

Determinações dos módulos de elasticidade e ruptura de madeiras por técnicas não destrutivas e destrutiva

Evaluation of elasticity and rupture modulus of woods by destructive and non-destructive techniques

Pedro Nicó Medeiros Neto¹, Juarez Benigno Paes²,
Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho²

Resumo

Este trabalho objetivou avaliar o uso de técnicas não destrutivas (dinâmicas) por meio de frequências de vibração (longitudinal e transversal) e *stress wave* e relacionar os resultados com os obtidos no ensaio destrutivo (estático) na determinação da rigidez e resistência da madeira de quatro espécies florestais. Foram utilizadas tábuas com 200 x 40,0 x 5,0 cm (comprimento x largura x espessura) das madeiras de eucalipto (*Corymbia citriodora*), louro preto (*Cordia alliodora*), massaranduba (*Manilkara* sp.) e pau brasil (*Caesalpinia echinata*) e avaliados o módulo de ruptura (MOR) por técnica destrutiva (estática) e o módulo de elasticidade (MOE) por meio de técnicas destrutivas e não destrutivas ou dinâmicas (vibração longitudinal, transversal e *stress wave*). Para a análise e avaliação dos resultados, empregou-se um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (espécies) e 20 repetições por tratamento e os valores, quando significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$), tiveram suas médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A avaliação das relações entre as técnicas estática e dinâmicas foi por meio do teste de Pearson. O eucalipto apresentou os maiores valores de módulos de elasticidade e ruptura. A técnica de vibração transversal proporcionou os maiores coeficientes de correlações entre as técnicas testadas. As melhores correlações entre os MOEs foram obtidas para as madeiras de menores massas específicas e para o MOR não foi observado nenhuma relação entre as massas específicas.

Palavras-chave: técnicas de vibração, flexão estática, correlação linear.

Abstract

This work aimed to evaluate the use of non-destructive techniques (dynamic) by means of vibration frequencies (longitudinal and transversal) and stress wave and to relate the results with those obtained in destructive test (static) in determining the stiffness and strength of the four woody forest species. Planks with 200 x 40.0 x 5.0 cm (length x width x thickness) of *Corymbia citriodora*, *Cordia alliodora*, *Manilkara* sp. and *Caesalpinia echinata* were evaluated and the modulus of rupture (MOR) by destructive technique (static) and modulus of elasticity (MOE) by means of destructive and non-destructive techniques or dynamics (vibration transversal and longitudinal stress wave). For the analysis and evaluation of the results, a completely randomized design with four treatments (species) and 20 repetitions per treatment was used and the values, when significant F test ($p \leq 0.05$), had their averages compared by Tukey's test ($p \leq 0.05$). The evaluation of the relationship between static and dynamic techniques was through the Pearson's test. Eucalypts presented the highest values of elasticity and rupture modules. The transverse vibration technique provided the greatest correlation coefficients among the tested techniques. The best correlations among the MOEs were obtained by woods of lower specific gravities for the MOR was and no relationship among the specific gravities was observed.

Keywords: vibration techniques, static bending, linear correlation.

INTRODUÇÃO

A qualidade da madeira pode ser avaliada por técnicas não destrutivas (dinâmicas) e destrutivas (estáticas). Del Menezzi et al. (2007; 2010) e Almeida et al. (2012) citam que as técnicas não destrutivas proporcionam a obtenção rápida dos resultados, sem a destruição de amostras. Assim, tornaram-se promissoras para caracterizar a madeira, por não modificarem suas propriedades e nem interferir

¹Doutorando do Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais. UFES - Universidade Federal do Espírito Santo. Av. Governador Lindemberg, 316 - Centro - 29550000 - Jerônimo Monteiro, ES, Brasil. E-mail: pedroflorestal@gmail.com.

²Professor do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. UFES - Universidade Federal do Espírito Santo. Av. Governador Lindemberg, 316 - Centro - 29550000 - Jerônimo Monteiro, ES, Brasil. E-mail: jbp2@uol.com.br; p_gutemberg2001@yahoo.com.br.

no uso final (ROSS; PELLERIN, 1994; GOUVÊA et al., 2011; TRIANOSKI, 2012; MIRBOLOUK; ROOHNIA, 2015), além de promoverem economia de tempo e recursos financeiros na obtenção dos dados, quando comparados aos ensaios destrutivos (SHOKRIEH; MOHAMMADI, 2014).

Dentre as técnicas não destrutivas para a classificação de peças estruturais de madeira, destacam a radiografia, tomografia, análise da vibração transversal e longitudinal, ondas de tensão, ressonância magnética, espectroscopia e ultrassom (SEGUNDINHO et al., 2012). Tendo a utilização de técnicas de vibrações se tornando relevante, em virtude de proporcionarem respostas rápidas com boas correlações lineares com os ensaios destrutivos (CHENG; HU, 2011).

Além das técnicas vibracionais, a utilização de propagação de ondas vem sendo utilizada, frequentemente para analisar as características da madeira (CANDIAN; SALES, 2009). Cunha e Matos (2010) destacam o uso da técnica de emissão de ondas de tensão (*Stress Wave*) para a determinação do módulo de elasticidade (MOE) da madeira. Este método está embasado no princípio da velocidade de propagação da onda ao longo da peça avaliada, com relação direta com a massa específica e o módulo de elasticidade (TRIANOSKI, 2012).

O MOE que é uma medida da rigidez limite de deformação elástica do material (MORA et al., 2009), e o módulo de ruptura (MOR), que expressa a tensão normal máxima suportada, são propriedades relevantes avaliadas de um material e, a metodologia para a determinação dos mesmos continua a evoluir com o desenvolvimento de novos materiais e técnicas (MOHAMMED et al., 2014).

Desta forma, os objetivos deste trabalho foram avaliar o uso de técnicas não destrutivas (dinâmicas) por meio de frequências de vibração (longitudinal e transversal) e *stress wave* e relacionar os resultados com os obtidos no ensaio destrutivo (estático) na determinação da rigidez e resistência da madeira de quatro espécies florestais.

MATERIAL E MÉTODOS

Espécies florestais estudadas

Foram utilizadas as madeiras de eucalipto (*Corymbia citriodora* Hill & Johnson), louro preto (*Cordia alliodora* Cham.), paraju ou maçaranduba (*Manilkara* sp.) e pau brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.) disponíveis no Laboratório de Usinagem e Beneficiamento da Madeira (LUMBER), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), localizado em Jerônimo Monteiro, estado do Espírito Santo.

As madeiras de pau brasil e louro preto foram de doação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais – IBAMA, provenientes de um lote de madeira apreendida no estado do Espírito Santo, procedente da Mata Atlântica no estado da Bahia. A de eucalipto foi obtida de árvores com 40 anos de idade, de plantios existentes no *campus* da Universidade Federal do Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ e a de paraju, de lotes de madeira adquiridos da Região Norte do Brasil, utilizada em estrutura de telhado de prédios do DCFM.

Corpos de prova de madeira isentos de defeitos, como presença de nós, rachaduras e fendilhamento, foram submetidos a técnicas não destrutivas e destrutiva. Foram utilizadas 20 amostras com dimensões nominais de 30,0 x 2,0 x 2,0 cm (comprimento x espessura x largura) para cada espécie florestal estudada, a 12% de umidade. Apesar da relação vão livre:altura (L:h) ser inferior a recomendada pela Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1997) que padroniza o valor de 23, esta adequação foi necessária em virtude das dimensões das madeiras disponíveis para o estudo.

Entretanto, com estas dimensões, o ensaio de flexão estática de três pontos em corpos de prova de madeira utiliza uma relação (L:h) igual a 14, que se encontra em conformidade com a *American Society for Testing and Materials* - ASTM (2014b).

Determinação das propriedades físicas e mecânicas das madeiras

Para monitorar o teor de umidade (base seca) das amostras foram utilizados 10 corpos de prova com dimensões de 5,0 x 2,0 x 3,0 cm (comprimento x largura x espessura), conforme NBR 7190, ABNT (1997). Para a determinação da massa específica aparente das madeiras foram utilizados os mesmos corpos de prova das técnicas não destrutiva e destrutiva.

Foram avaliados os módulos de elasticidade e de ruptura a flexão (MOE e MOR) por meio de técnica destrutiva (ABNT, 1997) e não destrutivas. Para a destrutiva foi utilizada uma máquina universal de ensaios com capacidade de 100 kN e sistema automático de aquisição de dados.

Os módulos de elasticidade obtidos por meio das técnicas não destrutivas são denominados de dinâmicos (MOEd). Para os mesmos, foram empregadas as técnicas de vibração longitudinal, transversal e *stress wave*.

Técnica de vibração longitudinal (vibr. long.)

A técnica de vibração longitudinal consiste em sustentar os corpos de prova sobre fios de elastômero, conectados a duas hastes de madeira, os quais devem ser apoiados em pontos nodais, que são estabelecidos a 0,224* comprimento da amostra. Impactos gerados pela batida de um martelo, adequado para esta técnica, são captados por um microfone. O impacto deve ser na direção paralela às fibras da madeira e o microfone posicionado nesta direção na extremidade oposta do corpo de prova.

Os sinais obtidos foram transformadas em frequências pelo programa *Fast Fourier Vibration Analyzer – FFT Analyzer*. O MOEd longitudinal foi obtido conforme a ASTM (2009) e ASTM (2014a), Equação 1.

$$MOEd_{vl} = 4 \times \left(\frac{m \times f_1^2}{b} \right) \frac{l}{h} \quad (1)$$

em que: MOE_{dl} = Módulo de elasticidade dinâmico, técnica de vibr. long. (MPa);

m = Massa do corpo de prova (kg); f_1 = Frequência de vibração longitudinal (Hz);

b = Largura do corpo de prova (mm); h = Altura do corpo de prova (mm); e l = Comprimento do corpo de prova (mm).

Técnica de vibração transversal (vibr. trans.)

A diferença entre este ensaio e o anterior está no impacto com o martelo, o qual é realizado na direção perpendicular às fibras da madeira e o microfone é posicionado também nesta direção, na extremidade oposta ao impacto.

Os sinais obtidos foram transformados em frequências pelo programa *FFT Analyzer*. O módulo de elasticidade dinâmico transversal foi realizado de acordo com a ASTM (2009) e ASTM (2014a), Equação 2.

$$MOEd_{vt} = \frac{f_r^2 \times W \times L^3}{2,46 \times l \times g} \quad (2)$$

em que: MOE_{dt} = Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de vibr. trans. (MPa); f_r = Frequência de vibração transversal; W = Peso do corpo de prova (N);

L = Distância entre apoios (m); I = Momento de inércia (mm⁴); e g = Aceleração da gravidade (9,8 m s⁻²).

Stress wave (SW)

Foi utilizado o equipamento conhecido como *Stress Wave Timer*, que fornece o tempo para que a onda de tensão percorra o comprimento da amostra. A partir desse tempo, é calculado o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{sw}) por meio da Equação 3.

$$MOE_{sw} = \left(\frac{L}{t} \right)^2 \times \frac{D}{g} \times 10^{-5} \quad (3)$$

em que: MOE_{sw} = Módulo de elasticidade dinâmico pelo *Stress Wave* (MPa);

L = Comprimento do corpo de prova (m); t = Tempo de propagação da onda (s); e D = Densidade do corpo de prova (kg m⁻³); e g = Aceleração da gravidade (m s⁻²).

Análise estatística

Para comparar as médias das massas específicas, dos módulos de elasticidade (MOE) obtidos pelas técnicas não destrutivas e destrutiva e do módulo de ruptura (MOR), foi empregado um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (espécies) e 20 repetições. Antes das análises dos dados foi verificada a normalidade (teste de Lilliefors) e homogeneidade das variâncias (Cochran).

Os valores, quando significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$), tiveram suas médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A avaliação das relações entre as técnicas não destrutivas (dinâmicas) e destrutiva (estática) foi realizada por meio da análise de regressão linear simples, teste de Pearson.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As madeiras com maiores massas específicas tiveram maiores valores de resistência e do módulo de elasticidade nas técnicas não destrutivas (dinâmicas) e destrutiva (estático). Os módulos de elasticidades dinâmicos foram superiores ao estático (Tabela 1). Targa et al. (2005) afirmaram que isso é resultante da característica viscoelástica da madeira, que passam simultaneamente por deformações elásticas e viscosas e, assim os módulos dinâmicos superestimam os valores do ensaio estático. As técnicas não destrutivas tiveram uma variação média de 16,08% entre a maior (vibr.long.) e a menor (*stress wave*).

Tabela 1. Massa específica aparente e módulos de elasticidade e de ruptura por técnicas destrutivas e não destrutiva para as espécies estudadas.

Table 1. Apparent specific gravity, modules of elasticity and of rupture by destructive and non-destructive techniques of the species studied.

Espécies	MEA (g cm ⁻³)	Técnica Destrutiva		Técnicas não Destrutivas		
		MOR (MPa)	MOE _{st} (MPa)	MOE _{dvl} (MPa)	MOE _{dvt} (MPa)	MOE _{dsw} (MPa)
Eucalipto	1,05 a	205,07 a	20214,21 Ca	34525,21 Aa	29396,56 Ba	27918,54 Ba
Louro preto	0,85 c	132,04 c	12121,87 Bc	16383,55 Ac	15142,42 Ac	14604,79 ABd
Paraju	1,06 a	186,31 b	16389,37 Cb	23813,70 Ab	21465,83 Bb	19912,07 Bb
Pau Brasil	0,97 b	170,87 b	15883,23 Cb	21411,79 Ab	19483,56 ABb	17583,27 BCc

MEA = massa específica aparente, MOE_{st} = Módulo de elasticidade estático, MOR = Módulo de ruptura, MOE_{dvt}; MOE_{dvl}; e MOE_{dsw} = Módulos de elasticidade pelo ensaios dinâmicos de vibração longitudinal, transversal e stress wave. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na horizontal e minúscula, na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

A madeira de eucalipto teve os maiores valores para as características avaliadas, provavelmente em virtude da idade da árvore. O lenho de massaranduba ou paraju (*Manilkara* sp.) com idade desconhecida, possui valores médios de massa específica aparente de 1,03 g cm⁻³ (ROSA et al., 2014), sendo semelhante ao encontrado no presente trabalho e próximo ao valor citado na NBR 7190, ABNT (1997) de 1,14 g cm⁻³.

Para a madeira do louro preto (*Cordia alliodora*) o valor obtido (0,85 g cm⁻³) foi superior ao citado na ABNT (1997), que foi de 0,68 g cm⁻³. Isto pode estar relacionado com a idade das plantas e a qualidade de sítio onde as mesmas ocorrem (MENESES et al., 2015). Para essa espécie, o módulo de elasticidade estático foi de 14.180 MPa, superior ao encontrado nesta pesquisa, o que pode estar relacionado com o local de retirada da amostra no tronco da árvore.

Ballarin e Lara Palma (2009) obtiveram valor médio de massa específica aparente de 1,00 g cm⁻³, para a madeira de *Eucalyptus citriodora*, com 31 anos de idade. Os mesmos autores, com relação aos valores médios do módulo de elasticidade estático e dinâmico (vibr. Trans.) encontram valores de 22.420 e 24.700 MPa, respectivamente. O menor valor encontrado para a técnica não destrutiva, provavelmente deve-se a diferença de idade entre as espécies e o equipamento utilizado por aqueles autores.

A madeira do gênero *Eucalyptus* sp., pesquisada por Segundinho et al. (2012), teve módulos de elasticidade, obtidos por vibr. long., de 17.150 MPa; por vibr. trans. de 18.810 MPa e por flexão estática de 16.370 MPa. Estes valores são inferiores aos obtidos nesta pesquisa, em virtude, da provável diferença de idades e a espécie de eucalipto estudada, a qual não foi relatada pelos autores citados.

As técnicas não destrutivas superestimaram os valores do módulo de elasticidade estático (TARGA et al., 2005). Exceto para as madeiras de louro preto e pau brasil, para a técnica de *stress wave*, em que os valores foram semelhantes. O módulo de elasticidade obtido por vibr. long. proporcionou os maiores valores para as madeiras de maior massa específica (eucalipto e paraju). Apesar das massas específicas aparentes semelhantes, a espécie de eucalipto exibiu os maiores valores de módulo de elasticidade que a madeira de massaranduba. Isto provavelmente foi resultante das diferenças de idades entre as espécies avaliadas.

O eucalipto não teve relação significativa entre as técnicas não destrutivas e destrutiva (Tabela 2) obtidas com o *stress wave* e, para as demais, a relação entre as variáveis foi menor quanto comparada

com a obtida pelas demais técnicas não destrutivas testadas. Isto pode ter ocorrido por influência da estrutura anatômica, dimensões das fibras e grã da madeira, uma vez que esses fatores interferem na propagação de ondas de tensão (ALVES et al., 2013).

Tabela 2. Equações ajustadas para espécies, técnicas não destrutivas e parâmetros estatísticos para a estimativa do módulo de elasticidade estático.

Table 2. Species adjusted equations, non-destructive techniques and statistical parameters for estimating the static modulus of elasticity.

Espécie	Técnicas	Equações Ajustadas	Parâmetros		
			r	p	$S_{\bar{y}\bar{x}}$
Eucalipto	Vibr. Trans.	$\overline{MOE_{st}} = 11113,53 + 0,3096 * MOE_{dvt}$	0,51	0,02	1218,53
	Vibr. Long.	$\overline{MOE_{st}} = 12869,67 + 0,2127 * MOE_{dvl}$	0,44	0,05	1270,49
	Stress wave	$\overline{MOE_{st}} = 19189,42 + 0,0367 * MOE_{dsw}$	0,07	0,77	1411,27
Louro Preto	Vibr. Trans.	$\overline{MOE_{st}} = 2682,34 + 0,6234 * MOE_{dvt}$	0,96	0,00	712,722
	Vibr. Long.	$\overline{MOE_{st}} = 2944,96 + 0,5601 * MOE_{dvl}$	0,96	0,00	702,874
	Stress wave	$\overline{MOE_{st}} = 1824,31 + 0,7051 * MOE_{dsw}$	0,91	0,00	1082,52
Paraju	Vibr. Trans.	$\overline{MOE_{st}} = 5741,62 + 0,4960 * MOE_{dvt}$	0,77	0,00	1035,46
	Vibr. Long.	$\overline{MOE_{st}} = 5728,50 + 0,4477 * MOE_{dvl}$	0,72	0,00	1119,92
	Stress wave	$\overline{MOE_{st}} = 5369,26 + 0,5534 * MOE_{dsw}$	0,68	0,00	1183,86
Pau Brasil	Vibr. Trans.	$\overline{MOE_{st}} = -149,13 + 0,8229 * MOE_{dvt}$	0,97	0,00	791,635
	Vibr. Long.	$\overline{MOE_{st}} = 768,96 + 0,7059 * MOE_{dvl}$	0,93	0,00	1141,66
	Stress wave	$\overline{MOE_{st}} = -156,16 + 0,9122 * MOE_{dsw}$	0,82	0,00	1827,08

Vibr. Trans. = vibração transversal (vt); Vibr. Long. = vibração longitudinal (vl); Stress wave (sw); MOE_{st} = módulo de elasticidade estático; MOE_d = módulo de elasticidade dinâmico; r = coeficiente de correlação; p_{cal} = p calculado ($p \geq 0,05$); e $S_{\bar{y}\bar{x}}$ = erro padrão da estimativa.

As madeiras de eucalipto e paraju exibiram os maiores valores de massa específica aparente (Tabela 1) e obtiverem menores coeficientes de correlação entre as técnicas destrutivas e não destrutiva (Tabela 2). Sendo evidente a influência da massa específica nos movimentos das ondas de tensão e frequências vibratórias (ALVES et al., 2013).

A técnica de vibração transversal (dinâmico) proporcionou os maiores valores de coeficiente de correlação com a técnica não destrutiva (estático) para as madeiras testadas, enquanto a do *stress wave* exibiu as menores correlações. Isto pode estar relacionado com as diferenças metodológicas para a obtenção dos valores entre as técnicas utilizadas.

Para as madeiras de três espécies de eucaliptos, com idades de 21 a 31 anos, os resultados dos coeficientes de correlação entre o ensaio não destrutivo (vibr. trans.) e o módulo de elasticidade estático foram de 0,87 e 0,93 (TARGA et al., 2005). A disparidade destes valores, em relação aos encontrados no presente trabalho, provavelmente está relacionada com o equipamento utilizado, espécie florestal testada e a mensuração das frequências de vibr. trans.

Madeiras de cinco espécies tropicais, ensaiadas por Baar et al., (2015), com massa específica entre 0,77 e 0,86 g cm⁻³, exibiram coeficientes de correlação, em média, de 0,86 para a técnica não destrutiva (vibr. long.) e o módulo de elasticidade estático. Estes resultados foram inferiores aos encontrados para as espécies louro preto e pau brasil, as quais foram as de menor massas específicas entre as espécies florestais estudadas (Tabela 1).

Para o módulo de ruptura (Tabela 3), as correlações entre as técnicas não destrutivas (dinâmicas) e destrutiva (estática) foram significativas para as madeiras de maiores massa específica, exceto para a madeira de eucalipto por *stress wave*. Assim, as técnicas dinâmicas avaliadas responderam com boa estimativa o módulo de ruptura das madeiras estudadas. Tendo as melhores estimativas do módulo de ruptura estático obtidas para a madeira de pau brasil, e as piores, as obtidas pelo *stress wave*, para todas as madeiras testadas.

Tabela 3. Equações ajustadas para espécies, técnicas não destrutivas e parâmetros estatísticos para a estimativa do módulo de ruptura estático.

Table 3. Species adjusted equations, non-destructive techniques and statistical parameters for estimating the static modulus of rupture.

Espécie	Técnicas	Equações Ajustadas	Parâmetros		
			r	p	S_{yx}
Eucalipto	Vibr. Trans.	$\overline{\text{MOR}} = 69,38 + 0,0046 * \text{MOE}_{\text{dvt}}$	0,74	0,00	9,86
	Vibr. Long.	$\overline{\text{MOR}} = 84,20 + 0,0035 * \text{MOE}_{\text{dvl}}$	0,70	0,00	10,35
	Stress wave	$\overline{\text{MOR}} = 173,35 + 0,0011 * \text{MOE}_{\text{dsw}}$	0,21	0,37	0,014
Louro Preto	Vibr. Trans.	$\overline{\text{MOR}} = 85,44 + 0,0031 * \text{MOE}_{\text{dvt}}$	0,63	0,00	15,15
	Vibr. Long.	$\overline{\text{MOR}} = 89,06 + 0,0026 * \text{MOE}_{\text{dvl}}$	0,60	0,00	15,62
	Stress wave	$\overline{\text{MOR}} = 91,05 + 0,0028 * \text{MOE}_{\text{dsw}}$	0,48	0,03	17,09
Paraju	Vibr. Trans.	$\overline{\text{MOR}} = 36,64 + 0,0070 * \text{MOE}_{\text{dvt}}$	0,87	0,00	9,99
	Vibr. Long.	$\overline{\text{MOR}} = 49,85 + 0,0057 * \text{MOE}_{\text{dvl}}$	0,74	0,00	13,48
	Stress wave	$\overline{\text{MOR}} = 64,31 + 0,0061 * \text{MOE}_{\text{dsw}}$	0,66	0,00	15,99
Pau Brasil	Vibr. Trans.	$\overline{\text{MOR}} = 20,90 + 0,0077 * \text{MOE}_{\text{dvt}}$	0,90	0,00	14,17
	Vibr. Long.	$\overline{\text{MOR}} = 27,65 + 0,0067 * \text{MOE}_{\text{dvl}}$	0,87	0,00	15,49
	Stress wave	$\overline{\text{MOR}} = 18,91 + 0,0086 * \text{MOE}_{\text{dsw}}$	0,77	0,00	20,57

Vibr. Trans. = vibração transversal (vt); Vibr. Long. = vibração longitudinal (vl); Stress wave (sw); MOR = módulo ruptura à flexão; MOEd = módulo de elasticidade dinâmico; r = coeficiente de correlação; pcal = p calculado ($p \leq 0,05$); e S_{yx} = erro padrão da estimativa.

As técnicas não destrutivas de vibr. long. e trans. proporcionaram uma maior precisão na estimativa do módulo de ruptura para as madeiras de maior massa específica (eucalipto, pau brasil e paraju).

Para a madeira de *Populus tomentosa*, os valores de coeficiente de correlação foram de 0,61 e 0,65 para as técnicas de vibr. long. e trans. (dinâmico), respectivamente, com o módulo de ruptura (estático) (CHENG; HU; 2011). Os resultados podem ser influenciados pela espécie florestal, massa específica e idade dos indivíduos (ALVES et al., 2013) e grã da madeira (BAAR et al., 2015).

CONCLUSÕES

Os maiores valores de módulos de elasticidade (estático e dinâmicos) e de ruptura foi para a madeira de eucalipto (*Corymbia citriodora*). Isto ocorreu em decorrência da idade do lenho testado.

A técnica de vibração transversal proporcionou os maiores coeficientes de correlações entre as não destrutivas e destrutiva para os módulo de elasticidade e ruptura para as madeiras ensaiadas, e a de *stress wave*, os menores valores.

Para as madeiras de pau brasil e louro preto as técnicas não destrutivas (vibr. trans. e long.) estimaram com boa precisão o MOE. Enquanto, para o MOR as melhores correlações foram obtidas para os lenhos de paraju e pau brasil.

As melhores correlações entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos foram para as madeiras de menores massas específicas. Por outro lado, para módulo de ruptura não houve o mesmo comportamento, em que as melhores correlações não ocorreram para as madeiras de maior ou menor massa específica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: projeto de estruturas de madeira. Anexo B – determinação das propriedades das madeiras para projetos de estruturas. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ALMEIDA, C. F. A. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVA, T. C. Uso da avaliação não destrutiva em vigotas de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke). *Ciência da Madeira*, Pelotas, v. 3, n. 2, p. 128-143, 2012.

- ALVES, R. C.; MARTINS, T.; MANTILLA CARRASCO, E. V. Influência da densidade na velocidade de propagação da onda em sete espécies de madeira tropicais. **Natural Resources**, Aquidabã, v. 3, n. 1, p. 6-13, 2013.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C-215: standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. West Conshohocken, Annual Book of ASTM Standards, 2014a. 7 p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D-143: standard test methods for small clear specimens of timber. West Conshohocken, Annual Book of ASTM Standards, 2014b. 31 p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E-1876: standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by Impulse excitation of vibration. West Conshohocken, Annual Book of ASTM Standards, 2009. 16 p.
- BAAR, J.; TIPPNER, J.; RADEMACHER, P. Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity - of five tropical species by nondestructive methods. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, n. 2, v. 17, 2015.
- BALLARIN, A. W.; LARA PALMA, H. A. Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não destrutivo de vibração transversal. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, São Carlos, v. 10, n. 25, p. 5-14, 2009.
- CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 83-98, 2009.
- CHENG, F.; HU, Y. Y. Reliability analysis of timber structure design of poplar lumber with nondestructive testing methods. **BioResources**, Raleigh, v. 6, n. 3, p. 3188-3198, 2011.
- CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo ("stress wave timer"). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 345-354, 2010.
- DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. S.; SOUZA, M. R. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 2, p. 325- 332, 2010.
- DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I.; SOUZA, M. R. Avaliação não-destrutiva de painéis OSB modificados termicamente: parte 1-efeito do tratamento térmico sobre a velocidade de propagação de ondas de tensão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 67-75, 2007.
- GOUVÊA, A. F. G.; TRUGILHO, P. F.; GOMIDE, J. L.; SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R.; ALVES, I. C. N. Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011.
- MENESES, V. A.; TRUGILHO, P. F.; CALEGARIO, N.; LEITE, H. G. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, 2015.
- MIRBOLOUK, P.; ROOHNIA, M. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of medium density fiberboard panel from longitudinal vibration tests on specimens. **BioResources**, Raleigh, v. 10, n. 1, p. 613-621, 2015.
- MOHAMMED, A. A.; HARIS, S. M.; NUAWI, M. Z. New way to find the modulus of elasticity. **Journal of Applied Sciences**, New York, v. 14, n. 22, p. 2939-2952, 2014.

MORA, C. R.; SCHIMLECK, L. R.; FISIK, F.; MAHON JR., J. M.; CLARK III, A.; AND DANIELS, R. F. Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 39, n. 8, p. 1421-1429, 2009.

ROSA, R. A.; FRANÇA, L. C. A.; SEGUNDINHO, P. G. A.; LUBE, V. M.; PAES, J. B. Caracterização da madeira de maçaranduba (*Manilkara* sp.) por métodos destrutivos e não destrutivos. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 05, n. 01, p. 68-78, 2014.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures**: a review. Madison: USDA Forest Service, 1994. 40 p. (FPL General Technical Report, 70).

SEGUNDINHO, P. G. A.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; CALIL JR., C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1155-1161, 2012.

SHOKRIEH, M. M.; MOHAMMADI, A. R. G. Non-destructive testing (NDT) techniques in the measurement of residual stresses in composite materials: an overview. In: SHOKRIEH, M. M. (Org.). **Residual stresses in composite materials**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2014. p. 58-75.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 291-299, 2005.

TRIANOSKI, R. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de pinus tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos**. 2012. 552 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

Recebido em 23/04/2015

Aceito para publicação em 01/02/2016