

Avaliação da secagem de madeira de *Eucalyptus grandis* em estufa controlada após a impregnação com nanopartículas de prata

Guilherme Valcorte¹; Roberta Rodrigues Roubuste¹; Cristiane Pedrazzi¹; Talita Baldin²;
Bárbara Lôpo de Lima; Fernando Colen²

¹Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria/RS, Brasil; Instituto de Ciências Agrárias, ²Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Montes Claros/RN, Brasil - gvalcorte@gmail.com

Resumo: A madeira do gênero *Eucalyptus* é bastante utilizada e difundida na indústria, sendo notória a necessidade de implantação de tecnologias que melhorem o processo de secagem. O objetivo deste estudo é avaliar a secagem de tábuas da madeira de *Eucalyptus grandis* em estufa controlada após a impregnação com nanopartículas de prata. Foram confeccionados corpos de prova (2,5 x 10,0 x 31,0 cm, respectivamente, espessura, largura e comprimento), nos quais foram impregnadas concentrações de 40 e 100 ppm, com posterior secagem em estufa laboratorial com circulação forçada com temperatura constante de 60°C, para realização de análises de teor de umidade e taxa de secagem. Os resultados mostraram que ocorreu maior perda de umidade naquelas peças com impregnação de 40 ppm, assim como, uma maior taxa de secagem. A partir do estudo, foi possível concluir que a impregnação de nanopartículas de prata traz benefícios no tempo secagem para madeiras de *Eucalyptus grandis*.

Palavras-chave: Nanotecnologia, Prata coloidal, Secagem da madeira.

Evaluation of the Drying of *Eucalyptus grandis* Wood in a Controlled Kiln after Impregnation with Silver Nanoparticles

Abstract: Wood from the *Eucalyptus* genus is widely used and disseminated in industry, and there is a clear need to implement technologies that improve the drying process. The aim of this study was to evaluate the drying of *Eucalyptus grandis* wood boards in a controlled oven after impregnation with silver nanoparticles. Specimens were made (2.5 x 10.0 x 31.0 cm in thickness, width and length, respectively), in which concentrations of 40 and 100 ppm were impregnated, and then dried in a laboratory oven with forced circulation at a constant temperature of 60°C, for analysis of moisture content and drying rate. The results showed that there was a greater loss of moisture in the pieces impregnated with 40 ppm, as well as a higher drying rate. From the study, it was possible to conclude that the impregnation of silver nanoparticles brings benefits in drying time for *Eucalyptus grandis* wood.

Keywords: Nanotechnology, Colloidal silver, Wood drying.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se observado um aumento significativo na utilização da madeira proveniente de árvores de plantações florestais de ciclo curto e alta produtividade, especialmente das espécies pertencentes aos gêneros *Eucalyptus*. Esse crescimento é particularmente evidente na indústria, que vem adotando essas



espécies como matéria-prima devido à sua rápida renovação, grande disponibilidade em matéria prima e suas características físico-mecânicas adequadas para a fabricação de móveis, além de atender às demandas de sustentabilidade, uma vez que as plantações florestais são manejadas de forma a garantir a reposição contínua dos recursos (LOPES *et al.*, 2011).

No processo de secagem das madeiras serradas de eucalipto, é crucial manter um controle rigoroso para evitar mudanças dimensionais drásticas que podem causar defeitos e comprometer a funcionalidade e estética da madeira (RABIDIN *et al.*, 2017). A secagem deve ser ajustada para alcançar um teor de umidade de equilíbrio, minimizando variações e prevenindo deformações, rachaduras e outros problemas estruturais.

Conceitualmente, as madeiras do gênero *Eucalyptus* são de difícil secagem (JANKOWSKY *et al.*, 2000). Esse comportamento é prejudicial para a indústria madeireira, devido à grande demanda por produtos com secagem mais rápida e boa qualidade final. Por conta disso, muitas indústrias enfrentam problemas com a qualidade das peças secas ou preferem adotar outras espécies como matéria-prima principal (ZEN *et al.*, 2019). Dessa forma, para que as espécies desse gênero sejam mais bem aproveitadas, é necessário um método de secagem adequado, conforme a sua finalidade.

Nesse sentido, a secagem convencional se destaca por ser mais rápida, com controle de taxa de secagem e ainda é capaz de acelerar a perda de umidade da madeira com menor incidência de defeitos possíveis, gerando um produto de maior qualidade (REZENDE *et al.*, 2015) e, consequentemente, baixos custos.

Visando obter melhores resultados, existem muitas tecnologias que podem ser utilizadas para melhorar o uso da madeira, no entanto, a tecnologia de impregnação da madeira com nanopartículas de prata anterior ao processo de secagem pode atribuir ao material características relevantes, como por exemplo, servir de catalisador na secagem da madeira (DASHTI *et al.*, 2012).

A avaliação do processo de secagem é fundamental para fornecer subsídios, de modo a minimizar os defeitos, o tempo de secagem, melhorar a qualidade da madeira. Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar a secagem de tábuas da madeira de *Eucalyptus grandis* em estufa controlada após a impregnação com nanopartículas de prata, nas concentrações de 40 e 100 ppm.



2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 *Obtenção e preparo do material*

As árvores de *Eucalyptus grandis* são provenientes de plantios experimentais localizados na cidade de Santa Maria – RS, nas coordenadas 29°39'37.63"S e 53°55'4.49"O. Para a elaboração deste estudo, foram abatidas três árvores de um plantio homogêneo com espaçamento 3 x 2 m, as quais foram utilizadas apenas a primeira tora com 1,50 m, após 0,10 m acima do nível do solo. Posteriormente, foram confeccionados os corpos de provas nas dimensões de 0,025 x 0,10 x 0,40 m, respectivamente, espessura, largura e comprimento.

As nanopartículas de prata foram obtidas de forma comercial, sendo selecionadas em duas concentrações, com 40 e 100 ppm (parte por milhão), essa solução possui pratas coloidais com tamanhos nanométricos, foi impregnada na madeira com auxílio de uma autoclave laboratorial, inicialmente aplicou-se uma contrapressão durante 15min e, em seguida, o líquido contendo as NP's Ag foi transferido para o interior da autoclave, para assim ser aplicado a pressão de 8 bar durante um período de 1 hora.

2.2 *Método de secagem da madeira*

A secagem controlada da madeira foi realizada em estufa laboratorial da marca Marconi modelo MA 035 com circulação e renovação de ar, utilizando temperatura constante de $60^{\circ}\text{C} \pm 2$. Ainda, analisando três diferentes tratamentos: testemunha, 40 ppm e 100 ppm, onde cada tratamento tinha seis repetições, totalizando 18 corpos de prova. Durante o processo de secagem, a cada 2 horas foram tomadas de todas as amostras o seu peso e suas respectivas dimensões (espessura, largura e comprimento). Assim que as tábuas atingissem o valor constante de teor de umidade de aproximadamente 20%, parou-se a medição, o tempo de secagem foi de 109 horas.

2.3 *Monitoramento do teor de umidade e taxa de secagem*

O método utilizado para determinar o teor de umidade da madeira, foi o gravimétrico, para isso foram utilizadas todas as tábuas de 0,40m e retirada os primeiros 0,025m de cada extremidade, com o objetivo de minimizar a influência da secagem dos topos. Posteriormente, foram retirados mais dois corpos de provas de 0,025m como amostra de controle. Deixando como material final, corpos de prova de 0,30m para realizar as análises de secagem.



Durante a secagem da madeira, o teor de umidade inicial de cada amostra de controle foi calculado por meio da média aritmética das duas seções (A e B). O teor de umidade de cada seção foi determinado pela equação 1, utilizando estufa de convecção natural com temperatura constante de $103^{\circ}\text{C} \pm 2$.

$$Tui = \frac{(Pu - Ps)}{Ps} \times 100$$

Em que: Tui = Teor de umidade inicial (%); Pu = Peso úmido da amostra (g); Ps = Peso seco da amostra (g).

Em cada pilha de madeira foram colocadas duas amostras de controle em locais diferentes de fácil remoção e reposição, de modo a permitir uma medição real e representativa do teor de umidade das mesmas. O teor de umidade de cada pilha foi calculado por meio da equação 2:

$$Tua = \frac{(Pa(TUi + 100)}{Pi - 100}$$

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

As peças permaneceram nas pilhas até que atingissem o teor médio de umidade aproximado de 17,8%, percentual considerado o teor de umidade de equilíbrio para madeira na região central do Rio Grande do Sul nesta época do ano, de junho a agosto.

Para determinar a taxa de secagem, foi necessário utilizar a equação 3, descrita por Santini (1980);

$$TS = \frac{Qae}{Ae \times T}$$

Em que: Ts : Taxa de secagem ($\text{g}/\text{cm}^2 \text{ h}$); Qae : Quantidade de água evaporada (g); Ae : Área superficial da peça (cm^2); T : Tempo de secagem decorrido (horas).

2.4 Análise estatística

Foi realizado um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com as análises de homocedasticidade da variância ($p > 0,05$) e a normalidade da distribuição dos erros experimentais ($p > 0,05$), respectivamente, Bartlett e Shapiro-Wilk. Nos casos em que não houve a diferença significativa, foi necessário realizar a transformação



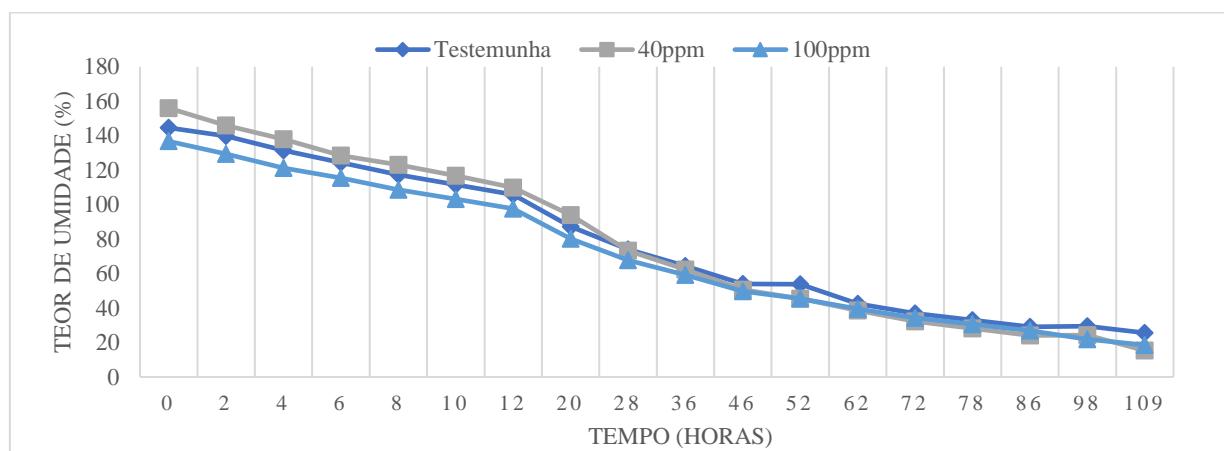
dos dados, para isso, em conjunto foi utilizado o software estatístico Past e o software Rstudio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 ilustra as curvas de secagem das madeiras secas em estufa laboratorial. Relacionando o teor de umidade e o tempo de secagem, percebe-se que a curva apresenta as características normais das curvas de secagem, sendo que a partir das 28 horas de processo a testemunha apresentou menor perda de teor de umidade em relação às madeiras que foram impregnadas com NP's Ag. Isso acontece, pelo fato de os nano-metais estarem espalhados por todas as paredes celulares, vasos e pontuações, facilitando uma melhor transferência de calor ao interior da madeira. Assim, o TUf da testemunha apresentou-se mais alto do que o das madeiras com impregnação de nanopartículas de prata.

Ao analisar a Figura 1, pode-se observar através da curva de umidade para a retirada da água da madeira, que levaram aproximadamente 78 horas para que fosse atingido o PSF. Já para a remoção da água de impregnação, foram necessárias mais 31 horas, totalizando 109 horas de secagem, chegando até aproximadamente 19% de teor de umidade.

Figura 1. Curva de secagem em estufa laboratorial das amostras de *Eucalyptus grandis* em função do teor de umidade inicial e tempo decorrido em horas.



Fonte: (Autores).

Isso acontece, segundo Viscarra (1998), porque a perda da água da madeira ocorre de maneira diferente dependendo do teor de umidade em que a peça se encontra, ou ainda, se está acima ou abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF).



Para a retirada da água livre da madeira por capilaridade, segundo autores como Galvão e Jankowsky (1985) e Simpson (1991), devem ser tomados alguns cuidados no início do processo para espécies de baixa permeabilidade, como o gênero *Eucalyptus*, para que assim minimize-se a ocorrência de defeitos.

O teor de umidade inicial médio, horas de secagem e teor de umidade final da secagem em estufa laboratorial estão expostos na Tabela 1. A partir da análise do teor de umidade médio dos tratamentos, pode-se observar que houve uma redução de 125,94% de umidade durante as 109 horas de secagem. Nota-se ainda, que a maior média inicial (155,98%) e a menor média ao final (15,32%) foram obtidas quando utilizada a concentração de 40 ppm, a qual apresentou uma maior perda de umidade nas 109 horas de secagem.

Tabela 1. Valores de teor de umidade inicial, final e tempo decorrido da secagem em estufa laboratorial para cada tratamento analisado.

Tratamento	TUi	Horas	TUf
Testemunha	144,58	109	25,60
40 ppm	155,98	109	15,32
100 ppm	126,74	109	18,58
Média	145,77	-	19,83

Legenda: TUi, teor de umidade inicial, TUf, teor de umidade final.

Os resultados obtidos no teor de umidade inicial estão semelhantes aos observados por outros estudos para a espécie de *Eucalyptus grandis* com vaporização (MELLADO, 1993; REZENDE *et al.*, 2015). As perdas de umidade em relação ao tempo de secagem da madeira se mostram superiores às encontradas por autores como Ciniglio (1998), Severo (1998) e Rocha (2000), que fizeram secagem em estufa convencional para a mesma espécie, em estufa semelhante.

Na Tabela 2 estão expostas as taxas de secagem acima e abaixo do PSF, além da média geral para a secagem em estufa laboratorial. Por meio dessa, pode-se observar que aquelas madeiras com valores de taxa de secagem acima do PSF com a impregnação de 40 ppm diferiram significativamente da testemunha e daquela com impregnação de 100 ppm, mostrando que houve uma maior perda de umidade da madeira em relação às demais. Quando comparado a secagem em estufa com o teor de umidade abaixo do PSF, concluímos que não houve diferença significativa, no entanto, podemos verificar que a testemunha apresentou maior perda de umidade nesta fase.



Os valores médios da taxa secagem em estufa variaram de 2,07 a 2,95 ($\text{g.cm}^{-2}.\text{h}$) 10^3 , sendo que a peça com impregnação de 40 ppm obteve a maior taxa de secagem 2,95 ($\text{g.cm}^{-2}.\text{h}$) 10^3 , diferindo significativamente das demais.

Tabela 2. Valores da taxa de secagem em estufa laboratorial para os diferentes tratamentos analisados.

Tratamento	Taxa de secagem ($\text{g/cm}^2.\text{h}$) 10^3		
	Acima do PSF	Abaixo do PSF	Média geral
Testemunha	2,4775 b	0,2025 a	2,0761 b
40 ppm	3,5447 a	0,1945 a	2,9535 a
100 ppm	2,6135 b	0,1991 a	2,1874 b

*Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Zen (2016) relata que o valor médio na secagem convencional da madeira verde até 30% (água capilar) ficou em $0,7468 \% \text{U.h}^{-1}$, de 30% até 9% (água de impregnação) ficou em $0,1715 \% \text{U.h}^{-1}$ e de verde até 9% ficou em $0,2845 \% \text{U.h}^{-1}$, demonstrando que há uma redução de perda de umidade da peça quando abaixo do PSF. Corroborando, Guina Luis (2014) verificou uma redução na faixa higroscópica da taxa de secagem ao estudar o efeito da vaporização da madeira de eucalipto para dois tratamentos.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados da presente pesquisa, foi possível concluir que a impregnação com NP's Ag apresentou um menor teor de umidade final e maior perda de umidade da madeira. Além disso, a taxa de secagem do tratamento com 40 ppm demonstrou um melhor desempenho em relação ao tratamento testemunha e ao tratamento com 100 ppm.

5. REFERÊNCIAS

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla*.** 1998. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1998.

DASHTI, H.; SALEHPUR, S.; TAGGHIYARI, H. R.; FAR, F. A.; HESHMATI. S. The Effect Of Nanoclay On The Mass Transfer Properties Of Plywood. **Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures** v. 7, n. 3, p. 853-860, 2012.

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



GUINA LUIS, R. C. **Processo de vaporização na homogeneização da cor da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith e seu efeito nas propriedades tecnológicas.** 2014. 36 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – 63. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2014.

JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V.; ANDRADE, A. **Secagem da madeira serrada de eucalipto.** In: XV Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, AR, out. 2000.

LOPES, C. S. D.; NOLASCO, A. M.; FILHO, M. T.; DIAS, C. T. dos S.; PASINI, A. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 315-322, 2011.

MELLADO, E. C. E. R. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para utilização de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* (hill ex madein) na região de produtos com maior valor agregado.** 1993. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 1993.

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, p. 15, 1980. (Série Técnica, 5).

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; PAULA, L. E. R.; SILVA, J. R. M. Efeito da vaporização na secagem de tábuas de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 1. 2015.

RABIDIN, Z. A.; SENG, G. K.; WAHAB, M. J. A. Characteristics of Timbers Dried Using Kiln Drying and Radio FrequencyVacuum Drying Systems. **Matec Web of Conferences**, v. 108, n. 10001, 2017.

ROCHA, M. P. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como **Fontes de Matéria Prima para Serraria.** 2000. 186 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2000.

SEVERO, E. T. D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem da madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid.** 1998. 200 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1998.

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

VISCARRA, S. Guía para el secado de la madera em hornos. Bolivia: USAID. **Documento Técnico.** 69 p. 1998.

ZEN, L. R.; MONTEIRO, T. C.; SCHAEFFER, W.; KAMINSKI, J. M.; KLITZKE, R. J. Secagem ao ar da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity.** v. 7, n. 2. p. 291-298, 2019.