

Predição do comportamento do transporte de umidade no processo de secagem de madeira de diferentes espécies de eucalipto em estufa convectiva convencional

Alisson Frank Canuto Brandão ^{[1]*}, Viviane Santos Birchal ^[2], Esly Ferreira da Costa Junior ^[3], Andréa Oliveira Souza da Costa ^[4].

^[1] alisson.fcbrandao@gmail.com, ^[2] vsbirchal@gmail.com, ^[3] esly@deq.ufmg.br, ^[4] andreacosta@deq.ufmg.br. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil

* autor correspondente

Resumo

A madeira, principalmente o eucalipto, tem papel fundamental como matéria-prima para diversos ramos industriais, como na construção civil, indústria moveleira e na de papel e celulose. No entanto, seu processo de secagem pode causar danos estruturais, como empenamentos e rachaduras devido à anisotropia da madeira e aos gradientes de umidade resultantes, tendo como consequência perdas significativas de produto. Para combater isso, é importante formular uma metodologia de secagem adequada que leve em consideração o tipo e a densidade da madeira. Técnicas de modelagem e simulação computacional surgem como ferramentas alternativas, permitindo a previsão e controle de variáveis críticas do processo, ajudando a otimizar planos experimentais e reduzir custos e riscos. Essas tecnologias têm o potencial de aprimorar a secagem da madeira, garantir eficiência e evitar perdas de material. O presente estudo teve como objetivo a modelagem e simulação do comportamento da remoção de umidade da madeira de diferentes espécies de eucalipto quando submetidas a programas de secagem típicos da rotina industrial. Para isso, foi utilizado um modelo difusivo composto por um sistema de equações algébrico-diferenciais acopladas. A resolução foi obtida por meio da discretização parcial das derivadas espaciais e da integração das derivadas de primeira ordem em relação ao tempo. A validação dos resultados teóricos foi realizada por meio da comparação com dados experimentais da literatura. As simulações mostraram uma concordância significativa com os dados experimentais, com um desvio relativo médio de 18,4% e uma correlação linear de 0,987, o que confirma a relativa eficiência do modelo na previsão do comportamento da secagem.

Palavras-chave: diferenças finitas; estufa convencional; programa de secagem; simulação.

Prediction of moisture transport behavior in the drying process of wood from different eucalyptus species in a conventional convective kiln

Abstract

Wood, primarily eucalyptus, plays a fundamental role as a raw material in various industrial sectors, such as construction, furniture, pulp and paper industries. However, its drying process can lead to structural damage, such as warping and cracking, due to the anisotropy of wood and resulting moisture gradients, resulting in significant product losses. To address this issue, it is important to formulate an appropriate drying schedule that considers the wood's type and density. Modeling and computational simulation techniques emerge as alternative tools, enabling the prediction and control of critical process variables, assisting in the optimization of experimental plans, and reducing costs and risks. These technologies have the potential to optimize wood drying, ensure efficiency, and prevent material losses. The present study aimed to model and simulate the moisture removal behavior of different species of eucalyptus wood when subjected to typical drying schedules in industrial routines. To achieve this, a diffusive model composed of a system of coupled algebraic-differential equations was employed. The resolution was obtained through partial discretization of the spatial derivatives and integration of the first-order derivatives with function to time. The validation of the theoretical results was performed by comparing them with experimental data from the literature. The simulations demonstrated a significant agreement with the experimental data, with an average relative deviation of 18.4% and a linear correlation coefficient of 0.987, confirming the relative efficiency of the model in predicting drying behavior.

Keywords: *conventional kiln; drying schedule; finite differences; simulation.*

1. Introdução

A madeira é um insumo essencial para diversos setores industriais e matéria-prima para uma ampla variedade de produtos. De acordo com o relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), a indústria madeireira contribuiu em média com 1,2% para a economia brasileira no período de 2010 a 2021, atingindo o maior percentual observado na última década. O eucalipto é o principal tipo de madeira utilizado nesse setor, uma vez que, em 2021, dos 9,93 milhões de hectares de florestas plantadas no Brasil, 7,53 milhões (75,8%) foram destinados ao cultivo de eucalipto (IBÁ, 2022). No entanto, para muitos usos da madeira, é necessário submetê-la a procedimentos de secagem, que conferem e aprimoram características importantes para seu processamento e aplicação, tais como melhorias nas propriedades mecânicas, aumento da capacidade calorífica, aumento da resistência a organismos xilófagos, redução da massa através da remoção de umidade e, consequentemente, aumento de sua vida útil (Eitelberger; Svensson; Hofstetter, 2011; Fernandes; Braga; Braga Junior, 2021; Kocaefe *et al.*, 2006).

No entanto, durante o processo de secagem, a indução de uma distribuição não uniforme de umidade no material pode resultar em estresses de contração causando danos ao produto, como empenamento, trincas e rachaduras, especialmente na madeira do gênero *Eucalyptus*, devido principalmente à sua baixa permeabilidade, que resulta em um acentuado gradiente de umidade, elevada contração, alta suscetibilidade a colapsos e altas tensões de secagem (Calonego *et al.*, 2006; Klitzke; Batista, 2010; Silva *et al.*, 2022; Talgatti *et al.*, 2019).

Para evitar que as tensões de secagem excedam a resistência da madeira, o processo de remoção de umidade segue um procedimento baseado em uma série de modificações no comportamento do ar dentro da estufa, como alterações na velocidade, temperatura e umidade relativa ao longo do processo. Esse procedimento é chamado de programa de secagem (Batista *et al.*, 2016; Fernandes; Braga; Braga Junior, 2021; Martins; Marques; Gouveia, 2019).

A formulação de um programa de secagem deve atender às especificações da espécie de madeira a ser processada (Batista *et al.*, 2016; Fernandes; Braga; Braga Junior, 2021; Santos; Jankovsky; Andrade, 2003; Susin, 2018). Em geral, as madeiras mais densas são mais resistentes à remoção de umidade e mais propensas a defeitos de secagem, exigindo procedimentos mais lentos e condições mais suaves (Batista; Klitzke; Santos, 2010; Silva *et al.*, 2022).

Com o objetivo de agilizar e aumentar a efetividade desse método, as técnicas de modelagem e simulação podem ser aplicadas para prever as variáveis do processo, auxiliar no planejamento de rotinas experimentais, reduzir os custos de testes operacionais e os riscos de perda de material, além de auxiliar no desenvolvimento dos programas de secagem (Avramidis; Hatzikiriakos, 1995; Brandão *et al.*, 2022; Eleotério, 2009; Oumarou; Kocaefe; Kocaefe, 2014; Rozas; Montero, 2020).

Este estudo tem como objetivo implementar um modelo matemático capaz de simular o comportamento da umidade da madeira durante o processo de secagem para diferentes espécies de eucalipto, sob diferentes condições operacionais associadas a programas de secagem distintos. Em seguida, avaliar sua eficácia, comparando os resultados obtidos com dados experimentais coletados da literatura.

Na sequência deste artigo, são descritas as metodologias utilizadas na execução deste estudo, explicando as considerações e deduções do modelo empregado, assim como o método de validação de resultados e as fontes dos dados experimentais, na seção 2. Na seção 3, os resultados das simulações e as análises estatísticas são apresentadas e discutidas, seguidas das considerações finais sobre o trabalho desenvolvido, na seção 4.

2. Metodologia

A abordagem metodológica para a formulação do modelo tem como base teórica as considerações feitas por Martinović, Horman e Demirdžić (2001) e por Zhao *et al.* (2016) em seus respectivos trabalhos, juntamente com as adaptações apropriadas aos objetivos deste estudo. Para a modelagem matemática dos fenômenos físicos associados ao processo de secagem da madeira, foram consideradas as seguintes premissas:

- A madeira é tratada como um meio poroso capilar constituído principalmente de uma matriz de um composto polimérico celular de baixa densidade, água livre, água ligada e vapor de água;
- O processo de secagem da madeira é definido como um fluxo difusivo transiente, considerando-o como o único mecanismo de transporte de água dentro do sólido e sendo regido pelo gradiente de umidade;
- A transferência de calor e massa ocorre apenas ao longo da espessura, com o fluxo de umidade ocorrendo da direção do centro para a superfície da peça e o fluxo de calor ocorrendo da superfície ao centro;
- Durante a secagem, o tamanho e a estrutura interna da madeira não se alteram, desconsiderando, portanto, as alterações no fluxo devido às retrações volumétricas e variações da densidade da madeira durante o processo de secagem;
- A temperatura do ambiente interno da estufa, assim como a velocidade e a umidade relativa do ar, não são afetadas pela temperatura e umidade da madeira.

Dessa forma, a equação que descreve o balanço de energia, dada em termos de entalpia, é constituída pelo fluxo de calor, descrito pela lei de Fourier, somado ao consumo de energia na evaporação da umidade como mostra a Equação 1.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{(k_h - \varepsilon \lambda \delta k_m)}{\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon \lambda k_m}{\rho} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (1)$$

em que: t é o tempo (em s); ρ é a densidade da madeira anidra (em $\text{kg}_{\text{sólido seco}}/\text{m}^3$); T é a temperatura (em K); x é a direção espacial contemplada pelo modelo (em m); δ é o coeficiente do gradiente de temperatura (em K^{-1}); H é a entalpia (em kJ/kg); k_h é a condutividade térmica (em W/m.K); M é a umidade (em $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$); k_m é a difusividade efetiva (em $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m.s}$); ε é a razão entre a difusividade mássica de vapor e a difusividade mássica total de umidade; λ é o calor latente de vaporização (em kJ/kg).

Vale ressaltar que, no modelo empregado, o transporte de energia é medido em termos de variação de entalpia em função do tempo, admitindo assim um afastamento dos preceitos da termodinâmica clássica.

O balanço de massa considera a difusão unidimensional em regime transiente dada pela segunda lei de Fick somada à influência da difusão térmica, como resultado do efeito Soret, como expresso na Equação 2.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{k_m}{0,01\rho} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\delta k_m}{0,01\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

A escala de variação de certas propriedades da madeira, como sua condutividade térmica e a difusividade mássica efetiva em função das mudanças de temperatura e umidade no material durante o processo de secagem é pequena o suficiente para que sua influência seja desprezada (Arends; Barakat; Pel, 2018; Kadem *et al.*, 2011; Kocaefe *et al.*, 2007; Martinović; Horman; Demirdžić, 2001; Simo-Tagne *et al.*, 2016; Simpson; Tenwold, 1999). Contudo, outras apresentam forte dependência a qual deve ser respeitada.

Conforme descrito por Simpson e Tenwold (1999), o calor específico da madeira não é influenciado pela espécie ou densidade do lenho. No entanto, observa-se um aumento significativo desta propriedade com o aumento da temperatura, seguindo a tendência de outros materiais orgânicos. Além disso, o calor específico também é afetado pela umidade, uma vez que a água possui um calor específico superior ao da madeira seca.

Abaixo do Ponto de Saturação das Fibras (PSF), o calor específico total de uma peça de madeira (C_p , em kJ/kg.K) é determinado por uma relação entre o calor específico da madeira anidra (C_{p0} , em kJ/kg.K) e o calor específico da água (C_{pA} , em kJ/kg.K) acrescida de um fator de ajuste (Ac , em

kJ/kg.K) relativo à energia adicional resultante da impregnação da água na madeira (Simpson; Tenwold, 1999). Essa relação é representada pela Equação 3.

$$C_p = \left(\frac{C_{p0} + 0,01MC_{pA}}{1 + 0,01M} \right) + Ac \quad (3)$$

em que C_{p0} , C_{pA} e Ac são dados pelas relações empíricas apresentadas pelas Equações 4, 5 e 6, respectivamente (Kadem *et al.*, 2011; Putranto *et al.*, 2011; Simo-Tagne *et al.*, 2016; Simpson; Tenwold, 1999; Younsi *et al.*, 2010).

$$C_{p0} = 0,1031 + 0,003867T \quad (4)$$

$$C_{pA} = -2 \cdot 10^{-12} \cdot T^5 + 4,39 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 - 3,56 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 1,4327 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 285,6 \cdot 10^{-3} \cdot T + 26,776 \quad (5)$$

$$Ac = M(-0,06191 + 2,36 \cdot 10^{-4}T - 1,33 \cdot 10^{-4}M) \quad (6)$$

Combinando as equações do calor específico e integrando a expressão resultante em função da temperatura chega-se à equação para a variação da entalpia (Equação 7).

$$\Delta H = \left(\frac{1}{1 + 0,01M} \right) \{ 0,1031(T_0 - T_{ref}) + 0,0019335(T_0^2 - T_{ref}^2) + 0,01M[26,776(T_0 - T_{ref}) + 0,1428(T_0^2 - T_{ref}^2) + 4,7757 \cdot 10^{-4}(T_0^3 - T_{ref}^3) + 8,9 \cdot 10^{-7}(T_0^4 - T_{ref}^4) + 8,78 \cdot 10^{-10}(T_0^5 - T_{ref}^5) - 3,3 \cdot 10^{-12}(T_0^6 - T_{ref}^6)] \} + 10^{-6}M(T_0 - T_{ref})[-133M + 118(T_0 - T_{ref}) - 61910] \quad (7)$$

em que T_0 é a temperatura inicial no intervalo de tempo considerado e T_{ref} é uma temperatura fixada como referência, ambas dadas em K.

Para resolver as Equações 1 e 2, as condições iniciais e de contorno são necessárias. Para as condições iniciais considera-se que quando $t = 0$, a umidade e a temperatura são uniformes em toda a amostra e são definidas como iguais à umidade inicial conhecida e a temperatura inicial da madeira, podendo serem expressas como:

$$T(0, x) = T_0 \quad (8)$$

$$M(0, x) = M_0 \quad (9)$$

Para os valores de t em $x = L$, que corresponde à superfície da peça de madeira, as condições de contorno são dadas pelas Equações 10 e 11 onde a Equação 10 expressa o calor que chega à superfície por convecção e é conduzido para o interior do material ou é consumido na evaporação da umidade na superfície. Na Equação 11, a umidade que chega à superfície por difusão e pelo efeito Soret é removida por convecção.



$$k_h \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_h(T - T_a) + (1 - \varepsilon)\lambda\alpha_m(M - M_a) = 0 \quad (10)$$

$$k_m \frac{\partial M}{\partial x} + \alpha_m(M - M_a) + \delta k_m \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

em que: T_a é a temperatura do ambiente interno da estufa (em K); M_a é a umidade relativa do ar interno da estufa (em %); α_h é o coeficiente de transferência de calor por convecção (em W/m².K); α_m é o coeficiente de transferência de massa por convecção (em kg/m².s).

Para o centro da peça de madeira ($x = 0$), considera-se a condição de simetria representada pelas Equações 12 e 13.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

Dessa forma, o modelo é dado pelas duas equações diferenciais parciais para a descrição da transferência simultânea de energia e massa, respectivamente, e pela expressão algébrica que define a variação de entalpia, compondo um sistema de equações algébrico-diferenciais representado pelas Equações 1, 2 e 7, não possuindo solução analítica.

Para sua resolução, aplica-se o método das linhas baseando-se na discretização parcial (somente das derivadas espaciais) e na integração das derivadas de primeira ordem em função do tempo. A solução numérica é obtida por meio da discretização das equações diferenciais parciais na direção espacial pelo Método de Diferenças Finitas com aproximações por diferenças finitas centrais de segunda ordem.

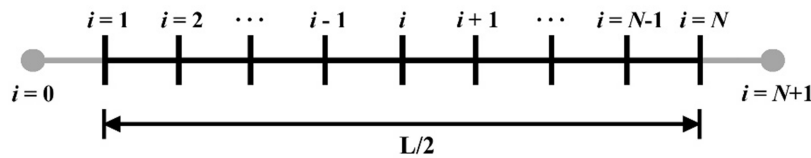
Aplicando o método nas Equações 1 e 2 chega-se as Equações 14 e 15, respectivamente.

$$\frac{dH_i}{dt} = \frac{(k_h + \varepsilon\lambda\delta k_m)}{\rho} \left(\frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \right) + \frac{\varepsilon\lambda k_m}{\rho} \left(\frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta x^2} \right) \quad (14)$$

$$\frac{dM_i}{dt} = \frac{k_m}{0,01\rho} \left(\frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta x^2} \right) + \frac{\delta k_m}{0,01\rho} \left(\frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \right) \quad (15)$$

Estas equações, em conjunto com a Equação 7, podem ser diretamente empregadas nos pontos centrais ($i = 2$ a $i = N-1$) sendo N o número de pontos de discretização na direção espacial. Para o tratamento do contorno, foram empregados pontos fictícios, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Representação da malha numérica



Fonte: elaborado pelos autores

Para a determinação dos valores relativos à temperatura e à umidade no contorno, foi aplicado o método de diferenças finitas centrais de primeira ordem nas Equações 10 e 11, considerando pontos fictícios como ilustrado na Figura 1. Para condições da superfície no ponto $i = N$ obtêm-se as Equações 16 e 17 discretizadas.

$$T_{N+1} = T_{N-1} - 2\Delta x \left[\frac{\alpha_h}{k_h} (T_N - T_a) + \frac{(1 - \varepsilon)\lambda\alpha_m}{k_h} (M_N - M_a) \right] \quad (16)$$

$$M_{N+1} = M_{N-1} - 2\Delta x \left[\frac{\alpha_m}{k_m} (M_N - M_a) + \delta \left(\frac{T_{N+1} - T_{N-1}}{2\Delta x} \right) \right] \quad (17)$$

Para as condições de contorno no centro da peça ($i = 0$) admite-se a condição de simetria. A discretização das Equações 12 e 13 por diferenças finitas para as derivadas espaciais resulta nas Equações 18 e 19.

$$T_{i=0} = T_2 \quad (18)$$

$$M_{i=0} = M_2 \quad (19)$$

A substituição dessas igualdades nas Equações 14 e 15 gera as equações para derivadas temporais no ponto central ($i = 1$).

Dessa forma, os valores iniciais de temperatura e umidade utilizados na geração dos resultados, através da resolução do modelo, são baseados nas condições iniciais e de contorno admitidos no problema, considerando as condições operacionais e os programas de secagem implementados no algoritmo.

O algoritmo para resolução do problema foi implementado no *software* MATLAB[®]. O sistema de equações algébrico-diferenciais, obtido pela discretização do modelo, é solucionado no tempo através do uso da função *ode15i* que pode ser usada para resolver sistemas de equações algébrico-diferenciais de índice 1 pelo método de ordem variável (Mathworks, 2023). A função *odeset* foi utilizada para determinar os valores de 10^{-5} para tolerância relativa e 10^{-6} para a tolerância absoluta.

A determinação do ponto de convergência da malha numérica foi realizada considerando um valor inicial de 11 pontos de discretização e aumentando esse valor em 10 a cada iteração. Esse procedimento foi repetido até que se observasse uma diferença mínima da ordem de 10^{-5} entre os valores resultantes de cada iteração, visando alcançar um nível de refinamento da malha adequado para os fins deste estudo.

Para essa análise foram utilizados os dados de variação da umidade no centro da peça de madeira (M_C) em função do tempo, pois eles demonstraram maior sensibilidade ao aumento do número de pontos de discretização (N).

A validação do modelo matemático foi realizada por meio da comparação dos dados teóricos com dados experimentais relatados na literatura. Para isso, foram efetuadas simulações considerando as condições operacionais especificadas pelos autores dos experimentos.

Os trabalhos empregados na validação do modelo foram Martinović, Horman e Demirdžić (2001) e Zhao *et al.* (2016). Nos experimentos de Martinović, Horman e Demirdžić (2001) foram usadas amostras de madeira de faia (*Fagus sylvatica*) de 50 mm de espessura e densidade média de 545 kg/m^3 expostas ao fluxo uniforme de ar em um secador de laboratório com controle automático dos parâmetros do ar ambiente. A precisão dos instrumentos utilizados no experimento foi de $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ para a temperatura e $0,1\%$ para a umidade.

Os dados experimentais de Zhao *et al.* (2016) foram obtidos de amostras de lariço (*Larix gmelinii*) com 40 mm de espessura e densidade média de 405 kg/m^3 , submetidas à secagem em uma câmara de condicionamento com velocidade do ar interno de 2 m/s e condições operacionais controladas. A incerteza encontrada para os dados de temperatura foi de $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e para umidade foi de $1,06\%$.

A relação entre os resultados experimentais e as simulações foi determinada através do cálculo do coeficiente de determinação (R^2) que indica o quão próximo os resultados das simulações estão dos dados experimentais.

A implementação dos programas de secagem no algoritmo foi realizada assumindo-os como uma série programada de variações nos parâmetros operacionais do ambiente interno da estufa, temperatura (T_a) e umidade (M_a) da corrente de ar, em função da umidade média da madeira (M_m) dada pela Equação 20.

$$M_m = \left[\frac{M_1 + M_N}{2} + \sum_{i=2}^{N-1} M_i \right] / (N - 1) \quad (20)$$

O programa é construído de forma que, para cada intervalo de umidade média, é estabelecido um valor para a temperatura e para a umidade do ar no interior da estufa. A transição dos valores de temperatura do ar (T_a) e de umidade do ar (M_a) entre cada intervalo de umidade média é definida através das Equações 21 e 22.

$$T_a(M_m) = T_i + (T_{i+1} - T_i) \cdot \frac{(M_m - M_j)}{(M_{j+1} - M_j)} \quad (21)$$

$$M_a(M_m) = M_i + (M_{i+1} - M_i) \cdot \frac{(M_m - M_j)}{(M_{j+1} - M_j)} \quad (22)$$

Com i e j variando de acordo com o número de modificações das condições operacionais, onde o índice j refere-se ao valor de referência da M_m e o índice i refere-se à condição operacional atribuída àquele intervalo.

Para esse trabalho, foi considerada, como objeto de estudo, a madeira serrada de diferentes espécies de eucalipto, devido à sua relevância no mercado e ao volume de dados disponíveis na literatura. As fontes dos dados experimentais utilizados nas simulações dos programas foram os trabalhos de Santos (2002), Susin (2012) e Soares, Lima e Silva (2016).

As Equações 18 e 19 foram aplicadas aos programas de secagem apresentados nos trabalhos citados anteriormente, com o objetivo de adaptar o procedimento experimental no algoritmo para a simulação do processo.

Nos experimentos realizados por Santos (2002) foram utilizadas amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 16 anos de idade, 40 mm de espessura e densidade de aproximadamente 574 kg/m³. Nos experimentos relatados por Susin (2012) foram utilizadas amostras de *Eucalyptus robusta* com densidade de 610 kg/m³ e *Eucalyptus saligna* com densidade de 690 kg/m³, todas as amostras com de espessura de 25 mm. Soares, Lima e Silva (2016) utilizaram amostras de madeira de *Eucalyptus saligna* jovem com 10 mm de espessura e densidade de 636 kg/m³, e madeira madura com densidade de 735 kg/m³.

Todos os procedimentos experimentais foram realizados em estufas convectivas convencionais. Para todos os programas, foi considerado que a ventilação interna da câmara se manteve constante no decorrer do processo, com velocidade de 2 m/s.

Para validar os resultados das simulações considerando as variações operacionais associadas à implementação dos programas de secagem, foi realizada uma análise comparativa entre os dados experimentais e teóricos. As simulações foram feitas considerando os programas de secagem e as condições operacionais especificadas pelos autores em seus experimentos. Utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2) como parâmetro para avaliar a correlação entre os dados experimentais e teóricos.

3. Resultados e discussões

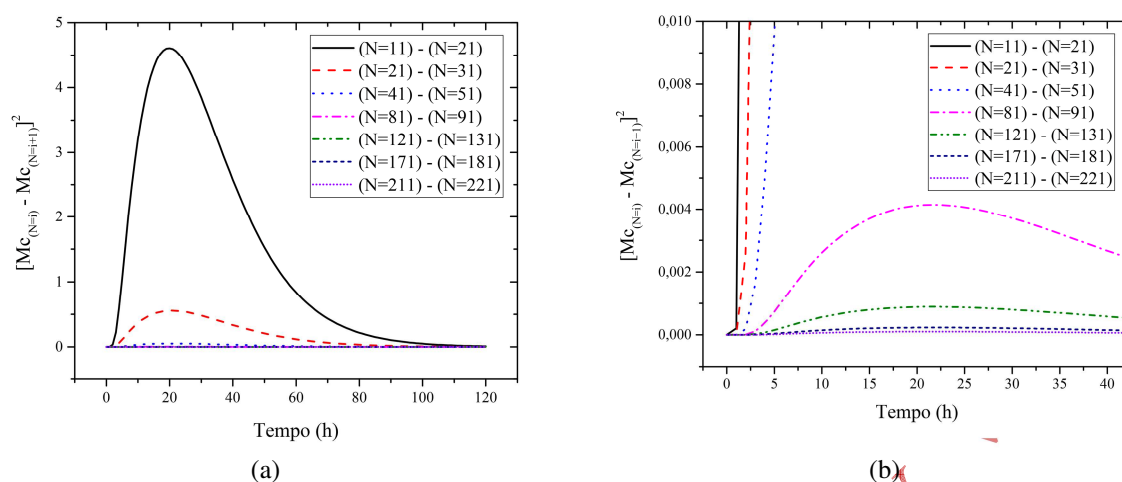
Para verificar o número de pontos de discretização necessário para alcançar um equilíbrio satisfatório entre a precisão dos resultados de simulação e o uso dos recursos computacionais, realizou-se uma análise de convergência da malha numérica.

A análise da convergência foi realizada observando como os resultados de simulação variam à medida que o número de pontos de discretização (N) é alterado. Iniciou-se com 11 pontos de discretização e aumentou-se em 10 pontos a cada iteração até que uma diferença da ordem de 10^{-5} fosse alcançada entre os resultados, correspondendo a um nível de refinamento adequado.

Observou-se que os dados correspondentes à variação da umidade no centro da peça de madeira em função do tempo (M_c) eram mais sensíveis às alterações no número de pontos de discretização (N) e, por esta razão, foram escolhidos como parâmetro para a análise de convergência.

Pelas Figuras 2a e 2b, é possível observar que a partir de 171 pontos não ocorrem alterações significativas nos valores dos resultados obtidos; as curvas praticamente se sobrepõem, indicando que a malha converge para um número de pontos maior. Considerando uma tolerância de 10^{-5} , o valor de N adotado para as simulações neste trabalho foi de 181 pontos de discretização.

Figura 2 – Análise da convergência da malha numérica. (a) Visão geral dos pontos de discretização. (b) Visão aproximada a partir de 81 pontos de discretização



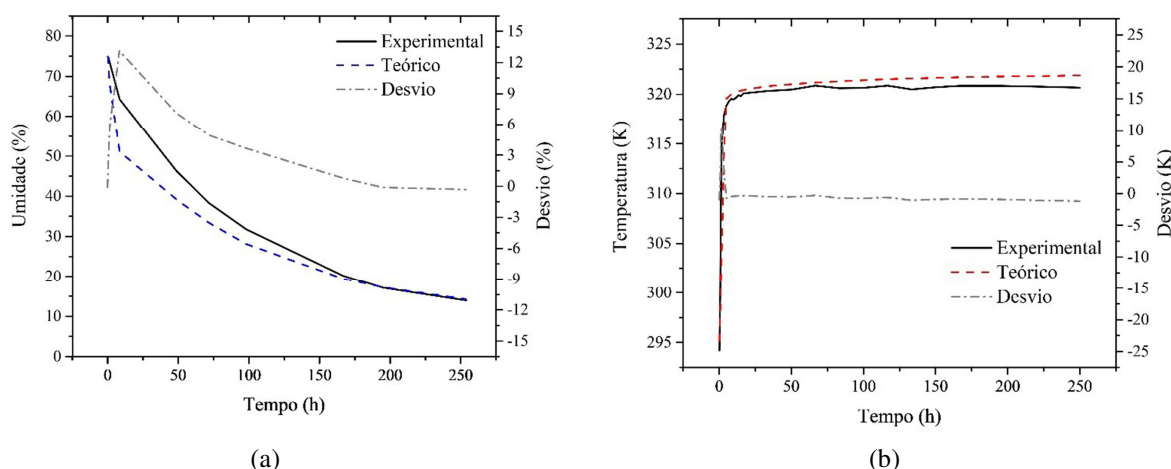
Fonte: dados da pesquisa

Para avaliar se os resultados obtidos a partir do modelo matemático empregado são consistentes com o comportamento observado experimentalmente, realizou-se uma comparação entre os dados de simulação e os dados experimentais encontrados na literatura. Para validar o modelo, utilizaram-se dados de dois estudos que realizaram experimentos em secadores de bancada, com condições operacionais especificadas, as quais foram reproduzidas nas simulações realizadas.

Foram analisados os dados de variação da temperatura e da umidade média da peça ao longo do processo de secagem para a madeira de faia (*Fagus sylvatica*) conforme descrito no trabalho de Martinović, Horman e Demirdžić (2001), e para a madeira de lariço (*Larix gmelinii*), de acordo com as condições apresentadas por Zhao *et al.* (2016).

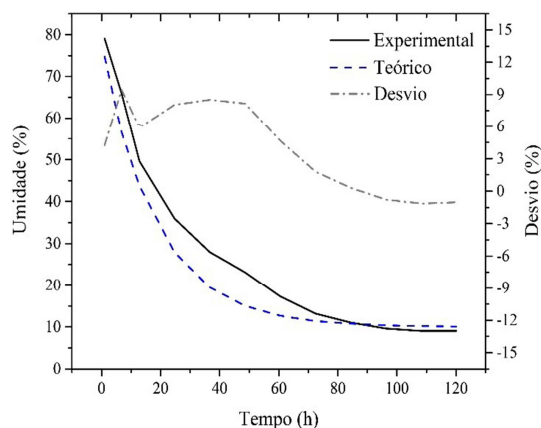
A correlação entre os dados experimentais dos autores e os resultados teóricos obtidos nas simulações, bem como o desvio absoluto entre eles, são ilustrados nas Figuras 3a e 3b para Martinović, Horman e Demirdžić (2001) e nas Figuras 4a e 4b para Zhao *et al.* (2016), respectivamente.

Figura 3 – Validação do modelo a partir dos dados experimentais de Martinović, Horman e Demirdžić, (2001) para (a) umidade média e (b) temperatura média da peça de madeira

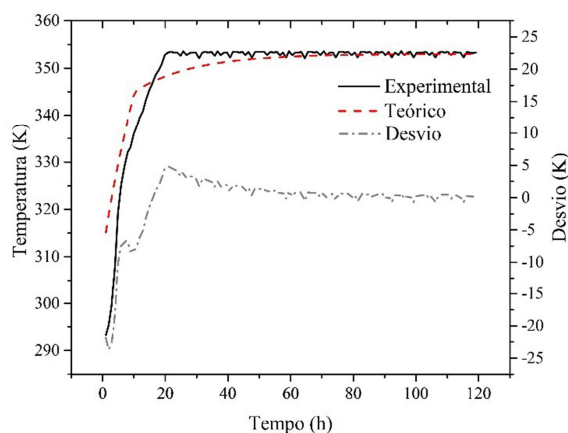


Fonte: dados da pesquisa

Figura 4 – Validação do modelo a partir dos dados experimentais de Zhao *et al.* (2016) para (a) umidade média e (b) temperatura média da peça de madeira



(a)



(b)

Fonte: dados da pesquisa

Nota-se que o desvio na simulação da variação da umidade chega a 13% para os dados de Martinović, Horman e Demirdžić (2001) e 9% para os dados de Zhao *et al.* (2016), ambos no início do processo, por volta de 23 horas de secagem. Quanto aos dados de simulação da variação da temperatura, observa-se um pequeno desvio absoluto de 7 K também no início do processo para os dados de Zhao *et al.* (2016), entanto os dados de Martinović, Horman e Demirdžić (2001) apresentam um desvio praticamente nulo ao longo de todo o processo. Em todos os casos, as oscilações numéricas se estabilizam, e o desvio entre os dados teóricos e experimentais tende a zero.

A qualidade da simulação foi avaliada por meio de dois parâmetros que correlacionam os dados experimentais com os dados teóricos: o desvio relativo médio ($D_{rel.}$), que permite avaliar a variabilidade entre os resultados experimentais e teóricos, e o coeficiente de determinação (R^2), que indica o quão próximo os dados teóricos estão dos dados experimentais.

Os valores desses parâmetros para os dois trabalhos, conforme relatado, estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Parâmetros para avaliação da validação do modelo

Parâmetro	Martinović, Horman e Demirdžić, (2001)		Zhao <i>et al.</i> (2016)	
	Umidade média	Temperatura média	Umidade média	Temperatura média
Desvio relativo médio ($D_{rel.}$)	7,13 %	0,70 %	16,30 %	0,71 %
Coef. de determinação (R^2)	0,973	0,886	0,977	0,960

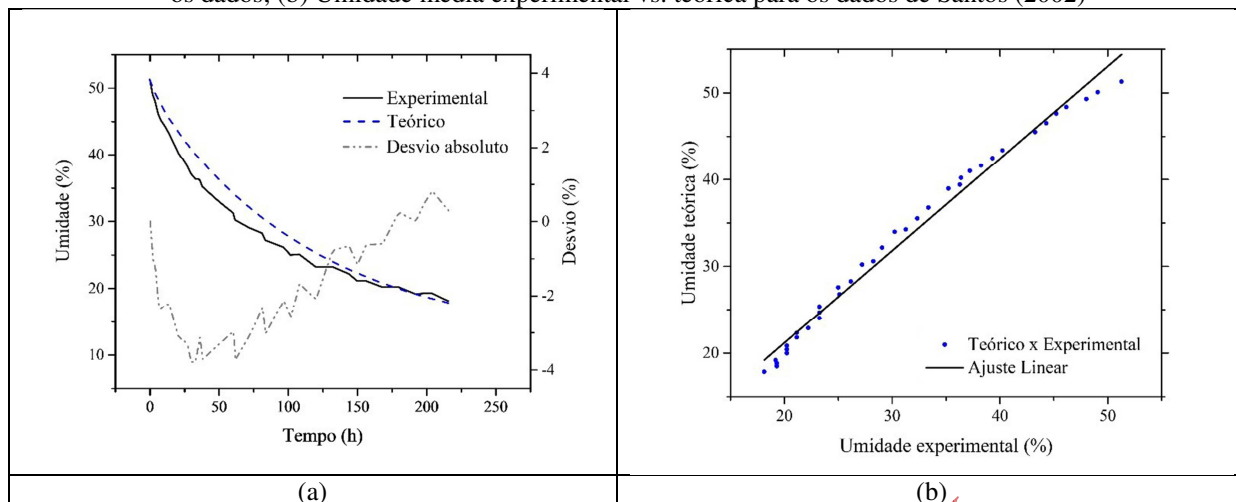
Fonte: dados da pesquisa

Os resultados obtidos para o coeficiente de determinação indicam uma boa aproximação, confirmando a adequação do modelo para a simulação do processo de secagem de madeira. Observa-se que o modelo apresenta maior precisão nos dados de umidade, porém com uma variabilidade maior em comparação com os dados de temperatura. Além disso, é possível inferir que o modelo é sensível à espessura e à densidade da peça, como demonstrado por Brandão *et al.* (2022).

Para avaliar o desempenho do modelo ao simular um programa de secagem, o algoritmo foi utilizado para replicar experimentos em escala industrial descritos em três estudos (Santos, 2002; Susin, 2012; Soares; Lima; Silva, 2016).

A análise comparativa entre os dados experimentais de Santos (2002) e os dados simulados para a umidade média da madeira de *Eucalyptus grandis* é apresentada na Figura 5. A variabilidade entre os dados, expressa pelo cálculo do desvio relativo médio, foi de 6,2%. O coeficiente de determinação alcançado foi de 0,986, indicando uma boa correlação entre os dados experimentais e teóricos, com um coeficiente de correlação linear de 0,993.

Figura 5 – (a) Variação da umidade média experimental e teórica em função do tempo e o desvio absoluto entre os dados; (b) Umidade média experimental vs. teórica para os dados de Santos (2002)

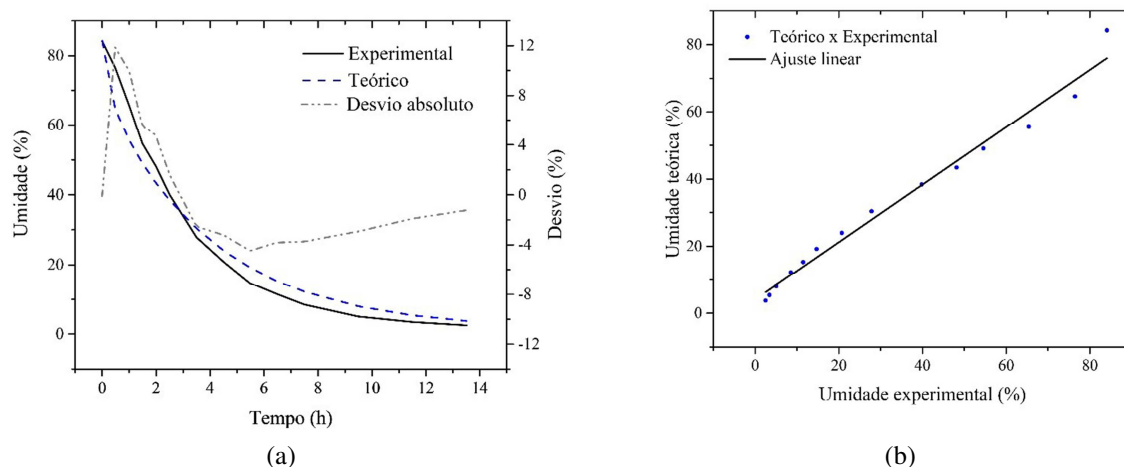


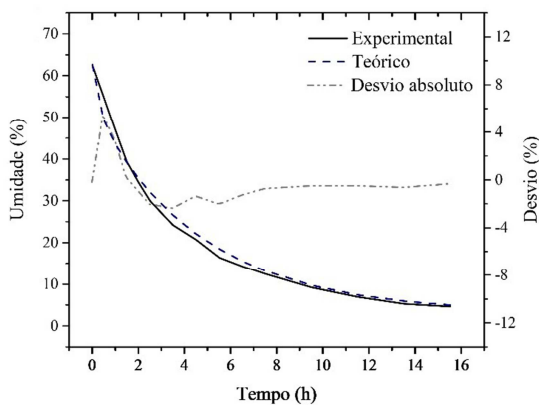
Fonte: dados da pesquisa

Observa-se que o modelo apresenta resultados mais precisos após atingir o Ponto de Saturação das Fibras (PSF), que ocorre em torno de 24% de umidade. Esse comportamento é consistente com a natureza difusiva do modelo difusivo, conforme também observado por outros estudos (Avramidis; Hatzikiriakos, 1995; Kocafee *et al.*, 2006; Kadem *et al.*, 2011).

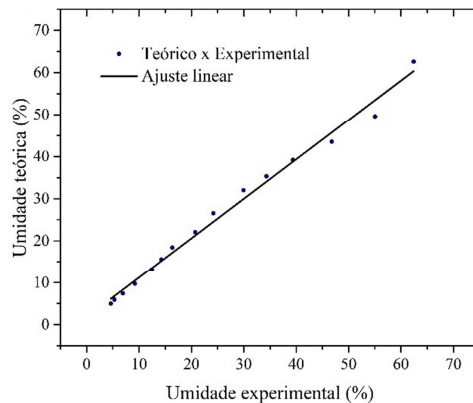
A Figura 6 mostra a comparação com os experimentos descritos por Soares, Lima e Silva (2016). Esses autores desenvolveram dois programas diferentes, adaptados às propriedades distintas encontradas nas amostras de madeira de *Eucalyptus saligna* jovem e madura.

Figura 6 – Comparação com os experimentos descritos por Soares, Lima e Silva (2016). (a) Variação da umidade média experimental e teórica e desvio absoluto para a madeira jovem; (b) Umidade média experimental versus teórica para madeira jovem; (c) Variação da umidade média experimental e teórica e desvio absoluto para a madeira madura; (d) Umidade média experimental versus teórica para madeira madura





(c)



(d)

Fonte: dados da pesquisa

Os parâmetros usados para analisar a simulação estão reunidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros para avaliação dos dados de Soares, Lima e Silva (2016)

Parâmetro	Madeira jovem	Madeira madura
Desvio relativo médio ($D_{rel.}$)	24,9%	6,8%
Coefficiente de determinação (R^2)	0,981	0,990
Coefficiente de correlação linear (r)	0,990	0,995

Fonte: dados da pesquisa

Avaliando os dados trazidos na Tabela 2, observa-se que a madeira madura apresenta uma maior correlação entre os dados experimentais e os resultados da simulação, além de uma menor variabilidade em comparação com a madeira jovem. Isso indica que a simulação foi mais precisa para a amostra de madeira madura.

Ao considerar que a principal diferença entre as duas amostras é a idade, o que implica em diferenças em propriedades como densidade, porosidade e dimensões das fibras (Soares; Lima; Silva, 2016), é possível inferir que o modelo descreve de forma mais precisa a madeira madura devido à sua menor porosidade e maior densidade. Essa maior densidade prioriza a secagem por difusão, que é melhor descrita pelo modelo difusivo utilizado (Kadem *et al.*, 2011; Kocaefer *et al.*, 2006). Essa hipótese pode ser reforçada ao comparar com um modelo não-difusivo.

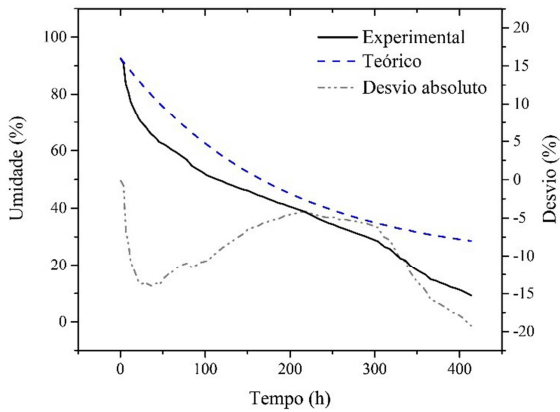
Também se observa que o programa de secagem usado para a madeira madura é menos agressivo em relação às suas condições operacionais, possuindo variações mais graduais na temperatura e umidade do ar dentro da estufa. Isso também pode contribuir para a melhor qualidade dos resultados, tanto em termos de variabilidade quanto de precisão na simulação da secagem da madeira madura.

Nas Figuras 6a e 6c, nota-se um comportamento similar do desvio absoluto para as duas amostras, porém, a escala de desvio é consideravelmente menor para a madeira madura. Além disso, após o PSF, a variabilidade é substancialmente reduzida para ambas as amostras.

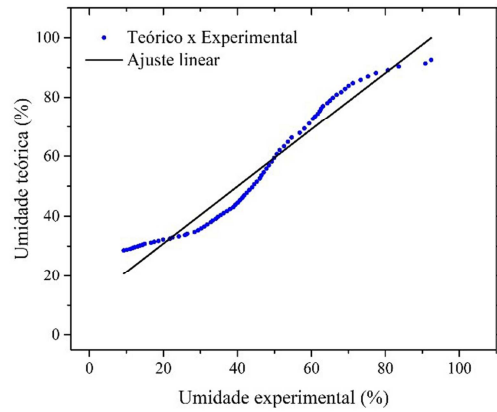
Susin (2012) conduziu testes com duas espécies de eucalipto, considerando dois lotes para cada espécie. A Figura 7 apresenta a comparação entre os dados experimentais coletados para os dois lotes de madeira de *Eucalyptus robusta* e os dados teóricos gerados.

Figura 7 – Comparação com os experimentos descritos por Susin (2012) para a madeira de *Eucalyptus robusta*.

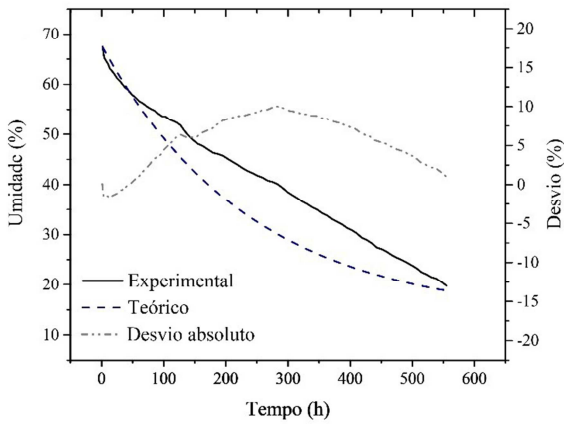
(a) Variação da umidade média experimental e teórica e desvio absoluto para o 1º lote; (b) Umidade média experimental versus teórica para o 1º lote; (c) Variação da umidade média experimental e teórica e desvio absoluto para o 2º lote; (d) Umidade média experimental versus teórica para o 2º lote



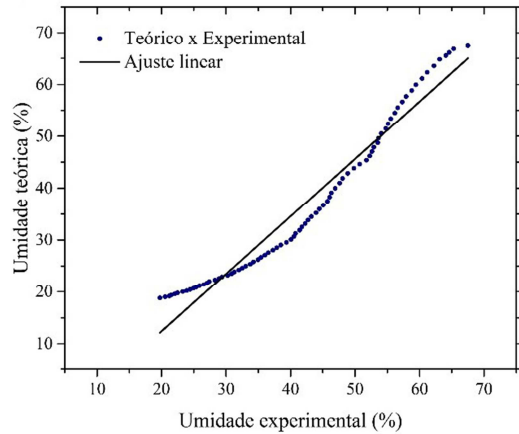
(a)



(b)



(c)

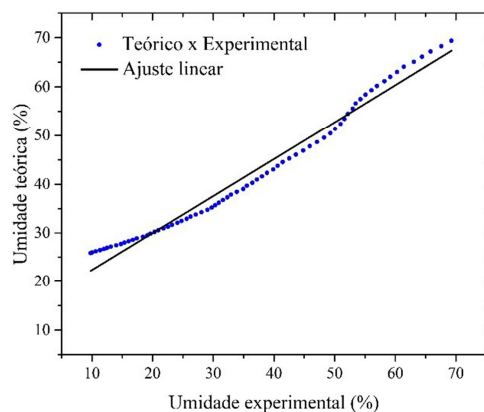
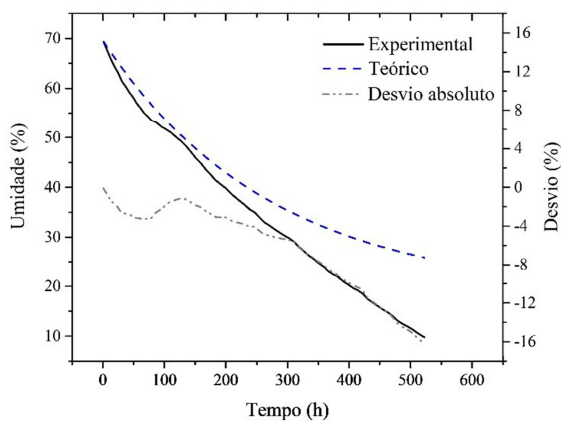


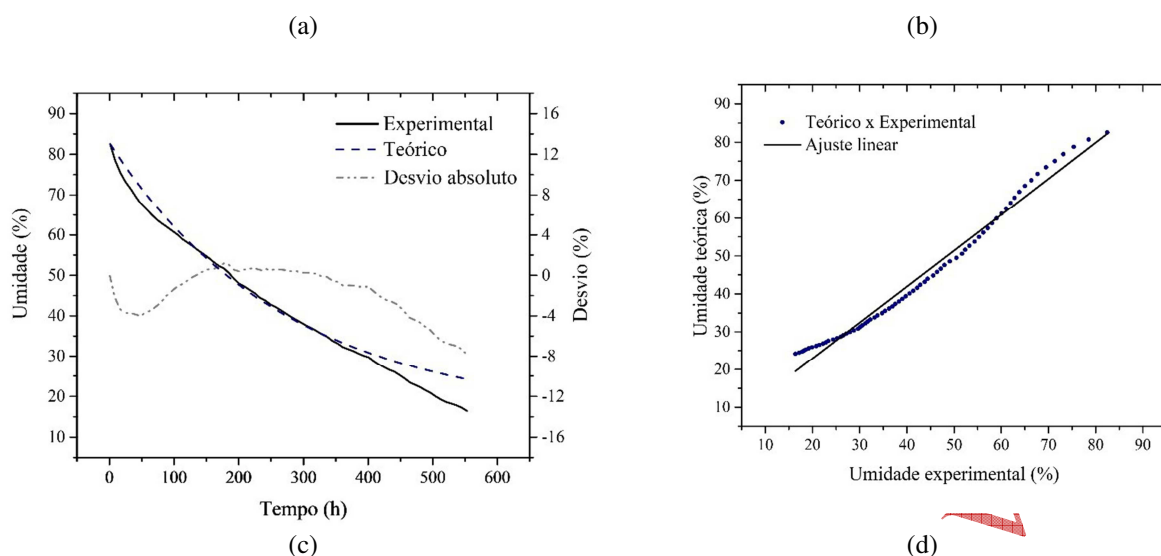
(d)

Fonte: dados da pesquisa

A Figura 8 ilustra a comparação entre os dados experimentais coletados por Susin (2012) para dois lotes de madeira de *Eucalyptus saligna* e as simulações realizadas.

Figura 8 – Comparação com os experimentos descritos por Susin (2012) para a madeira de *Eucalyptus saligna*. (a) Variação da umidade média experimental e teórica e desvio absoluto para o 1º lote; (b) Umidade média experimental versus teórica para o 1º lote; (c) Variação da umidade média experimental e teórica e desvio absoluto para o 2º lote; (d) Umidade média experimental versus teórica para o 2º lote





Fonte: dados da pesquisa

A Tabela 3 reúne os parâmetros relacionados à simulação dos ensaios de Susin (2012) para as duas espécies estudadas.

Tabela 3 – Parâmetros para avaliação dos dados de Susin (2012)

Parâmetro	<i>Eucalyptus robusta</i>		<i>Eucalyptus saligna</i>	
	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2
Desvio relativo médio ($D_{rel.}$)	35,65%	14,69%	32,71%	7,90%
Coefficiente de determinação (R^2)	0,953	0,954	0,978	0,981
Coefficiente de correlação linear (r)	0,976	0,977	0,988	0,991

Fonte: dados da pesquisa

Avaliando os resultados trazidos na Tabela 3, nota-se que a simulação produziu resultados mais precisos para amostras de *Eucalyptus saligna* (690 kg/m^3) que possuíam maior densidade em comparação com as amostras de *Eucalyptus robusta* (610 kg/m^3), mantendo a mesma espessura. Contudo, ao analisar as Figuras 7 e 8, se constata que, ao contrário dos ensaios anteriores, em três dos quatro experimentos de Susin (2012), não foi observada a redução da variabilidade da simulação à medida que a secagem avançava. Apenas em um caso (segundo lote de amostras de *Eucalyptus robusta*, Figura 7c) observa-se uma diminuição do desvio absoluto após o PSF.

Liebl *et al.* (2017) e Silva *et al.* (2022) afirmam que as características do gênero *Eucalyptus* tornam o processo de secagem lento e desafiador. Isso ocorre principalmente devido à baixa permeabilidade da madeira, que resulta em um gradiente de umidade, contrações visíveis e maior suscetibilidade ao colapso, rachaduras e tensões durante a secagem.

Zen *et al.* (2019) mencionam que as dificuldades associadas ao processo de secagem da madeira de eucalipto levam muitas indústrias a optarem por outras espécies como sua principal matéria-prima.

Conforme Silva *et al.* (2022) a densidade da madeira é influenciada pela interação das propriedades anatômicas e químicas do lenho, desempenhando um papel significativo no processo de secagem. Madeiras com maior densidade apresentam menor permeabilidade.

Segundo Susin (2018), madeiras com maior densidade possuem uma parede celular mais espessa e menor volume de lume, resultando em uma proporção relativamente maior de água higroscópica, cuja movimentação é mais lenta. Nesses casos, o mecanismo de secagem é definido pela difusão da umidade através das paredes das células.

Considerando que foi utilizado um modelo difusivo, os resultados das simulações são consistentes com os resultados experimentais observados em programas de secagem de madeiras

densas, que apresentam um comportamento complexo e exigem maior atenção no seu tratamento para evitar perdas causadas por tensões de secagem.

4. Conclusões

Percebe-se que, ao utilizar um programa de secagem adequado, as amostras com maior densidade e menor espessura apresentaram menor desvio relativo e maior correlação linear entre os dados experimentais e os resultados das simulações. No entanto, uma amostra com densidade e espessura mediana mostrou um desvio maior e uma correlação menor. Portanto, é possível que outros fatores além da densidade e espessura da peça de madeira possam influenciar a qualidade dos resultados da simulação.

De maneira geral, verifica-se um aumento na precisão das simulações e uma redução em sua variabilidade após a peça atingir um teor de umidade de 24%. Essa tendência está de acordo com a aplicação de um modelo difusivo. No entanto, essa relação não se manifestou nos resultados dos experimentos ilustrados nas Figuras 7a, 8a e 8c. É importante notar que esses casos derivam do mesmo estudo, o que sugere que possíveis fatores externos ligados à origem dos dados experimentais possam estar influenciando o comportamento divergente observado nessas amostras.

Os resultados das simulações em diferentes condições operacionais de secagem e para diferentes espécies de madeira de eucalipto mostraram uma correlação significativa com os dados experimentais. A variabilidade entre os dados, medida pelo cálculo do desvio relativo médio, foi de 18,4%. O coeficiente de determinação alcançado foi de 0,975, e a relação entre os dados experimentais e os dados teóricos apresentou um coeficiente de correlação linear de 0,987.

Foi possível prever com acurácia aceitável o comportamento da remoção de umidade ao longo do processo, o que indica que essa técnica pode ser usada para projetar a resposta do material a mudanças nas condições operacionais e auxiliar no planejamento de rotinas experimentais futuras.

Trabalhos futuros têm a possibilidade de se concentrar no aprimoramento do modelo, incorporando considerações adicionais, tais como a variação da velocidade do ar no interior da estufa; admitir o aumento típico da densidade da madeira durante o processo de secagem; considerar a anisotropia do sistema e avaliar a variabilidade de outros coeficientes em função das condições operacionais. Além disso, o modelo pode ser estendido para integrar outras abordagens, como a análise da eficiência energética do processo por meio da simulação do transporte de calor.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ARENDS, T.; BARAKAT, A. J.; PEL, L. Moisture transport in pine wood during one-sided heating studied by NMR. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 99, p. 259-271, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exptthermflusci.2018.08.004>.

AVRAMIDIS, S.; HATZIKIRIAKOS, S. G. Convective heat and mass transfer in nonisothermal moisture desorption. **Holzforshing**, v. 49, n. 2, p. 163-167, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1515/hfsg.1995.49.2.163>.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P.; BATISTA, T. R. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade da secagem convencional da madeira de *Eucalyptus*

sp. – Parte 2. **Floresta e Ambiente**, 23(1), 135–141. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.046613>.

BATISTA, D. C.; **KLITZKE**, R. J.; **SANTOS**, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050982425>.

BRANDÃO, A. F. C.; **BIRCHAL**, V. S.; **COSTA JUNIOR**, E. F.; **COSTA**, A. O. S. Resolução numérica e análise do transporte simultâneo de calor e massa durante o processo de secagem da madeira de *Pinus elliottii*. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, v. 59, n. 2, p. 371-387, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4842>.

CALONEGO, F. W.; **SEVERO**, E. T. D.; **CONGLIAN**, A.; **BARREIROS**, R. M. Qualidade da secagem de *Eucalyptus grandis* mediante vaporização simultânea em toros e em madeira serrada. **Silva Lusitana**, v. 14, n. 2, p. 169-180, 2006. Disponível: <https://scielo.pt/pdf/slu/v14n2/v14n2a04.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2022.

EITELBERGER, J.; **SVENSSON**, S.; **HOFSTETTER**, K. Theory of transport processes in wood below the fiber saturation point: physical background on the microscale and its macroscopic description. **Holzforschung**, v. 65, n. 3, p. 337-342, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf.2011.041>.

ELEOTÉRIO, J. R. **Modelagem e simulação do processo de secagem de madeiras serradas de espécies tropicais brasileiras**. 2009. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/92895>. Acesso em: nov. 2021.

FERNANDES, M. L.; **BRAGA**, L. A. F.; **BRAGA JUNIOR**, G. F. Proposta de automação para o controle de temperatura e umidade em uma estufa de secagem de madeira. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 13, n. 1, p. 56-67, mar. 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/17091>. Acesso em: 30 mai. 2023.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORE. **Relatório Anual IBÁ 2022**. São Paulo: IBÁ, 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: jan. 2023.

KADEM, S.; **LACHEMET**, A.; **YOUNSI**, R.; **KOCAEFE**, D. 3D-Transient modeling of heat and mass transfer during heat treatment of wood. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 38, n. 6, p. 717-722, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.03.026>.

KLITZKE, R. J.; **BATISTA**, D. C. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis** (IPEF), v. 38, n. 85, p. 97-105, 2010. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr85/cap09.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2023.

KOCAEFE, D.; **YOUNSI**, R.; **CHAUDRY**, B.; **KOCAEFE**, Y. Modeling of heat and mass transfer during high temperature treatment of aspen. **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 5, p. 371-391, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0069-6>.

KOCAEFE, D.; **YOUNSI**, R.; **PONCSAK**, S.; **KOCAEFE**, Y. Comparison of different models for the high-temperature heat-treatment of wood, **International Journal of Thermal Sciences**, v. 46, n. 7, p. 707-716, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.09.001>.

LIEBL, O. A.; LOIOLA, P. L.; ZEN, L. R.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. Influência dos parâmetros dimensionais da pilha na qualidade da madeira de *Eucalyptus spp* submetida à secagem ao ar. **Floresta e Ambiente**, n. 24, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.105514>.

MARTINOVIĆ, D.; HORMAN, I.; DEMIRDŽIĆ, I. Numerical and experimental analysis of a wood drying process. **Wood Science and Technology**, v. 35, p. 143-156, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002260000083>.

MARTINS, V. A.; MARQUES, M. H. B.; GOUVEIA, F. N. Programa de secagem para a madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1469-1477, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509825221>.

MATHWORKS. **Help Center: ODE15i Function**. Mathworks, 2023. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode15i.html>. Acesso em: 16 ago. 2023.

OUMAROU, N.; KOCAEFE, D.; KOCAEFE, Y. 3D-modelling of conjugate heat and mass transfers: effects of storage conditions and species on wood high temperature treatment. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 79, p. 945-953, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.086>.

PUTRANTO, A.; CHEN, X. D.; XIAO, Z.; WEBLEY, P. A. Modeling of high-temperature treatment of wood using the reaction engineering approach (REA). **Bioresource Technology**, v. 102, n. 10, p. 6214-6220, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.053>.

ROZAS, E. C. E.; MONTERO, C. Modelo matemático para predecir las propiedades físicas en madera de *Eucalyptus nitens* para diferentes alturas y edades del árbol. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 4, p. 980-994, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509832493>.

SANTOS, G. R. V.; JANKOVSKY, I. P.; ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, n. 63, p. 214-220, 2003. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr63/cap18.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2023.

SANTOS, G. R. V. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis***. 2002. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.11.2002.tde-01082002-163939>.

SILVA, T. B.; SILVA, R. C.; LIMA, N. S. B.; CARVALHO, L. A.; SARAIVA, K. F.; MENDES, J. G. N.; LOIOLA, P. L.; FRANÇA, M. C.; MORAES, C. B.; MARCHESAN, R. Elaboração de programas de secagem para madeiras de *Eucalyptus spp.* e *Corymbia citriodora*. In: OLIVEIRA, R. J. (org.). **Engenharia Florestal: contribuições, análises e práticas em pesquisa**. Editora Científica Digital, p. 118-129, cap. 8, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.37885/220308101>.

SIMO-TAGNE, M.; RÉMOND, R.; ROGAUME, Y.; ZOULALIAN, A. Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of tropical woods. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 109, p. 299-308, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.012>.

SIMPSON, W.; TENWOLD, A. Physical properties and moisture relations of wood. In: **Wood Handbook: wood as an engineering material**, Madison: USDA Forest Service, 1999. Disponível em: <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgrtr/fplgrtr113/fplgrtr113.htm>. Acesso em: 25 ago. 2023.

SOARES, B. C. D.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. Analysing the drying behavior of juvenile and mature *Eucalyptus saligna* wood in drastic drying test for optimal drying schedule. **Maderas, Ciencia y Tecnologia**, v. 18, n. 4, p. 543-554, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000047>.

SUSIN, F. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaborados com base em testes prévios a alta temperatura**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/8726>. Acesso em: 12 ago. 2022.

SUSIN, F. **Caracterização e secagem da madeira de 12 espécies amazônicas**. 2018. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15284>. Acesso em: 30 mai. 2023.

TALGATTI, M.; SILVEIRA, A. G.; BALDIN, T.; OLIVEIRA, L. H.; SANTINI, E. J. Gradientes de umidade e suas implicações nas tensões de secagem, quantidade e dimensões de rachaduras na madeira de *Eucalyptus tereticornis* aos 15 anos. **Revista do Instituto Florestal**, v. 31, n. 1, p. 65-74, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.24278/2178-5031.201931106>.

YOUNSI, R.; KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; KOCAEFE, Y. Computational and experimental analysis of high temperature thermal treatment of wood based on thermowood technology. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 37, n. 1, p. 21-28, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.08.008>.

ZEN, L. R.; MONTEIRO, T. C.; SCHAEFFER, W.; KAMINSKI, J. M.; KLITZKE, R. J. Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 7, n. 2, p. 291-298, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20873/jbb.ufscemaf.v7n2.zen>.

ZHAO, J.; FU, Z.; JIA, X.; CAI, Y. Modeling conventional drying of wood: inclusion of a moving evaporation interface. **Drying Technology**, v. 34, n. 5, p. 530-538, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2015.1060999>.

Revista Principio Early View