

VARIAÇÃO SAZONAL DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO PARA MADEIRA DE *Pinus*

IVALDO PONTES JANKOWSKY

Departamento de Silvicultura, ESALQ-USP
13400 - Piracicaba - SP

ABSTRACT - This paper analysis the seasonal variation of the equilibrium moisture content in ***Pinus caribaea*** var. ***hondurensis***, ***Pinus oocarpa***, ***Pinus taeda*** and ***Pinus kesiya*** woods. Samples of these woods, air and kiln dried, were exposed to internal and external conditions during one year. In this period the samples were weighed periodically to calculate the moisture content variation. The equilibrium moisture content of the four wood species was similar, showing the same hygroscopic characteristics. The equilibrium moisture variation was less in closed environment. The kiln drying reduced the hygroscopicity, when compared with air drying. The SIMPSON (1971) equation gives a good approach to estimate the equilibrium moisture content for the wood species studied.

RESUMO - O objetivo do presente trabalho foi avaliar a variação sazonal da umidade de equilíbrio das madeiras de ***Pinus caribaea*** var. ***hondurensis***, ***P. oocarpa***, ***P. taeda*** e ***P. kesiya***. Para tanto, amostras das quatro espécies, secas ao ar e em secador convencional, foram expostas em ambientes interno e externo durante doze meses. A partir do registro periódico das massas das amostras calculou-se a variação da umidade de equilíbrio no decorrer do período de ensaio. As quatro espécies ensaiadas apresentam o mesmo comportamento higroscópico, atingindo teores semelhantes na umidade de equilíbrio. A amplitude de variação na umidade de equilíbrio é menor em ambientes internos. A madeira artificialmente seca em secador convencional tem sua higroscopicidade reduzida quando comparada com a madeira seca ao ar. A utilização da equação de SIMPSON (1971) permite obter uma boa estimativa da umidade de equilíbrio para as espécies estudadas.

INTRODUÇÃO

A madeira, mesmo após ter passado por um processo de secagem, mantém as suas características de material higroscópico e continua trocando umidade com o ar que a envolve. Mantendo-se constantes as condições de temperatura e umidade relativa, o teor de umidade da madeira irá atingir um equilíbrio dinâmico com a umidade do ar. Nessa situação define-se a umidade de equilíbrio da madeira.

Contudo, as condições ambientais variam constantemente, ocasionando mudanças no teor de umidade da madeira. Isto traz uma consequência indesejável, que é a alteração nas dimensões da madeira, proporcional à quantidade de água ganha ou perdida para o ambiente.

De acordo com PECK (1965), dificuldades causadas pela movimentação dimensional podem ser minimizadas secando-se a madeira até um teor de umidade médio entre os valores extremos que serão atingidos quando em serviço.

Torna-se então necessário estimar quais os valores mínimo e máximo da umidade de equilíbrio para a localidade na qual a madeira será utilizada, o que pode ser feito a partir de tabelas (SMITH, 1963) ou equações matemáticas (SIMPSON, 1971).

SIMPSON (1973), comparou diferentes modelos de sorção, utilizando resultados disponíveis em literatura, e concluiu que para expressar a umidade de equilíbrio da madeira em função da temperatura e da umidade relativa do ar o melhor modelo era o que baseava-se na teoria de Hailwood e Horobin.

A partir da equação proposta por SIMPSON (1971), GALVÃO (1975, 1981) calculou a variação anual da umidade de equilíbrio para várias cidades brasileiras.

Todavia, ORMAN (1966) adverte sobre o inconveniente de generalizar os valores da umidade de equilíbrio obtidos a partir de tabelas ou equações gerais, pois muitas espécies podem apresentar comportamento distinto, conforme foi observado experimentalmente por JANKOWSKY (1979).

Assim, o objetivo do presente trabalho foi determinar a variação sazonal na umidade de equilíbrio para as madeiras de **Pinus caribaea** var. **hondurensis**, **Pinus oocarpa**, **Pinus kesiya** e **Pinus taeda**, comparando os resultados experimentais com os valores estimados, e avaliando o comportamento higroscópico em função dos processos de secagem natural e artificial.

MATERIAL E MÉTODOS

A madeira utilizada neste experimento foi fornecida pelo Instituto Florestal do Estado de São Paulo, em tábuas de 2,5 x 6,0 x 100,0 cm, sendo 3 tábuas por espécie. As tábuas foram cortadas na metade, 3 de seu comprimento, formando dois lotes iguais.

Um dos lotes foi submetido à secagem natural, atingindo uma umidade média de 14,1%, e o outro foi artificialmente seco em um secador convencional até 13,0% de umidade. Após a secagem foram retiradas duas amostras pareadas de cada tábua, com 1,5 cm de espessura, 4,0 cm de largura e 8,0 cm de comprimento. Uma das amostras foi destinada à exposição em ambiente interno e a outra à ambiente externo.

Utilizaram-se doze corpos de prova por espécie, sendo que metade deles ficou em exposição ao ar em um local fechado (ambiente interno) e a metade restante permaneceu exposta ao ar em local aberto, porém, abrigada da chuva e da radiação solar direta (ambiente externo). Das seis amostras colocadas em um dos ambientes, três haviam sido secas ao ar e três foram submetidas à secagem artificial. Dessa forma, obteve-se a combinação completa entre os fatores espécies, tipo de secagem e condição de exposição.

As amostras foram pesadas periodicamente, para determinação da massa úmida corrente (m_{uc}), durante um período de doze meses; após o que foram secas em estufa à $103(\pm 2)^{\circ}\text{C}$ para obtenção da massa seca (m_s). As umidades de equilíbrio (UE) no decorrer do período foram então calculadas utilizando-se a equação (1):

$$UE = \left(\frac{m_{uc}}{m_s} - 1 \right) \cdot 100 \dots\dots\dots(1)$$

A estimativa da umidade de equilíbrio foi obtida pelo uso da equação (2), apresentada por SIMPSON (1971), a partir das médias mensais de temperatura e umidade relativa fornecidas pelo Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ.

$$UE = \left(\frac{K_1 K_2 h}{1 + K_1 K_2 h} + \frac{K_2 h}{1 - K_2 h} \right) \cdot \frac{1800}{W} \dots\dots\dots(2)$$

$$K_1 = 4,737 + 0,04773(T) - 0,00050123(T)^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$K_2 = 0,70594 + 0,001698(T) - 0,000005553(T)^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$W = 223,374 + 0,69309(T) + 0,01850(T)^2 \dots\dots\dots (5)$$

T = temperatura em graus Celsius

h = umidade relativa/100

A equação (2) originalmente apresentada por SIMPSON (1971) prevê a estimativa dos parâmetros $K_1 K_2$ e W a partir da temperatura em graus Fahrenheit. Essas estimativas (equações 3, 4 e 5) foram corrigidas para utilização da temperatura em graus Celsius.

O experimento foi conduzido nas dependências do Departamento de silvicultura - ESALQ/USP, em Piracicaba, Estado de São Paulo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias mensais da umidade de equilíbrio para as quatro espécies estudadas são apresentadas na Tabela 1 para madeira exposta em ambiente externo, e na Tabela 2 para local interno. Pode-se observar que os valores de umidade de equilíbrio apresentados pelas quatro espécies, no decorrer do período de medição, foram extremamente semelhantes.

A maior diferença observada foi de 1,3%, que ocorreu no mês de março para madeira seca ao ar e exposta em ambiente externo. Em relação aos valores médios, observou-se uma diferença máxima de 0,6%, tanto no ambiente externo como no interno.

Esses resultados permitem concluir que as quatro espécies ensaiadas apresentam o mesmo comportamento higroscópico, isto é, tendem a atingir valores de umidade de equilíbrio semelhantes quando expostas à mesma condição de temperatura e umidade relativa.

Tabela 1. Umidade de equilíbrio (média mensal) para madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurnesis* (Pch), *Pinus kesiya* (Pk), *Pinus oocarpa* (Po) e *Pinus taeda* (Pt) exposta à variação ambiental em ambiente externo (umidade expressa em %).

MÊS	Secagem natural				Secagem artificial			
	Pch	Po	Pk	Pt	Pch	Po	Pk	Pt
Janeiro	18,2	19,0	18,5	18,3	16,4	16,3	16,5	17,0
Fevereiro	15,8	16,5	15,5	16,1	14,8	14,6	14,9	14,9
Março	15,3	16,2	14,9	15,6	14,7	14,8	15,0	14,5
Abril	15,7	16,3	15,3	16,0	15,0	15,0	15,2	14,8
Mai	15,4	16,1	15,1	15,7	15,2	15,1	15,3	14,7
Junho	15,9	16,8	15,7	16,5	15,6	15,7	15,7	15,3
Julho	13,7	14,2	13,5	14,0	13,1	12,7	13,3	12,9
Agosto	12,6	13,1	12,4	12,8	12,2	12,0	12,3	12,0
Setembro	10,0	10,4	9,8	10,0	9,7	9,5	9,8	9,5
Outubro	12,3	12,8	12,2	12,4	12,0	11,9	12,1	11,9
Novembro	14,1	14,6	14,0	14,5	13,6	13,6	13,7	13,4
Dezembro	13,0	13,3	12,8	13,2	12,4	12,2	12,4	12,3
Mínima	10,0	10,4	9,8	10,0	9,7	9,5	9,8	9,5
Máxima	18,2	19,0	18,5	18,3	16,4	16,3	16,5	17,0
Média	14,1	14,7	14,2	14,2	13,1	12,9	13,2	13,3

Tabela 2. Umidade de equilíbrio (média mensal) para madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Pch), *Pinus oocarpa* (Po), *Pinus kesiya* (Pk) e *Pinus taeda* (Pt) exposta à variação ambiental em ambiente interno (umidade expressa em %).

MÊS	Secagem natural				Secagem artificial			
	Pch	Po	Pk	Pt	Pch	Po	Pk	Pt
Janeiro	13,9	14,7	14,1	14,3	12,4	12,3	12,3	12,2
Fevereiro	12,6	13,1	12,8	12,8	11,2	11,1	11,4	11,2
Março	12,4	12,9	12,5	12,6	11,0	10,9	11,2	11,1
Abril	12,6	13,2	12,8	12,9	11,4	11,2	11,5	11,3
Mai	12,9	13,6	13,1	13,3	11,7	11,5	11,8	11,7
Junho	13,1	13,8	13,3	13,5	11,8	11,7	11,9	11,8
Julho	12,6	13,2	12,8	12,9	11,3	11,1	11,4	11,4
Agosto	11,9	12,4	12,0	12,2	10,8	10,6	10,9	10,7
Setembro	9,9	10,3	10,0	10,2	9,2	8,9	9,2	9,1
Outubro	10,9	11,4	10,9	11,2	10,1	9,9	10,2	10,1
Novembro	12,0	12,6	12,1	12,5	11,1	11,0	11,2	11,1
Dezembro	12,2	12,8	12,3	12,6	11,3	11,1	11,4	11,3
Mínima	9,9	10,3	10,0	10,2	9,2	8,9	9,2	9,1
Máxima	13,9	14,7	14,1	14,3	12,4	12,3	12,3	12,2
Média	11,9	12,5	12,1	12,3	10,8	10,6	10,8	10,7

A Tabela 3 mostra a média da umidade de equilíbrio para as quatro espécies em função do tipo de secagem e do ambiente de exposição. A Figura 1 apresenta os mesmos resultados na forma gráfica, onde são comparados com a curva da umidade de equilíbrio

estimada com o auxílio da equação de Simpson, e dos valores médios de temperatura e umidade relativa que constam da Tabela 4.

Tabela 3. Variação anual da umidade de equilíbrio (em %) para madeira de Pinus. Valores médios a partir dos resultados obtidos com *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus oocarpa*, *Pinus kesiya* e *Pinus taeda*.

MÊS	Secagem natural		Secagem artificial	
	Ambiente Externo	Ambiente Interno	Ambiente Externo	Ambiente Interno
Janeiro	18,5	14,3	16,6	12,3
Fevereiro	16,0	12,8	14,8	11,2
Março	15,5	12,6	14,8	11,1
Abril	15,8	12,9	15,0	11,4
Mai	15,6	13,2	15,1	11,7
Junho	16,2	13,4	15,6	11,8
Julho	13,9	12,9	13,0	11,3
Agosto	12,7	12,1	12,1	10,8
Setembro	10,1	10,1	9,6	9,1
Outubro	12,4	11,1	12,0	10,1
Novembro	14,3	12,3	13,6	11,1
Dezembro	13,1	12,5	12,3	11,3
Mínima	10,1	10,1	9,6	9,1
Máxima	18,5	14,3	16,6	12,3
Média	14,3	12,2	13,1	10,7

Tabela 4. Temperatura (T), umidade relativa (UR) e umidade de equilíbrio estimada (EU), médias durante o período do ensaio, para a cidade de Piracicaba

MÊS	T (°C)	UR (%)	EU (%)
Janeiro	23,3	76,0	14,8
Fevereiro	25,6	76,0	14,7
Março	24,6	76,0	14,8
Abril	21,7	77,0	15,2
Mai	20,2	78,0	15,5
Junho	16,6	78,0	15,7
Julho	15,9	70,0	13,4
Agosto	19,1	69,0	13,1
Setembro	22,0	60,0	11,0
Outubro	21,2	78,0	15,5
Novembro	24,2	77,0	15,1
Dezembro	23,7	78,0	15,4

Os valores de temperatura e umidade relativa foram fornecidos pelo Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP. A umidade de equilíbrio foi estimada com o auxílio das equações 2, 3, 4 e 5.

Examinando-se a Figura 1 e as Tabelas 3 e 4, nota-se que a madeira seca tanto natural como artificialmente e exposta a um ambiente externo foi a que apresentou teores

de umidades de equilíbrio mais próximo dos valores estimados teoricamente. Considerando-se que as médias de temperatura e umidade relativa, que serviram de base para os cálculos teóricos, representam as condições de um ambiente exterior, conclui-se que o modelo matemático apresentado por SIMPSON (1971) pode ser utilizado para se estimar a umidade de equilíbrio da madeira de **Pinus**.

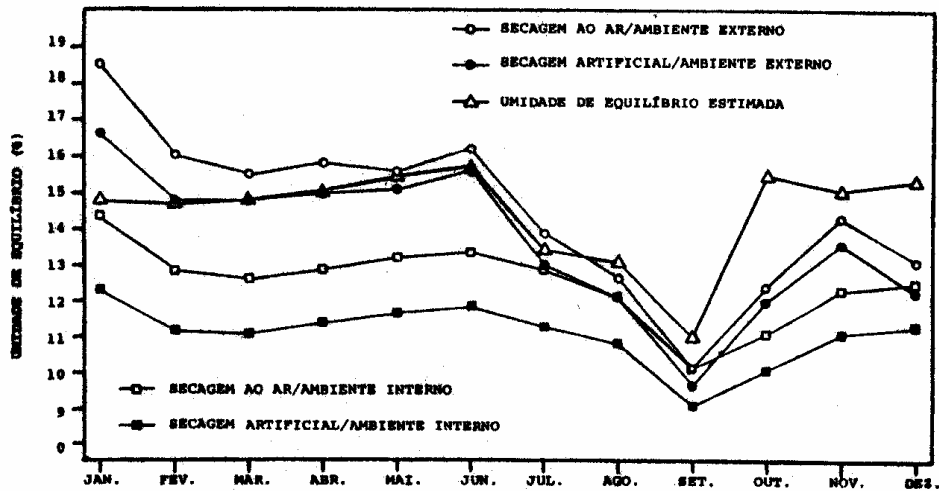


Figura 1. Variação da umidade de equilíbrio para madeira de *Pinus* submetida à diferentes tratamentos, comparada com a variação estimada pela equação de SIMPSON (1971). Valores médios para madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *P. oocarpa*, *P. kesiya* e *P. taeda*.

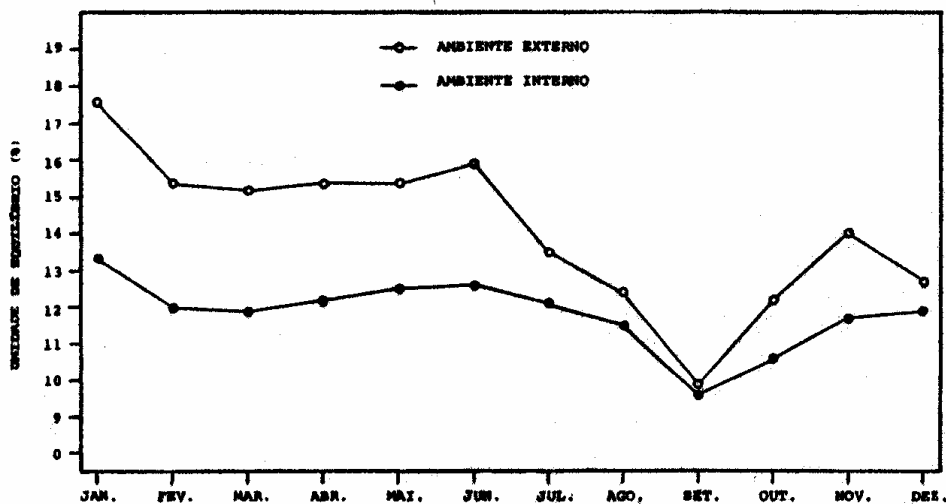


Figura 2. Variação anual da umidade de equilíbrio da madeira de *Pinus* exposta à ambientes externo e interno. Valores médios para madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus oocarpa*, *Pinus kesiya* e *Pinus taeda* submetida à secagem natural e artificial.

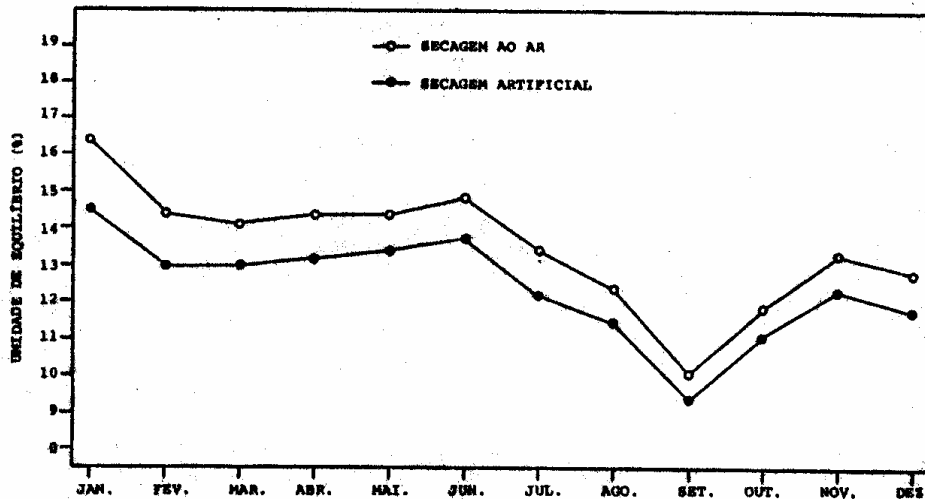


Figura 3. Variação anual da umidade de equilíbrio da madeira de *Pinus* submetida à secagem natural e artificial. Valores médios para madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus oocarpa*, *Pinus kesiya* e *Pinus taeda*, exposta à ambientes externo e interno.

Deve-se ressaltar que esse procedimento não é absolutamente preciso, porém, resultará em estimativas bem próximas dos valores a serem atingidos pela madeira.

Contudo, na Figura 2 observa-se que a madeira em ambientes interiores atinge teores de equilíbrio inferiores às umidades alcançadas pela madeira em local externo, bem como uma amplitude de variação cerca de 50% menor. A amplitude média da variação na umidade foi de 7,7% em ambiente externo e de 3,7% em local interno.

HOADLEY (1967) reporta situação inversa para a cidade de Amherst, na América do Norte, justificando a maior variação em locais internos principalmente devido ao uso de sistemas de aquecimento central, durante o Inverno. Para as condições climáticas do local de ensaio ocorre exatamente o contrário, onde a variação de temperatura e umidade relativa é maior fora dos prédios do que no seu interior. Note-se que a maior diferença devido ao local de exposição ocorre durante o período quente e úmido, diminuindo nos meses frios e secos.

Embora os valores estimados pela equação de SIMPSON (1971) tenham apresentado um bom ajuste com os dados experimentais para madeira de **Pinus**, deve-se ter precaução ao utilizar estimativas, pois normalmente as informações disponíveis de temperatura e umidade relativa são coletadas em ambientes exteriores e não representam exatamente as condições a que a madeira, principalmente como móveis, permanecerá exposta.

Outro aspecto importante é ressaltado na Figura 3, onde se pode observar que a madeira submetida a secagem artificial apresentou menor higroscopicidade do que a madeira seca ao ar. Esse comportamento já era esperado, uma vez que não apenas as causas da diminuição da umidade de equilíbrio em função da temperatura como também vários exemplos de literatura foram abordados por SKAAR (1972).

Assim, comprova-se mais uma vez a importância da secagem artificial da madeira para se, obter um produto final de boa qualidade, pois a redução da higroscopicidade resulta diretamente em menor variação dimensional.

CONCLUSÕES

Com base na análise e discussão dos resultados obtidos no presente ensaio, pode-se concluir que:

a) as quatro espécies ensaiadas, **Pinus caribaea** var. **hondurensis**, **Pinus oocarpa**, **Pinus kesiya** e **Pinus taeda**, apresentam o mesmo comportamento higroscópico, isto é, tendem a atingir valores de umidade de equilíbrio semelhantes quando expostas a mesma condição de temperatura e umidade relativa;

b) o modelo matemático apresentado por SIMPSON (1971) pode ser utilizado para estimar a umidade de equilíbrio das espécies de **Pinus** utilizadas neste experimento, desde que os valores de temperatura e umidade relativa empregados no cálculo sejam representativos do local a que a madeira será exposta;

c) a madeira exposta em ambientes interiores apresenta menor variação na umidade de equilíbrio do que quando exposta em ambientes exteriores;

d) a madeira submetida à secagem artificial em secadores convencionais teve sua higroscopicidade reduzida quando comparada com a madeira seca ao ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GALVÃO, A.P.M., 1975. Estimativas da umidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil. **IPEF**, Piracicaba,(11): 53-65.

GALVÃO, A.P.M., 1981. A umidade de equilíbrio e a .secagem da madeira em Brasília. **Boletim de Pesquisa florestal**, Curitiba, (3): 1-7.

HOADLEY, R.B., 1967. **Weather, water and wood**. Massachusetts, Cooperative Extension Service, 8p.

JANKOWSKY, I. P. , 1979. **Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira**. Piracicaba. 94p. (Tese-Mestrado-ESALQ).

ORMAN, H.R. , 1966. **New Zealand timbers and atmospheric moisture**. Rotorua, Forest Research Institute. 12p.

PECK, E. C. , 1965 **Moisture content of wood in use**. Madison, USDA, Forest Products Laboratory. 10p.

SIMPSON, W.T., 1971. Equilibrium moisture content prediction for wood. **Forest Products Journal**, Madison, **21**(5): 48-9.

SIMPSON, W.T., 1973. Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. **Wood and Fiber**, Madison, **5**(1): 41-9.

SKAAR, C., 1972. **Water in wood**. Syracuse, Syracuse University Press. 218p.

SMITH, H.H. , 1963. **Relative humidity and equilibrium moisture content graphs and tables for use in kiln drying lumber.** Madison, USDA. Forest Products Laboratory. 10p.