

AValiação DA DUREZA JANKA PREDITA PARA CONdições DE MADEIRA SATURADA

LEONARDO ROSO DELDOTTI¹, INGRID ZACHARIAS MARTINS²,
JULIO SORIANO³

¹ Graduando em Engenharia Agrícola, UNICAMP/Campinas-SP, (19)99852-0505, leonardodeldotti96@gmail.com

² Engenheira Agrícola, Mestranda em Engenharia Agrícola (Métodos Não Destrutivos Aplicados a Materiais, Estruturas e Árvores), UNICAMP/Campinas-SP, ingridzmartins@gmail.com

³ Engenheiro Civil, Prof. Livre Docente, UNICAMP/Campinas-SP, julio.soriano@feagri.unicamp.br

Apresentado no
XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2019
17 a 19 de setembro de 2019 - Campinas - SP, Brasil

RESUMO: A dureza da madeira possibilita a escolha de espécies com maior resistência ao desgaste, bem como a avaliação de danos a equipamentos para o beneficiamento. Assim como outras propriedades mecânicas da madeira, a dureza é afetada pelo teor de umidade. Esta pesquisa teve por objetivo avaliar o efeito da saturação na dureza Janka de espécies folhosas, considerando-se os resultados experimentais e os valores preditos com base na norma brasileira (ABNT NBR 7190, 1997). Para tanto, foram empregadas quatro espécies de madeira: Cumaru (*Dipteryx odorata*), Garapa (*Apuleia leiocarpa*), Eucalipto Saligna (*Eucalyptus saligna*) e Freijó (*Cordia goeldiana*), para as quais foram realizados ensaios de dureza Janka em corpos de prova nas condições de madeira saturada e de madeira estabilizada. A análise dos valores preditos mostrou para a espécie E. Saligna, principalmente na direção paralela às fibras, que houve grandes diferenças com valores maiores que os resultados experimentais. Pode-se concluir que para algumas espécies a calibração de um modelo de predição para a dureza Janka beneficiará os processos que necessitam do conhecimento desta propriedade na condição de madeira saturada.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades mecânicas, espécies folhosas, teor de umidade.

EVALUATION OF JANKA HARDNESS PREDICTED FOR SATURATED WOOD CONDITIONS

ABSTRACT: The wood hardness allows the selection of species with greater wear resistance, as well as the evaluation of damages to the processing equipment. Thus, like other mechanical properties of wood, the hardness is affected by the moisture content. As with other mechanical properties of wood, the hardness is affected by the moisture content. The aim of this research was to evaluate the effect of saturation on Janka hardness of hardwoods, considering the experimental results and the predicted values based on the Brazilian standard (ABNT NBR 7190, 1997). For this, four species of wood were used: Cumaru (*Dipteryx odorata*), Garapa (*Apuleia leiocarpa*), Eucalyptus Saligna (*Eucalyptus saligna*) and Freijó (*Cordia goeldiana*), and the Janka hardness tests were carried out on specimens under conditions of saturated wood and stabilized wood. The analysis of the predicted values showed, for the species E. Saligna, mainly in the direction parallel to the grain, a greater difference than the experimental results. It can be concluded, for some species, that the calibration of a prediction model for the Janka hardness will benefit the processes that need the knowledge of this mechanical property under conditions of saturated wood.

KEYWORDS: Mechanical properties, hardwood species, moisture content.

INTRODUÇÃO: A madeira é um material muito versátil amplamente utilizado na construção civil (CALIL Jr. & DIAS, 1997) e também utilizada como matéria prima em diversos processos industriais, por exemplo, na fabricação de papel e móveis, com a vantagem de ser um recurso renovável (BRITO & CINTRA, 2004; GOMIDE et al., 2010). É essencial o conhecimento prévio das principais propriedades físicas e mecânicas, bem como classificações que possam ser relacionadas com as suas aplicações (SILVA FILHO et al., 1992; GROBÉRIO & LAHR, 2002 e LAHR et al., 2010). A dureza é uma das propriedades mecânicas desse material que exemplifica a sua importância para o setor de fabricação de pisos, que consiste no fato de que quanto maior a dureza da espécie maior é a resistência ao desgaste devido ao tráfego. SILVA et al. (2014), reportam que a dureza é a propriedade mecânica mais importante para a indústria moveleira e, também destacam que a melhoria da qualidade dos produtos depende do uso da madeira de alta qualidade.

O método de Janka é padronizado para determinação da dureza da madeira (ABNT NBR 7190, 1997), que consiste em medir a força necessária para que meia esfera com secção diametral de 1 cm² seja cravada em corpos de prova prismáticos. O procedimento de ensaio deve ser realizado tanto na direção paralela quanto normal às fibras da madeira, com duas amostras para as condições de madeira saturada e de madeira em equilíbrio com o ambiente.

Do ponto de vista das correlações das propriedades mecânicas, a densidade e a dureza Janka são grandezas que se correlacionam por funções lineares, como reportado na literatura (HOLMBERG, 2000; MELO et al., 2013). No entanto, estudos com espécies coníferas e folhosas, realizados por WIEMANN & GREEN (2007) e YOJO et al. (2018), para a estimativa da densidade em função da dureza Janka resultaram modelos com equações não lineares.

A madeira é um material higroscópico e, portanto, suas propriedades mecânicas e físicas são alteradas pelo teor de umidade. A ABNT NBR 7190 (1997) estipula como umidade de equilíbrio da madeira o teor de 12 % (da condição-padrão de referência) para elaboração dos projetos de estruturas de madeira. Para adequar a resistência do material a diferentes teores de umidade, a norma estabelece um modelo linear, com a propriedade mecânica decrescente para os teores de umidade variando de 10% a 20%. LOGSDON & CALIL Jr. (2002) analisaram esse modelo para as resistências a compressão paralela às fibras, a tração paralela às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras. Os autores verificaram a validação do modelo para o primeiro caso (resistência a compressão paralela às fibras), pois os dados observados experimentalmente não apresentaram diferenças estatísticas em relação aos valores preditos pelo modelo; porém, para os outros dois casos alguns dos valores preditos foram diferentes estatisticamente dos valores experimentais.

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito da saturação na dureza Janka de espécies folhosas, considerando-se os resultados experimentais e os valores preditos com base na equação de correção de propriedades mecânicas da ABNT NBR 7190 (1997).

MATERIAL E MÉTODOS: Foram pesquisadas quatro espécies de madeira folhosas: Cumaru (*Dipteryx odorata*), Garapa (*Apuleia leiocarpa*), Eucalipto Saligna (*Eucalyptus saligna*) e Freijó (*Cordia goeldiana*), utilizando-se para cada espécie 06 vigas com dimensões da seção transversal medindo 60 mm x 160 mm, das quais foram confeccionados corpos de provas com dimensões de 50 mm x 50 mm x 150 mm (Figura 1a) para os ensaios de dureza Janka. Como determina a norma brasileira, os primeiros 30 cm da ponta de cada uma das vigas foram descartados e utilizada somente a região interna para extração dos corpos de prova (ABNT NBR 7190, 1997). Os ensaios para determinação da dureza foram realizados nas condições de madeira saturada e estabilizada (em equilíbrio com o meio). Portanto, de cada uma das vigas foram confeccionados 02 corpos de prova. Também foram extraídos

corpos de prova com dimensões de 20 mm x 30 mm x 50 mm (Figura 1b) de cada viga para a determinação do teor de umidade e densidade de cada espécie.

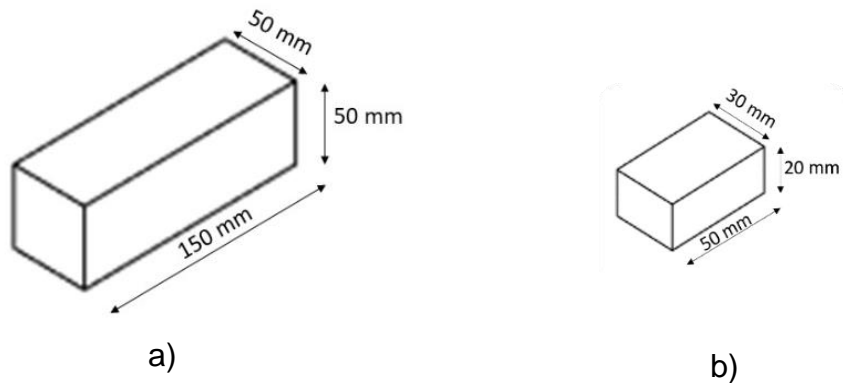


FIGURA 1. Representação dos corpos de prova sem escala: dureza Janka (a); densidade e umidade (b).

Para a condição de madeira saturada os corpos de prova, agrupados por espécie, foram submergidos em água por um período de no mínimo duas semanas. O processo de saturação foi monitorado diariamente medindo-se a massa de cada corpo de prova numa balança de precisão centesimal. De acordo com ABNT NBR 7190 (1997), a saturação ocorre quando a diferença de massa entre duas leituras consecutivas for igual ou menor a 0,5%.



FIGURA 2. Corpos de prova em processo de saturação em recipiente com água.

Para determinar o teor de umidade das amostras estabilizadas, os corpos de provas de dimensão 20 mm x 30 mm x 50 mm foram colocados em uma estufa com temperatura de 103 ± 2 °C (Figura 3) e a massa foi verificada a cada 6 horas, quando a variação da massa neste intervalo de tempo resultou inferior a 0,5% foi determinada a massa seca da amostra e, utilizando-se a Equação (1) foi possível determinar o teor de umidade de cada amostra (ABNT NBR 7190, 1997).

$$U (\%) = 100 * (m_i - m_s) / m_s \quad (1)$$

em que,

U (%) – Teor de umidade em porcentagem;

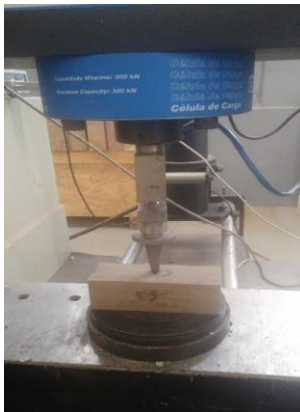
m_i – Massa inicial do corpo de prova (g);

m_s – Massa seca do corpo de prova (g).



FIGURA 3. Secagem de corpos de prova em estufa.

Os ensaios de dureza Janka, para cada condição de umidade de madeira (saturada e em equilíbrio), foram realizados numa máquina de ensaios (modelo DL30.000, EMIC, Brasil), com uma perfuração por face de cada corpo de prova, sendo, portanto, 04 leituras na direção normal às fibras (Figura 4a) e 02 leituras paralelas às fibras (Figura 4b).



a)



b)

FIGURA 4. Ensaio de dureza Janka: direção normal às fibras (a); direção paralela às fibras (b).

Com a Equação (2) de correção de propriedades mecânicas em função do teor de umidade (ABNT NBR 7190,1997), e com base nos resultados de Janka na situação de madeira estabilizada, foi estimada a dureza de cada corpo de prova para a condição de madeira saturada. Para umidades acima de 20% admite-se que são pequenas as variações das propriedades mecânicas da madeira (ABNT NBR 7190, 1997).

$$f_{H,sat_NBR} = f_{H,U\%} * [1 + 3 * (U\% - 20) / 100] \quad (2)$$

em que,

f_{H,sat_NBR} – Dureza Janka em condição saturada, calculada para $U=20\%$ (N);

$f_{H,U\%}$ – Dureza em condição estabilizada, obtida para um teor $U\%$ (N);

$U\%$ - teor de umidade em porcentagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Com a finalização dos procedimentos de secagem dos corpos de prova e com base na Equação (1), foram obtidos os teores de umidade para cada uma das espécies (Tabela 1). As peças estabilizadas apresentaram os teores de umidade no intervalo de 10% (Cumaru) e 13,7% (E. Saligna), que são valores próximos a umidade padrão de 12% (ABNT NBR 7190, 1997).

TABELA 1. Teor de umidade por corpo de prova e espécie.

CP	Teor de umidade (%)			
	Garapa	Cumarú	E. Saligna	Freijó
1	10,9	9,7	13,5	12,0
2	10,9	10,0	13,8	11,5
3	10,9	8,7	13,8	11,4
4	10,8	9,9	13,8	11,3
5	11,3	10,9	13,4	11,2
6	10,9	11,0	13,8	11,5
Média	11,0	10,0	13,7	11,5
D.V	0,1	0,9	0,2	0,3
C.V. (%)	1,3	8,5	1,4	2,4

onde: CP.: identificação do corpo de prova; D.P.: desvio padrão amostral; C.V.: coeficiente de variação.

Os valores da dureza Janka foram calculados com base nos resultados experimentais, que são apresentados para a condição de madeira estabilizada (Tabela 2) e madeira saturada (Tabela 3). Para cada corpo de prova, na direção normal às fibras o valor de dureza Janka foi obtido pela média dos 04 valores das cravações nas respectivas faces laterais. Na direção paralela às fibras, a dureza de Janka foi calculada pela média dos 02 valores de cravação correspondentes às superfícies transversais do corpo de prova. Esses dados foram submetidos aos testes de Tukey com 95% de confiança, buscando-se investigar as seguintes hipóteses:

-Primeira: Se a dureza normal às fibras apresenta diferença estatística em relação à dureza paralela, ambas em condição de madeira estabilizada. Nesta análise, todas as espécies apresentaram valores pertencentes ao mesmo grupo, indicando não haver diferença significativa em relação as direções anatômicas da madeira.

-Segunda: Se a dureza normal às fibras apresenta diferença em relação à dureza paralela em que ambas estão na condição saturada. Para este teste aplicado a cada espécie, também não houve diferença estatística que diferenciasse os resultados em relação às duas direções anatômicas.

-Terceira: Se a dureza normal às fibras em condição estabilizada era diferente da dureza normal em condição saturada. Nesta análise todas as espécies, exceto o Freijó, apresentaram diferenças estatísticas.

-Quarta: Se a dureza paralela às fibras em condição estabilizada era diferente da dureza paralela em condição saturada. Analogamente ao terceiro caso, todas as espécies exceto o Freijó tiveram diferenças significativas.

Os resultados das hipóteses 1 e 2, para as espécies e condições ensaiadas, contrariam o procedimento da ABNT NBR 7190 (1997), que considera a dureza em 2 grupos (normal e paralela às fibras). Acrescenta-se, no entanto, que diversos autores reportam modelos que correlacionam os valores de dureza segundo as direções normal e paralela às fibras (LAHR et al., 2010; SILVA et al, 2014).

No caso das hipóteses 3 e 4, mostrou-se que a umidade tem um efeito importante na de dureza Janka, justificando, assim, a necessidade de modelos para corrigir a redução da propriedade de dureza em função do aumento do teor de umidade.

TABELA 2. Dureza Janka para condição de madeira estabilizada.

CP	Garapa		Cumaru		E. Saligna		Freijó	
	f _{H90} (N)	f _{H0} (N)	f _{H90} (N)	f _{H0} (N)	f _{H90} (N)	f _{H0} (N)	f _{H90} (N)	f _{H0} (N)
1	8458	9100	15015	15218	11229	12698	4306,9	5237,8
2	10557	11647	13911	15373	12475	14086	1481	2337,1
3	10519	12557	16999	16979	10483	11974	3876,9	4047,8
4	11219	12575	12985	13737	14759	15012	3983,9	4806,3
5	13677	14048	19807	18691	11228	12633	2121,9	3227
6	10064	10627	17597	17320	10861	11932	3052,8	4501,5
Média	10749	11759	16053	16220	11839	13056	3137	4026
D.P.	1709	1727	2547	1777	1580	1235	1133	1077
C.V.	15,9	14,7	15,9	11	13,3	9,5	36,1	26,7

onde: CP.: identificação do corpo de prova; C.V.: coeficiente de variação; D.P.: desvio padrão amostral, f_{H90}: dureza Janka na direção normal às fibras; f_{H0}: dureza Janka na direção paralela às fibras.

TABELA 3. Dureza Janka para condição de madeira saturada.

CP	Garapa		Cumaru		E. Saligna		Freijó	
	f _{H90} (N)	f _{H0} (N)	f _{H90} (N)	f _{H0} (N)	f _{H90} (N)	f _{H0} (N)	f _{H90} (N)	f _{H0} (N)
1	6343	6781	10605	10322	7332	6967	3841,2	4319,5
2	7818	7357	11177	10451	7819	7348	1152,5	1637,2
3	7079	6823	13281	11983	6003	5677	3024,4	2926,6
4	9473	8774	10307	10024	9911	8853	3209,6	3572,3
5	9512	8961	15797	14096	5273	6096	1712,8	2214
6	9193	8725	12588	13263	6608	6351	2722,3	3721,2
Média	8236	7904	12292	11690	7157	6882	2610	3065
D.V	1354	1027	2068	1705	1627	1137	999	1004
C.V (%)	16,4	13	16,8	14,6	22,7	16,5	38,3	32,8

onde: CP.: identificação do corpo de prova; C.V.: coeficiente de variação; D.P.: desvio padrão amostral, f_{H90}: dureza Janka na direção normal às fibras; f_{H0}: dureza Janka na direção paralela às fibras.

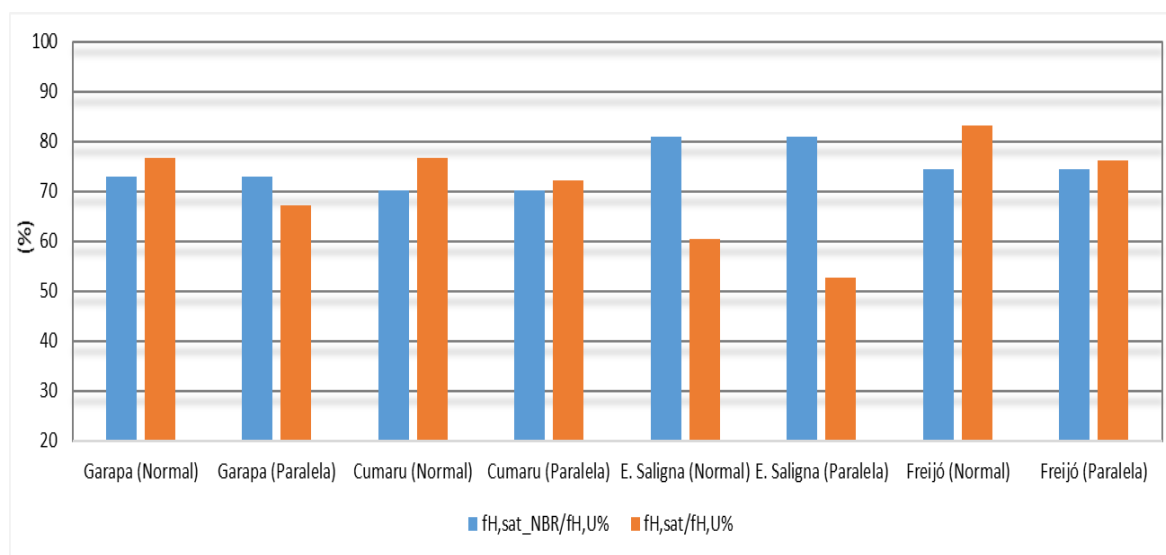
Tendo por base os valores de dureza Janka obtidos nas condições de madeira estabilizada (Tabela 2), com a Equação (2) foram calculados os valores da dureza Janka para o teor de umidade de 20%, cujos resultados representam os valores preditos de dureza para os corpos de prova em condição saturada (Tabela 4).

Para todas as espécies podem-se observar que a saturação fez reduzir o valor médio da dureza Janka, comportamento este esperado devido ao aumento do teor de umidade (da condição de umidade 'U%' para a condição 'sat'). Os valores das reduções são expressos (Figura 5) tanto para os resultados experimentais quanto para os preditos pela Equação 2, indicando (com exceções da espécie E. saligna e, para a espécie Garapa na direção paralela) que os valores preditos resultaram menores que os valores experimentais.

TABELA 4. Dureza Janka predita para condição de madeira saturada.

Espécie		$f_{H90_sat_NBR}$ (N)	$f_{H0_sat_NBR}$ (N)
Garapa	Média	7842	8578
	D.P.	1288	1292
	C.V. (%)	16,4	15,1
Cumaru	Média	11268	11378
	D.P.	2012	1472
	C.V. (%)	17,9	12,9
E. Saligna	Média	9597	10582
	D.P.	1306	1023
	C.V. (%)	13,6	9,7
Freijó	Média	2339	3001
	D.P.	857	822
	C.V. (%)	36,6	27,4

onde: C.V.: coeficiente de variação; D.P.: desvio padrão amostral; f_{H90} : dureza Janka na direção normal às fibras; f_{H0} : dureza Janka na direção paralela às fibras. Os valores médios calculados são referentes aos dados de 06 corpos de prova.



onde: f_{H,sat_NBR} : Dureza Janka em condição saturada, calculada para U=20% (N); $f_{H,sat}$: Dureza Janka obtida experimentalmente; $f_{H,U\%}$: Dureza Janka em condição estabilizada, obtida para um teor U% (N);

FIGURA 5. Razões das durezas nas condições saturadas previstas e experimentais em relação a dureza na condição de madeira estabilizada.

Pode-se notar para as espécies Garapa, Cumaru e Freijó que o uso da Equação (2) para se estimar a dureza na condição saturada resultaram pequenas as diferenças relativas (Tabela 5). As maiores diferenças absolutas e relativas foram obtidas para a espécie E. Saligna, tendo sido maior na direção paralela às fibras. Por efeito de fendilhamento da madeira, mais acentuado em determinadas espécies, podem ocorrer anomalias em que os valores experimentais resultem menores que os previstos (WIEMANN & GREEN, 2007).

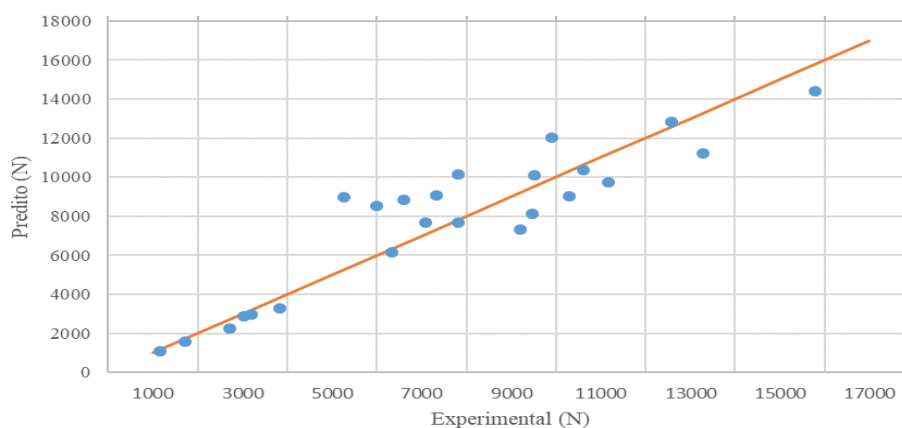
Esses resultados que representam valores mais conservadores de dureza na condição de peça saturada mostra a importância da metodologia de predição da dureza, a qual pode afetar a escolha de determinadas espécies.

TABELA 5. Diferenças entre os valores médios de dureza Janka experimentais e preditos.

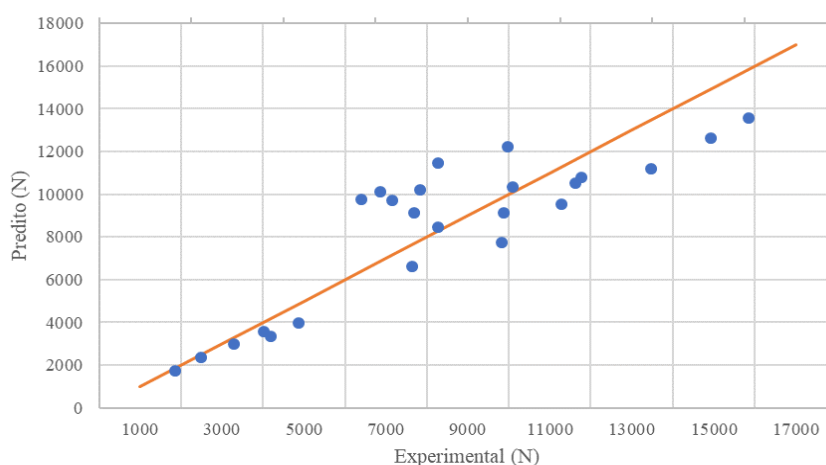
Espécie	Δf_{H90A} (N)	Δf_{H0A} (N)	Δf_{H90R} (%)	Δf_{H0R} (%)
Garapa	394	-674	3,67	-5,73
Cumarú	1025	312	6,39	1,92
E. Saligna	-5087	-2715	-20,60	-28,34
Freijó	272	64	8,65	1,59

onde: Δf_{H90A} : variação da dureza Janka em valores absolutos para a direção normal; às fibras; Δf_{H0A} : variação da dureza Janka em valores absolutos para a direção paralela; Δf_{H90R} : variação da dureza Janka em valores relativos para a direção normal; Δf_{H0R} : variação da dureza Janka em valores relativos para a direção paralela.

Pode-se ainda analisar o desempenho do modelo de predição através do gráfico com os valores experimentais ($f_{H,sat}$) *versus* valor predito pelo modelo (f_{H,sat_NBR}), conforme Figura 6. Nota-se que para o modelo ser perfeito o valor experimental deve ser igual ao valor predito, incidindo na reta com inclinação de 45° e com a origem no encontro dos eixos. Na Figura 6, o modelo perfeito é representado pela reta inclinada e os dados de dureza experimental e predita são representados pelos pontos azuis.



(a)



(b)

FIGURA 6. Representação dos valores de Janka preditos e experimentais, com a linha do modelo perfeito: direção normal às fibras (a); direção paralela às fibras (b).

Nota-se um comportamento padrão para ambas as direções anatômicas, em que para os corpos de prova com durezas menores (a exemplo da espécie Freijó) o modelo mostrou seu melhor desempenho, com os pontos mais próximo da reta inclinada. Nesta região do modelo é onde se encontra a menor raiz do erro quadrático, resultando em 50,2 N e 13,7 N para as durezas normal e paralela às fibras, respectivamente. Na região intermediária, com a dureza experimental variando de 6000 N a 12000 N o modelo mostrou o seu pior desempenho, o que é evidenciado pelo afastamento dos pontos em relação a reta inclinada. Para esta região foram determinados os maiores valores da raiz do erro quadrático, sendo para a dureza normal às fibras igual a 3717 N e para a dureza paralela igual a 4100 N, retratando que nesta região o modelo tende a superestimar o valor de dureza e, diferentemente do que ocorre com a terceira região (maiores durezas) onde o modelo tende a subestimar o valor da dureza.

CONCLUSÕES: A estimativa da dureza Janka por equação, quando em situação saturada, pode resultar em grandes discrepâncias para algumas espécies de madeira folhosa, como foi o caso da espécie *E. saligna*, que implicou em valores estimados maiores que os valores determinados por ensaios mecânicos. Com isto, tem-se a importância de uma metodologia adequada para a predição da dureza da madeira, principalmente, nas condições de umidade mais crítica (saturada), a qual pode afetar a escolha e a qualidade de determinadas espécies.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem aos apoios do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190:** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.
- BRITO, J. O., CINTRA, T. Madeira para energia no Brasil: Realidade, visão estratégica e demanda de ações. **Biomassa & Energia**, Viçosa v. 1, n. 2, p.157-163, 2004
- CALIL Jr., C., DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Bras. Eng. Agric. Ambiental**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p.71-77, 1997.
- GOMIDE J. L., FANTUZZI, N. H.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose Kraft. **Rev. Árvore**, Viçosa, v.34, n.2, 2010
- GROBÉRIO, M. P., LAHR, F. A. R. Indicações para o emprego da madeira de espécies tropicais do Brasil. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, v.8, 2002. (CDROM).
- HOLMBERG, H. Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Holz als Roh-und Werkstoff*, v.58, p.91-95, 2000.
- LAHR, F. A. R. *et al.* Influência da densidade na dureza paralela e na dureza normal às fibras para algumas espécies tropicais brasileira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 153-158, 2010
- LOGSDON, N. B., CALIL Jr., C. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 18, p, 77-107, 2002
- MELO, R. R. *et al.* Uso das características tecnológicas da madeira para o agrupamento de espécies florestais. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2013.
- SILVA FILHO, D. F., ROCHA, J. S., MOURA, J. B. Influência da densidade na dureza Janka em oito espécies madeireiras da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v.22, p.275-283, 1992.
- SILVA, F.; *et al.* Nondestructive evaluation of hardness in tropical wood. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 26, n. 1, p.69-74. 2014.

WIEMANN, M. C.; GREEN, D. W. Estimating Janka hardness from specific gravity for tropical and temperate species. Research Paper FPL-RP-643. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 21 p. 2007.

YOJO et al. Dureza Janka como estimador da densidade aparente e das resistências à flexão e compressão em madeiras de folhosa nativas brasileiras e coníferas. **Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, XVI e Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira, III**, 2018. São Carlos. Anais... São Carlos: EESC-USP, mar. 2018, 1 CDRom.