

## Efeito do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade da madeira por técnica não destrutiva

Effect of moisture content on the determination of the modulus of elasticity of wood by non-destructive technique

Pedro Nicó de Medeiros Neto<sup>1</sup>, Juarez Benigno Paes<sup>2</sup> e João Gabriel Missia da Silva Silva<sup>1</sup>**Resumo**

Este trabalho objetivou avaliar o efeito de diferentes teores de umidade na determinação do módulo de elasticidade da madeira, com o uso de técnica não destrutiva (dinâmica) e compará-lo com o obtido em técnica destrutiva (estática), na umidade de equilíbrio. Foram utilizadas as madeiras de *Tectona grandis* (10 e 20 anos), *Khaya ivorensis* e *Khaya senegalensis* (19 anos). Corpos de prova com dimensões nominais de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm (tangencial x radial x longitudinal) foram ensaiados em técnica não destrutiva (dinâmica), em três diferentes teores de umidade, que compreenderam a madeira anidra (0%), na umidade de equilíbrio (12%) e saturada (>30%). Para comparar as médias dos módulos de elasticidade estático ( $MOE_{st}$ ) e de ruptura (MOR) por meio de técnica destrutiva foi empregado um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e 10 repetições. Na avaliação do módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_d$ ) e das massas específicas aparentes, foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial, em que foram analisados a madeira (quatro níveis) e o teor de umidade (três níveis) e a interação entre os fatores quando significativo pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ), teve suas médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A espécie *Khaya ivorensis* exibiu os menores valores de módulo de elasticidade dinâmico de 8782,71 MPa. O teor de umidade afetou os valores do módulo de elasticidade dinâmico.

**Palavras-chave:** avaliação não destrutiva; *stress wave*; propriedades mecânicas.

**Abstract**

This work aimed to evaluate the effect of different levels of moisture on the determination of the modulus of elasticity of wood, with the use of non-destructive technique (dynamic) and comparing it to the one obtained through the destructive technique (static) at equilibrium moisture. *Tectona grandis* wood was used with approximately 20 and 10 years of age and 19 year-old *Khaya ivorensis* and *Khaya senegalensis*. Test samples with nominal dimensions of 2.0 x 2.0 x 30.0 cm (tangential x radial x longitudinal) were subjected to non-destructive method at three different moisture contents: anhydrous wood (0%); wood at equilibrium moisture (12%) and saturated wood (> 30%). To compare the means of static modulus of elasticity ( $MOE_{st}$ ) and rupture (MOR) by means of the destructive technique a completely randomized design with four treatments and 10 replicates per treatment was used. In the evaluation of dynamic modulus of elasticity ( $MOE_d$ ) and apparent specific gravity, a completely randomized design in a factorial arrangement was used. For the analysis of wood; four levels of moisture content at three levels and interaction between the factors were studied. If the F test ( $p \leq 0.05$ ) was significant, the averages were compared by Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). *Khaya ivorensis* exhibited the lowest dynamic modulus of elasticity at 8782.71 MPa. The static moisture content had an influence on the values of the dynamic modulus elasticity.

**Keywords:** Nondestructive evaluation; *stress wave*; mechanical properties.

**INTRODUÇÃO**

A madeira por ser um material higroscópico é afetada pela umidade do meio, a qual tem efeito diretamente sobre suas propriedades físico-mecânicas (GLASS; ZELINKA, 2010). Wiedenhoef (2010) e Ross (2015) destacam que a presença de água no interior do material dificulta a industrialização e a comercialização dos produtos madeireiros. Outra variável importante para qualificar os

<sup>1</sup>Doutorando em Ciências Florestais. UFES - Universidade Federal do Espírito Santo / Centro de Ciências Agrárias. Av. Governador Lindemberg - Centro - 29550000 - Jerônimo Monteiro, ES, Brasil. E-mail: [pedroflorestal@gmail.com](mailto:pedroflorestal@gmail.com); [j.gabrielmissia@hotmail.com](mailto:j.gabrielmissia@hotmail.com).

<sup>2</sup>Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. UFES - Universidade Federal do Espírito Santo / Centro de Ciências Agrárias. Av. Governador Lindemberg - Centro - 29550000 - Jerônimo Monteiro, ES, Brasil. E-mail: [jbp2@uol.com.br](mailto:jbp2@uol.com.br).

lenhos das espécies florestais para os mais diversos usos, seja no setor moveleiro ou na construção civil, está relacionada com a massa específica aparente, uma vez que esta influencia na resistência mecânica e a variação dimensional da madeira (MARQUES et al., 2012).

As propriedades mecânicas são geralmente as características mais importantes para avaliar a qualidade de produtos madeireiros para aplicações estruturais (SHMULSKY; JONES, 2011). Dentre estas, destacam-se os módulos de elasticidade, que é a capacidade do material resistir às deformações produzidas pela força aplicada e tornar-se completamente recuperável após as cargas serem removidas, e o de ruptura que reflete a capacidade máxima de um material suportar um dado esforço (KRETSCHMANN, 2010). Assim, a qualidade da madeira pode ser avaliada por técnicas não destrutivas como, raios-X, propriedades vibracionais e transmissão de ondas de som (OLIVEIRA et al., 2005).

O uso de ensaios não destrutivos, como ondas de tensão, é uma importante ferramenta para a determinação das propriedades físico-mecânicas da madeira, como módulo de elasticidade (MORROW et al., 2013; LIU et al., 2014) e massa específica aparente, por possuir diversas vantagens quando comparado aos métodos destrutivos. Dentre estas, Shokrieh e Mohammadi (2014) destacam a economia de tempo e recursos financeiros na obtenção dos dados. Além disso, tais técnicas fornecem informações sem causar falha ou alteração na amostra a ser ensaiada (MIRBOLOUK; ROOHNIA, 2015), sendo uma importante alternativa para estimativas das características da madeira (MANTILLA CARRASCO et al., 2013).

Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes teores de umidade na determinação do módulo de elasticidade da madeira, com o uso de técnica não destrutiva (dinâmica) e compara-lo com o obtido em técnica destrutiva (estática), na umidade de equilíbrio.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Espécies florestais estudadas

Foram utilizadas madeiras de teca (*Tectona grandis* L. f.) com 20 anos, proveniente de um plantio florestal da empresa Celulose Nipo Brasileira – Cenibra S.A., sediada em Belo Oriente - MG, na região do Vale do Rio Doce (19° 15' 00" de latitude Sul e 42° 22' 30" de longitude Oeste), e com 10 anos, do município de Sooretama - ES (19° 08' 41" de latitude Sul e 40° 06' 17" de longitude Oeste) em um plantio consorciado com café.

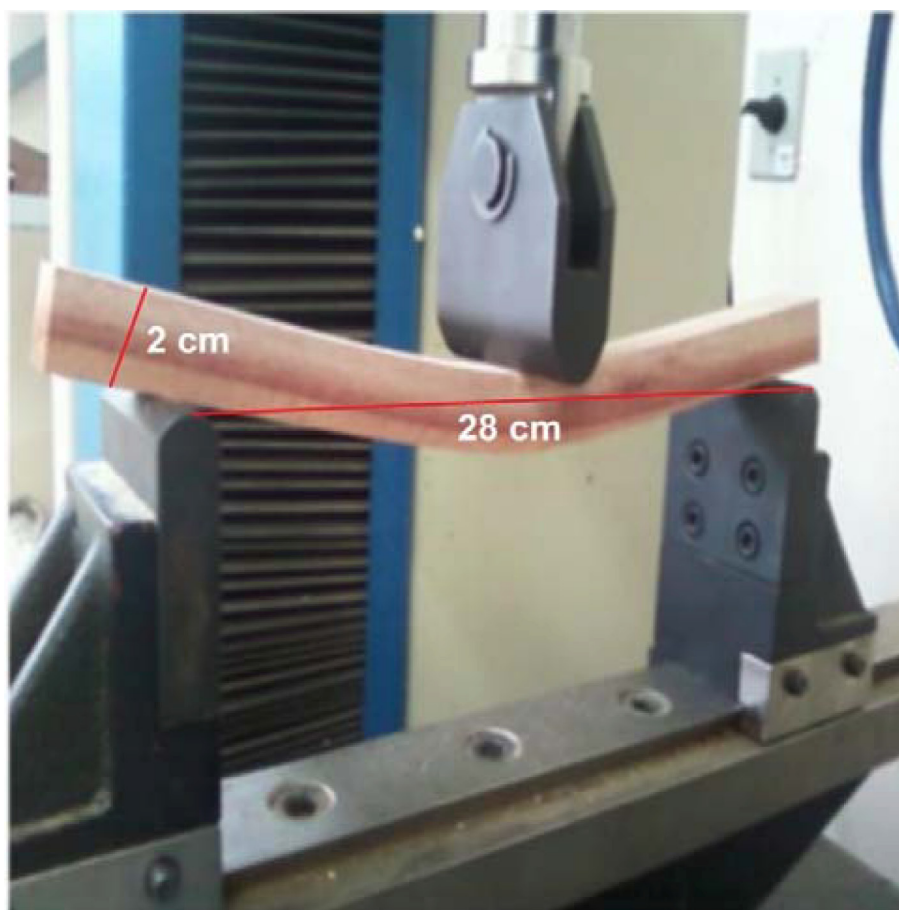
As espécies de mogno africano estudadas foram a *Khaya ivorensis* A. Chev. e *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss., ambas com 19 anos de idade, oriundas de um plantio experimental da Reserva Natural Vale, localizada no município de Linhares - ES (19° 06' a 19° 18' de latitude Sul e 39° 45' a 40° 19' longitude Oeste).

### Propriedades físico-mecânicas

Para monitorar o teor de umidade (base seca) das amostras foram utilizados 10 corpos de prova com dimensões de 2,0 x 3,0 x 5,0 cm (tangencial x radial x longitudinal), conforme a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1997).

Foram avaliados os módulos de elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR) a flexão estática (ABNT, 1997) e o MOE dinâmico. Para tanto, foram utilizados 10 corpos de prova de madeira isentos de defeitos (nós, empenamentos, rachaduras e trincas) com dimensões nominais de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm (tangencial x radial x longitudinal). Essas dimensões foram empregadas em virtude do tamanho do material disponível. Assim, não foi possível obter a relação comprimento do vão: altura de 21, recomendada pela NBR 7190, ABNT (1997), tendo sido empregada a relação de 14, conforme a *American Society for Testing and Materials* - ASTM (2014).

Para o ensaio destrutivo de flexão estática foi utilizada uma máquina universal com capacidade de 100 kN e sistema automático de aquisição de dados, ao ser adotado um vão de 28 cm, conforme ASTM (2014), (Figura 1). Na determinação do MOE estático e MOR a madeira estava com 12 % de umidade.



**Figura 1.** Técnica destrutiva para a determinação do MOE e MOR, demonstrando a o vão e a altura do corpo de prova.  
**Figure 1.** Destructive technique for determination the MOE and MOR demonstrating the width and the height of the test sample.

O módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_d$ ) foi determinado pela técnica não destrutiva de *Stress Wave*, em três diferentes teores de umidade da madeira; anidra (0%), na umidade de equilíbrio (12%) e saturada (> 30%), para cada espécie avaliada. O equipamento usado para determinação do  $MOE_d$  fornece o tempo para que a onda de tensão percorra o comprimento da amostra. A partir desse tempo, foi calculado o  $MOE_d$  (Equação 1).

$$MOE_d = \left(\frac{L}{t}\right)^2 \times \frac{D}{g} \times 10^{-5} \quad (1)$$

em que:  $MOE_d$  = Módulo de elasticidade dinâmico pelo *Stress Wave* (MPa); L = Comprimento do corpo de prova (m); t = Tempo de propagação da onda (s); D = Densidade do corpo de prova ( $kg\ m^{-3}$ ); e g = Aceleração da gravidade ( $m\ s^{-1}$ ).

A massa específica aparente foi determinada, conforme o pressuposto na NBR 7190 (ABNT, 1997) nos mesmos teores de umidade e com os respectivos corpos de prova utilizados no ensaio não destrutivo, ao mensurar o volume com paquímetro digital (0,01 mm) e pesados em balança (0,01g).

### Análise estatística

Para comparar as médias dos módulos de elasticidade estático ( $MOE_s$ ) e de ruptura (MOR) obtidos por meio de técnica destrutiva foi empregado um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (duas espécies de mogno africano e madeira de teca com duas idades) e 10 repetições por tratamento.

Na avaliação do módulo de elasticidade dinâmico e das massas específicas aparentes, foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial, em que foram analisados os fatores; madeira, quatro níveis (duas espécies de mogno africano e madeira de teca de duas idades), teor de umidade na madeira, três níveis (equilíbrio com ambiente, saturada e anidra) e a interação entre os fatores.

Foram verificadas as pressuposições de normalidade (teste de Lilliefors) e homogeneidade das variâncias (Cochran) dos dados. Os valores, quando significativos pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ), tiveram suas médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo das análises de variância (Tabela 1) indicou que não houve interação significativa, quando determinado o módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_d$ ) para as quatro madeiras avaliadas nos três teores de umidade. Resultado contrário foi obtido para a massa específica aparente (MEA) das espécies, em que se detectou interação significativa entre os fatores espécie e umidade.

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância do módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) e massa específica aparente (MEA).  
**Table 1.** Summary of variance analyzes to dynamic modulus of elasticity (MOEd) and apparent specific gravity (ASG).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	
		$MOE_d$ (MPa)	MEA (g cm <sup>-3</sup> )
Espécie	3	26035914,90**	0,290**
Umidade	2	5784611,70**	3,350**
Espécie x umidade	6	1387395,90 <sup>ns</sup>	0,008**
Resíduo	108	1050177,70	0,002

\*\* Significativo ( $p \leq 0,01$ ); <sup>NS</sup> Não significativo ( $p > 0,05$ ) pelo teste de F.

O módulo de elasticidade dinâmico (Tabela 2) exibiu maior valor médio para as madeiras de *T. grandis*, sem exibir diferença estatística entre as idades de 10 e 20 anos e menor para a de *K. ivorensis*. A madeira de *T. grandis* com 10 anos não diferiu da *K. senegalensis*. Com relação ao teor de umidade, o lenho na umidade de equilíbrio (12%) apresentou maior resultado de  $MOE_d$ , quando comparado com a condição anidra (0%). Isto pode ter ocorrido por causa da dificuldade da transmissão de ondas na madeira mais seca influenciadas por rachaduras internas proporcionadas pela secagem.

**Tabela 2.** Massa específica aparente, teor de umidade e módulos de elasticidade e ruptura por técnicas destrutiva e não destrutiva para as espécies estudadas.

**Table 2.** Apparent specific gravity, moisture content, modules of elasticity and rupture by destructive and non-destructive technique of the species studied.

Espécie	$MOE_d$ (MPa)	$MOE_{st}$ (MPa)	MOR (MPa)
Teca 10 anos	10411,49 ab	8771,15 ab	94,00 bc
Teca 20 anos	10979,56 a	10043,79 a	111,35 a
<i>Khaya senegalensis</i>	9994,64 b	8161,79 b	96,75 ab
<i>Khaya ivorensis</i>	8782,71 c	7809,30 b	79,31 c

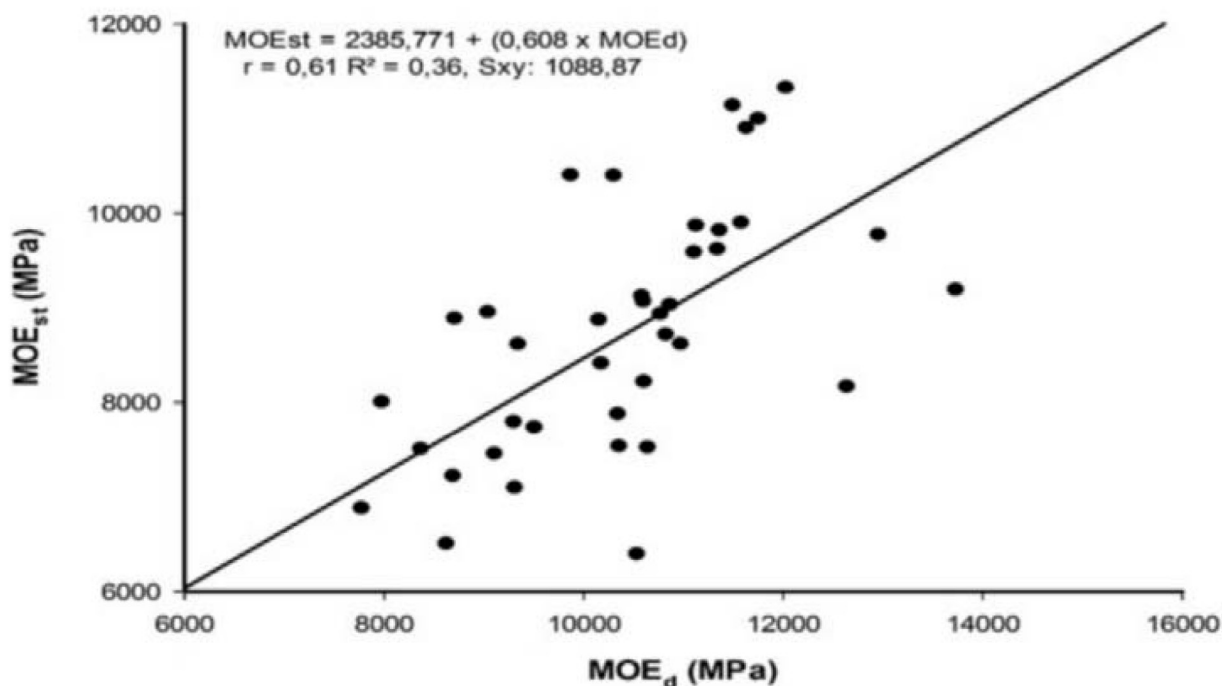
Umidade (%)	$MOE_d$ (MPa)	Espécie	Massa Específica Aparente (g cm <sup>-3</sup> )		
			Teor de Umidade (%)		
			>30	12	0
>30	10113,33 ab	Teca 10 anos	1,06 bA	0,58 bcB	0,53 bcC
12	10381,74 a	Teca 20 anos	1,03 bA	0,63 bB	0,57 bC
0	9631,24 b	<i>Khaya senegalensis</i>	1,26 aA	0,78 aB	0,70 aC
		<i>Khaya ivorensis</i>	1,05 bA	0,54 cB	0,49 cC

$MOE_d$  = Módulo de elasticidade dinâmico; MEA = Massa específica aparente,  $MOE_{st}$  = Módulo de elasticidade estático, MOR = Módulo de ruptura. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e minúscula na vertical, não diferem estatisticamente (Tukey;  $p > 0,05$ ).

Em virtude da heterogeneidade da madeira, a propagação do som é influenciada por fatores inerentes a espécie, como, dimensões das fibras, frequência de raios, densidade, lenho de reação, presença de nós, ângulo de grã, teor de umidade, anisotropia, lenho juvenil e adulto, além de outros fatores como temperatura, umidade relativa, e os procedimentos utilizados para obtenção das medidas (OLIVEIRA; SALES, 2006; HASEGAWA et al., 2011; CALEGARI et al., 2011; GARCIA et al., 2012; ROSS, 2015). Estes fatores podem explicar a diferença dos valores do  $MOE_d$  entre as espécies florestais estudadas.

Com relação ao módulo de elasticidade estático ( $MOE_{st}$ ), este foi inferior ao dinâmico para todas as madeiras ensaiadas, com maiores valores para a *T. grandis* em comparação as espécies de *Khaya*. Esta diferença entre os módulos é resultante da característica viscoelástica do material, que passa

simultaneamente por deformações elásticas e viscosas e, assim o módulo dinâmico superestima o estático (TARGA et al., 2005). Todavia, uma correlação significativa, mediana e positiva de 0,61 foi observada entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático (Figura 2).



**Figura 2.** Diagrama de dispersão e reta de regressão entre  $MOE_{st}$  e  $MOE_d$ .  
**Figure 2.** Scatter plots and regression line between  $MOE_{st}$  and  $MOE_d$ .

Para a massa específica aparente, esta foi inferior quando a madeira estava totalmente seca e com maiores valores para a completamente saturada, fato observado para todas as espécies avaliadas. Isso provavelmente é resultante de uma maior quantidade de água na parede celular (MARQUES et al., 2012), que resulta em valores mais altos de massa específica quando o lenho está úmido. Os maiores resultados foram obtidos para a espécie *Khaya senegalensis* nos três teores de umidade avaliados.

O módulo de ruptura foi menor para as madeiras de menores massas específicas aparentes, fato observado para as espécies *Khaya ivorensis* e teca (10 anos), quando no estado de equilíbrio e anidro (Tabela 2). Isso provavelmente, é resultante da menor deposição de celulose na camada interna das paredes celulares, o que confere uma redução da rigidez da madeira (CALEGARI et al., 2011).

No entanto, observou-se que apesar da *Khaya senegalensis* possuir maior massa específica, apresentou menor MOR que a teca de 20 anos. Isto provavelmente está relacionada a uma maior quantidade de células de parênquima na primeira espécie que favorece a um acréscimo na massa específica, fato não observado na resistência a ruptura da madeira. Pesquisas conduzidas por Motta (2011) com madeira de teca e França (2014) com madeira de *K. senegalensis* confirmam esta diferença na quantidade de células parenquimáticas.

## CONCLUSÕES

Quanto à influência dos módulos de elasticidade dinâmico e estático, a madeira de *Khaya ivorensis* exibiu os menores resultados e as de teca os maiores valores. Isto está relacionado com a massa específica aparente da madeira.

O teor de umidade influenciou nos valores de massa específica aparente, os quais exibiram maiores valores quando a madeira encontrava-se totalmente saturada e menor para a condição anidra.

O teor de umidade influenciou os valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos com o *Stress wave*. Os módulos de elasticidade estáticos foram inferiores aos dinâmicos para todas as madeiras ensaiadas. Isto ocorre por causa da viscoelasticidade da madeira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 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, 2014. 31 p.

CALEGARI, L.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M. Influence of moisture content, specific gravity and specimen geometry on the ultrasonic pulse velocity in *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood. *Ciência da Madeira, Pelotas*, v. 2, n. 2, p. 64-74, 2011.

FRANÇA, T. S. F. A. **Caracterização tecnológica das madeiras de duas espécies de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev. E *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss.)**. 2014, 105 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.

GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. LATORRACA, J. V. F.; MATOS, J. L. M.; WANESSA A. SANTOS, W. A.; SILVA, R. F. M. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. *Wood Science and Technology*, Berlin, v. 52, p. 41-52, 2012.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: USDA, Forest Service, 2010. p. 80-99. (FPL General Technical Report, 190).

HASEGAWA, M.; TAKATA, M.; MATSUMURA, J.; ODA, K. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. *Ultrasonics*, v. 51, n. 3, p. 296-302, 2011.

KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: USDA, Forest Service, 2010. p. 100-145. (FPL General Technical Report, 190).

LIU, H.; GAO, J.; CHEN, Y.; LIU, Y. Effects of moisture content and fiber proportion on stress wave velocity in cathay poplar (*Populus cathayana*) wood. *BioResources*, Raleigh, v. 9, n. 2, p. 2214-2225, 2014.

MANTILLA CARRASCO, E. V.; PEREIRA, N. C. S.; ALVES, R. C. Estimativa da densidade aparente, resistência à compressão e módulo de elasticidade da madeira por meio do resistógrafo. *Construindo*, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 45-51, 2013.

MARQUES, S. S.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, E. S.; SILVA, A. G.; FIEDLER, N. C. Estudo comparativo da massa específica aparente e retratibilidade da madeira de pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.) nativa e de reflorestamento. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 373-380, 2012.

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.

MORROW, C.; GORMAN, T.; EVANS, J.; KRETSCHMANN, D.; HATFIELD, C. Prediction of wood quality in small-diameter Douglas-fir using site and stand characteristics. *Wood and Fiber Science*, Madison, v. 45, n. 1, p. 49-61, 2013.

MOTTA, J. O. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* L.f. proveniente do Vale do Rio Doce, Minas Gerais**. 2011. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

OLIVEIRA, F. G. R.; CANDIAN, M.; LUCCHETTE, F. F.; SALGON, J. L.; SALES, A. A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (*Goupia glabra*). **Building and Environment**, Oxford, v. 40, n. 2, p. 297-300, 2005

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. **Bioresource Technology**, Essex, v. 97, n. 18, p. 2443-2446, 2006.

ROSS, R. J. Nondestructive testing and evaluation of wood. In: ROSS, R. J. (Ed.). **Nondestructive evaluation of wood**. 2.ed. Madison: USDA, Forest Service, 2015. p. 1-4. (FPL General Technical Report, 238).

SHMULSKY, R.; JONES, P. D. **Forest products and wood science: an introduction**. 6.ed. Iowa: Wiley-Blackwell, 2011. 483 p.

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.

WIEDENHOEFT, A. Structure and function of wood. In: **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: USDA, Forest Service, 2010. p. 62-79. (FPL General Technical Report, 190).

Recebido em 20/12/2015

Aceito para publicação em 04/05/2016

