

**GRADIENTES DE UMIDADE E SUAS IMPLICAÇÕES NAS TENSÕES DE SECAGEM,
QUANTIDADE E DIMENSÕES DE RACHADURAS NA MADEIRA DE *Eucalyptus tereticornis*
AOS 15 ANOS¹**

**MOISTURE GRADIENTS AND THEIR IMPLICATIONS ON DRYING AND QUANTITY, CRACK
DIMENSIONS ON THE WOOD OF 15-YEAR-OLD *Eucalyptus tereticornis***

Maiara TALGATTI²; Amanda Grassmann da SILVEIRA²; Talita BALDIN²;
Laura Hoffmann de OLIVEIRA^{2,3}; Elio José SANTINI²

RESUMO - O gradiente de umidade, que corresponde à diferença de umidade entre o centro e a periferia da peça de madeira, desempenha papel importante no desenvolvimento de tensões que causam defeitos como rachaduras, encruamento e empenamentos. Cuidados para reduzir essa diferença no decorrer e no final do processo de secagem são procedimentos importantes para que a qualidade da madeira não seja comprometida. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do gradiente de umidade no desenvolvimento de tensões resultantes da secagem da madeira de *Eucalyptus tereticornis* conduzida em estufa convencional. Para isso, tábuas de 40 x 10 x 70 mm foram submetidas à secagem nas temperaturas de 45, 60 e 75°C, desde verde até o teor de umidade de 12%. No final da secagem foi avaliado a qualidade do material, por meio do gradiente de umidade, tensões de secagem e defeitos. A temperatura de 75°C proporcionou menor tempo de secagem, porém, maiores gradientes de umidade, maiores tensões e menor qualidade da madeira ao final da secagem. As temperaturas de 60° e 40°C apresentaram grande diferença no tempo de secagem, porém gradientes de umidade muito semelhantes e qualidade do material final também. Pode-se então, sugerir que seja utilizada a temperatura de 60°C para a secagem da madeira de *Eucalyptus tereticornis* com ganho de tempo e qualidade muito próxima da proporcionada por baixas temperaturas.

Palavras-chave: umidade da madeira; taxa de secagem; defeitos de secagem.

ABSTRACT - The moisture gradient, which corresponds to the humidity difference between the center and the periphery of the piece of wood plays an important role in the development of stresses that cause defects such as cracking, hardening and warping. Care to reduce this difference during and at the end of the drying process are important procedures so that the quality of the wood is not compromised. The present work had as the objective of this study was to evaluate the effect of the moisture gradient on the development of stresses of drying *Eucalyptus tereticornis* wood conducted in a conventional greenhouse. For 40 x 10 x 70 mm boards were then dried at temperatures of 45°C, 60°C and 75°C, from green to a moisture content of 12%. At the end of the drying, the quality was evaluated. through the moisture gradient, drying stresses and defects. The temperature 75°C provided shorter drying time, but higher moisture gradients, higher tensions and lower wood quality at the end of drying. The temperatures of 60°C and 40°C showed great difference in drying time, but humidity gradients very similar and quality of the final material as well. One can then suggest that it be 60°C for drying *Eucalyptus tereticornis* wood with gain in time and quality very close to that provided by low temperatures.

Keywords: Moisture content; drying rate; drying defects.

¹Recebido para análise em 15.05.2019. Aceito para publicação em 30.06.2019.

²Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Ciências, Av. Roraima 1000, Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria, RS,

³Autor para correspondência: Laura Hoffmann de Oliveira - laura-hoff@hotmail.com.

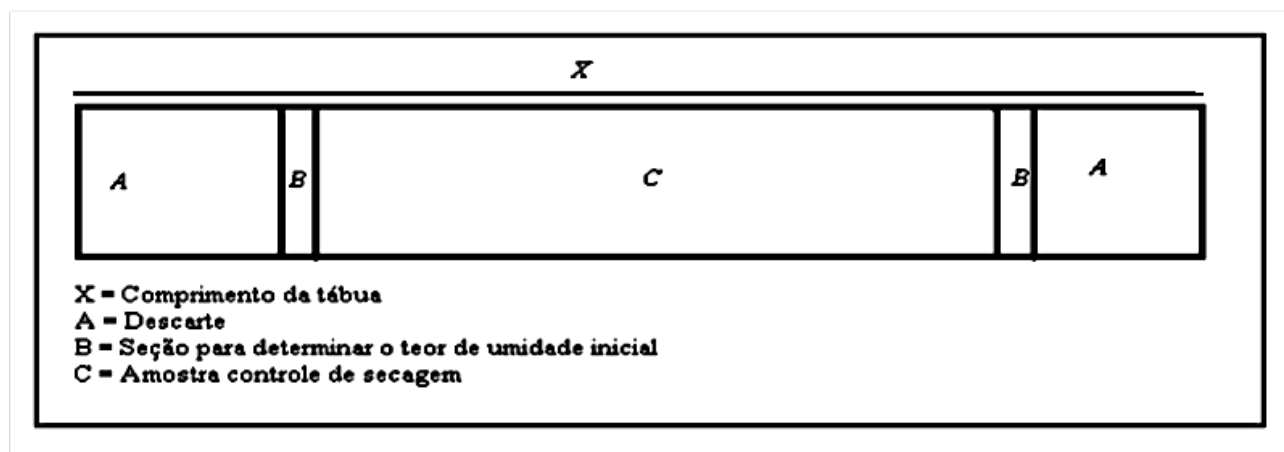


Figura 1. Metodologia adotada para a confecção das amostras controle de secagem.

Figure 1. Methodology used for the preparation of drying control samples.

Os corpos de prova controle foram imediatamente pesados em balança de precisão de 0,01g para a obtenção do peso inicial. Posteriormente, os corpos de prova foram dispostos em sala de climatização. O teor de umidade das amostras foi monitorado por meio da Equação (2) abaixo, a umidade final desejada foi de 12 %.

$$Tua = \frac{Pa(Tui+100)}{Pi} - 100 \quad (2)$$

Em que: Tua = Teor de umidade atual (%); Pa = Peso atual da amostra (g); Pi = Peso úmido da amostra (g); Tui = Teor de umidade inicial (%).

Para a determinação da taxa de secagem, Equação (3) descrita por Santini (1980), a massa úmida inicial das amostras foi obtida em balança digital de precisão igual a 0,01 g, enquanto as dimensões iniciais (largura, espessura e comprimento) foram obtidas com paquímetro digital, com precisão de 0,01mm. Durante o ensaio de taxa de secagem acompanhou-se a perda de massa dos corpos de prova, em balança digital.

$$Ts = \frac{Qae}{Ae \times T} \quad (3)$$

Em que: Ts = Taxa de secagem (g.cm⁻² h); Qae = Quantidade de água evaporada (g); Ae = Área superficial da peça (cm²); T = Tempo de secagem decorrido (horas).

A avaliação da secagem foi feita de acordo com a ocorrência de defeitos, umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem. Estas avaliações foram feitas decorridas 24 horas do término da fase de resfriamento das cargas de secagem, conforme recomendado por Galvão e Jankowsky (1985). Os defeitos avaliados foram: rachaduras de superfície e de topo e classificados como presente ou ausente, utilizando-se 100% das amostras de acordo com o proposto por Brandão (1989) (Tabela 1). Adicionalmente foram calculados os Índices de Rachadura de Superfície - IRS e de Topo - IRT de acordo com o proposto por Rocha (2000). Os empenamentos não foram avaliados devido ao comprimento e largura reduzida das amostras.

Após a secagem, de cada tábua avaliada cortaram-se três corpos de prova A, B e C, com 25 mm cada. A peça A foi utilizada para a determinação da umidade final, de acordo com a Equação (1). Já a peça B foi utilizada para a avaliação do gradiente de umidade, sendo desdobrada novamente em três corpos de prova. Os corpos de prova A1 e A2 foram utilizados para a determinação da umidade da superfície das tábuas, enquanto o B foi utilizado para a determinação da umidade no centro das mesmas, de acordo com a Equação (1). Calcularam-se dois gradientes de umidade, entre o corpo de prova B e A1 e entre B e A2, de acordo com as Equações (4) e (5).

$$G_1 = UB - UA_1 \quad (4)$$

$$G_2 = UB - UA_2 \quad (5)$$

Em que: G1 = Gradiente de umidade 1 (%); G2 = Gradiente de umidade 2 (%); UB = Umidade no interior da tábua (%); UA1 = Umidade na superfície 1 da tábua (%); UA2 = Umidade na superfície 2 da tábua (%).

A peça C foi utilizada para a avaliação da presença de tensões de secagem, de acordo com o teste do garfo. Conforme a Figura 2, pode-se observar o modelo da avaliação deste teste. Desta forma, as tábuas foram classificadas de acordo com o sugerido por Galvão e Jankowsky (1985).

Na Tabela 1 encontram-se os critérios utilizados para comparar a secagem realizada neste

trabalho quanto à duração do tempo de secagem e incidência de defeitos. Adicionalmente, foi verificada a massa específica aparente das madeiras de acordo com os requisitos normativos da Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7190/97.

A análise dos diferentes parâmetros aferidos deu-se por meio do Delineamento Inteiramente Casualizado - DIC, utilizou-se a análise de variância (teste F a 5% de significância), e nos casos em que a hipótese da nulidade foi rejeitada, aplicou-se o teste de Tukey (5% de significância) para a diferenciação das médias.

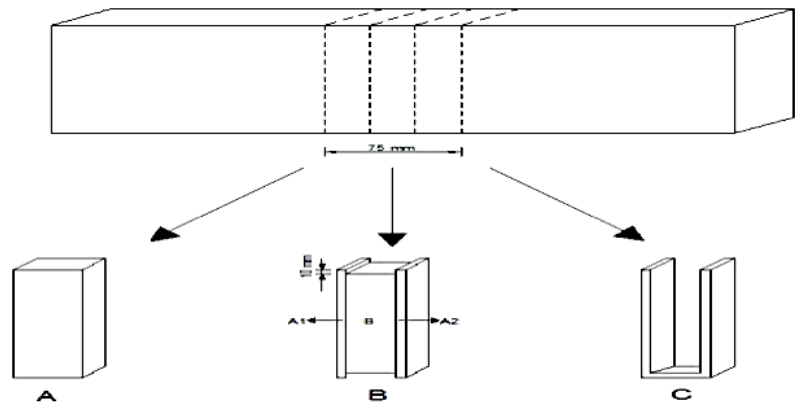


Figura 2. Corpos de prova utilizados na avaliação da umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem na madeira de *Eucalyptus tereticornis* aos 15 anos. Adaptado de Galvão e Jankowsky (1985). Sem escala.

Figure 2. Specimens used in final moisture evaluation, moisture gradient and drying stresses in 15-year-old *Eucalyptus tereticornis* wood. Adapted from Galvão and Jankowsky (1985). No scale.

Tabela 1. Critérios utilizados para a classificação da duração e incidência de defeitos de secagem na madeira de *Eucalyptus tereticornis* aos 15 anos.

Table 1. Criteria used for classification of drying duration and incidence of drying defects in 15-year-old *Eucalyptus tereticornis* wood

Tempo de secagem (h)	Classificação	Porcentagem de amostras com defeitos (%)	Classificação
Menos que 96	Muito rápida	0-10	Ausente
96-192	Rápida	11-30	Pequena
192,1-288	Moderadamente rápida	31-50	Moderada
288,1-384	Moderadamente lenta	51-100	Grande
384,1-480	Lenta	-	-
Mais que 480	Muito lenta	-	-

*Classificação feita por Brandão (1984).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, é possível visualizar os resultados da secagem da madeira de *Eucalyptus tereticornis* nas diferentes temperaturas empregadas e a massa específica aparente dos materiais. De acordo com a classificação feita por Brandão (1984), a secagem da madeira utilizando a temperatura de 75°C é considerada rápida, a 60°C moderadamente rápida e a 40°C muito lenta. Oliveira (1981) destaca que com relação às variáveis do processo, a elevação da temperatura contribui para o aumento de velocidade de remoção da água, tanto para os mecanismos de difusão, quanto para a movimentação de água capilar, porém, temperaturas muito elevadas podem causar maior degradação no material. Este comportamento foi verificado no presente estudo, onde a velocidade de secagem do material foi maior na maior temperatura empregada.

Stangerlin et al. (2009) ao submeterem à secagem ao ar livre e em estufa solar as madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, verificaram maior dificuldade na secagem de *E. tereticornis* em detrimento das demais em estudo. Este resultado corrobora com a presente pesquisa, na qual a madeira de *E. tereticornis* também apresentou dificuldade de secagem, os autores supracitados atribuíram este resultado a elevada massa específica verificada (0,90 g.cm⁻³), sendo esta semelhante à apresentada neste estudo (0,89 g.cm⁻³). Já Delucis et al. (2014), verificaram massa específica básica para madeira de lenho adulto e juvenil de *E. tereticornis* de 0,76 e 0,67 g.cm⁻³, respectivamente. Para Batista et al. (2015), a densidade se correlaciona diretamente com as demais propriedades físicas da madeira. Porém, o conhecimento de um maior número de características do comportamento de secagem das espécies levará a tomada de decisões mais acertadas.

Tabela 2. Teor de umidade inicial (Tui) e final (Tuf) dos corpos de prova, Massa específica aparente (Mea) e Tempo decorrido (Td) na madeira de *Eucalyptus tereticornis* aos 15 anos.

Table 2. Initial and final moisture content of specimens, apparent specific mass and elapsed time in 15-year-old *Eucalyptus tereticornis* wood.

Temperatura	Tui média (%)	Tuf média (%)	Td (h)	Mea (g.cm-3)
75°C	65,53	11,5	120	0,89
60°C	67,61	12,14	252	0,89
40°C	68,16	13,04	492	0,89
Média	67,1	12,22	288	0,89

Na Figura 3 são apresentadas as curvas características de secagem para o material em estudo nas diferentes temperaturas empregadas. Visualiza-se que, as curvas de secagem não apresentam região ou fase em que a taxa de secagem é constante, mesmo com teores de umidade acima do PSF, caracterizando as madeiras como impermeáveis, resultados semelhantes foram reportados por Rezende et al. (2015), em estudos de secagem por vaporização em *E. grandis*. Ainda, Santos et al. (2003), afirmam que a permeabilidade reduzida implica na necessidade de uma secagem lenta e no desenvolvimento, durante o processo, de gradientes de umidade acima do normal.

Simpson (1991) cita que a rapidez da secagem está relacionada com gradiente de umidade, este decresce à medida que a secagem decorre com o tempo,

diminuindo também a velocidade da secagem, ou seja, a secagem se dá com maior velocidade nas primeiras horas, com a retirada da água livre, e tende a diminuir progressivamente à medida que a água de impregnação começa a se movimentar para fora da madeira. Já autores como Martins (1988) e Ponce e Watai (1985) comentam, que geralmente as madeiras mais densas requerem mais tempo para secar e tendem a apresentar maiores defeitos.

Na Tabela 3 são apresentados os valores de taxa de secagem acima do Ponto de Saturação das Fibras - PSF e abaixo, até o teor de umidade desejado de 12%. As taxas de secagem nos diferentes tratamentos diferiram entre si, sendo as maiores, tanto acima quanto abaixo do PSF, apresentadas na temperatura de 75°C, seguidas da de 60°C e 40°C.

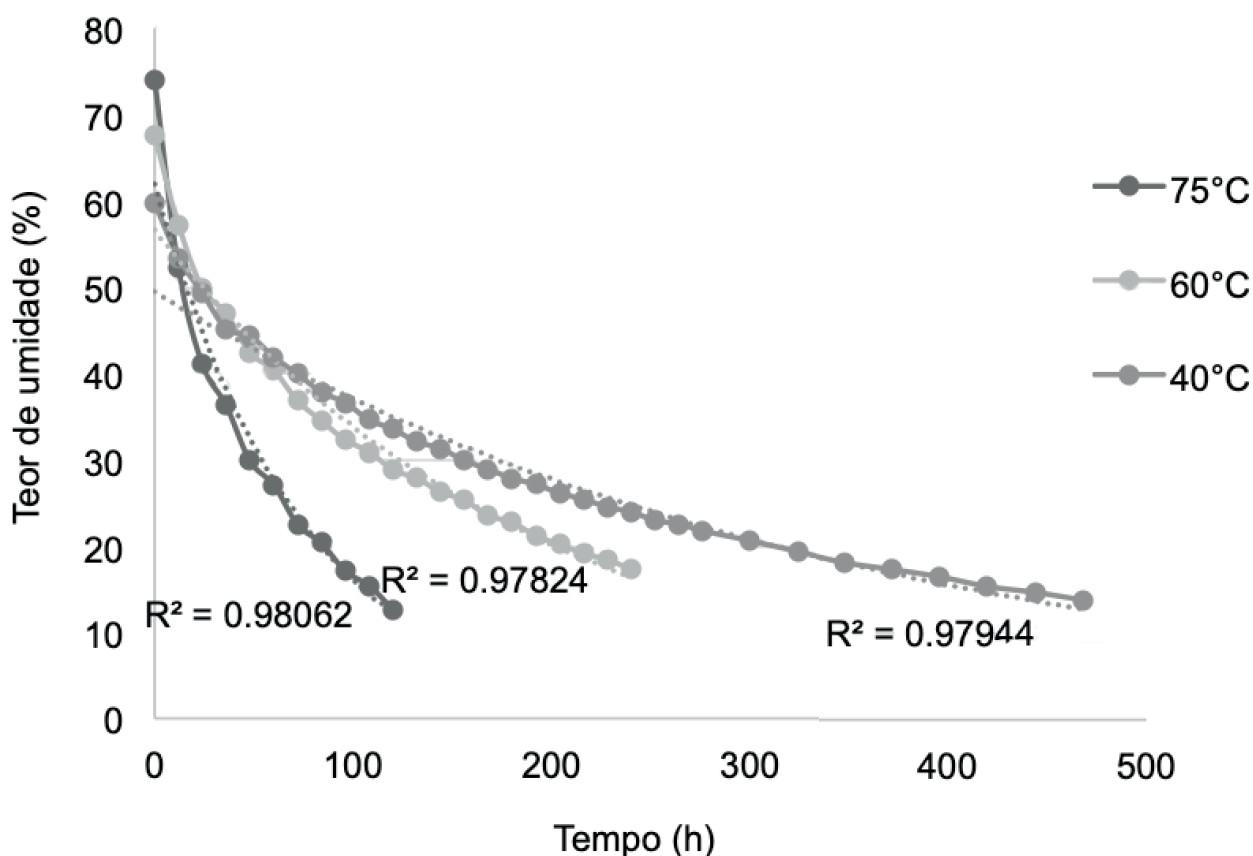


Figura 3. Curvas de secagem das amostras de madeira de *Eucalyptus tereticornis* aos 15 anos em função do teor de umidade inicial e tempo decorrido em horas nas diferentes temperaturas de secagem.

Figure 3. Drying curves of 15-year-old *Eucalyptus tereticornis* wood as a function of the initial moisture content and time elapsed in hours at the different drying temperatures.

Tabela 4. Médias dos gradientes de umidade e tensões de secagem da madeira de *Eucalyptus tereticornis* aos 15 anos em diferentes temperaturas.

Table 4. Means of moisture gradients and drying tensions of 15-year-old *Eucalyptus tereticornis* wood at the different drying temperatures.

Temperatura	Gradiente de umidade (%)				Tensões de secagem (%)	
	1		2		Leve	Forte
60°C	5,20	aA	5,75	aA	20	80
40°C	2,73	aA	3,40	aA	33,33	66,66
Média	2,21	aA	2,37	aA	40	60

Médias seguidas de uma mesma letra minúscula, em uma mesma coluna, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula, em uma mesma linha, não diferem entre si de acordo com o teste t a 5% de significância.

Já Stangerlin et al. (2009) não observou tensões de secagem para madeira de *E. tereticornis*, *E. saligna* e *C. citriodora*, na secagem ao ar livre, provavelmente pela baixa velocidade de secagem empregada e pelo teor de umidade final estar em média com 23%, muito próximo ainda do PSF, não sendo suficiente para causar tensões internas na madeira.

Souza et al. (2012) em estudo sobre a influência da secagem ao ar livre e convencional na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* verificaram índices médios de rachaduras de topo em tábuas de 15,01 e 23,7%, respectivamente, resultados inferiores aos apresentados neste estudo. Stangerlin et

al. (2009), durante processo de secagem de *Eucalyptus tereticornis* ao ar livre e em estufa solar, verificaram que 18,18 e 12,73% das amostras apresentaram rachaduras de topo em tábuas e 58,18 e 67,27% de rachaduras de superfície, estes valores são menores do que os verificados no presente estudo, esta discrepância pode ser explicada devido a utilização de temperaturas maiores no presente estudo.

Na Tabela 5 encontram-se a porcentagem dos tipos de rachadura, Índices de Rachadura de Superfície - IRS e de Topo - IRT da madeira de *Eucalyptus tereticornis* aos 15 anos em diferentes temperaturas.

Tabela 5. Porcentagem dos tipos de rachadura e Índices de Rachadura de Topo (IRT) e Superfícies (IRS) da madeira de *Eucalyptus tereticornis* aos 15 anos em diferentes temperaturas.

Table 5. Percentage of *Eucalyptus tereticornis* samples with drying defects and top crack (IRT) and surface indexes (IRS) of 15-year-old *Eucalyptus tereticornis* wood at the different drying temperatures.

Temperatura	Rachaduras de topo (%)	Rachaduras de superfície (%)	IRT (%)	IRS (%)
75 °C	80 (grande)	8,23 (ausente)	46,94	3,03
60 °C	46,66 (moderada)	4,02 (ausente)	35,39	0,56
40 °C	40 (moderada)	0,00 (ausente)	25,63	0,00

Entre parênteses classificação da incidência de defeitos.

PONCE, R.M.; WATAI, L.T. **Manual de secagem de madeira**. Brasília: MIC/STI/IPT, 1985. 70 p. (Série Documentos, 22).

REZENDE, R. N. et al. Efeito da vaporização na secagem de tábuas de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 37-43, 2015.

ROCHA, M. P. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria prima para serrarias. 2000. 185 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SANTINI, E. J. **Influência de temperatura na taxa de secagem e contração da madeira de *Pinus elliottii* proveniente de plantios de rápido crescimento**. Curitiba: FUPEF, 15p. (Série Técnica, 5), 1980.

SANTOS, G. R. V.; JANKOWSKY, I. P.; ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, n. 63, p. 214-220, 2003.

SILVA, J. C. Eucalipto: a madeira do futuro. **Revista da Madeira**, Edição especial, 2001. 114 p.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1991. 274 p.

SOUZA, J.T. et al. Qualidade da madeira serrada proveniente de árvores dominantes 167 e médias de *Eucalyptus grandis* submetidas à secagem. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 167-174, jan./mar. 2012.

STANGERLIN, D. M. et al. Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 4, p. 461-472, out/dez. 2009.

TOMASELLI, I. **Secagem de madeira**. Curitiba: FUPEF, 1980. 29 p.

VIDAURRE, G. et al. Lenho Juvenil e Adulto e as Propriedades da Madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, out./dez. 2011.