

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4842>

ARTIGO ORIGINAL

## Resolução numérica e análise do transporte simultâneo de calor e massa durante o processo de secagem da madeira de *Pinus elliottii*

SUBMETIDO 19/08/2020

APROVADO 19/04/2021

PUBLICADO ON-LINE 12/08/2021

PUBLICADO Junho de 2022

EDITOR ASSOCIADO

Francisco de Assis da Silveira Gonzaga

 Alisson Frank Canuto Brandão <sup>[1]</sup>

 Viviane Santos Birchal <sup>[2]</sup>

 Esly Ferreira da Costa Junior <sup>[3]</sup>

 Andréa Oliveira Souza da Costa <sup>[4]</sup>

[1] [alisson.fcbrandao@gmail.com](mailto:alisson.fcbrandao@gmail.com).

[2] [vbirchal@ufmg.br](mailto:vbirchal@ufmg.br).

[3] [esly@deq.ufmg.br](mailto:esly@deq.ufmg.br).

[4] [andreacosta@deq.ufmg.br](mailto:andreacosta@deq.ufmg.br).

Escola de Engenharia/Departamento de Engenharia Química / Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

**RESUMO:** O presente trabalho visa analisar a influência de parâmetros operacionais no transporte simultâneo de calor e massa durante o processo de secagem da madeira, por meio de simulação computacional. Nesse intuito, utilizou-se um modelo matemático que aborda o fenômeno como sendo intrinsecamente difusivo, sendo constituído de um sistema de equações diferenciais parciais acopladas. Sua resolução foi numericamente alcançada por meio da aplicação do método das linhas. As simulações consideraram uma placa de madeira de *Pinus elliottii* submetida às condições típicas de secagem em uma estufa convectiva convencional. A validação dos resultados teóricos foi realizada a partir da comparação com dados experimentais da literatura. As simulações mostram a formação de um gradiente de umidade expressivo no início do processo. Também foi observada a ocorrência da redução gradual da taxa de secagem e a significativa influência da espessura da peça na velocidade de secagem. As interferências associadas à termodifusão e ao efeito Soret mostraram-se pouco apreciáveis. A concordância das observações inferidas dos resultados teóricos com os dados experimentais sustenta que o modelo possui relativa eficiência na predição do comportamento do material quando submetido a condições operacionais específicas.

**Palavras-chave:** diferenças finitas; estufa convencional; madeira; secagem; simulação.

*Numerical resolution and analysis of the simultaneous transport of heat and mass during the drying process of *Pinus elliottii* wood*

**ABSTRACT:** *The present work aims to analyze the influence of operational parameters in the simultaneous transport of heat and mass during the drying process of the wood using computer simulation. For this purpose, it used a mathematical model that approaches the phenomenon as being intrinsically diffusive, being constituted of a system coupled partial differential equations. Its resolution was numerically achieved through the application of the method of lines. The simulations considered a Pinus elliottii wood plate submitted to typical drying conditions in a conventional convective kiln. The validation of the theoretical results was performed by comparing them with experimental data from the literature. The simulations show the formation of an expressive moisture gradient at the beginning of the process. It was also observed the occurrence of a gradual reduction in the drying rate and the significant influence of the thickness of the piece on the drying speed. The interferences associated with thermal diffusion and the Soret effect proved to be insignificant. The agreement of the observations inferred from the theoretical results with the experimental data maintains that the model has relative efficiency in the prediction of the material's behavior when subjected to specific operational conditions.*

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

## 1 Introdução

A madeira pode ser definida como um material composto polimérico celular de baixa densidade, higroscópico e com estrutura porosa capilar (BELGACEM, PIZZI, 2016; RICHTER, 2015). Seu processo de secagem ocorre através da transferência simultânea de calor e massa; nele, um gradiente de temperatura e um gradiente de massa (umidade) interagem (ZHAO *et al.*, 2016).

A maioria das propriedades da madeira independem de sua umidade enquanto ela se situa acima de um valor médio de 28% em base seca (b.s.). No entanto, abaixo desse valor, tais propriedades passam a ser sensíveis às variações da umidade, pois, a partir daí, a madeira se contrai e, de forma geral, se torna mais densa e mecanicamente mais rígida (EITELBERGER; SVENSSON; HOFSTETTER, 2011; KOCAEFE *et al.*, 2006). Esse valor médio de umidade é definido como Ponto de Saturação das Fibras (PSF). Nesse ponto, considera-se que a madeira perdeu toda a sua água livre (dos lumens e espaços intercelulares), porém ainda mantém as paredes celulares saturadas de umidade (EITELBERGER; SVENSSON; HOFSTETTER, 2011). Abaixo do PSF, o processo de secagem da madeira pode ser considerado um processo puramente difusivo, no qual a água ligada se move através das paredes das células, devido a gradientes de umidade estabelecidos pela secagem. A expressão matemática que descreve esse fenômeno se torna equivalente à segunda lei de Fick (DEDIC; MUJUMDAR; VORONJEC, 2003; KEEY; LANGRISH; WALKER, 2000).

A secagem de madeira é geralmente realizada por meio de uma combinação de secagem natural (ao ar livre) e secagem em estufa. A secagem natural prévia tende a melhorar a permeabilidade da madeira e a reduzir o tempo de secagem na estufa. Ela geralmente se estende até que a umidade da madeira atinja 30% a 25% (b.s.); a madeira é, então, transferida para a próxima etapa (SANTOS, 2002). A secagem convencional em estufa convectiva é um método tradicional que possui uma ampla aplicação na indústria madeireira. Atualmente, mais de 80% da madeira produzida é seca por esse método,

em que o ar quente e com baixa umidade é forçado a circular por bancos de madeira empilhada (ZHAO *et al.*, 2016).

Durante o processo de secagem, a distribuição não uniforme de temperatura e umidade pode causar estresses de contração, resultando em possíveis danos ao produto. O procedimento de secagem é geralmente determinado empiricamente e a operação da secagem da madeira pode levar de alguns dias até semanas, visando minimizar os danos desse procedimento (HORMAN; MARTINOVIĆ; HAJDAREVIĆ, 2009).

A literatura traz vários estudos sobre os fenômenos de transporte em meios porosos capilares (DEDIC; MUJUMDAR; VORONJEC, 2003; KADEM *et al.*, 2011; KOCAEFE *et al.*, 2006; LUIKOV, 1975; MARTINOVIĆ; HORMAN; DEMIRDŽIĆ, 2001; ZHAO *et al.*, 2016). Os modelos que melhor representam o processo de secagem convencional tratam a transferência simultânea de calor e umidade como um conjunto de equações de transporte acopladas, ou seja, consideram a distribuição da temperatura sendo influenciada pelo transporte de umidade e vice-versa (ARENDS; BARAKAT; PEL, 2018; AVRAMIDIS; HATZIKIRIAKOS, 1995; CREMASCO, 2015; KOCAEFE *et al.*, 2006). Esses modelos contêm várias propriedades termofísicas das fases envolvidas (sólida, líquida e gasosa) e são geralmente uni ou bidimensionais. Sua resolução é alcançada numericamente através da aplicação de métodos computacionais de resolução de equações diferenciais (ELEOTÉRIO, 2009; KOCAEFE *et al.*, 2006). As simulações computacionais realizadas a partir desses modelos de transporte permitem prever o comportamento de parâmetros e podem ser usadas na projeção da resposta do material às mudanças nas condições operacionais, o que torna essa abordagem uma ferramenta útil no desenvolvimento, otimização e controle de processos de secagem, permitindo reduzir o tempo, os defeitos de secagem e, conseqüentemente, os custos do processo (AVRAMIDIS; HATZIKIRIAKOS, 1995; OUMAROU; KOCAEFE; KOCAEFE, 2014).

O presente estudo tem como objetivo analisar a simulação do processo de secagem da madeira de *Pinus elliottii* em uma estufa convectiva convencional, avaliando o comportamento da distribuição de temperatura e umidade na peça de madeira em função de modificações nos parâmetros operacionais do processo.

## 2 Metodologia

Este trabalho aborda o fenômeno de transferência simultânea de calor e massa como intrinsecamente difusivo. As condições externas de secagem, como a temperatura e a umidade relativa do fluxo de ar no interior da estufa, também foram consideradas. O modelo que melhor se adequa à proposta deste trabalho é o apresentado por Martinović, Horman e Demirdžić (2001), porém com adaptações pertinentes aos objetivos deste estudo.

As seguintes considerações foram assumidas:

- i) A madeira é um meio poroso capilar que consiste principalmente em uma matriz de um composto polimérico celular de baixa densidade, água livre, água ligada e vapor de água.
- ii) O processo de secagem da madeira é caracterizado pelo fluxo difusivo transiente, sendo este o único mecanismo de transporte de água dentro do sólido e sendo regido pelo gradiente de umidade.
- iii) Foi considerada a transferência de calor e massa ocorrendo somente ao longo da espessura, com o fluxo de umidade dando-se na direção do centro para a superfície da peça e o fluxo de calor na direção inversa.

- iv) Durante a secagem, o tamanho e a estrutura interna da peça de madeira não se alteram, desprezando-se, dessa forma, alterações no fluxo devidas às retrações volumétricas e variações na densidade da madeira no processo de secagem.
- v) A temperatura do ambiente interno da estufa assim como a velocidade e a umidade relativa do ar não se alteram com a temperatura e umidade da madeira.

O balanço de energia é descrito pelo fluxo de calor dado pela lei de Fourier somada a um termo referente à energia consumida ao evaporar a parcela de massa que se difunde na forma de vapor, como mostra a Equação 1.

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

em que:  $t$  = tempo (s);  $\rho$  = densidade da madeira anidra ( $\text{kg}_{\text{sólido seco}}/\text{m}^3$ );  $T$  = temperatura (K);  $x$  = direção espacial contemplada pelo modelo (m);  $C_p$  = calor específico (J/kg.K);  $k_h$  = condutividade térmica (W/m.K);  $M$  = umidade ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$ );  $k_m$  = difusividade efetiva ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m.s}$ );  $\varepsilon$  = razão entre a difusividade mássica de vapor e a difusividade mássica total de umidade;  $\lambda$  = calor latente de vaporização (J/kg).

O balanço de massa, considerando um conteúdo de umidade abaixo do PSF, é dado pela segunda lei de Fick, mais um termo relacionado à influência do gradiente de temperatura no fluxo de umidade (efeito Soret), como expresso na Equação 2.

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

Em que:  $C_m$  = capacidade de umidade ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$ );  $\delta$  = coeficiente do gradiente de temperatura ( $\text{K}^{-1}$ ).

Para resolver as Equações 1 e 2, condições iniciais e de contorno são necessárias. Para as condições iniciais, em  $t = 0$ , considera-se que o conteúdo de umidade e a temperatura são uniformes em toda a amostra e são definidos como iguais à umidade inicial conhecida e à temperatura inicial da madeira, podendo ser expressos como a seguir:

$$T(0, x) = T_0 \quad (3)$$

$$M(0, x) = M_0 \quad (4)$$

Para todos os valores de  $t$  em  $x = L$  (superfície da madeira), as condições de contorno da transferência de calor e umidade são expressas pelas Equações 5 e 6. Na Equação 5, o calor que chega à superfície por convecção é conduzido para o interior do material ou é consumido na evaporação da umidade na superfície. Na Equação 6, a umidade que chega à superfície por difusão e pelo efeito Soret é removida por convecção.

$$k_h \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_h(T - T_a) + (1 - \varepsilon)\lambda\alpha_m(M - M_a) = 0 \quad (5)$$

$$k_m \frac{\partial M}{\partial x} + \alpha_m(M - M_a) + \delta k_m \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Em que:  $T_a$  = temperatura do ambiente interno da estufa (K);  $M_a$  = umidade de equilíbrio do ar interno da estufa (%);  $\alpha_h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m<sup>2</sup>.K);  $\alpha_m$  = coeficiente de transferência de massa por convecção (kg/m<sup>2</sup>.s).

Para o centro da peça de madeira ( $x = 0$ ), considera-se a condição de simetria representada pelas Equações 7 e 8:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

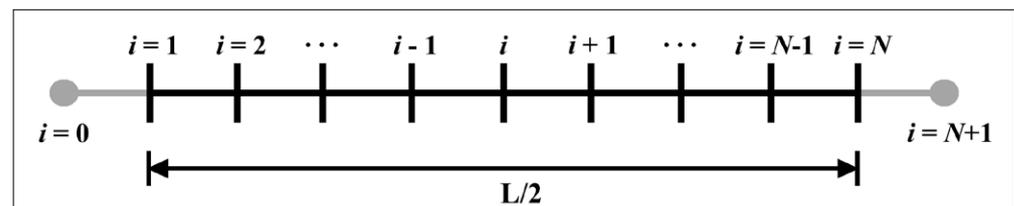
O modelo matemático descrito consiste num sistema de equações diferenciais parciais acopladas e não possui solução analítica. Para sua resolução, as equações diferenciais parciais são discretizadas na direção espacial usando o método de diferenças finitas com aproximações por diferenças finitas centrais de segunda ordem aplicadas às Equações 1 e 2, como mostrado nas Equações 9 e 10:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{(k_h + \varepsilon\lambda\delta k_m)}{\rho C_p} \left( \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \right) + \frac{\varepsilon\lambda k_m}{\rho C_p} \left( \frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta x^2} \right) \quad (9)$$

$$\frac{dM_i}{dt} = \frac{k_m}{\rho C_m} \left( \frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta x^2} \right) + \frac{\delta k_m}{\rho C_m} \left( \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \right) \quad (10)$$

Essas equações 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 apresentado na Figura 1.

**Figura 1** ►  
Representação da malha numérica. Fonte: dados da pesquisa



Para a determinação dos valores relativos à temperatura e à umidade no contorno foi aplicado o método de diferenças finitas centrais para as derivadas espaciais das Equações 5 e 6, no ponto  $i = N$ , considerando pontos fictícios, resultando nas Equações 11 e 12.

Para  $i = N$ :

$$T_{N+1} = T_{N-1} - 2\Delta x \left[ \frac{\alpha_h}{k_h} (T_N - T_a) + \frac{(1 - \varepsilon)\lambda\alpha_m}{k_h} (M_N - M_a) \right] \quad (11)$$

$$M_{N+1} = M_{N-1} - 2\Delta x \left[ \frac{\alpha_m}{k_m} (M_N - M_a) + \delta \left( \frac{T_{N+1} - T_{N-1}}{2\Delta x} \right) \right] \quad (12)$$

Os valores calculados para  $T_{N+1}$  e  $M_{N+1}$  pelas Equações 11 e 12 são substituídos nas Equações 9 e 10 e tem-se as equações para as derivadas temporais no ponto  $i = N$ .

Para as condições de contorno no centro da peça, representadas pelas Equações 7 e 8, um ponto fictício, de índice  $i = 0$ , localizado antes do ponto central é admitido, como ilustrado na Figura 1. A discretização dessas Equações 7 e 8 por diferenças finitas para as derivadas espaciais resulta nas igualdades 13 e 14.

Para  $i = 1$ :

$$T_{i=0} = T_2 \quad (13)$$

$$M_{i=0} = M_2 \quad (14)$$

A substituição dessas igualdades nas Equações 9 e 10 gera as equações para derivadas temporais no ponto central ( $i = 1$ ).

O algoritmo para resolução do problema foi implementado no software MATLAB®. O sistema de equações diferenciais ordinárias, obtido pela discretização das Equações 1 e 2, foi integrado no tempo através do uso da função *ode23*, que permite resolver problemas de valores iniciais para equações diferenciais baseando-se no método explícito de Runge-Kutta.

Para determinar quantos pontos de discretização seriam necessários para alcançar um equilíbrio satisfatório entre a precisão dos resultados da simulação e o uso dos recursos computacionais, foi realizada uma análise da convergência da malha numérica. Para isso, usou-se como base os dados de variação da umidade (b.s.) no centro da peça de madeira em função do tempo, por demonstrarem maior sensibilidade ao aumento do número de pontos de discretização ( $N$ ) quando comparados aos dados de temperatura ou aos dados de umidade em outros pontos. As simulações foram feitas admitindo-se 6, 11, 21, 41, 81 e 161 pontos de discretização. Ressalta-se que esses números de pontos foram escolhidos de modo que o número de intervalos de discretização (igual a  $N-1$ ) fosse dobrado a cada aumento do número de pontos. O procedimento foi repetido até que se observasse uma diferença mínima da ordem de  $10^{-3}$  entre os valores resultantes de cada iteração, visando alcançar um nível de refinamento da malha adequado para os fins deste estudo.

Foram consideradas como objeto de estudo deste trabalho amostras de madeira serrada de *Pinus elliottii*, por esta ser, entre as espécies de coníferas cultivadas no Brasil, a que apresenta maior percentual de exportação e consumo (IBA, 2019; SBS, 2018), como também pela disponibilidade de dados acerca das propriedades dessa madeira na literatura

(ELEOTÉRIO, 2009; SANTOS *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2011). Foi assumido que as amostras teriam espessura padrão de 4 cm e densidade média de 480,4 kg/m<sup>3</sup>. Considerou-se também que as amostras teriam passado previamente por um processo de secagem natural, assumindo que esse procedimento teria sido capaz de remover a umidade das peças até o teor médio de 30% em base seca (b.s.), quando as peças seriam encaminhadas à secagem por estufa convencional. Os parâmetros operacionais assumidos são referentes aos encontrados em condições típicas de secagem nesse tipo de equipamento. Esses parâmetros e as demais propriedades estão indicados no Quadro 1.

**Quadro 1** ▶  
Parâmetros e propriedades consideradas na simulação.  
Fonte: elaboração própria

Parâmetro (símbolo)	Valor e unidade	Fonte
Densidade ( $\rho$ )	480,4 kg <sub>seco</sub> /m <sup>3</sup>	IPT-SP, 2018
Umidade inicial (b.s.)( $M_o$ )	30%	Santos, 2002
Temperatura inicial ( $T_o$ )	300,15 K	Eleotério, 2009
Umidade do ar no interior da estufa (b.s.)( $M_a$ )	8%	Martinović; Horman; Demirdžić, 2001
Temperatura do ar ( $T_a$ )	343,15 K	Oumarou; Kocaefer; Kocaefer, 2014
Espessura da peça ( $L$ )	0,04 m	Mellado, 2007
Capacidade de Umidade ( $C_m$ )	0,01 kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>seco</sub>	Simo-Tagne <i>et al.</i> , 2016
Calor específico ( $C_p$ )	2500,0 J/kg.K	Zadin <i>et al.</i> , 2015
Coeficiente de difusividade ( $k_m$ )	1,8.10 <sup>-8</sup> kg/m.s	Simo-Tagne <i>et al.</i> , 2016
Coeficiente de condutividade térmica ( $k_h$ )	0,65 W/m.K	Thomas; Lewis; Morgan, 1979
Coeficiente de transferência de massa por convecção ( $\alpha_m$ )	2,15.10 <sup>-6</sup> kg/m <sup>2</sup> .s	Thomas; Lewis; Morgan, 1979
Coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\alpha_h$ )	22,675 W/m <sup>2</sup> .K	Thomas; Lewis; Morgan, 1979
Coeficiente de gradiente de temperatura ( $\delta$ )	2,0 K <sup>-1</sup>	Martinović; Horman; Demirdžić, 2001
Calor latente de evaporação ( $\lambda$ )	2,32.10 <sup>6</sup> J/kg	Martinović; Horman; Demirdžić, 2001
Razão entre a difusividade mássica do vapor de água e a difusividade mássica total de umidade ( $\epsilon$ )	0,5	Martinović; Horman; Demirdžić, 2001

Para a validação dos resultados de simulação, foi feita a coleta de dados experimentais de dois trabalhos que estudaram espécies de madeira similares e usaram condições operacionais semelhantes às consideradas neste estudo.

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<sup>3</sup>, expostas ao fluxo uniforme de ar em um secador de laboratório com um controle automático dos parâmetros do ar ambiente. A acurácia dos instrumentos utilizados no experimento foi de 0,01 °C para a temperatura e de 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<sup>3</sup>, submetidas à secagem em uma câmara de condicionamento com velocidade do ar interno de 2 m/s e

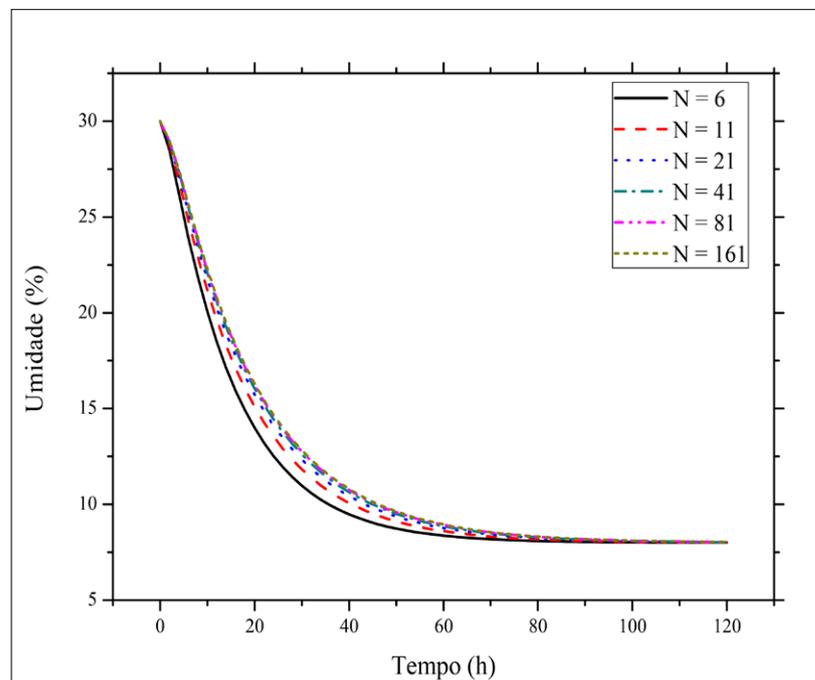
condições operacionais controladas. A incerteza encontrada para os dados de temperatura foi de 0,5 °C e de 1,06% para umidade.

As propriedades e condições operacionais usadas nos experimentos de Martinović, Horman e Demirdžić (2001) e de Zhao et al. (2016) foram utilizadas como dados de entrada do modelo. A validação é feita através do cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que correlaciona os dados resultantes das simulações com os dados experimentais dos respectivos autores.

### 3 Resultados e discussão

Na análise da convergência da malha, observou-se que, a partir de 41 pontos de discretização, não há alterações significativas nos valores dos resultados obtidos para variação da umidade no centro da peça de madeira, que apresentaram uma diferença média na ordem de  $10^{-3}$  entre os valores associados a 41 e 81 pontos de discretização. Como se observa na Figura 2, a partir de  $N = 41$  as curvas praticamente se sobrepõem, indicando a convergência da malha numérica. O tempo de processamento alcançado pelo algoritmo foi de 1 minuto e 27 segundos, em média. Dessa forma, pode-se considerar como adequado o número de pontos de discretização ( $N$ ) igual a 41 para os fins desta pesquisa, uma vez que, a partir desse nível de refinamento da malha, admite-se que a solução obtida está toleravelmente próxima da considerada exata, sem exigir um alto custo computacional para seu processamento.

**Figura 2** ►  
Análise da convergência da malha numérica.  
Fonte: dados da pesquisa



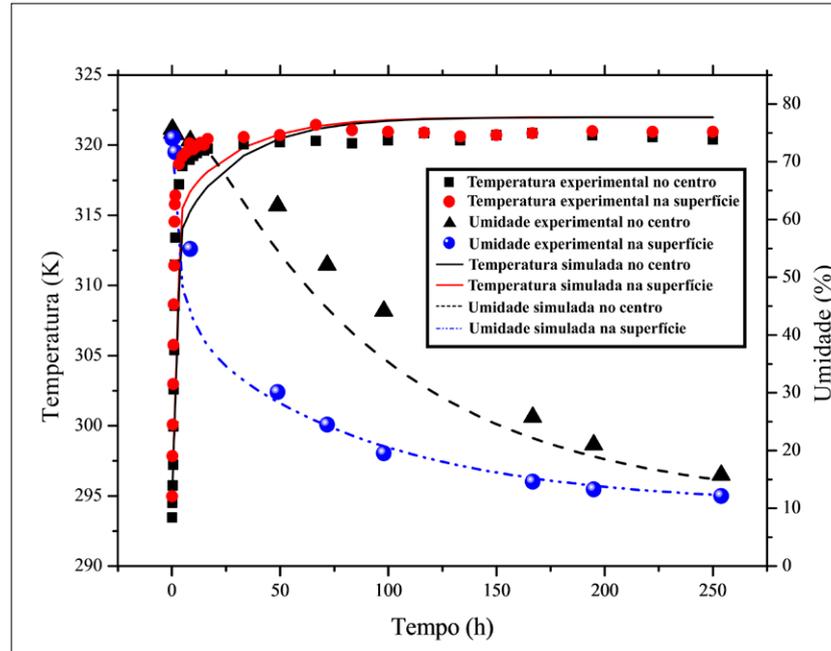
A comparação dos resultados teóricos obtidos com os dados experimentais dos trabalhos de Martinović, Horman e Demirdžić (2001) e de Zhao *et al.* (2016) indicou similaridades, como pode ser observado nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

A análise comparativa entre os dados experimentais de Martinović, Horman e Demirdžić (2001) e os dados simulados de temperatura e umidade é representada na Figura 3.

**Figura 3** ▶

Comparação dos resultados da simulação com os resultados experimentais de Martinović, Horman e Demirdžić (2001).

Fonte: dados da pesquisa



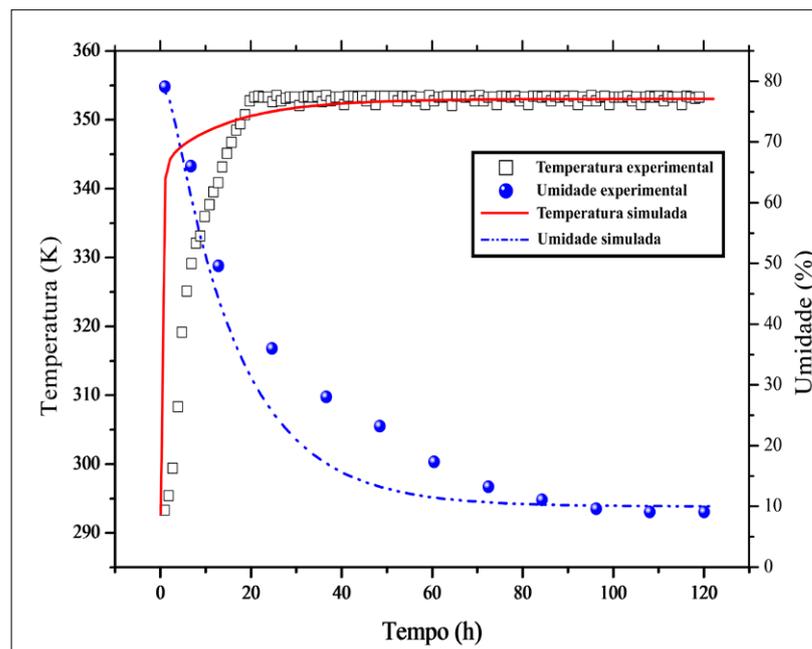
A avaliação dos resultados foi realizada através da análise do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), relacionando os dados experimentais aos resultados das simulações. A análise em relação aos dados experimentais de Martinović, Horman e Demirdžić (2001) resultou nos valores de  $R^2$  de 0,909 para os dados de temperatura e 0,840 para dados de umidade.

Os valores obtidos para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) em relação aos dados experimentais de Zhao *et al.* (2016) foram de 0,955, referente à transferência de calor, e 0,863, referente à transferência de massa. A Figura 4 mostra uma comparação entre os dados de variação de temperatura e umidade experimentais coletados por Zhao *et al.* (2016) e os dados obtidos através da simulação do sistema por este trabalho.

**Figura 4** ▶

Comparação dos resultados da simulação com os resultados experimentais de Zhao *et al.* (2016).

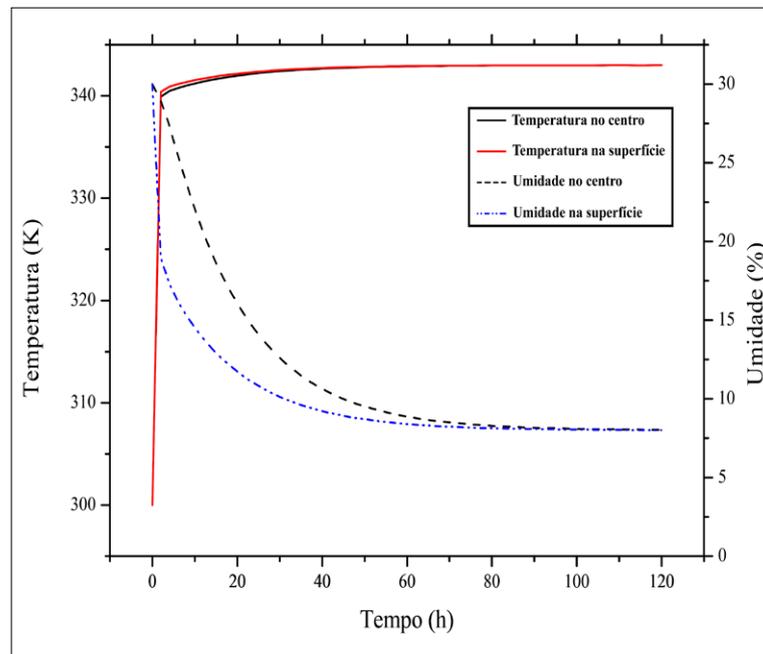
Fonte: dados da pesquisa



Os resultados confirmaram a adequação do modelo para a simulação do processo de secagem de madeira em estufa convencional. Contudo, foi possível inferir que o modelo é sensível à espessura e à densidade da peça assumida, atingindo resultados menos precisos para maiores espessuras e maiores valores de densidade.

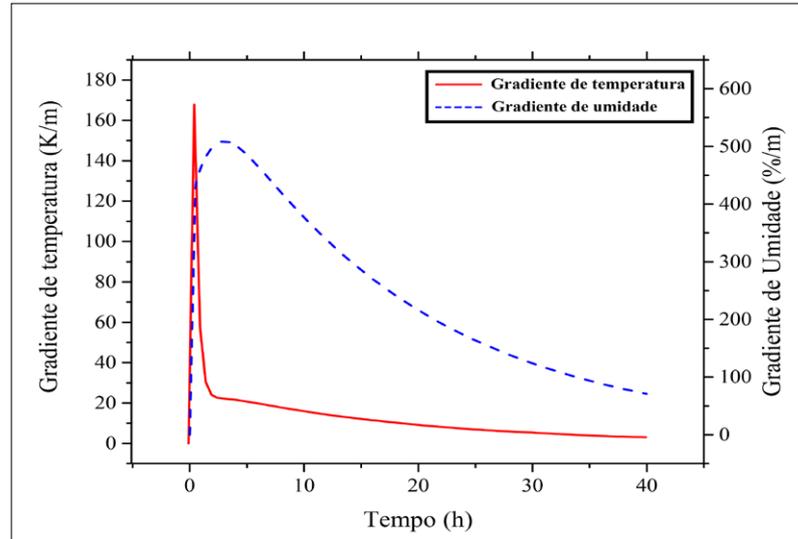
Considerando as condições descritas no Quadro 1, obtiveram-se as evoluções temporais para a umidade e a temperatura, que podem ser observadas na Figura 5. A umidade média apresentou um valor inicial de 30% (b.s.) e temperatura inicial de 300 K (27 °C). A Figura 5 mostra que o fluxo do calor se dá de maneira mais rápida na peça que o fluxo de massa. A temperatura da madeira aumenta rapidamente para 340 K nos primeiros 7.200 segundos (2 horas) e atinge o equilíbrio térmico com a temperatura ambiente em aproximadamente 273.600 segundos (76 horas) de aquecimento. Percebe-se também uma diminuição gradual da taxa média de secagem. Após aproximadamente 360.000 segundos (100 horas), chegou-se ao valor de umidade no centro de 8,093% e de 8,043% na superfície da peça de madeira, donde é possível assumir que o equilíbrio higroscópico (umidade de equilíbrio) foi alcançado, obtendo-se, dessa forma, uma taxa de secagem média de 0,219 %kg<sub>H2O</sub>/h.

**Figura 5** ►  
Variação da umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça de madeira. Fonte: dados da pesquisa



O valor máximo do gradiente de umidade entre o centro e a superfície da peça foi de aproximadamente 509,55%/m e ocorreu no início do processo de secagem, em torno dos 10.800 segundos (3 horas) de aquecimento, como ilustra a Figura 6. Como mostrado por Silva *et al.* (2011), a determinação da diferença entre o conteúdo de umidade no centro e na superfície da peça é um importante parâmetro que indica a possibilidade de causar estresses de contração durante o processo de secagem, os quais podem danificar a madeira. A Figura 6 também mostra a variação do gradiente de temperatura em função do tempo, com o valor máximo de 167,78 K/m, sendo atingido com apenas 210 segundos de aquecimento e reduzindo progressivamente com o decorrer da secagem. Observou-se que o gradiente de temperatura é pequeno quando comparado ao gradiente de umidade; isso possivelmente implica uma baixa influência do efeito Soret no transporte de massa durante a secagem.

**Figura 6** ►  
Variação do gradiente de umidade e de temperatura em função do tempo. *Fonte: dados da pesquisa*



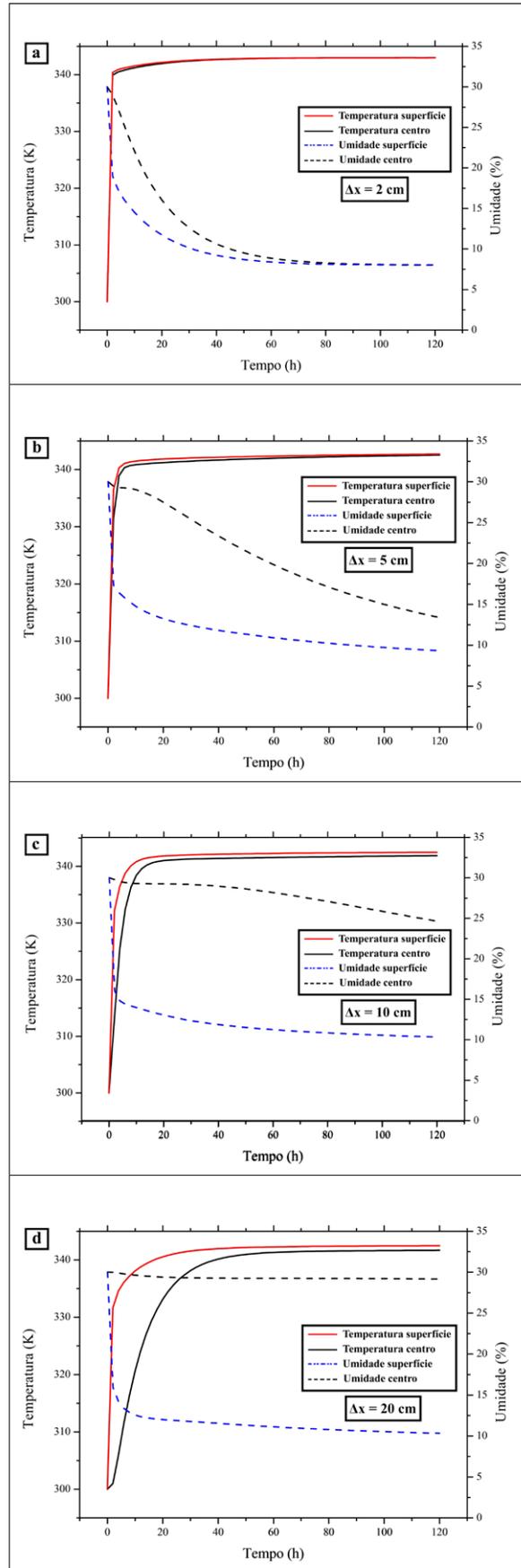
A Figura 7 ilustra a análise da variação da umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo, para diferentes espessuras da peça de madeira submetida à secagem. Nota-se que, durante o processo de secagem, a temperatura aumentou e o conteúdo médio de umidade diminuiu com o tempo, devido à influência da temperatura da atmosfera interna da estufa. A ebulição da umidade ocorreu a partir da superfície da amostra de madeira, que absorveu o calor da vaporização. A umidade se propagou para as superfícies externas da madeira por meio do fluxo capilar sob a influência do gradiente de umidade. Uma menor espessura da amostra de madeira significa um menor número de camadas de fibras e, conseqüentemente, um maior gradiente de umidade entre a superfície e o centro da peça, o que facilitou a difusão da umidade até a superfície da madeira, aumentando, assim, a velocidade de secagem. Entende-se também que, com a redução da espessura, ocorre uma diminuição da resistência à difusão de umidade e à transferência de calor, corroborando os achados de Santos *et al.* (2017), que observaram que a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii* tende a ser inversamente proporcional à espessura das peças. Conclui-se que, assim como citado por Andrade (2000), o processo de secagem convencional é inadequado para peças espessas.

Ao se calcular o número de Biot para as diferentes espessuras testadas, encontraram-se valores entre 0,8 e 7,9, o que mostra que a resistência interna ao transporte de calor no sólido, representada pela baixa condutividade térmica, é mais substancial que a resistência convectiva do fluxo de calor na superfície. Entretanto, em espessuras menores que 5 cm, o material apresentou um gradiente térmico interno pequeno, o que significa que a influência da transferência convectiva de calor na superfície passou a ter papel predominante no transporte de calor na peça.

No período de 0 a 6840 segundos (0 hora a 1,9 hora), a temperatura da superfície aumenta rapidamente, até próximo da temperatura ambiente do bulbo úmido, e a umidade média aumenta levemente, como pode ser observado mais nitidamente na Figura 7(b). Durante esse estágio, a madeira não apenas recebeu calor de convecção, mas também absorveu o calor liberado pela condensação do vapor de água em água líquida, porque a densidade do vapor de água da superfície é menor que a do vapor de água do ambiente, e devido a isso se observa um pequeno aumento na curva do teor de umidade no centro da peça (ZHAO *et al.*, 2016).

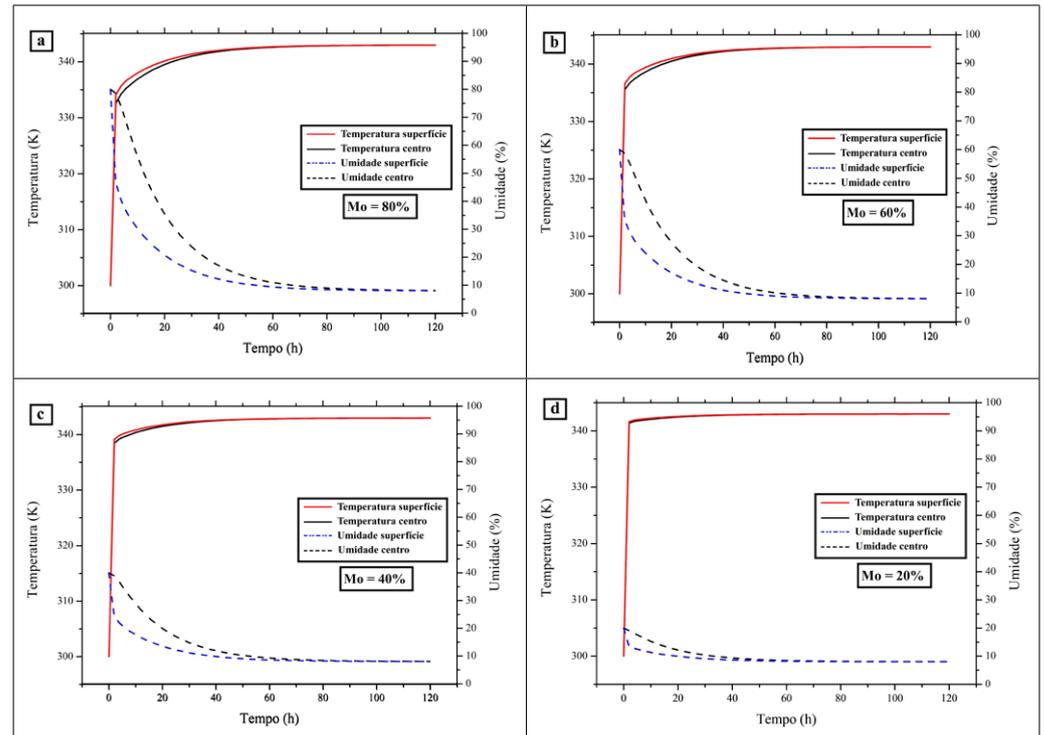
**Figura 7** ▶

Varição da umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça de madeira em função do tempo para diferentes espessuras da peça de madeira: (a) 2 cm; (b) 5 cm; (c) 10cm; (d) 20 cm.  
 Fonte: dados da pesquisa



Foi analisada também a simulação para diferentes valores iniciais de umidade da peça. Considerando que é comum uma secagem prévia da madeira antes de submetê-la à secagem na estufa, os resultados podem ser observados na Figura 8. Assim como esperado, quanto menor a umidade inicial, menor o tempo para se alcançar o equilíbrio higroscópico com o ambiente da estufa. Também foi possível inferir, através da análise da Figura 8, que os perfis de temperatura no centro e na superfície não sofreram grande influência pela umidade inicial considerada, ou ainda, percebe-se que os efeitos da termodifusão (efeito Dufour) não foram expressivos devido à grande diferença de velocidade entre as taxas de transferência de calor e transferência de massa.

**Figura 8** ►  
Variação da umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça de madeira em função do tempo para diferentes umidades da peça de madeira: (a) 80%; (b) 60%; (c) 40%; (d) 20% .  
Fonte: dados da pesquisa



Os resultados teóricos obtidos corresponderam às observações experimentais sobre o comportamento do transporte de calor e massa durante o processo de secagem da madeira (DEDIC; MUJUMDAR; VORONJEC, 2003; ELEOTÉRIO, 2009; KADEM *et al.*, 2011; KOCAEFE *et al.*, 2006; KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; MARTINOVIĆ; HORMAN; DEMIRDŽIĆ, 2001; MELLADO, 2007; MUJUMDAR, 2006; SILVA *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2016). O modelo também apresentou respostas coerentes às variações operacionais testadas, o que indica que a modelagem e a simulação da secagem da madeira podem auxiliar na definição das condições adequadas de processamento, visando à maior qualidade do produto final.

#### 4 Conclusões

Os resultados indicaram que o modelo difusivo representou adequadamente os valores experimentais, permitindo prever com acurácia aceitável o comportamento do transporte de calor e massa ao longo do processo de secagem da madeira de *Pinus elliottii* em uma estufa convectiva convencional, dentro das condições empregadas neste estudo.

O modelo se mostrou sensível à espessura considerada para a peça de madeira, fornecendo resultados mais precisos ao se admitirem valores menores que 10 cm para a espessura. Além disso, também foi possível inferir que o processo de secagem por estufa convencional não é indicado para peças muito espessas, para as quais o processo apresenta baixo rendimento.

A influência da termodifusão nos resultados do transporte de calor não foi expressiva, devido à diferença de velocidade entre a transferência de calor e massa no processo. Também não se observou uma influência significativa do efeito Soret no transporte de massa, devido ao baixo gradiente de temperatura em relação ao valor de gradiente de massa.

Os resultados de simulação são fisicamente consistentes e podem auxiliar na análise dos mecanismos da secagem da madeira, predizendo de maneira satisfatória as principais variáveis do processo, o que permite seu uso no planejamento de rotinas experimentais, reduzindo assim custos de testes operacionais e os riscos de perda de material. Também é notável seu potencial uso como uma ferramenta útil no aprimoramento de projetos e no controle do processo de secagem na indústria madeireira.

## Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa.

## Referências

ANDRADE, A. **Indicação de programas para secagem convencional de madeiras**. 2000. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.11.2019.tde-20191218-173153>.

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

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

BELGACEM, M. N.; PIZZI, A. **Lignocellulosic fibers and wood handbook: renewable material for today's environment**. New Jersey: Wiley, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118773727>.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. 3. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2015.

DEDIC, A. D.; MUJUMDAR, A. S.; VORONJEC, D. K. A three-dimensional model for heat and mass transfer in convective wood drying. **Drying Technology: an international journal**, v. 21, n. 1, p. 1-15, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1081/DRT-120017280>.

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: <http://dx.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: 11 nov. 2018.

HORMAN, I.; MARTINOVIĆ, D.; HAJDAREVIĆ, S. Finite volume method for analysis of stress and strain in wood. **Drvna Industrija**, Hrvatska, v. 60, n. 1, p. 27-32, 2009. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/34520>. Acesso em: 5 nov. 2018.

IBA – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORE. **Relatório IBA 2019**. São Paulo: IBÁ, 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2019.

IPT-SP – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Informações sobre madeiras: pinus-eliote**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2018. Disponível em: [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=7](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7). Acesso em: 6 nov. 2018.

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, p. 717-722, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.03.026>.

KEEY, R. B; LANGRISH, T. A. G.; WALKER, J. C. F. **Kiln-drying of lumber**. Berlin: Springer Verlag, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59653-7>.

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

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ Jr., W. A. **Principles of wood sciences and technology: I - solid wood**. New York: Springer-Verlag, 1968. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>.

LUIKOV, A. V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review). **International Journal. of Heat and Mass Transfer**, v. 18, n. 1, p. 1-14, 1975. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90002-2).

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

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus**. 2007. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível

em: [http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf\\_dr/2007/t226\\_0252-D.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_dr/2007/t226_0252-D.pdf). Acesso em: 25 nov. 2018.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, CRC Press, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420017618>.

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**, Chicoutimi, v. 79, p. 945-953, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.086>.

RICHTER, C. **Wood characteristics: description, causes, impact on use and technological adaptation**. New York: Springer, 2015. 226 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07422-1>.

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>.

SANTOS, J. C. H.; SILVA, F. J. T.; LILGE, D. S.; MACHADO, S. F.; FERREIRA, M. D. Avaliação do programa de secagem e determinação da taxa de secagem de *Pinus elliottii engelm*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/cbctem/papers/avaliacao-do-programa-de-secagem-e-determinacao-da-taxa-de-secagem-de-pinus-elliottii-engelm>. Acesso em: 5 nov. 2018.

SBS – SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Estatísticas: setor florestal brasileiro**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005. Disponível em: <http://sbs.org.br/estatisticas.htm>. Acesso em: 4 nov. 2018.

SILVA, W. P.; SILVA, L. D.; SILVA, C. M. D. S.; NASCIMENTO, P. L. Optimization and simulation of drying processes using diffusion models: application to wood drying using forced air at low temperature. **Wood Science and Technology**, v. 45, n. 4, p. 787-800, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0391-x>.

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

THOMAS, H. R.; LEWIS, R. W.; MORGAN, K. An application of the finite element method to the drying of timber. **Wood and Fiber Science**, v. 11, p. 237-243, 1979. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/534>. Acesso em: 13 nov. 2018.

ZADIN, V.; KASEMÄGI, H.; VALDNA, V.; VIGONSKI, S.; VESKE, M.; AABLOO, A. Application of multiphysics and multiscale simulations to optimize industrial wood drying kilns. **Applied Mathematics and Computation**, Tartu, v. 267, p. 465-475, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.01.104>.

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