



## ESTIMATIVA DAS CONSTANTES DE RIGIDEZ DE MADEIRAS TROPICAIS ULTRA-DURAS ORIENTADAS NAS TRÊS DIREÇÕES PRINCIPAIS

Rejane Costa Alves<sup>1</sup>, Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco<sup>2</sup>

1 Doutoranda em Engenharia de Estruturas, de Engenharia de Estruturas,  
Universidade Federal de Minas Gerais, rejanecosta@dees.ufmg.br

2 Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade  
Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Brasil.

Recebido em: 06/05/2013 – Aprovado em: 17/06/2013 – Publicado em: 01/07/2013

### RESUMO

Este trabalho trata da determinação da constante de rigidez (CR) da madeira por método de propagação de onda ultrassônica. Para a determinação da velocidade de propagação de onda foi utilizado o aparelho de ultrassom James V Mk II com transdutor de 150 kHz. As madeiras ensaiadas foram angelim pedra, angelim vermelho, castanheira, garapa, muiracatiara, pequi e roxinho. De cada espécie confeccionou-se sete corpos de prova para cada direção analisada (longitudinal, tangencial e radial). A determinação do teor de umidade, densidade aparente e módulo de elasticidade à compressão seguiram as prescrições da NBR 7190 (1997) (ABNT 1997). O método utilizado mostrou ser eficiente para estimar as constantes de rigidez da madeira. Os valores de  $R^2$  foram 91%, 88% e 55% para as direções tangencial, radial e longitudinal, respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaio não destrutivo, ultrassom, constante de rigidez, madeira.

### ESTIMATE OF ELASTIC STIFFNESS CONSTANTS OF ULTRA-HARD TROPICAL WOOD ORIENTED IN THE THREE MAIN DIRECTIONS

#### ABSTRACT

This study discusses determination of the elastic stiffness constant in wood by the ultrasound wave propagation method. For determination of wave propagation speed, the James V Mk II ultrasound device with 150 kHz transducer was used. The woods tested were angelim pedra, angelim vermelho, castanheira (Brazil nut), garapa, muiracatiara, pequi and roxinho (purpleheart). Seven test specimens were created of each species for each direction analyzed (longitudinal, tangential and radial). Determination of moisture content, apparent density and compression elasticity modulus followed the determinations of NBR 7190 (1997). The method used proved to be efficient in estimating the wood elastic stiffness constants. The  $R^2$  values were 91%, 88% and 55% for the tangential, radial and longitudinal directions, respectively.

**KEYWORDS:** Non-destructive testing, ultrasound, elastic stiffness constant, wood.

## INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas de ultrassom para a caracterização elástica da madeira foi iniciado no Reino Unido por Hearmon em 1965 (BUCUR, 2006). E a partir do final de 1970, houve a estimulação destes testes em todo o mundo, por meio de simpósios. Autores como BOLZA & KLOOT (1963), KENNEDY (1965), BODIG & GOODMAN (1972), CURRY & TORY (1976), WARREN (1979), ATHERTON (1980) e BUCUR (1984) contribuíram para percepção da importância da técnica de propagação de ondas acústicas para avaliação de madeira. Levando em consideração a utilização de ondas acústicas com frequências maiores que 20 kHz são utilizados métodos de ultrassom, que utilizam um cristal de quartzo que converte corrente elétrica em ondas oscilatórias.

No Brasil, quando se refere a métodos não destrutivos para avaliação em madeira, geralmente se associa a técnicas de ultrassom (BALLARIN & NOGUEIRA (2005); MINÁ et al., (2004); OLIVEIRA et al., (2006); CANDIAN & SALES (2009); DEL MENEZZI et al., (2010); STANGERLIN et al., (2010)). Na literatura há poucos estudos que estimam as propriedades da madeira por meio de métodos não destrutivos nas três direções principais da madeira (longitudinal, tangencial e radial), principalmente quando se refere a estudos com maiores intervalos de densidade.

Entre os pesquisadores há uma divergência de opiniões quando se avalia o módulo de elasticidade da madeira por meio de propagação de ondas. Alguns como ROSS et al., (1998), STEIGER (1997), GONÇALVES & BARTHOLOMEU (2000), GONÇALEZ et al., (2001), LOURENÇO et al., (2007) e TELES et al., (2011) utilizam o módulo de elasticidade dinâmico (Edin) como resposta da relação entre a velocidade de propagação da onda e a densidade da madeira. Outros como BUCUR (1983), SANDOZ (1989), BALLARIN & NOGUEIRA (2005) e GONÇALVES et al., (2011) os chamam de constante elástica (CR), já que afirmam que para ser considerada como Edin, é necessário ser levado em consideração uma série de outros fatores, como por exemplo, os coeficientes de Poisson. E por isto poderá ocorrer em alguns casos à comparação da CR ou Edin com valores de módulo de elasticidade estático (Eest).

Também NOGUEIRA & BALLARIN (2003) utilizaram esta técnica para comparar com o Eest da madeira de *Pinus taeda* nas três direções da madeira. De acordo com os autores o método ultrassônico se mostrou eficiente para as direções longitudinais e radiais, com valores de coeficiente de determinação das regressões lineares de  $R^2= 97\%$  e  $R^2= 82\%$  respectivamente. Já para a direção tangencial, este método não se mostrou eficiente para avaliar o módulo de elasticidade, uma vez que o  $R^2$  foi de 42%.

FEIO et al., (2004) determinaram os coeficientes de determinação do módulo de elasticidade e a resistência à compressão normal às fibras, por método ultrassônico, para a madeira de *Castanea sativa* Mill. Para a direção paralela às fibras, esta correlação foi de  $R^2= 74\%$ . CANDIAN & SALES (2009) utilizaram o mesmo método de ondas para correlacionar o módulo de elasticidade da madeira de *Eucalyptus citridora*. Como resultado, conseguiram-se valores de  $R^2=76\%$ , demonstrando ser uma ferramenta importante para avaliar o módulo de elasticidade. YANG et al., (2008) investigaram a velocidade de propagação da onda ultrassônica em função do Edin para um total de 160 peças de Douglas-fir (*Pseudotsuga menzresii*) e verificaram correlação de  $R^2=80\%$ .

MINÁ et al., (2004) investigaram o uso da técnica de ultrassom para avaliar o

Edin, por meio da comparação com ensaio de flexão estática, em 50 postes de madeira de eucalipto. Os resultados deste estudo mostraram uma boa relação entre as propriedades determinadas por emissão ultrassônica e a flexão estática, com valores de coeficiente de determinação variando de  $R^2 = 55\%$  a  $R^2 = 62\%$  entre  $E_{din}$  e  $E_{est}$ . STANGERLIN et al., (2008) utilizaram este método para obter o módulo de elasticidade em madeiras de Guajuvira (*Patagonula americana*) e Pinheiro-do-Paraná (*Araucaria angustifolia*). Para avaliar a sensibilidade do método ultrassônico, os corpos-de-prova foram ensaiados destrutivamente à compressão paralela às fibras, com determinação do módulo de elasticidade estático. Os resultados mostram um coeficiente de determinação de 84% e 88% entre  $E_{din}$  e  $E_{est}$  para a madeira juvenil e adulta de Guajuvira, respectivamente. Para a madeira de Pinheiro-do-Paraná os valores foram 91% e 95% para madeiras juvenis e adultas, respectivamente. Assim, segundo os pesquisadores citados, este método é uma alternativa confiável para determinar o módulo de elasticidade (E).

O presente estudo tem com objetivo estimar os valores da CR através da propagação de ondas ultrassônicas em madeiras tropicais ultra-duras orientadas nas três direções principais.

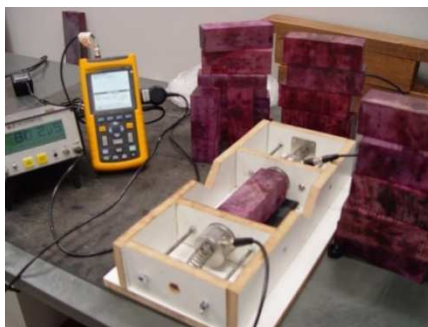
## MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios destrutivos e não destrutivos foram realizados no Centro de Pesquisa Avançado da Madeira e novos Materiais (CPAM<sup>3</sup>), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). As madeiras ensaiadas foram angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointeii*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*). De cada espécie confeccionou-se sete corpos de prova (CPs) para cada direção analisada (longitudinal, tangencial e radial).

Os CPs utilizados para os ensaios não destrutivos também foram utilizados para determinar o teor de umidade, densidade aparente e o módulo de elasticidade à compressão. Os procedimentos de ensaio seguiram as prescrições da NBR 7190 (1997). Os CPs ensaiados à compressão (147 amostras) foram orientados nas direções radial, tangencial e longitudinal.

A umidade e a densidade aparente foram determinadas no Laboratório de Caracterização Física da Madeira (LACAF) de acordo com a NBR 7190 (1997), e suas correções foram realizadas utilizando a ISO 3130 (1975) e a ASTM D 2395 (1998) (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 1998)

Para a determinação da velocidade de propagação de ondas foi utilizado o aparelho de ultrassom James V Mk II (FIG. 1) com transdutor de 150 kHz. Este aparelho detecta o pulso acústico emitido por transdutores localizados em cada uma das seções transversais do CP, ou seja, transmitem pulsos elétricos para o cristal piezelétrico (transdutores), que os transformam em ondas ultrassônicas.



**FIGURA 1** – ensaio com equipamento de ultrassom

Para a determinação das CRs nas três direções foi utilizada a equação 1, indicada por SANDOZ (1989), GONÇALVES & BARTHOLOMEU (2000) e NOGUEIRA & BALLARIN (2003).

$$C.R. = \frac{V_o^2 \times \rho \times 10^{-5}}{g} \quad (1)$$

em que:

C.R = Constante de rigidez, MPa;

$V_o$  = velocidade de propagação da onda,  $m.s^{-1}$ ; e

$\rho$  = densidade da madeira;  $kg.m^{-3}$ ;

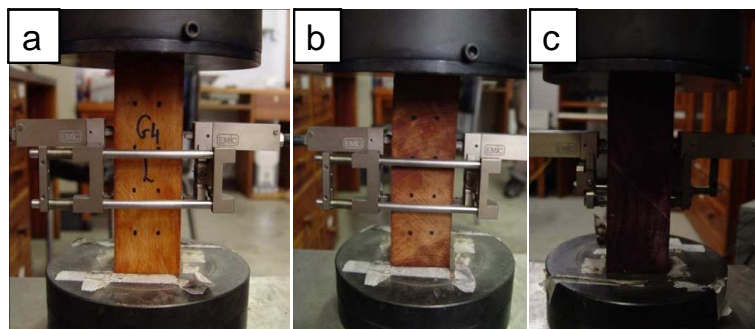
$g$  = Aceleração da gravidade,  $m.s^{-2}$ .

Segundo a NBR 5800 (2007) (ABNT, 2007) o comportamento do CP deve ser de pelo menos três vezes o comprimento de onda. Na Tabela 1 é apresentado o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e o comprimento mínimo do CP. Como o comprimento dos CPs utilizados foram de 150 mm, esta especificação está atendida.

**TABELA 1** – Valor médio de comprimento de onda na direção longitudinal, e o comprimento mínimo do corpo-de-prova sugerido pela norma brasileira para o transdutor de 150 kHz

Madeiras	150kHz	
	Comp. onda ( $\lambda$ )	Comprimento CP mínimo (mm)
Angelim pedra	350	1100
Angelim vermelho	290	900
Castanheira	320	1000
Garapa	330	1000
Muiracatiara	310	1000
Pequi	320	1000
Roxinho	370	1100

Na FIG. 2 são mostrados os CPs durante o ensaio de compressão, com CPs orientados nas direções longitudinal, radial e tangencial.



**FIGURA 2** – Ensaio de compressão com utilização do “clip-gage”; a) longitudinal; b) radial; e c) tangencial

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são mostrados os valores médios de densidade aparente a 12% de umidade, velocidade de propagação, Eest e as CRs para cada madeira.

Observa-se que para as madeiras analisadas na direção longitudinal (TAB. 2), os valores de velocidade de propagação de ondas variam de 4378 m/s a 5531 m/s. GONÇALEZ et al., (2001) encontraram valores de velocidades de propagação de ondas longitudinais, com a utilização do transdutor de 80 kHz, variando de 5146 m/s a 5319 m/s, com intervalo de densidades de 670 kg.m<sup>-3</sup> a 780 kg.m<sup>-3</sup>. Enquanto STANGERLIN et al., (2010) valores de 5180 a 5269 m/s para a madeira de *Eucalyptus grandis*, e de 3534 m/s a 5063 m/s para madeiras de *Pinus elliottii*.

Na direção tangencial (TAB. 2), os valores de velocidade de propagação de ondas variam de 1555 m/s a 1915 m/s, no intervalo de 650 a 1150 kg.m<sup>-3</sup>. Valores maiores de velocidade de propagação da onda foram encontrados por LOURENÇO et al., (2007), que acharam valores de 4527,2 m/s e 4834,7 m/s obtidos pelo método indireto de medição, para a madeira de castanheira proveniente do norte de Portugal, com densidade de 570 e 600 Kg.m<sup>-3</sup>, respectivamente. Para a direção radial (TAB. 2), os valores de velocidade de propagação da onda variaram de 1819 m/s a 2156 m/s, no intervalo de 650 a 1150 kg.m<sup>-3</sup>. LOURENÇO et al., (2007) novamente encontraram valores superiores para a mesma direção, de 4481,5 m/s e 4619,9 m/s para as densidades de 570 Kg.m<sup>-3</sup> e 600 Kg.m<sup>-3</sup>, respectivamente. No entanto utilizaram o método indireto de ensaio, em que os dois transdutores são colocados na mesma face.

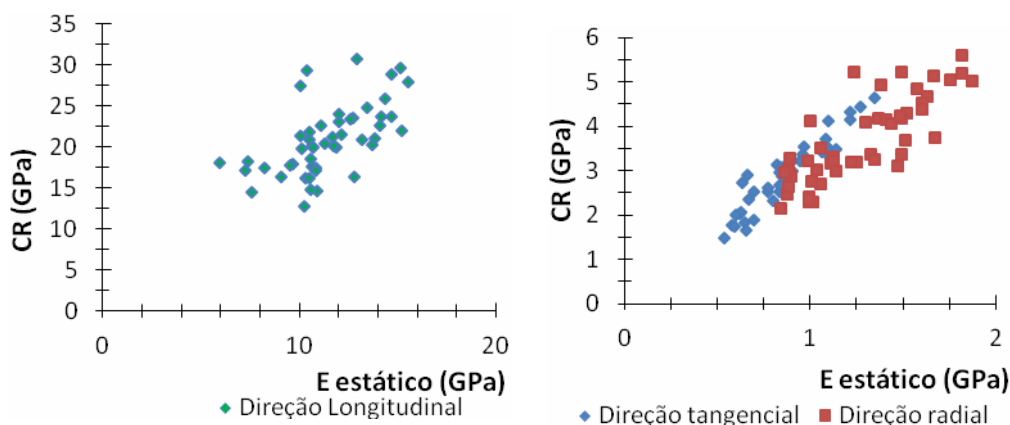
Para a constante de rigidez na direção tangencial, os valores variam de 1685 a 3864 MPa. Já na direção radial, estes valores variam de 2069 a 5029 MPa. E os maiores valores foram para constante de rigidez na direção longitudinal, que variam de 16481 a 28544 MPa. GONÇALEZ et al., (2001) encontraram valores de Edin variando de 19770 a 20650 MPa para madeiras no intervalo de 670 a 780 Kg.m<sup>-3</sup>. Outros autores também calcularam a mesma característica, como STANGERLIN et al., (2008), com valores variando de 15698 MPa a 19884 MPa para madeiras de *Eucalyptus grandis*, cuja densidade foi de 720 Kg.m<sup>-3</sup> e 4600 MPa a 5613 MPa para madeiras de *Pinus elliottii*, cuja densidade é de 670 Kg.m<sup>-3</sup>. Nota-se com uma simples observação que, os valores de velocidade de propagação não possuem relação direta com a densidade da madeira.

**TABELA 2 – Resultados de ensaio**

Madeiras	$\rho$ a 12% (kg.m <sup>-3</sup> )	150 kHz			CR (MPa)			Eest (MPa)		
		Long.	Tang	Rad.	Long.	Tang.	Rad.	Long.	Tang.	Rad.
Castanheira	696 (35) *	4863 (182,6)	1555 (56,2)	1819 (72,0)	16481 (1495)	1685 (150)	2069 (621)	9007 (1173)	678 (169)	969 (78)
A. pedra	761 (42)	5318 (110,5)	1681 (154,3)	1962 (79,9)	21512 (1193)	2183 (477)	3055 (349)	12077 (1174)	750 (94)	1052 (226)
Muiracatiara	780 (63)	4689 (378,5)	1572 (202,4)	1967 (40,6)	17163 (2583)	1971 (609)	2765 (219)	8729 (923)	788 (267)	1055 (152)
Pequi	783 (38)	4751 (201)	1858 (31,4)	2080 (73,3)	17689 (1518)	2706 (172)	3206 (320)	7345 (1553)	821 (84)	911 (85)
Roxinho	933 (23)	5531 (167)	1810 (27,6)	2156 (88,5)	28544 (1610)	3059 (151)	4352 (556)	12024 (1999)	911 (85)	1486 (275)
Garapa	946 (17)	4920 (177)	1915 (49,4)	2084 (36,4)	22883 (1664)	3465 (197)	4046 (123)	12258 (1448)	1048 (169)	1483 (114)
A. vermelho	1131 (20)	4378 (142)	1847 (72,6)	2129 (31,1)	21679 (1123)	3864 (319)	5029 (248)	9909 (808)	1228 (92)	1600 (237)

\*Desvio padrão em Kg/m<sup>3</sup> e m/s.

Na Figura 3 são mostrados os gráficos da relação entre Eest e CR, nas três direções.



**FIGURA 3–** Módulo de elasticidade estático (E estático) em função das constantes de rigidez.

Os resultados da análise de regressão são apresentados na Tabela 3. A correlação entre Eest e as CRs é sempre significativa a 5% de nível de significância para as três direções dos CPs estudados ( $p$ -valor < 0,005). Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para as madeiras são, respectivamente, 55%, 91% e 88% para as direções longitudinal, tangencial e radial. NOGUEIRA & BALLARIN (2003) encontraram valores de 97%, 42% e 82% para a madeira de *Pinus taeda*, nas direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. Esta discrepância pode ser atribuída a espécie de madeira e ao intervalo pequeno de densidade estudada. Em contrapartida, FEIO et al., (2004) determinaram valores de  $R^2=74\%$  para a madeira de castanheira na direção longitudinal e 86% para as direções tangencial e radial. STANGERLIN et al., (2008) obtiveram valores de  $R^2$  variando de 84 a 88% para madeira de *Patagonula americana*, cuja densidade é 740 Kg.m<sup>-3</sup> e de 91 a 95% para a madeira de *Araucaria angustifolia*, cuja densidade é 520 Kg.m<sup>-3</sup>, por meio de compressão paralela às fibras.

**TABELA 3**– Análise de regressão entre o módulo de elasticidade estático e a constante de rigidez em cada direção analisada

Direção	Equação	R <sup>2</sup> ajust (%)	R <sup>2</sup> (%)	p-valor
<b>Longitudinal</b>	$E= 3994 + 0,376\rho(V)^2$	55	54,7	0,000
<b>Tangencial</b>	$E= 242+ 0,23\rho(V)^2$	91	91	0,000
<b>Radial</b>	$E= 259+ 0,295\rho(V)^2$	88	87,6	0,000

## CONCLUSÃO

O método utilizado mostrou ser eficiente para estimar as constantes de rigidez da madeira. Os valores de R<sup>2</sup> foram 91%, 88% e 55% para as direções tangencial, radial e longitudinal, respectivamente.

## AGRADECIMENTO

Ao CNPq e a FAPEMIG pelo auxílio financeiro.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard test method of for specific gravity of wood based materials**. ASTM designation D 2395, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Ensaio não destrutivo – Ultrassom: classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas** (Projeto NBR 58 000 10001). Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

ATHERTON, G. H. Preliminary study of proportional limit as a predictor of ultimate strength in bending. **Oregon. Forest. Prod. J.** v. 30, n. 1, p. 47-53. 1980.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultrassom. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

BODIG, J.; GODMANN, J. R. Prediction of elastic parameters for wood. **Wood Sci.** v. 5, p. 249-264. 1972.

BOLZA, E.; KLOOT, N. M. **The mechanical properties of 174 Australian timbers**. Div. For. Prod. CSIRO Melbourne Tech. Paper. n. 25. 1963.

BUCUR, V. An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. **Ultrasonics**, v. 21, p. 116-126. 1983.

BUCUR, V. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. **Wood Sci. Technol.** v. 18, p. 255-265. 1984.

BUCUR, V. Theory of and experimental methods for acoustic characterization of wood. In: **Acoustics of wood**. Berlin: Springer-Verlag. 2 ed, p. 39-104, 2006.

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, out.-dez. 2009.

CURRY, W. T.; TORY, J. R. **The relation between the modulus of rupture and modulus of plasticity of timber**. Aylesbury, Bucks Building Research Establishment, Princess Risborough Laboratory, Current paper. n. 30. 1976.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; 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 Amazônica**. Manaus, v. 40 n. 2, 2010.

FEIO, A. O.; MACHADO, J. S.; LOURENÇO, P. B. **Caracterização de propriedades da madeira de castanheira na direção perpendicular ao fio – recurso a técnicas destrutivas e não destrutivas de ensaio**. 2004.

GONÇALEZ, J. C.; VALLE, A. T.; COSTA, A. F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultrassônicas (ultrassom). **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 81-92, 2001.

GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*. Construções rurais e ambiência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 269-274, 2000.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. . Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression test. **Wood and Fiber Science**, v. 43, p. 64-75, 2011.

ISO 3130. **Wood determination of moisture content for physical and mechanical tests**. International Organization for Standardization, Switzerland. 1975.

KENNEDY, E. I. **Strength and related properties of wood grown in Canada**. Dept. of Forestry Publications. n. 1104, Ottawa. 1965.

LOURENÇO, P. B.; FEIO, A. O.; MACHADO, J. S. Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood. **Construction and Building Materials**, v. 21.1617-1627. 2007.

MINÁ, A. J. S.; OLIVEIRA, F. G. R.; CALIL JR., C.; DIAS, A. A.; SALES, A. Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 188-196, jun. 2004.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A. W. **Sensibilidade dos ensaios de ultra-som à ortotropia elástica da madeira.** Pan- American Conference for Nondestructive Testing. 2003.

OLIVEIRA, F. G. R.; PEITL, M. K.; CANDIAN, M.; SALES, A. Efeito do comprimento do corpo-de-prova na velocidade ultra-sônica em madeiras. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 141-145, 2006.

ROSS, R.J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, Madison, US, v. 48, n. 1, p. 14-19, 1998.

SANDOZ, J. L. **Triagetfiabilité de bois de construction.** 186p. Tese (Doutorado em Sciences Techniques) – Departamento de Génie Civil, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Suisse. 1989.

STANGERLIN, D. M.; GONÇALVES, J. C.; GONÇALVES, R.; SANTINI, E. J.; CALEGARI, L.; MELO, R. R.; GATTO, D. A. Avaliação de tipos de ondas geradas por dois modelos de transdutores para determinação do módulo de elasticidade dinâmico. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 691-700, out.-dez. 2010a.

STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; SANTINI, E. J.; DOMINGUES, J. M. X.; GATTO, D. A.; MELO, R. R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não-destrutivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, n. 2, p. 145-150, 2008.

STEIGER, R. Sortierung von Rund-und SchnittholzmittelsUltraschall. **Holzforschung und Holzverwertung**, v. 49, n. 2, p. 28-35, 1997.

TELES, R. F.;

DEL MENEZZI, C. S.; SOUZA, F.; SOUZA, M. R. Nondestructive evaluation of a tropical hardwood: interrelationship between methods and physical-acoustical variables. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 2, n. 1, p. 1-14, 2011.

YANG, T.; WANG, S.; LIN, C.; TSAI, M. Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 487-493. 2008.

WARREN, W. G. **A critical examination of the statistical techniques available for estimating exclusion limits from in-grade tests.** Technical Rapport, Western Forest Prod. Lab., Vancouver, B. C. 1979.