegaram à conclusão de que esse programa é mais prático que os métodos anteriores para determinar o tempo de aquecimento de toras e o consumo de energia durante o processo.

Rozas Mellado (1993), Severo (1998) e Tejada et al. (1997) salientaram a necessidade da realização de estudos específicos sobre o tempo de aquecimento de toras, visando definir, com exatidão, os limites de tempo e temperatura de aquecimento.

Este trabalho teve como objetivo adequar o modelo geral de determinação do tempo de vaporização de toras, proposto por Steinhagen et al. (1980), para toras de *Eucalyptus grandis*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foram utilizadas toras de *Eucalyptus grandis* com 30 anos de idade, provenientes do Horto Florestal de Mandurí, localizado no Município de Mandurí, SP, e pertencente ao Instituto Florestal do Estado de São Paulo.

As 14 árvores foram escolhidas aleatoriamente dentro do povoamento e, após a derrubada, foram seccionadas em toras e classificadas em três classes de diâmetro (20 a <25; 25 a <30; e 30 a <35 cm).

2.1. Coleta do material

As toras apresentaram comprimento de 2,9 m e sofreram anelamento a 10 cm de cada uma de suas extremidades, a uma profundidade de aproximadamente 1/3 do raio das respectivas faces das toras, conforme a metodologia proposta por Sales (1986) e Kubler (1987).

Entre cada tora foi retirado um disco de 5 cm de espessura, sendo o primeiro localizado na base da árvore. Todo o material foi identificado com lápis-cópia e os discos, armazenados em sacos plásticos para, imediatamente, serem determinados o teor de umidade com base em massa seca e a massa específica básica do material, através das equações 3 e 4. Para a verificação dessas variáveis, utilizaram-se uma balança de precisão de 0,1 g e uma estufa com regulagem de temperatura a 103 ± 2 °C.

$$U\% = \frac{M_u - M_s}{M_s} * 100 \quad (\text{Eq.3})$$

$$\rho = \frac{M_s}{V_v} \quad (\text{Eq.4})$$

em que:

$U\%$ = teor de umidade da madeira, %;

M_u = massa úmida da madeira, g;

M_s = massa seca da madeira, g;

r = massa específica básica da madeira, g/cm³; e

V_v = volume no estado verde da madeira, cm³.

2.2. Determinação do tempo de vaporização de toras

Cada torete recebeu 1 um termopar, a uma profundidade equivalente ao seu centro, os quais tinham como função permitir o monitoramento, com precisão, da temperatura no interior das toras durante o processo de vaporização. A Figura 1 ilustra o modo de fixação do termopar no interior do torete.

Os termopares do tipo "T" (cobre X constantin) foram construídos através da união de ambos os termoelementos, utilizando-se um equipamento de solda elétrica. Após a construção dos termopares, estes foram submetidos a testes de aferição nas temperaturas 0 e 100 °C, as quais representam os pontos de gelo fundente e água em ebulição, cujos valores foram, respectivamente, 0,31 e 97,40 °C.

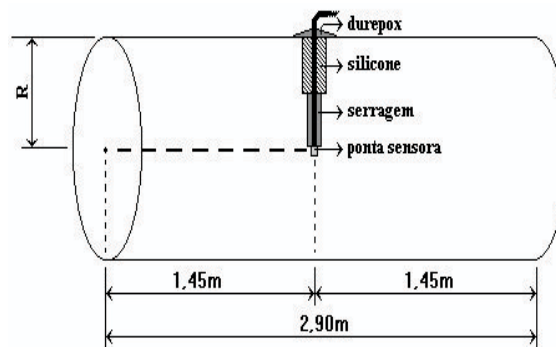


Figura 1 – Esquema de acomodação do termopar na tora.
Figure 1 – Outline drawing showing arrangement of the thermocouple inside the log.

Em cada um dos toretes foram realizados furos para a perfeita acomodação dos termopares. Depois da acomodação dos sensores, os orifícios foram vedados com várias camadas: serragem, retirada do próprio furo, no momento da furação; silicone, material resistente a temperaturas e umidades elevadas; resina durepox, isolante térmico; e uma película de silicone, resistente à umidade, ao choque mecânico e à temperatura. Cada material foi aplicado durante um intervalo de 24 horas, permitindo, dessa maneira, a secagem e fixação dos isolantes na madeira.

O comportamento da temperatura em cada classe de diâmetro dos toretes foi monitorado pelos termopares acoplados a uma base coletora de dados (Datalogger Micrologger 21X), durante todo o processo de vaporização.

2.3. Vaporização das toras

Os toretes com 2,9 m de comprimento foram submetidos ao tratamento de vaporização a 90 °C de temperatura e 100% de umidade relativa, durante 20 horas no interior de uma estufa-piloto de secagem convencional de madeira, com dimensões internas de 3,0 m de comprimento, 1,6 m de largura e 1,6 m de altura.

A estufa era dotada de um sistema de aquecimento através de resistência elétrica que permitia o alcance de uma temperatura máxima de 130 °C; um sistema de umidificação por vapor; uma caldeira elétrica da marca ETNA, com capacidade de geração de vapor de 30 kgf/h; e uma pressão de trabalho de 8 kgf/cm².

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme sugerido por Rozas Mellado (1993), Severo (1998) e Tejada et al. (1997), desenvolveu-se, neste estudo, um fator de correção de forma a permitir a utilização do modelo proposto por Steinhagen et al. (1980) para definir, com exatidão, o tempo de vaporização para toretes de *E. grandis*, com massa específica básica de $0,6 \text{ g/cm}^3$ e 75% de teor de umidade com base em massa seca.

Para cada ganho de 1°C de temperatura no centro dos toretes, durante o tratamento térmico, determinou-se o tempo de vaporização pelo modelo geral de Steinhagen et al. (1980) e coletou-se, conforme metodologia proposta neste estudo (ver item 2.2.), o tempo de vaporização real.

Em seguida, com os dados logaritimizados do tempo obtido por Steinhagen e do tempo real de vaporização, aplicou-se o modelo de regressão em função da tendência observada dos pares de dados. Essa operação foi realizada para cada classe de diâmetro de toretes estudados, como mostrado nas Figuras 2, 3 e 4. Nas três classes de diâmetro, optou-se pela escolha de um modelo linear crescente ($Y=a+b*X$).

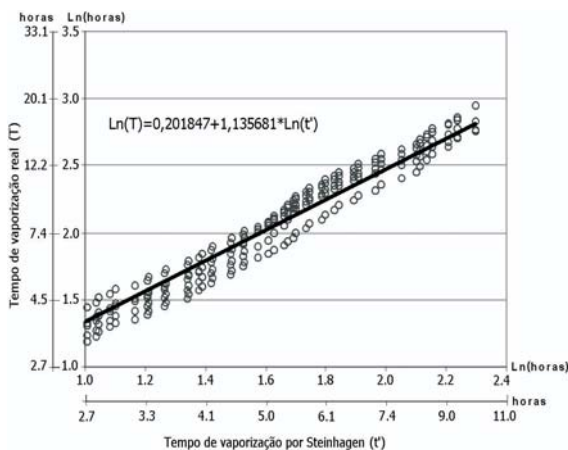


Figura 2 – Regressão linear ajustada para estimar o tempo de vaporização real de toras de *Eucalyptus grandis* com 20 a <25 cm de diâmetro, em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen et al. (1980).

Figure 2 – Adjusted linear regression to estimate real heating times for *Eucalyptus grandis* logs with 20 to <25 cm diameter in function of the heating time determined by the Steinhagen et al. (1980) model.

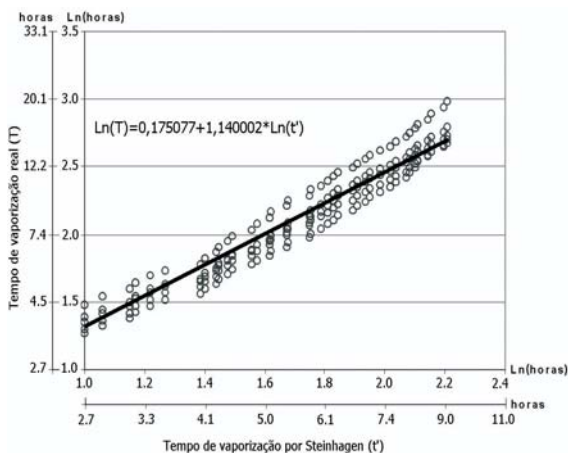


Figura 3 – Regressão linear crescente ajustada para estimar o tempo de vaporização real para toras de *Eucalyptus grandis* com 25 a <30 cm de diâmetro, em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen et al. (1980).

Figure 3 – Adjusted linear regression to estimate the real heating times for *Eucalyptus grandis* logs with 25 to <30 cm diameter in function of the heating time determined by the Steinhagen et al. (1980) model.

Na Figura 2, apresentam-se os resultados obtidos do modelo ajustado para calcular o tempo real de vaporização dos toretes de *Eucalyptus grandis* com diâmetro entre 20 e <25 cm. Nesse caso, o coeficiente de determinação (R^2), o erro-padrão da estimativa (S_{yx}) e o valor de “P” foram, respectivamente, de 0,97; 0,10278; e <0,0001.

A Figura 3 contempla os resultados obtidos do modelo ajustado para se calcular o tempo real de vaporização dos toretes de *Eucalyptus grandis* com diâmetro entre 25 e <30 cm. Nesse caso, o coeficiente de determinação (R^2), o erro-padrão da estimativa (S_{yx}) e o valor de “P” foram, respectivamente, de 0,95; 0,10657; e <0,0001.

A Figura 4 contém os resultados obtidos do modelo ajustado para se calcular o tempo real de vaporização dos toretes de *Eucalyptus grandis* com diâmetro entre 30 e <35 cm. Nesse caso, o coeficiente de determinação (R^2), o erro-padrão da estimativa (S_{yx}) e o valor de “P” foram, respectivamente, de 0,85; 0,14609; e <0,0001.

Nas três classes de diâmetros de toretes, os coeficientes dos modelos de regressão “a” e “b”

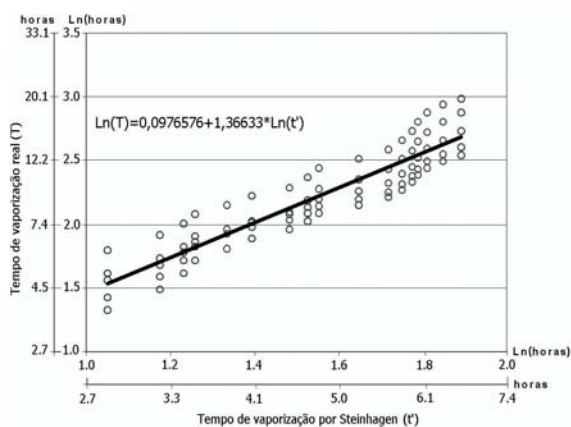


Figura 4 – Regressão linear crescente ajustada para estimar o tempo de vaporização real de toras de *Eucalyptus grandis* com 30 a <35cm de diâmetro, em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen et al. (1980).

Figure 4 – Adjusted linear regression to estimate the real heating times for *Eucalyptus grandis* logs with 30 to <35cm diameter in function of the heating time determined by the Steinhagen et al. (1980) model.

apresentaram-se altamente significativos, justificando suas presenças no modelo. Através da dispersão dos erros e dos intervalos de confiança e de previsão, conclui-se que os modelos ajustados e descritos anteriormente representam os conjuntos dos dados estudados.

Através do desenvolvimento matemático dos modelos gerados em função da análises de regressão, obtiveram-

se as equações propostas para a determinação do tempo de vaporização de toras de *E. grandis*, para cada classe de diâmetro, como mostrado na Tabela 1.

Supõe-se que, para que o centro dos toretes de 20 a <25, de 25 a <30 e de 30 a <35 cm de diâmetro atinja, respectivamente, 67, 50 e 39 °C de temperatura no processo de vaporização a 90 °C, sejam necessários seis horas pelo modelo de Steinhagen et al. (1980). Então, através da aplicação das equações propostas, apresentadas na Tabela 1, verificou-se que o tempo real necessário para que o centro dos toretes atinjam essas temperaturas desejadas é, respectivamente, de 9h20, 9h11 e 12h45.

Notou-se que o tempo de vaporização obtido experimentalmente, para que o centro dos toretes atinja a temperatura desejada, foi sempre superior ao obtido pela aplicação do modelo geral proposto por Steinhagen et al. (1980). Conclui-se que o modelo de Steinhagen não é diretamente aplicável para a espécie em questão (*E. grandis*), sendo necessária a adoção de fatores de correção.

Essa diferença pode ser explicada pela diversidade de espécies utilizadas. Os autores desenvolveram um modelo geral de vaporização baseado nas seguintes espécies: *Populus* sp, *Prunus serotina*, *Quercus* sp e *Pinus strobus*. A ausência do gênero *Eucalyptus* no desenvolvimento desse modelo requer a adoção de fatores de correções para estimar o tempo de vaporização de toras. Para que o modelo geral de determinação de tempo de vaporização de toras seja aplicado para a madeira de *Eucalyptus grandis*, sugerem-se as equações originadas das análises de regressão, como apresentado anteriormente.

Tabela 1 – Equações propostas para determinação do tempo de vaporização de toras de *Eucalyptus grandis*
Table 1 – Proposed equations for determination of steaming times for *Eucalyptus grandis* logs

Classe de Diâmetro (cm)	Modelo		Temperatura Desejada no Centro da Tora (°C)	Tempo de Vaporização pelo Modelo	
	de Steinhagen	Proposto		de Steinhagen	Proposto
20 a <25		$T = e^{(0,201847 + 1,135681 * Ln(t'))}$	67	6h	9h20
25 a <30	$t' = \frac{F * R^2}{D^2}$	$T = e^{(0,175077 + 1,140002 * Ln(t'))}$	50	6h	9h11
30 a <35		$T = e^{(0,0976576 + 1,36633 * Ln(t'))}$	39	6h	12h45

Em que: t' - tempo de vaporização de toras por Steinhagen et al. (1980), horas; F - número de Fourier, adimensional; R - raio médio das toras, m; D - difusividade térmica média das toras, m².h⁻¹; e T - tempo de vaporização de toras pelo modelo proposto.



4. CONCLUSÕES

Através da verificação das temperaturas dos toretes de *Eucalyptus grandis* durante a vaporização a 90 °C de temperatura, conclui-se que:

- O modelo de determinação do tempo de vaporização de toras, proposto por Steinhagen et al. (1980), subestima os tempos reais necessários de vaporização do material estudado.

- É necessária a adoção de fatores de correções para a utilização do modelo de determinação do tempo de vaporização de toras, proposto por Steinhagen et al. (1980), para a espécie estudada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOYD, J.D. The growth stresses: evidence of a origin in differentiation and lignification. **Wood Science Technology**, v. 6, p. 251-262, 1972.
- DETIENNE, P. **Cours illustre d'anatomie des bois**. Centre Technique Forestier Tropical. Département du CIRAD. Nogent - Sur-Marne CEDEX. Paris, 1988. 47p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - wood as an engineering material**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1999. 463p.
- KUBLER, H. Growth stresses in trees and related wood properties. **Forest Products Abstracts**, v. 10, n. 3, p. 61-119, 1987.
- LANGRISH, T.A.G.; WALKER, J.C.F. Transport process in wood. In: WALKER, J.C.F. et al. **Primary wood processing: principles and practice**. London: Chapman & Hall, 1993. p. 121-152.
- NICHOLSON, J.E. Growth stresses differences in eucalypts. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 169-174, 1973.
- ROZAS MELLADO, E.C.E.R. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para a utilização de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* (Hill Ex Maiden) na geração de produtos com maior valor agregado**. 1993. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Setor de Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.
- SALES, C.G. Growth stresses: main results obtained on the study of guyana species and consequences for and use. In: IUFRO WORLD CONGRESS, 18., 1986, Ljubljana. **Proceedings...** Ljubljana: IUFRO, 1986. v. 5, p. 234-248.
- SEVERO, E.T.D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem na madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid**. 1998. 200f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.
- SIMPSON, W.T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274p.
- SKOLMEN, R. G. Heating logs to relieve growth stresses. **Forest Products Journal**, v. 17, p. 41-42, 1967.
- STEINHAGEN, H. P; LEE, H.W.; LOEHNERTZ, S.P. LOG-HEAT: a computer program for determining log heating times charts for frozen and nonfrozen logs. **Forest Products Journal**, v. 37, n.11/12, p. 60-64, 1987.
- STEINHAGEN, H. P; MEYERS,G.E. & KUBLER,H. Heating times charts for frozen and nonfrozen veneer logs. **Forest Products Journal**, v. 30, n. 4, p. 27-37, 1980.
- TEJADA, A. et al. Reduction of growth stress in logs by direct heat treatment: assessment of a commercial-scale operation. **Forest Products Journal**, v. 47, n. 9, p. 86-93, 1997.