

# Modelagem e Simulação da Secagem de Madeira por Micro-ondas

Luis F. Q. Cavalcante<sup>1</sup>, Eduardo L. Oliveira<sup>2</sup>, Silvia C. B. Silva<sup>3</sup>

UEA, Manaus, AM

Hector A. V. Poblete<sup>4</sup>

Universid del Bío-Bío, Concepción, Chile

A secagem industrial da madeira é um processo adotado para assegurar parâmetros de qualidade, como durabilidade e estabilidade de volume. Na secagem convencional, a energia é fornecida pela queima de combustível em um forno comum, um procedimento que apresenta baixa eficiência na remoção de umidade de madeiras de alta densidade. Com a intenção de aumentar a eficiência da secagem, estudos investigam a viabilidade do uso de micro-ondas [2].

Neste trabalho, estendeu-se a modelagem para uma abordagem bidimensional do processo industrial de secagem e realizaram-se simulações numéricas com o método dos elementos finitos de Galerkin. Avaliou-se o aquecimento dielétrico por micro-ondas quanto à sua eficiência na secagem de madeiras. Para tanto, utilizaram-se os parâmetros de secagem do carvalho branco como espécie representativa de madeiras de alta densidade e dureza.

Na modelagem, utilizaram-se princípios de Fenômenos de Transporte e de Termodinâmica. Desse modo, partiu-se do princípio de conservação de energia, juntamente com a equação de Fourier, para modelar o transporte de calor, bem como do princípio de conservação de massa, associado à equação de Fick, para modelar o transporte de umidade. Considerando o domínio quadrangular  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ , fechado e limitado, e definindo-se as funções  $T$  e  $C$ , que representam, respectivamente, a temperatura e a fração mássica de umidade, construiu-se o seguinte sistema de equações diferenciais parciais parabólicas acoplado em duas direções:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad \text{em } \Omega, \quad (1a)$$

$$\nabla \cdot (\rho D \nabla C) = \rho \frac{\partial C}{\partial t}, \quad \text{em } \Omega, \quad (1b)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica,  $\rho$  a densidade,  $C_p$  a capacidade calorífica,  $D$  a difusividade mássica e  $Q$  a geração volumétrica de calor. As condições de contorno são, respectivamente, dadas por:

$$-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h(T_e - T) + \rho S(C_e - C)\Delta H, \quad \text{em } \partial\Omega, \quad (2a)$$

$$-\rho D \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} = \rho S(C_e - C), \quad \text{em } \partial\Omega, \quad (2b)$$

onde  $\mathbf{n}$  é o vetor unitário normal à fronteira  $\partial\Omega$ ,  $S$  é o coeficiente convectivo de transferência de massa,  $h$  é o coeficiente convectivo de transferência de calor e  $\Delta H$  é a variação de entalpia.

<sup>1</sup>lfqc.geq21@uea.edu.br

<sup>2</sup>eldeoliveira@uea.edu.br

<sup>3</sup>scbsilva@uea.edu.br

<sup>4</sup>vargaspo@gmail.com

A temperatura e a umidade da câmara de secagem são dadas por  $T_e$  e  $C_e$ , que foram mantidas constantes durante a simulação.

Quanto aos parâmetros do modelo, utilizaram-se as funções empíricas determinadas por [2] para  $k$ ,  $D$ ,  $\Delta H$  e  $C_p$ , as quais dependem de  $T$  e  $C$ . Além disso,  $h$  e  $S$  foram determinados em função de números adimensionais e da análise das camadas limite hidrodinâmica, térmica e de concentração, em concordância com os métodos descritos por [1]. Para a substituição de  $Q$  e  $\rho$ , utilizaram-se funções dependentes de  $C$ , determinadas analiticamente.

As simulações computacionais foram conduzidas para obter a solução numérica de (1a), (1b), (2a) e (2b). Para a discretização temporal, fez-se uso do esquema implícito de Euler com 21 600 níveis de tempo. Para a discretização espacial, utilizou-se uma malha com 160 elementos triangulares uniformes, totalizando 105 nós. Cada simulação representa uma secagem de 6 horas aplicada a uma peça de madeira de base retangular, com dimensões de  $1,0\text{ m} \times 0,2\text{ m}$ . As simulações foram realizadas utilizando a linguagem de programação Python, com a biblioteca FEniCS.

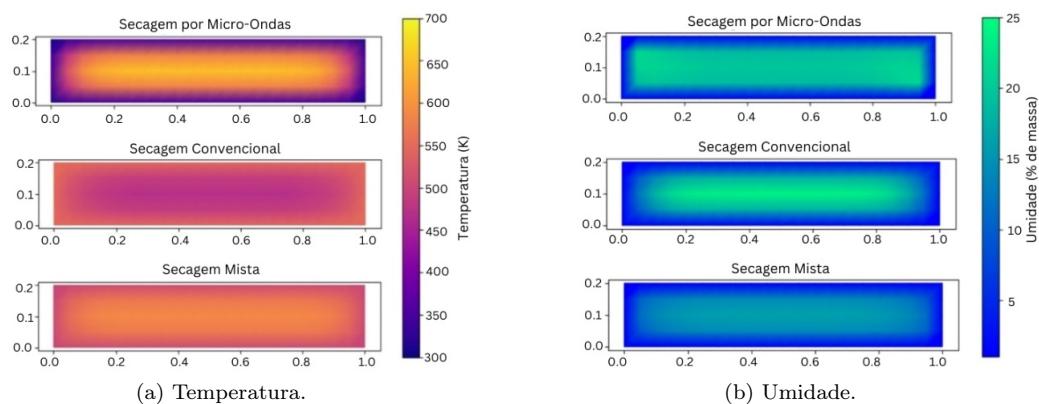


Figura 1: Perfis de temperatura e umidade ao final do processo de secagem. Fonte: autor.

A Figura 1a representa a temperatura em três simulações, com os perfis de secagem por micro-ondas, secagem convencional e secagem mista; na Figura 1b são apresentados os mesmos perfis para a umidade. A secagem mista consiste em um processo em que o fornecimento de energia ocorre tanto pela ação de micro-ondas quanto pela condução de calor fornecido externamente (como em um forno convencional).

Nota-se que a secagem por micro-ondas foi capaz de reduzir a umidade no centro da peça, mas se estabiliza na forma de um bolsão de umidade. Por outro lado, a secagem convencional retirou grande quantidade de umidade das bordas, mas foi ineficiente em reduzir a concentração de umidade no centro da peça. Por fim, a secagem mista mostrou-se capaz de reduzir a umidade de modo bastante significativo em todo o interior da peça.

## Referências

- [1] Y. A. Çengel. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4a. ed. São Paulo: McGraw Hill, 2012. ISBN: 8580551277.
- [2] J. DongHua e M. T. Afzal. “Modeling of moisture diffusion in microwave drying of hardwood”. Em: **Drying Technology** 25 (2007), pp. 449–454. DOI: 10.1080/07373930601183843.