

Estimativa da umidade de equilíbrio da madeira para o município de Sorocaba – SP

Resumo: O conhecimento da umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) da madeira em uso é importante, pois afeta o rendimento e a qualidade de determinados produtos. Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo a estimativa da UEH da madeira na cidade de Sorocaba, SP, utilizando equações com dados meteorológicos de 10 anos. Foram utilizadas as equações de Simpson (1971), Hailwood e Harrobin de 1 e 2 hidratos, Bradley, BET (Brunauer, Emmet e Teller) e Enderby-King. Os dados de umidade relativa e temperatura foram adquiridos no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. A UEH estimada pelas equações variou de 13,7 a 15,6 %. As equações de Simpson e BET estimaram valores maiores de UEH, enquanto as de Hailwood e Harrobin (um e dois hidratos) valores intermediários e as de Bradley e Enderby-King, estimaram valores menores.

Palavras-chave: Madeira, Umidade de Equilíbrio Higroscópico, Secagem

Estimation of wood equilibrium moisture for the Sorocaba city, Brazil

Abstract: The knowledge of the hygroscopic equilibrium Moisture (UEH) of the wood in use is important because it affects the yield and quality of certain products. This work aimed to estimate the UEH of wood in the city of Sorocaba, SP state, Brazil, by equations that use meteorological data for a period of 10 years. The Equations of Simpson (1971), Hailwood and Harrobin of 1 and 2 hydrates, Bradley, BET (Brunauer, Emmet and Teller) and Enderby-King were used to estimate the UEH. The data of relative humidity and temperature of the the National Institute of Meteorology – INMET were used. The UEH estimated by the equations ranged from 13.7 to 15.6%. The Simpson and BET equations estimated higher UEH values, while Hailwood and Harrobin (one and two hydrates) estimated intermediate values and Bradley and Enderby-King estimated lower values.

Keywords: Wood, Hygroscopic equilibrium Moisture, Drying

1. INTRODUÇÃO

A madeira possui composição heterogênea e as variações de suas características físicas, químicas e anatômicas diferem de acordo com a espécie, inclusive entre indivíduos da mesma espécie, sendo influenciadas principalmente por fatores genéticos e ambientais. Além

disso, a madeira é classificada como um material higroscópico e com comportamento anisotrópico, sendo capaz de realizar trocas de umidade com a atmosfera em forma de vapor de água. As trocas ocorrem até se atingir um equilíbrio entre o teor de umidade da madeira e a umidade do ar, pois desta forma a pressão de vapor de água dentro da parede celular tende a se igualar com a pressão de vapor atmosférica, determinando-se a umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) da madeira. A UEH está relacionada à temperatura e umidade relativa do ar do ambiente que a madeira está acondicionada, em escala local (Martins et al., 2003). Essas variáveis meteorológicas se alteram tanto diariamente quanto sazonalmente durante os meses do ano e tais alterações afetam a qualidade do material lenhoso, causando desde rachaduras e defeitos superficiais, até alterações dimensionais mais significativas, como inchamentos, empenamentos e rachaduras internas. (Cassiano et al., 2013)

Foram desenvolvidos diversos modelos matemáticos que permitem estimar a umidade de equilíbrio higroscópico da madeira. A maioria desses modelos utiliza como base a teoria de sorção da água elaborada por Hailwood e Harrobin e outros autores, utilizando como variáveis a temperatura e umidade relativa do local de estudo. A estimativa e estudo de variação da UEH podem auxiliar nas tomadas de decisão durante o programa de secagem, de modo a prevenir defeitos que comprometem a qualidade da madeira.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo comparar seis equações utilizadas para estimar a umidade de equilíbrio higroscópico, utilizando a faixa de variação de umidade relativa do ar e temperatura média mensais entre os anos 2008 a 2018, para o município de Sorocaba, localizado no interior do Estado de São Paulo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para o cálculo da umidade de equilíbrio, foram utilizados os dados mensais de umidade relativa do ar média e temperatura compensada média do período entre 2008 e 2018 obtidas no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Os dados foram utilizados para calcular as constantes que compõem as equações de estimativa da umidade de equilíbrio, sendo elas Simpson (1971), Hailwood e Harrobin de 1 e 2 hidratos, Bradley, BET (Brunauer, Emmete Teller) e Enderby-King, conforme demonstrado a seguir:

a) Simpson (1971): De acordo com Baraúna e Oliveira (2009) (Equação 1):

Equação 1

Em que: UE = umidade de equilíbrio (%); H = pressão de vapor relativa (UR/100); W = peso molecular da unidade polimérica que compõe o hidrato; K1 e K2 = constantes de equilíbrio, calculadas em função da Temperatura (°C) sendo: $K1 = 4,737 + 0,04773T_c - 0,00050123T_c^2$; $K2 = 0,705941 + 0,001698 T_c - 0,000005553 T_c^2$; $W = 223,384 + 06942 T_c + 0,0185324 T_c^2$; Tc: temperatura em graus Celsius.

b) Hailwood e Harrobin (um hidrato): segundo Mendes e Arce (2003), (Equação 2):

Equação 2

Em que: $K1 = 3,730 + 0,03642 T_f - 0,000154 T_f^2$; $K2 = 0,6740 + 0,001053 T_f - 0,000001714 T_f^2$; $W = 216,9 + 0,01961 T_f + 0,005720 T_f^2$; T_f = Temperatura, em graus Fahrenheit; H = pressão relativa de vapor d'água (UR/100).

c) Hailwood e Harrobin (dois hidratos): segundo Mendes e Arce (2003), (Equação 3):

Equação 3

Em que: $K = 0,791 + 0,000463 T_f - 0,000000844 T_f^2$; $K1 = 6,34 + 0,000775 T_f - 0,0000935 T_f^2$; $K2 = 1,09 + 0,0284 T_f - 0,0000904 T_f^2$; $W = 330 + 0,452 T_f + 0,00415 T_f^2$; H = pressão relativa de vapor d'água (UR/100).

d) Bradley: descrita por Skaar (1988), (Equação 4):

(Equação 4)

Em que: $K1 = 0,849 - 0,000236 T_c$; $K2 = 3,64 + 0,00316 T_c - 0,0000482 T_c^2$; $K3 = 0,00949 - 0,0000456 T_c$; T_c = Temperatura em Graus Celsius; H = pressão relativa de vapor d'água (UR/100).

Para o autor, contudo, o valor de K3 é muito baixo comparado com o resultado do produto $K2 \cdot K1^{UE}$ e pode ser ignorado, permitindo simplificar para posteriormente convertê-la para uma forma linear, conforme a Equação 5:

(Equação 5)

e) BET (Brunauer, Emmet e Teller): segundo Mendes e Arce (2003), (Equação 6):

(Equação 6)

Em que: $W_m = 7,4 - 0,020 T_f$ (teor de umidade quando o teor de adsorção monomolecular está completo); C = 6 (constante relacionada com a energia de adsorção); $N = 4,6 + 0,020 T_f$ (número de camadas por sítio de adsorção); T = temperatura em graus Fahrenheit; H = pressão relativa de vapor d'água (UR/100).

f) Enderby-King: Descrita por Skaar (1988), o método é dado pela Equação 7:

(Equação 7)

Em que: $a = 1,039 + 0,0212T_c$; $b = 0,587 - 0,000609T_c$; $K1 = 2,71 + 0,00915T_c - 0,000423T_c^2$; $K2 = 0,827 + 0,000607T_c$; $UE_0 = 7,75 - 0,0234T_c - 0,000234T_c^2$; T_c = Temperatura em Graus Celsius.

Os termos a , b , $K1$, $K2$ e UE_0 foram baseados nos dados apresentados por Simpson (1973), mas limitados pelo intervalo de temperatura entre 20°C e 70°C.

2.1 Análise estatística

Foi realizada análise de variância para as equações estudadas e posteriormente teste de Tukey para comparação de médias, utilizando o software estatístico Minitab.

3. RESULTADOS

A Figura 1 mostra as médias mensais de umidade de equilíbrio no período de 2008 a 2018, para cada uma das 6 equações estudadas

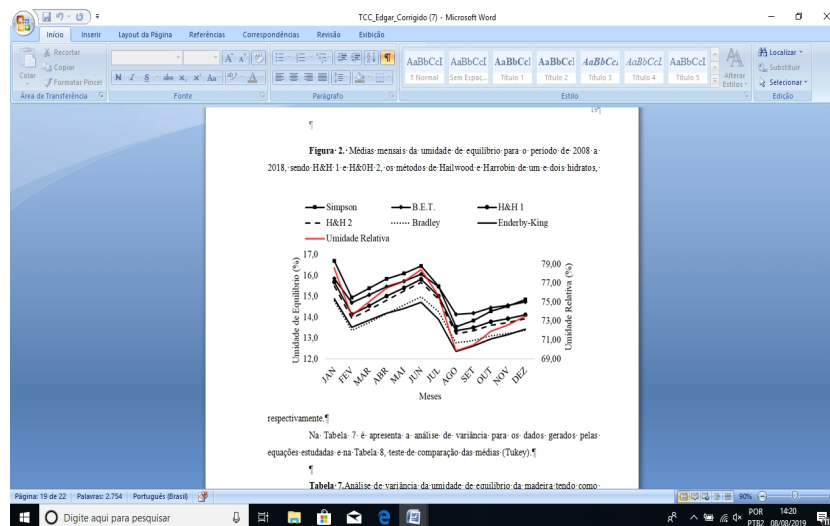


Figura 1. Médias mensais da umidade de equilíbrio para o período de 2008 a 2018, sendo H&H 1 e H&H 2, os métodos de Hailwood e Harrobin de um e dois hidratos, respectivamente.

Na Tabela 1 é apresentada a análise de variância para as equações estudadas e na Tabela 2, o teste de comparação de médias (Tukey).

Tabela 1. Análise de variância da umidade de equilíbrio da madeira tendo como fator as equações.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Equação	5	21,27	4,2542	9,60	8,8*10 ⁻⁷
Erro	60	26,60	0,4433		
Total	65	47,87			

Tabela 2. Teste de comparação de médias entre as equações estudadas, para um nível de significância de 5%. As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente.

Equação	N	Média	Agrupamento		
Simpson	11	15,2	A		
B.E.T.	11	15,0	A		
H&H (1)	11	14,4	A	B	
H&H (2)	11	14,3	A	B	C
Bradley	11	13,8		B	C
Enderby-King	11	13,7			C

4. DISCUSSÃO

Os valores de umidade de equilíbrio higroscópico estimados pelas equações, em um período de 10 anos, para a madeira seca ao ar na cidade de Sorocaba variaram de 13,7% a 15,2%. Na Figura 1 pode-se notar que as equações estimaram as UEH médias mensais com padrões de variação semelhantes no período de 10 anos. A comparação de médias (Tabela 2) permite verificar que as equações de Simpson e BET estimam valores maiores de umidade de equilíbrio, enquanto os métodos de Hailwood e Harrobin de um e dois hidratos apresentam valores intermediários e as equações de Bradley e Enderby-King, por sua vez, estimaram os valores menores.

As próximas etapas do trabalho terão o objetivo de determinar a UEH experimentalmente para as madeiras secas na cidade de Sorocaba, SP e assim verificar qual a equação estima os valores médios mais próximos ao real.

5. CONCLUSÕES

As equações estimaram valores médios variando de 13,7% a 15,2% de UEH para madeira seca ao ar na cidade de Sorocaba, SP. As equações Simpson e BET apresentaram uma tendência estimar maiores valores de UEH enquanto que as equações de Bradley e Enderby-King estimaram os menores valores.

6. REFERÊNCIAS

- Martins, V. A. et al. Umidade de equilíbrio e risco de apodrecimento da madeira em condições de serviço no Brasil. *Brasil Florestal*, Brasília, v. 76, n. 1, p. 29-34, 2003.
- Cassiano, C. et al. Sazonalidade e estimativas da umidade de equilíbrio de madeiras amazônicas em Sinop, Estado do Mato Grosso. *Scientia Florestalis*, v. 41, n. 100, p. 457-468, 2013.
- Baraúna, E. E. P.; Oliveira, V. S. Umidade de equilíbrio da madeira de Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz & Pav.) e taurari vermelho (*Cariniana micrantha* Ducke) em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. *Acta Amazonica*, Manaus, v. 39, n. 1, p. 91-96, 2009.
- Skaar, C. *Wood-Water Relations*. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 283 p.
- Mendes, L. M.; Arce, J. E. Análise comparativa das equações utilizadas para estimar a umidade de equilíbrio da madeira. *Cerne*, Lavras, v. 9, n. 2, p. 141-152, 2003.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso de outubro de 2018 à fevereiro de 2019.
- Simpson, W. T. Predicting equilibrium moisture content by mathematical models. *Wood and Fiber*, Madison, v. 5, n. 1, p. 41-45, 1973.