

## Higroscopicidade da madeira de *Eucalyptus* sp. em diferentes condições de umidade de equilíbrio

Anna Clara Oliveira Rupf <sup>1</sup>; Fernando Moreli Salvador <sup>1</sup>; Djeison Cesar Batista <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro/ES, Brasil - [annac.rupf@gmail.com](mailto:annac.rupf@gmail.com)

**Resumo:** A madeira é um material poroso e higroscópico, que troca umidade com o ambiente. O objetivo deste trabalho foi verificar o comportamento da higroscopicidade da madeira de *Eucalyptus* sp. em diferentes condições de umidade de equilíbrio: em câmara climática, em caixa com solução salina saturada de nitrito de sódio (NaNO<sub>2</sub>) e em ambiente não climatizado. Utilizou-se 15 amostras de madeira de *Eucalyptus* sp. para cada condição de equilíbrio. Inicialmente, pesou-se as amostras para obtenção da massa inicial e, então, acompanhou-se a massa das amostras até atingir massa constante. A temperatura e a umidade relativa dos ambientes também foram monitoradas. Obteve-se a umidade (U%) da madeira e a umidade de equilíbrio (UE%) dos três ambientes. Verificou-se o comportamento higroscópico de desorção da madeira de *Eucalyptus* sp. condicionado em câmara climática e em ambiente não climatizado. No entanto, não se verificou o comportamento higroscópico da madeira condicionada em caixa com solução salina.

**Palavras-chave:** Câmara climática, Solução salina saturada, Nitrito de sódio.

### Hygroscopicity of *Eucalyptus* sp. wood under different equilibrium moisture conditions

**Abstract:** Wood is a porous and hygroscopic material that exchanges moisture with the environment. This study aimed to determine the hygroscopicity of *Eucalyptus* sp. wood under different conditions: in a climate chamber, in a box containing a saturated sodium nitrite (NaNO<sub>2</sub>) salt solution, and in a non-climatized environment. Fifteen samples of *Eucalyptus* sp. wood were used for each condition. The samples were initially weighed to obtain the initial mass, and their mass was monitored until it reached a constant value. The temperature and relative humidity of the environments were also monitored. The moisture content of wood and the equilibrium moisture content of the three environments were obtained. We verified a desorptive behavior of *Eucalyptus* sp. wood conditioned in a climate chamber and a non-climatized environment. However, the hygroscopic behavior of wood conditioned in a box with a salt solution was not verified.

**Keywords:** Climate chamber, Saturated salt solution, Sodium nitrite.

## 1. INTRODUÇÃO



Engenharia  
Industrial  
Madeireira



SOCIEDADE BRASILEIRA  
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DA MADEIRA

A madeira é um material poroso e higroscópico que tem a capacidade de

conter água tanto nas paredes das células (água higroscópica) quanto na sua estrutura porosa (água capilar). A higroscopicidade da madeira está diretamente relacionada a sua composição química, principalmente devido a presença de grupos hidroxilas (OH) nos polímeros da parede celular (hemiceluloses, celulose e, em menor grau, lignina). As moléculas de água interagem por meio de ligações de hidrogênio com as hidroxilas livres da parede celular (Thybring e Fredriksson, 2023).

A umidade da madeira é quantificada pela relação entre a massa de água e a massa anidra, comumente medida pelo método gravimétrico, e tem uma influência importante nas propriedades e no desempenho da madeira em serviço. De acordo com Glass e Zelinka (2021), o ponto de saturação das fibras (PSF) é considerado como o teor de umidade acima do qual as propriedades físicas e mecânicas da madeira não se alteram em função da umidade, e equivale em média a 30%. Como a madeira maciça em serviço está comumente abaixo do PSF, é importante conhecer a umidade para o uso adequado e entender o desempenho do material.

Além do efeito da anatomia, a umidade da madeira varia conforme as condições ambientais, como a umidade relativa, a temperatura e a circulação de ar. O teor de umidade de equilíbrio (UE%) é definido como aquele no qual a madeira não está ganhando nem perdendo umidade do ambiente (Glass e Zelinka, 2021; Thybring e Fredriksson, 2023). Contudo, a madeira em serviço é exposta a mudanças climáticas de longo prazo (sazonais) e de curto prazo (diárias), que induzem a mudanças no teor de umidade da madeira, que busca alcançar esse equilíbrio por sua natureza higroscópica.

O objetivo deste trabalho foi verificar o comportamento da higroscopicidade da madeira de *Eucalyptus* sp. em diferentes condições de umidade de equilíbrio: em câmara climática, em caixa com solução salina saturada de nitrito de sódio (NaNO<sub>2</sub>) e em ambiente não climatizado.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de madeira de *Eucalyptus* sp., livres de defeitos, nas dimensões 10 x 70 x 20 mm (radial, tangencial, longitudinal), produzidas de uma única peça serrada, desprezando-se os topos (300 mm). Inicialmente, as amostras foram identificadas e pesadas em uma balança semianalítica digital (0,01 g), para

obtenção da massa inicial. Em seguida, elas foram condicionadas em três ambientes diferentes: i) câmara climática *walk-in*; ii) caixa com solução salina saturada de nitrito de sódio ( $\text{NaNO}_2$ ) e; iii) ambiente não climatizado, localizado na antessala da câmara climática. Foram ensaiadas 15 amostras em cada ambiente, com monitoramento da massa três vezes por semana, na mesma balança utilizada inicialmente. O monitoramento ocorreu no período de 24 de abril a 20 de maio (outono), e foi encerrado quando as amostras dos ambientes i e ii atingiram massa constante.

O condicionamento em câmara climática ( $15,0 \text{ m}^2$ ) foi realizado conforme a norma D4933-16 (American Society for Testing and Materials, 2021), em que as amostras foram dispostas em uma estante de aço dentro da câmara. O monitoramento da umidade relativa do ar (UR%) e da temperatura foi realizado pelo controlador lógico programável (CLP) da câmara e por um psicrômetro com termômetros de mercúrio.

O condicionamento do material em solução salina foi conduzido conforme a norma E104-20a (American Society for Testing and Materials, 2020b). Utilizou-se uma caixa plástica (45 L) contendo no fundo uma forma de vidro com solução saturada de nitrito de sódio ( $\text{NaNO}_2$ ). As amostras foram colocadas dentro da caixa, sobre um suporte acima da solução salina, juntamente com um termohigrômetro digital, para o monitoramento da temperatura e da UR%. A caixa plástica foi armazenada dentro da câmara climática da condição anterior.

O ambiente não climatizado foi representado pela antessala da câmara climática, construída em alvenaria ( $13,5 \text{ m}^2$ ), mantendo-se a porta e as janelas fechadas durante o experimento. As amostras foram dispostas em uma mesa, juntamente com um termohigrômetro digital, que foi utilizado para o monitoramento da temperatura e da UR%.

Encerrado o monitoramento da massa, as amostras foram secas em estufa ( $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 horas) para a obtenção da massa anidra. A umidade (U%) da madeira foi determinada pelo método gravimétrico, conforme o método B da norma D4442-20 (American Society for Testing and Materials, 2020a). Calculou-se a umidade de todas as amostras desde o início (massa inicial) até o encerramento do monitoramento (massa final), tomando-se como base a massa anidra. Para a produção dos gráficos dos resultados, considerou-se a média da umidade das 15

amostras de cada ambiente. A umidade de equilíbrio (UE%) dos três ambientes foi calculada com a equação de Simpson (Glass e Zelinka, 2021) (Equação 1).

(1)

Em que - h: umidade relativa (decimal,  $0 \leq h \leq 1$ );  $W=349+1,29T+0,0135T^2$ ;  
 $K=0,805+0,000736T-0,00000273T^2$ ;  $K_1=6,27-0,00938T-0,000303T^2$ ;  
 $K_2=1,91+0,0407T-0,000293T^2$ ; T: temperatura (em °C).

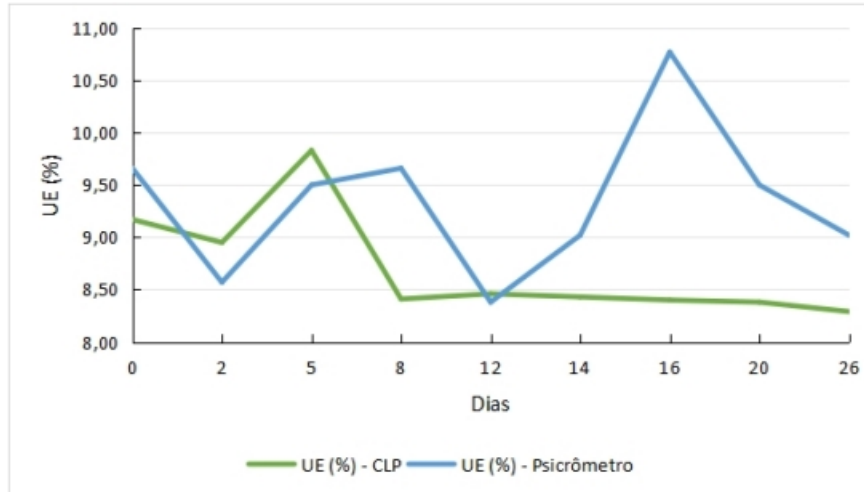
Especificamente para a câmara climática, foram comparados os resultados de UE% obtidos com as medidas de temperatura e UR% do CLP e do psicrômetro. Os dois conjuntos de dados foram comparados com o teste t de Student, adotando-se 5% como nível de significância.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, realizou-se a comparação da UE% calculada com os dados do CLP e com os do psicrômetro, ambos pertencentes à câmara climática, com médias de 8,70% ( $\pm 0,52\%$ ) e 9,34% ( $\pm 0,71\%$ ), respectivamente. De acordo com o teste t de Student, houve diferença significativa entre as médias ( $t_c=2,18$ ,  $p<0,05$ ).

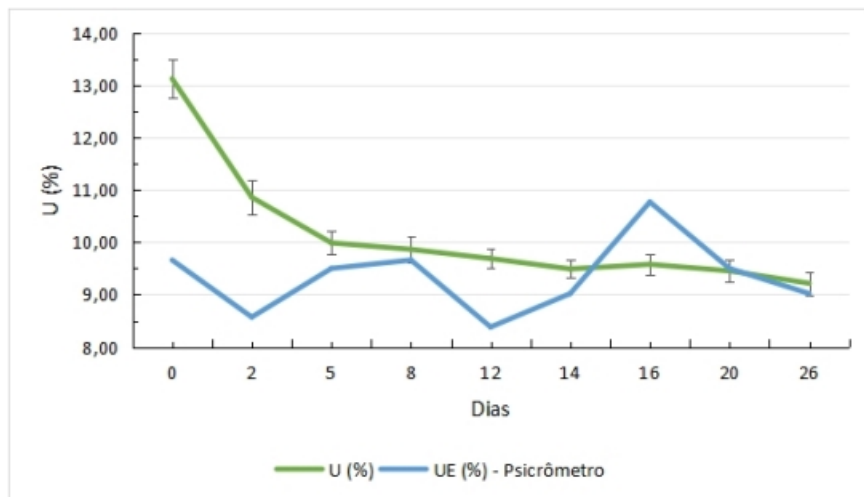
A UE% obtida com os dados do CLP se manteve mais constante (amplitude de 1,54 p.p.), principalmente a partir do oitavo dia de experimento (amplitude de 0,17 p.p.), em comparação com o psicrômetro, que variou mais durante o experimento (amplitude de 2,39 p.p.).

**Figura 1:** Comparação da umidade de equilíbrio medida com os dados do CLP e do psicrômetro.



A umidade final da madeira condicionada na câmara climática ( $9,22 \pm 0,22\%$ ) foi mais próxima da última medida de UE% calculada com os dados do psicrômetro (9,02%) do que com os do CLP (8,29%). Portanto, optou-se por utilizar os dados do psicrômetro para a comparação com a umidade da madeira na câmara climática (Figura 2).

**Figura 2:** Condicionamento em câmara climática - umidade da madeira e umidade de equilíbrio ao longo do tempo.

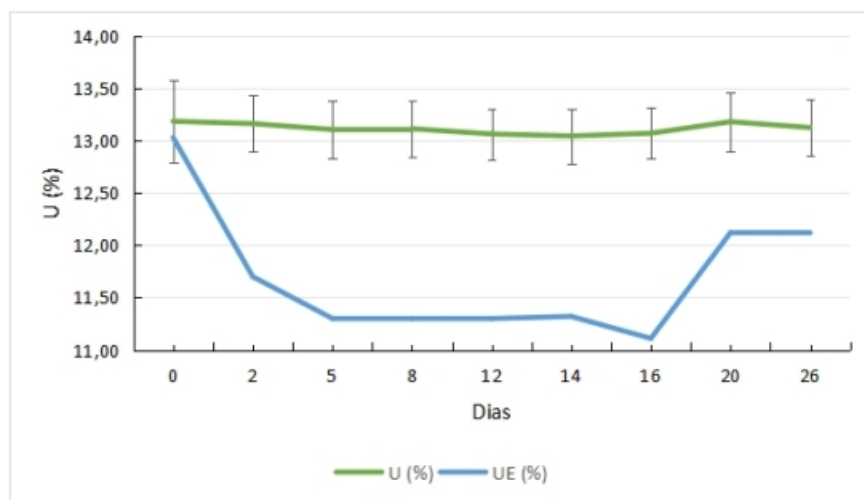


Verificou-se que a madeira secou continuamente durante o experimento, com uma taxa maior nos primeiros cinco dias, pela maior diferença entre a umidade da madeira e a UE%, partindo de uma umidade inicial média de  $13,13\% (\pm 0,37\%)$  até atingir  $9,22\% (\pm 0,22\%)$ . A exceção ocorreu no 16º dia do experimento, em que houve um pico na UE% de  $10,77\%$  e a umidade da madeira permaneceu estagnada. Nota-se que a UE% não se manteve constante, com amplitude de 2,39 p.p., indicando a necessidade de se verificar algum possível problema de

funcionamento da câmara. Ainda assim, notou-se que, ao final do experimento, a partir do 20º dia, a umidade da madeira ficou próxima da UE%, o que era esperado, por causa da higroscopicidade da madeira. De forma geral, nota-se que a madeira não teve uma rápida resposta à variação da UE%, o que pode estar relacionado com o tamanho da câmara climática.

A umidade da madeira em solução salina (Figura 3) teve um comportamento diferente da câmara climática, em que praticamente não houve variação, partindo de uma umidade inicial média de 13,19% ( $\pm 0,39\%$ ) até atingir 13,13% ( $\pm 0,27\%$ ).

**Figura 3:** Condicionamento em caixa com solução salina - umidade da madeira e umidade de equilíbrio ao longo do tempo.

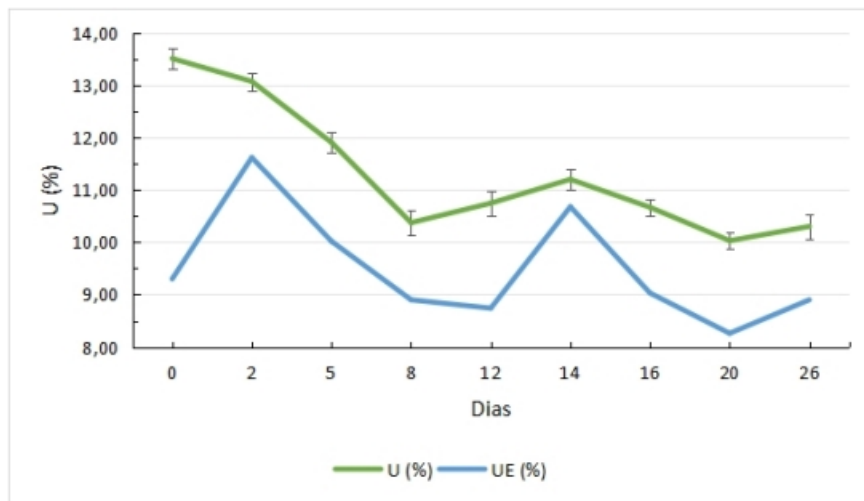


Inicialmente, a UE% estava alta (13,03%), porém a estabilização com a solução salina foi verificada a partir do segundo dia (11,70%). Desconsiderando-se a medida inicial, a variação da UE% foi pequena (1,01 p.p.) e menor que da câmara climática, o que era de se esperar, pelo menor volume da caixa, resultando em maior facilidade de manutenção das condições ambientais. Destaca-se que as condições climáticas da câmara interferiram diretamente nas condições da caixa com a solução salina, uma vez que esta estava depositada naquela. A partir do segundo dia, verificou-se diferença entre a umidade da madeira e a UE% e esperava-se que a madeira secasse e buscasse o equilíbrio com o ambiente, o que não ocorreu. Sugere-se que esse fenômeno tenha acontecido pela falta de circulação de ar dentro da caixa, o que necessitará uma futura investigação.

O ambiente não climatizado foi o único em que não houve controle artificial da temperatura e da UR% e, portanto, esperava-se a maior variação da UE% em

relação aos demais ambientes, o que ocorreu (3,36 p.p.) (Figura 4). A madeira secou até o 8º dia do experimento, em resposta a menor UE%, da mesma forma como ocorreu na câmara climática (Figura 2).

**Figura 4:** Condicionamento em ambiente não climatizado - umidade da madeira e umidade de equilíbrio ao longo do tempo.



A umidade da madeira permaneceu estável do 8º ao último dia do experimento, com uma pequena variação da umidade (1,17 p.p.), acompanhando a variação da UE%. No entanto, diferentemente da câmara climática, a umidade da madeira não conseguiu alcançar a UE%, em que a umidade final média foi de 10,30% ( $\pm 0,23\%$ ), enquanto a UE% foi de 8,90%. Isso está possivelmente relacionado à maior variação das condições climáticas desse ambiente ao longo de um dia, o que não ocorre em um ambiente artificial de climatização.

Diante disto, verificou-se neste estudo que o ambiente de climatização interferiu no tempo e na umidade final da madeira, o que pode influenciar significativamente no cronograma dos experimentos, bem como nos resultados das propriedades da madeira que se deseja medir. Ainda, verificou-se a necessidade de se ter atenção com os instrumentos de medição utilizados na verificação da umidade de equilíbrio de ambiente, para a melhor condução da climatização.

#### 4. CONCLUSÃO

Verificou-se o comportamento higroscópico de desorção da madeira de *Eucalyptus* sp. condicionado em câmara climática e em ambiente não climatizado. A menor umidade final da madeira foi verificada na madeira condicionada em câmara climática, que também foi a que mais se aproximou da umidade de equilíbrio do seu respectivo ambiente. Como esperado, a maior variação da umidade de equilíbrio foi verificada para o ambiente não controlado, o qual atingiu a menor umidade de equilíbrio ao final do experimento.

A menor variação na umidade de equilíbrio foi verificada no condicionamento em caixa com solução salina. Por outro lado, não se verificou o comportamento higroscópico da madeira condicionada nesse ambiente, o que merece futura investigação. Especificamente para a câmara climática, verificou-se que a umidade da madeira foi mais semelhante à umidade de equilíbrio medida pelo psicrômetro de mercúrio do que pelo controlador lógico programável da câmara.

#### 5. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. **D4442-20**: Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials. ASTM Book of Standards, West Conshohocken, 2020a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. **E104-20a**: Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions. ASTM Book of Standards, West Conshohocken, 2020b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. **D4933-16**: Standard guide for moisture conditioning of wood and wood-based materials. ASTM Book of Standards, West Conshohocken, 2021.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA)/FOREST SERVICE (FS)/FOREST PRODUCTS LABORATORY (FPL). **Wood Handbook**: Wood as an Engineering Material. General technical Report, FPL-GTR-282. Madison: USDA/FS/FPL. 2021. p. 1-4-22.

THYBRING, E. E.; FREDRIKSSON, M. Wood and moisture. In: NIEMZ, P.;



TEISCHINGER, A.; SANDBERG, D. (ed.). **Springer Handbook of Wood Science and Technology**. Springer Handbooks. Cham: Springer Nature, 2023. p. 281-353.