

Lourival Marin Mendes¹, Soraia Aparecida Mendes¹, Rafael Farinassi Mendes¹, Lina Bufalino², Thiago de Paula Protásio³

UMIDADE DE EQUILÍBRIO DE PAINÉIS OSB DE CLONES DE *Eucalyptus urophylla*

Palavras chave:
Painéis de partículas orientadas
Variáveis de produção
Equação de Nelson

Histórico:
Recebido 26/09/2011
Aceito 16/12/2013

Keywords:
Oriented strand board
Production variables
Nelson's equation

Correspondência:
lourival@dcf.ufla.br

RESUMO: Conduziu-se, este trabalho, com o objetivo de testar a eficiência da equação de Nelson na estimativa da umidade de equilíbrio desse tipo de material e propor um modelo para a determinação da umidade dos painéis em função da umidade relativa do ar, bem como avaliar os efeitos de algumas variáveis de processo na umidade de equilíbrio de painéis OSB (Oriented Strand Board). Amostras com dimensões de 25 x 25 mm foram colocadas em câmara de climatização, onde permaneceram a uma temperatura constante de 30°C e tiveram suas massas determinadas, quando estabilizadas nos teores de umidade relativa do ar de 40, 50, 60, 70, 80 e 90%. Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que: a equação de Nelson tem a tendência de subestimar os valores de umidade do painel; o modelo polinomial ajustado com base apenas na umidade relativa do ar apresentou grande potencial de utilização; não houve efeito das variáveis densidade do painel, densidade básica da madeira, tipo de colchão e temperatura de prensagem sobre os valores médios de umidade de equilíbrio na desorção 1, adsorção e desorção 2, apesar de comportamentos distintos terem sido observados para as isotermas dos tratamentos.

EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT OF OSB PANELS MADE FROM *Eucalyptus urophylla* CLONES

ABSTRACT: This work aimed to verify the efficiency of Nelson's equation to estimate equilibrium moisture content of this material and provide a model for determination of moisture content of panels based on air relative moisture content, as well as to evaluate the effect of some processing variables on the equilibrium moisture content of OSB (Oriented Strand Board) panels. The 25 x 25 mm samples were put in an acclimation room where they were kept at 30°C and had their mass determined after stabilization at the relative air moisture contents of 40, 50, 60, 70, 80 and 90%. By the results obtained it was possible to conclude that: Nelson's equation tended to underestimate moisture values of the panel; the polynomial model adjusted based on the relative moisture of the air presented great potential to be used; although different behavior may be observed for the isotherms of treatments, there was no significant effect of the variables panel density, wood basic density, mat type and pressure temperature on mean equilibrium moisture content in desorption 1, adsorption and desorption 2.

¹ Universidade Federal de Lavras - Lavras, Minas Gerais, Brasil

² Universidade do Estado do Amapá - Macapá, Amapá, Brasil

³ Universidade Federal de Goiás - Jataí, Goiás, Brasil

INTRODUÇÃO

Os painéis OSB (Oriented Strand Board) são produzidos a partir de partículas de madeira do tipo *strand*, sendo constituídos, geralmente, por três camadas perpendiculares entre si e colados com adesivo resistente à umidade (MALONEY, 1993; MENDES et al., 2013).

As propriedades físicas e mecânicas dos painéis OSB são parâmetros importantes para a definição de padrões de qualidade do produto para as diversas aplicações. Dentre essas propriedades, o teor de umidade, o qual varia em função das condições de equilíbrio com o ambiente, merece destaque, visto que apresenta relação direta com as demais.

De acordo com Skaar (1988), a umidade de equilíbrio da madeira varia com a umidade relativa da atmosfera que a circunda e também entre diferentes espécies de madeira, entre cerne e alburno da mesma espécie e teor de extrativos presentes na madeira. Sendo, também, afetada pela temperatura, pelas tensões mecânicas e pelo histórico de exposição da madeira. No entanto, produtos reconstituídos de madeira apresentam uma higroscopicidade diferente em relação à madeira maciça. Esse fato é atribuído à redução da madeira em lâminas ou partículas e à posterior combinação com adesivos e parafinas. Outro aspecto que contribui para a redução da higroscopicidade desses produtos é a utilização de altas temperaturas e pressão na consolidação final do painel (WU, 1999).

Mendes et al. (2006), estudando variáveis do processo influenciando a umidade de equilíbrio de painéis particulados, concluíram que a umidade de equilíbrio foi afetada pela temperatura de prensagem e pela interação entre a temperatura e o tempo de prensagem, porém não foi afetada pelos diferentes teores de adesivo avaliados.

Para verificar a influência das variáveis de processamento com confiabilidade sobre a umidade de equilíbrio dos painéis é necessário sua determinação por métodos precisos. Uma das formas é a utilização de equações, as quais visam a estimar o teor de umidade de equilíbrio da madeira e de subprodutos, utilizando outros parâmetros, como temperatura e umidade relativa do ar.

Nelson (1983) desenvolveu um modelo baseado na energia livre e definiu, pela análise de regressão, os coeficientes originais para alguns produtos à base de madeira (aglomerados, Medium Density Fiberboard - MDF, OSB e Chapas duras) e também para a madeira de folhosas, coníferas e para a madeira em geral. Até hoje essa equação vem sendo utilizada para a previsão da umidade de equilíbrio dos painéis expostos em

diferentes condições climáticas, podendo, assim, prever o comportamento desses painéis em relação a sua umidade de equilíbrio e, conseqüentemente, as suas propriedades físicas e mecânicas.

Segundo Silva et al. (2005), pelos valores médios de umidade de equilíbrio calculados e observados na temperatura de 30°C e as umidades relativas de 40, 50, 60, 70, 80 e 90%, pode-se verificar que a equação de Nelson (1983) subestima os valores de umidades de equilíbrio, mas esses valores foram bem próximos e estatisticamente iguais aos observados na câmara de climatização, mostrando que a equação de Nelson (1983) é eficiente na estimativa da umidade de equilíbrio.

Silva et al. (2006), estudando o comportamento dos painéis de madeira para diversas localidades no Brasil, observou diferença significativa entre produtos e localidades para a umidade de equilíbrio, demonstrando que o comportamento desses produtos ocorre de maneira diferente, o que sugere que as indústrias de painéis de madeira devem atentar a esse fato, evitando, assim, possíveis problemas desses produtos em serviço.

Este trabalho foi desenvolvido com objetivo de testar a eficiência da equação de Nelson na estimativa da umidade de equilíbrio desse tipo de material e propor um modelo para a determinação da umidade dos painéis em função da umidade relativa do ar, bem como avaliar os efeitos de algumas variáveis de processo na umidade de equilíbrio de painéis OSB (Oriented Strand Board).

MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção e processamento da matéria-prima

A madeira utilizada neste estudo foi obtida de árvores de testes clonais de *Eucalyptus urophylla* com 7,5 anos de idade, cultivados em sistema agrosilvopastoril pela Companhia Mineira de Metais no município de Vazante - MG.

Os clones foram classificados em dois grupos, com base nas médias de suas densidades. No primeiro grupo, foram selecionados seis clones com a média de densidade de 0,56 g·cm⁻³ e, no segundo grupo, cinco clones com a média de 0,74 g·cm⁻³. Para cada um dos clones foram coletadas três árvores.

Essas árvores, após serem transformadas em toras de 2,5 m de comprimento, foram conduzidas para a serraria da Universidade Federal de Lavras - UFLA, onde foram desdobradas em tábuas de 20 mm de espessura, o que correspondeu à largura das partículas do tipo *strand* produzidas. Em seguida, as tábuas foram seccionadas

em peças de 85 mm de largura no sentido das fibras, o que correspondeu ao comprimento das partículas *strand*, dando origem, assim, a blocos de madeira, os quais permaneceram submersos em água até completa saturação. Após a saturação, os blocos foram processados em um picador de disco, regulado para a produção de partículas com espessura de 0,60 mm, obtendo, assim, partículas nas dimensões de 0,60 x 20 x 85 mm (espessura, largura e comprimento, respectivamente). As partículas foram secas em uma estufa com circulação forçada de ar até o teor de umidade na faixa de 3 a 4% (base massa seca).

Plano experimental e produção dos painéis

Os painéis foram produzidos conforme o plano experimental apresentado na Tabela 1. O plano experimental se constituiu na avaliação de dois grupos de clones em função da divisão em relação à densidade da madeira (0,56 e 0,74 g·cm⁻³; Tratamentos 2 e 5); diferentes tipos de adesivos (FF – Fenol-formaldeído, MUF - melamina-ureia-formaldeído e PMUF - fenol-melamina-ureia-formaldeído; Tratamentos 1, 2 e 3); diferentes densidades do painel (0,70 e 0,90 g·cm⁻³; Tratamentos 2 e 4) e diferentes constituições do colchão do painel (HE – camada interna orientada de forma perpendicular as camadas da face e HO – camada interna na mesma direção da camada das faces/Camada única; Tratamentos 2 e 6). A temperatura de prensagem foi escolhida de acordo com cada tipo de adesivo, sendo elas de 140°C para o adesivo MUF e de 180°C para os adesivos FF e PMUF.

As características dos três tipos de adesivos utilizados estão apresentadas na Tabela 2. A avaliação dos valores de pH, teor de sólidos e viscosidade seguiu o procedimento da norma ASTM D1582 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1994).

Para a aplicação do adesivo e da parafina foi utilizada uma encoladeira do tipo tambor giratório dotado de pistola de ar comprimido. Os diferentes tipos de adesivos, de acordo com cada tratamento, foram aplicados em um teor de 6% (base massa seca das partículas), enquanto que a parafina foi aplicada em um teor de 1% (base massa seca das partículas) em todos os tratamentos.

Após encolamento das partículas, estas foram distribuídas sobre uma caixa orientadora (MENDES, 2001), conforme proporções em massa, estabelecidas para cada camada, as quais foram de 25%, 50% e 25% para face/miolo/face, respectivamente. Com exceção do tratamento 6, que foi produzido com todas as camadas orientadas na mesma direção (HO).

Terminado o processo de orientação, o colchão foi submetido a uma pré-prensagem a frio com o intuito de proporcionar uma melhor conformação do painel e evitar a perda de partículas. A prensagem quente foi realizada com um ciclo total de 8 minutos, pressão de 40 kgf·cm⁻² e temperaturas de 140°C para os painéis produzidos com o adesivo melamina-ureia-formaldeído e de 180°C para os produzidos com os adesivos fenol-formaldeído e fenol-melamina-ureia-formaldeído. Para cada tratamento foram produzidos três painéis com dimensões de 48 x 48 x 1,5 cm (comprimento x largura x espessura, respectivamente).

Avaliação da umidade de equilíbrio e análise estatística

Após a prensagem, os painéis foram esquadrejados nas dimensões finais de 420 x 420 mm e acondicionados em uma sala de climatização à temperatura de 22±2°C e umidade relativa de 65±5% até a estabilização. Foram, então, retiradas amostras com dimensões de 25 x 25 mm para a realização dos ensaios de umidade, conforme metodologia desenvolvida por Wu (1999).

TABELA 1 Plano experimental.

TABLE 1 Experimental plan.

Tratamentos	Adesivo	Densidade do painel (g·cm ⁻³)	Densidade da madeira (g·cm ⁻³)	Composição do painel	Temperatura de prensagem (°C)
1	MUF	0,7	0,56	HE	140
2	FF	0,7	0,56	HE	180
3	PMUF	0,7	0,56	HE	180
4	FF	0,9	0,56	HE	180
5	FF	0,9	0,74	HE	180
6	FF	0,7	0,56	HO	180

TABELA 2 Características dos adesivos utilizados na produção dos painéis OSB.**TABLE 2** Characteristics of the adhesives used in the production of OSB.

Adesivo	pH	Teor de sólidos (%)	Viscosidade (cP)
MUF	7,5	66,2	210
FF	12,0	45,0	220
PMUF	9,5	60,7	200

As amostras foram pesadas e levadas para uma câmara de climatização, onde foram submetidas a diferentes condições de umidade relativa com temperatura constante de 30°C. As condições iniciais de umidade relativa foram 90, 80, 70, 60, 50 e 40% para obter a primeira curva de dessorção. Em seguida, as amostras foram expostas à umidade relativa crescente sob as mesmas condições, para obter a curva de adsorção. Repetiu-se, então, o primeiro procedimento para obter a segunda curva de dessorção. A determinação da histerese foi realizada pela razão entre as umidades de equilíbrio da madeira, obtidas na curva de adsorção e dessorção (A/D).

Para cada condição de umidade relativa, a massa das amostras foi monitorada com o objetivo de verificar o momento da estabilização (massa constante). Ao final da estabilização, as amostras foram levadas à estufa com temperatura em torno de 103°C até atingirem massa constante, após o qual foram pesadas novamente para a determinação da umidade.

Foram realizados ainda os cálculos dos valores de umidade de equilíbrio pela equação de Nelson (1983), que é um modelo desenvolvido para estimar a umidade de equilíbrio de produtos compostos de madeira. O cálculo foi realizado para todos os tratamentos visando à avaliação comparativa com os valores reais obtidos nos testes da câmara de climatização. A equação simplificada de Nelson (1983) é apresentada a seguir (equações 1, 2 e 3), sendo: UEH = Umidade de equilíbrio higroscópico (%); Mv = constante do material aproximado (Ponto de saturação das fibras) para dessorção em porcentagem (28%); A = logaritmo natural da energia livre de Gibbs, por grama de água absorvida com a umidade relativa próxima de zero (ΔG_0 , 165 cal·g⁻¹); RH = Umidade relativa (%); R = constante universal dos gases (1,9858 cal/mol/K); T = temperatura absoluta (K); Ww = massa molecular da água (18 g·mol⁻¹).

$$UEH = Mv + B \cdot RH^T \quad [1]$$

$$B = \frac{-Mv}{A} \quad [2]$$

$$RH^T = \ln \left[(-RT / Ww) \cdot \ln(RH/100) \right] \quad [3]$$

Para a comparação da umidade de equilíbrio estimada (UEE) pela equação de Nelson (1983) com a umidade de equilíbrio observada (UEO) na câmara de climatização nas diferentes umidades relativas do ar (40, 50, 60, 70, 80 e 90%), foi utilizado o teste t (considerando duas amostras em par de médias). Foi realizada ainda a avaliação da correlação linear de Pearson entre a UEE e a UEO.

Um modelo estatístico polinomial de segunda ordem, relacionando a umidade de equilíbrio observada na câmara de climatização com a umidade relativa do ar foi proposto conforme a equação 4, sendo UEO = umidade de equilíbrio observada na câmara de climatização; UR = umidade relativa do ar; β_0 , β_1 e β_2 = coeficientes do modelo; ε = erro do modelo.

$$UEO = \beta_0 + \beta_1 \cdot UR + \beta_2 \cdot UR^2 + \varepsilon \quad [4]$$

Para a análise dos resíduos do modelo foram realizados os testes de normalidade, autocorrelação e homocedasticidade. Adicionalmente, foram avaliados o erro absoluto médio (PARIKH et al., 2005; THIPKHUNTHOD et al., 2005), significância dos coeficientes, coeficiente de variação experimental e erro padrão da estimativa.

Além dessas análises, foi realizada a comparação entre as diferentes variáveis de produção (Efeito do tipo de adesivo - Tratamentos 1, 2 e 3; Efeito da densidade do painel - Tratamentos 2 e 4; Efeito da densidade da madeira - Tratamentos 2 e 5; e Efeito da composição do painel - Tratamentos 2 e 6) quanto a dessorção 1, adsorção e dessorção 2 mediante análise de variância, com um nível de significância de 5%, sendo essa análise realizada com a média das umidades relativas. O comportamento das isotermas de adsorção e dessorção e os valores de histerese foram avaliados para cada tratamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estimativa da umidade de equilíbrio pela equação de Nelson

Na Tabela 3, estão apresentados os valores médios de umidade de equilíbrio calculados com base na equação de Nelson (1983) e obtidos na câmara de climatização nas condições de temperatura de 30°C e umidades relativas de 40, 50, 60, 70, 80 e 90%.

TABELA 3 Valores médios das umidades de equilíbrio estimados (UEE) pela Equação de Nelson (1983) e observados na câmara de climatização (UEO).**TABLE 3** Average values of equilibrium moisture contents estimated (UEE) by Nelson's equation (1983) and observed in the conditioning room (UEO).

UR (%)	UEE (%)	UEO (%)	Diferença (%)	UR (%)	UEE (%)	UEO (%)	Diferença (%)
T1 (MUF - DP:0,70 g·cm ⁻³ - TP:140°C - DM:0,56 g·cm ⁻³ - HE)				T4 (FF - DP: 0,90 g·cm ⁻³ - TP: 180°C - DM: 0,56 g·cm ⁻³ - HE)			
40	6,49	8,89	2,40	40	6,49	8,97	2,48
50	7,95	9,32	1,37	50	7,95	9,19	1,23
60	9,55	11,26	1,71	60	9,55	11,78	2,23
70	11,43	13,09	1,66	70	11,43	13,58	2,15
80	13,88	15,08	1,20	80	13,88	15,92	2,04
90	17,80	17,13	0,67	90	17,80	19,12	1,31
T2 (FF - DP: 0,70 g·cm ⁻³ - TP:140°C - DM:0,56 g·cm ⁻³ - HE)				T5 (FF - DP: 0,90 g·cm ⁻³ - TP: 180°C - DM: 0,74 g·cm ⁻³ - HE)			
40	6,49	9,77	3,28	40	6,49	8,62	2,17
50	7,95	10,19	2,24	50	7,95	10,20	2,25
60	9,55	11,76	2,21	60	9,55	11,72	2,17
70	11,43	13,87	2,44	70	11,43	13,23	1,80
80	13,88	15,33	1,45	80	13,88	15,69	1,81
90	17,80	19,39	1,58	90	17,80	19,07	1,26
T3 (PMUF - DP:0,70 g·cm ⁻³ - TP: 180°C - DM: 0,56 g·cm ⁻³ - HE)				T6 (FF - DP: 0,70 g·cm ⁻³ - TP: 180°C - DM: 0,56 g·cm ⁻³ - HO)			
40	6,49	8,68	2,19	40	6,49	10,06	3,57
50	7,95	9,22	1,27	50	7,95	10,96	3,00
60	9,55	11,28	1,73	60	9,55	11,87	2,33
70	11,43	12,63	1,20	70	11,43	13,43	2,01
80	13,88	14,99	1,11	80	13,88	15,37	1,49
90	17,80	17,09	0,71	90	17,80	20,29	2,49

MUF: Melamina-ureia-formaldeído; FF: Fenol-formaldeído; PMUF: Fenol-melamina-ureia-formaldeído; DP: Densidade dos painéis; TP: temperatura de prensagem; DM: Densidade da madeira; HE: Camada interna orientada de forma perpendicular as camadas da face; e HO: Camada interna na mesma direção da camada das faces.

Na Tabela 4, estão apresentados os resultados do teste t, realizado para os pares de média, bem como as correlações lineares de Pearson entre a umidade de equilíbrio estimada pela equação de Nelson (1983) e a observada para os diferentes tratamentos.

Observa-se que o teste t foi significativo para os painéis OSB de todos os tratamentos avaliados, o que indica que as umidades de equilíbrio estimadas e observadas são estatisticamente diferentes. Observa-se, ainda, que a equação de Nelson (1983) tendeu a subestimar a umidade de equilíbrio dos painéis OSB. O menor e o maior erro absoluto médio foram observados para os painéis dos tratamentos 3 e 6, respectivamente.

As correlações lineares de Pearson estabelecidas entre as umidades de equilíbrio estimadas e observadas foram significativas para todos os painéis, ou seja, apesar de apresentar diferença estatística

TABELA 4 Teste t e correlações lineares entre a umidade de equilíbrio estimada pela equação de Nelson (1983) e observada na câmara de climatização.**TABLE 4** t-Test and linear correlations between equilibrium moisture contents estimated by Nelson's equation (1983) and observed in the conditioning room.

Tratamentos	UEE (%)	UEO (%)	EAM (%)	r	P(T≤t) bi-caudal
T1	11,18	12,46	1,28	0,990*	0,00044
T2	11,18	13,39	2,21	0,995*	0,00044
T3	11,18	12,32	1,14	0,992*	0,03791
T4	11,18	13,09	1,91	0,993*	0,00026
T5	11,18	13,09	1,91	0,999*	0,00005
T6	11,18	13,66	2,48	0,988*	0,00042

UEE: umidade de equilíbrio estimada média; UEO: umidade de equilíbrio observada média; EAM: erro absoluto médio; r: correlação linear de Pearson; *: significativo a 5% de significância.

entre os valores médios observados e calculados pela equação, há uma tendência de que os maiores valores de umidade de equilíbrio estimado estejam associados aos maiores valores de umidade de equilíbrio observada. Dessa forma, a equação de Nelson (1983) mostrou-se eficiente para a estimativa da umidade de equilíbrio de painéis OSB, desde que as diferenças entre os valores estimados e observados sejam levados em consideração para a correção.

Estimativa da umidade de equilíbrio considerando o modelo ajustado

Na Figura 1, encontra-se a relação funcional estabelecida entre a umidade de equilíbrio observada e a umidade relativa do ar para todos os painéis avaliados. O modelo estatístico ajustado apresentou todos os coeficientes significativos (p -valor < 0,05), elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,96$), baixo erro padrão da estimativa (0,69%) e baixo coeficiente de variação experimental (5,30%).

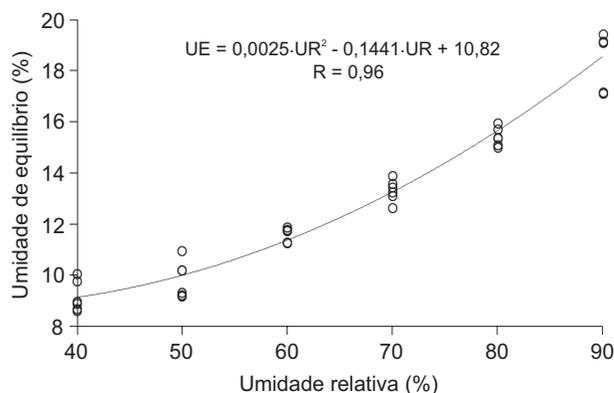


FIGURA 1 Relação funcional estabelecida entre a umidade de equilíbrio dos painéis OSB e a umidade relativa do ar.

FIGURE 1 Functional relationship established between equilibrium moisture content of OSB panels and relative moisture content of the air.

Observou-se que os resíduos do modelo estatístico ajustado apresentaram normalidade (p -valor > 0,05), homocedasticidade (p -valor > 0,05) e ausência de autocorrelação (p -valor > 0,01). Esses resultados indicam que o modelo polinomial ajustado pode ser utilizado para a predição indireta da umidade de equilíbrio dos painéis avaliados com base apenas na umidade relativa do ar. Além disso, o erro absoluto médio encontrado para o modelo estatístico ajustado (4,13%) foi inferior ao encontrado para a equação de Nelson (1983) (16,07%) considerando-se todos os painéis avaliados.

Influência das variáveis de processamento sobre a umidade de equilíbrio

Na Tabela 5, estão apresentados os valores médios de umidade de equilíbrio (40, 50, 60, 70, 80 e 90% de umidade relativa) para painéis produzidos com densidade de 0,7 e 0,9 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; resina FF, MUF e PMUF; densidade da madeira de 0,56 e 0,74; composição em camada única (HO) e camadas cruzadas (HE).

TABELA 5 Influência da densidade do painel, tipo de resina, densidade da madeira e composição do painel sobre a umidade de equilíbrio.

TABLE 5 Influence of panel density, resin type, wood density and panel composition on equilibrium moisture content.

DP ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	UE (%)		
	A	DI	D2
T2-0,7	14,00	12,50	13,67
T4-0,9	13,30	12,50	13,17
DM ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)			
T2-0,56	13,30	12,50	13,17
T5-0,74	13,30	12,50	13,50
R			
T1- MUF	12,67	11,82	13,00
T2-FF	14,00	12,50	13,67
T3-PMUF	12,33	11,50	12,80
CP			
T2-HE	14,00	12,50	13,67
T6-HO	14,30	12,80	14,00

DP: densidade do painel; DM: densidade da madeira; R: resinas (FF : fenol-formaldeído; MUF : melamina-uréia-formaldeído e PMUF : fenol-melamina-uréia-formaldeído); CP: composição do painel (HE : camada interna orientada de forma perpendicular as camadas da face; e HO : camada interna na mesma direção da camada das faces); UE: umidade de equilíbrio; A: adsorção; D: dessorção.

Os valores médios obtidos para primeira curva de desorção, adsorção e segunda curva de adsorção para painéis produzidos com densidades de 0,70 e 0,90 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ não apresentaram diferença estatística a 5% de significância. As mesmas relações foram encontradas para painéis produzidos com diferentes tipos de resinas (fenol-formaldeído, melamina-ureia-formaldeído, fenol-melamina-ureia-formaldeído), diferentes densidades da madeira (0,56 e 0,74 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) e, também, para painéis compostos de camada única (HO) e de camadas cruzadas (HE).

Mendes et al. (2006), ao avaliarem o efeito do nível de temperatura (160, 180 e 200°C), do tempo de prensagem (6, 8 e 10 minutos) e do teor de resina (3,

4,5 e 6%) sobre a umidade de equilíbrio de painéis OSB, observaram valores médios de umidade de equilíbrio, variando entre 9,84 a 10,31%. Sendo observado ainda apenas efeito significativo do nível de temperatura sobre a umidade de equilíbrio dos painéis, no entanto sem seguir um padrão definido.

Mendes et al. (2013) ao avaliarem a umidade de equilíbrio de painéis OSB produzidos com diferentes variáveis de produção e com tratamento térmico, obtiveram valores de umidade variando entre 5,98 a 8,76%.

Silva et al. (2006), ao avaliarem a umidade de equilíbrio de diferentes tipos de painéis de madeira quanto à exposição ao clima dos 26 estados brasileiros, obtiveram valores variando entre 13,64 a 14,46% para os painéis do tipo OSB. Enquanto que Silva et al. (2005), ao avaliarem a umidade de equilíbrio média de painéis

OSB exposto a umidades relativas entre 40 e 90%, obtiveram o valor médio de 12,19%.

De forma geral, observa-se que os valores médios obtidos para a umidade de equilíbrio dos painéis OSB estão coerentes com os dados encontrados em literatura. Apesar de não haver diferença estatística entre os fatores estudados, diferentes comportamentos de variação na umidade de equilíbrio do painel, em função da variação da umidade relativa do ambiente, foram observados e serão discutidos no item a seguir.

Isotermas de sorção e variáveis de processamento

A representação gráfica das isotermas de adsorção e dessorção 2 dos diferentes tratamentos está apresentada na Figura 2.

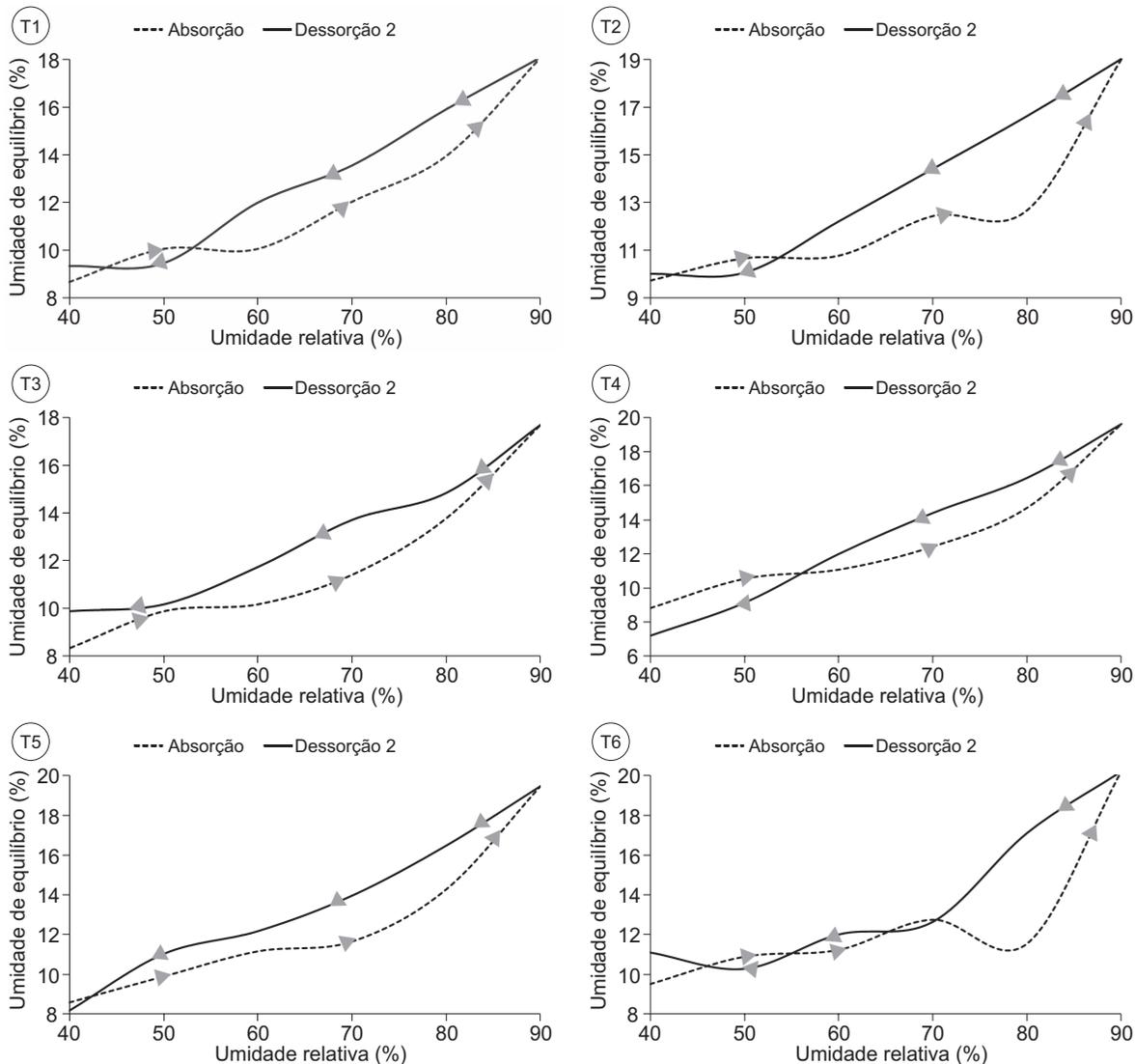


FIGURA 2 Curvas de adsorção e dessorção 2 dos painéis OSB.
FIGURE 2 Adsorption and desorption 2 curves of OSB panels.

As curvas demonstram claramente a higroscopicidade dos painéis OSB, em que ocorre adsorção ou dessorção de água e consequente mudança da umidade dos materiais em função da mudança de umidade relativa do ambiente. Alguns painéis são utilizados em locais com variações frequentes de umidade, o que deve ser considerado para avaliação do desempenho do produto em serviço (HARTLEY et al., 2007).

A relação entre a adsorção e a dessorção (A/D) do painel para cada umidade relativa resulta no coeficiente de histerese. O coeficiente de histerese (relação A/D) varia com a umidade relativa e é causado por diversos fatores como alcance incompleto do equilíbrio, número de fases de sorção e diferenças na constituição física e química da madeira (HARTLEY et al., 2007). As variáveis de processo, por sua vez, certamente influenciaram esses fatores, sendo que uma alta variação do coeficiente de histerese (0,68 a 1,15) foi observada entre os painéis dos diferentes tratamentos (Tabela 6).

TABELA 6 Variação do coeficiente de histerese para cada umidade relativa do ar

TABLE 6 Variation of the hysteresis coefficient for each air relative moisture humidity

Umidade Relativa (%)	Tratamentos					
	1	2	3	4	5	6
40	0,93	0,97	0,84	1,22	1,05	0,86
50	1,06	1,06	0,97	1,15	0,90	1,06
60	0,84	0,88	0,87	0,92	0,92	0,94
70	0,89	0,86	0,83	0,86	0,84	1,01
80	0,88	0,76	0,93	0,89	0,87	0,68
90	1,00*	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Média	0,92	0,91	0,89	1,01	0,91	0,91

* Os valores iguais a 1 correspondem à mesma umidade inicial para adsorção e dessorção dos painéis.

De acordo com Skaar (1988), um coeficiente de histerese próximo de 1 indica maior estabilidade do painel em termos de umidades flutuantes. De forma geral, foi possível observar que a umidades acima de 50% a histerese aumentou com o aumento da umidade, sendo máxima na umidade de 70% (Tratamentos 3 e 5) e 80% (Tratamentos 2 e 6), conforme observado na Figura 2 e na Tabela 6. Resultados similares foram relatados por Sekino et al. (1999), que verificaram maiores histereses em painéis OSB, para umidades relativas de 75 e 85%.

A capacidade de sorção total da madeira é dada pela capacidade de sorção de seus componentes. As

hidroxilas são os principais grupos da madeira envolvidos no processo de sorção, seguidas pelos grupos carboxílicos. As curvas de adsorção e dessorção (Figura 2) representam a relação entre a umidade de equilíbrio e umidade relativa do ar. Uma vez que a histerese é o resultado da ligação entre as hidroxilas livres quando a madeira que compõe os painéis está a baixas umidades, para adsorção seguinte em função do aumento da umidade relativa do ar, o número de hidroxilas livres é menor (ROWEL, 2005; TSOUMIS, 1991). Dessa forma, a histerese mais pronunciada ocorreu a altas umidades relativas do ar.

O maior efeito da histerese com o coeficiente de menor valor foi observado para os painéis OSB do tratamento 6, produzidos sem cruzamento das camadas, na umidade relativa de 80%. Isso indica uma menor estabilidade desse painel e o resultado sugere que as camadas cruzadas podem ocasionar uma barreira física mais eficiente na mobilidade de água do painel, evitando diferenças muito altas entre adsorção e dessorção.

Nas umidades mais altas, os painéis dos tratamentos 3, 4 e 5 apresentaram maior proximidade entre as umidades de equilíbrio obtidas durante a adsorção e dessorção de água, resultando em maiores coeficientes de histerese. As variáveis de processamento constante para os painéis dos tratamentos 4 e 5 foram resina fenol-formaldeído e colchão de três camadas, as quais influenciaram na maior estabilidade dos painéis. Já, para os painéis do tratamento 3, o uso da resina PMUF pode ter ocasionado o aumento do coeficiente de histerese.

Acima de 60% de umidade relativa, os painéis do tratamento 4 apresentaram os maiores coeficientes de histerese e maior proximidade entre as isotermas de adsorção e dessorção, indicando que esses painéis foram os mais estáveis dentre os estudados. No entanto, uma maior faixa de variação da umidade de equilíbrio do painel em função da variação da umidade relativa ambiental foi observada durante ambos os processos de adsorção e dessorção. Considerando que esses painéis foram produzidos com a maior densidade aparente pré-determinada do painel e madeira de menor densidade básica, eles, certamente, apresentam a maior razão de compactação. De acordo com Zheng et al. (2006), a maior quantidade de material lenhoso por volume do painel resulta em maior área de contato com o vapor de água do ambiente, o que pode ter ocasionado a maior variação da umidade de equilíbrio dos painéis em função da variação da umidade relativa do ar.

Os painéis dos tratamentos 1 e 3 foram produzidos com as resinas MUF e PMUF, respectivamente, as quais exercem influência direta sobre a resistência de painéis à condições de alta umidade. Esses produtos apresentaram menor faixa de variação da umidade de equilíbrio em função da variação da umidade relativa ambiente.

Valores acima de 1 foram encontrados para alguns coeficientes de histerese, principalmente a baixas umidades relativas. Richards et al. (1992) observaram o mesmo para painéis OSB na umidade de 11,3%. Para outros biomateriais estudados pelos autores, o efeito da histerese só ficou evidente a umidades acima de 50%. Hartley et al. (2007) afirma que não há explicação óbvia para esse fato, uma vez que ele indica uma taxa de adsorção maior em relação à taxa de dessorção.

CONCLUSÕES

O valor médio estimado pela equação de Nelson (1983) apresentou diferenças significativas em relação aos valores de umidade de equilíbrio observados, tendo a tendência de subestimar os valores.

O modelo polinomial ajustado para a predição indireta da umidade de equilíbrio dos painéis com base apenas na umidade relativa do ar apresentou grande potencial de utilização.

Não houve efeito das variáveis de produção dos painéis OSB sobre os valores médios de dessorção 1, adsorção e dessorção 2. No entanto, foi possível verificar diferentes comportamentos de variação da umidade de equilíbrio em função da variação da umidade relativa do ar para os diferentes tratamentos, conforme avaliado pelas isotermas de adsorção e dessorção.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1582**: adhesives. Washington, 1994.
- HARTLEY, I. D.; WANG, S.; ZHANG, Y. Water vapor sorption isotherm modeling of commercial oriented strand panel based on species groups and resin type. **Building and Environment**, Pergamon, v. 42, n. 10, p. 3655-3659, 2007.
- MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 2nd ed. San Francisco: M. Freeman, 1993. 689 p.
- MENDES, L. M. **Pinus spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB)**. 2001. 156 p. Tese (Doutorado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- MENDES, L.M.; SILVA, G. A.; TRUGILHO, P. F.; SALDANHA, L. K.; MORI, F. A.; PÁDUA, F. A. Influência do teor de adesivo, temperatura e tempo de prensagem na umidade de equilíbrio de painéis de partículas de madeira. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 4, p. 329-335, 2006.
- MENDES, R. F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; ALMEIDA, N. F.; SURDI, P. G.; BARBEIRO, I. N. Effect of thermal treatment on properties of OSB panels. **Wood Science and Technology**, Zurich, v. 47, p. 243-256, 2013.
- MENDES, R. F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; ALMEIDA, N. F.; SURDI, P. G.; BARBEIRO, I. N. Effects of thermal pre-treatment and variables of production on properties of OSB panels of *Pinus taeda*. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, v. 15, n. 2, p. 141-152, 2013.
- NELSON, R. M. A model for sorption of water vapor by cellulosic materials. **Wood Fiber Science**, Madison, v. 15, n. 1, p. 8-22, 1983.
- PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, London, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.
- RICHARDS, R. F.; BURCH, D. M.; THOMAS, W. C. Water vapor sorption measurements of common building materials. In: SYMPOSIUM ON IMPROVING BUILDING SYSTEMS IN HOT AND HUMID CLIMATES, 12., 1992, Atlanta. **Resumes...** Atlanta: ASHRAE, 1992. 1 CD-ROM.
- ROWEL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC, 2005. 487 p.
- SEKINO, N.; SUEMATSU, A.; HIDEAKI, K.; YASUI, E. Measurements of sorption isotherms of selected commercial wood-based panels and predictions of moisture content changes in service. **Mokuzai Gakkaishi**, Tokyo, v. 45, n. 3, p. 237-243, 1999.
- SILVA, G. A.; MENDES, L. M.; CALEGARIO, N.; MORI, F. A.; SILVA, I. R. M.; SANTOS, I. F. Estimativa da umidade de equilíbrio de painéis de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 70, p. 23-29, 2006.
- SILVA, G. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; MORI, F. A.; SANTOS, I. F. Umidade de equilíbrio de painéis de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 639-646, 2005.
- SKAAR, C. **Water in wood**. New York: Syracuse University, 1988. 263 p.

- THIPKHUNTHOD, P.; MEEYOO, V.; RANGSUNVIGIT, P.; KITIYANAN, B.; SIEMANOND, K.; RIRKSOMBOON, T. Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses. **Fuel**, London, v. 84, n. 7/8, p. 849-857, 2005.
- TSOUMIS, G. T. **Science and technology of wood**: structure, properties, and utilization. New York: V. N. Reinhold, 1991. 494 p.
- WU, Q. Application of Nelson's sorption isotherm to wood composites and overlays. **Wood Fiber Science**, Madison, v. 3, n. 2, p. 187-191, 1999.
- ZHENG, Y.; PAN, Z.; ZHANG, R.; JENKINS, B. M.; BLUNK, S. Properties of medium-density particleboard from saline Athel wood. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 23, n. 3, p. 318-326, 2006.