



Journal homepage:
www.arvore.org.br/seer

INFLUÊNCIA DA DENSIDADE NA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA EM SETE ESPÉCIES DE MADEIRA TROPICAIS

RESUMO

A tomografia acústica aplicada em peças de madeiras permite que seja determinada sua seção transversal por meio do princípio físico de emissão e de percurso de ondas acústicas. No entanto os valores da velocidade de propagação sofrem influência de alguns fatores, dentre eles, a densidade da madeira. Foram avaliadas sete espécies de madeiras tropicais por meio do equipamento tomógrafo acústico Fakopp 3D. Toda a metodologia destrutiva experimental seguiu as prescrições da NBR 7190/97, tendo sido realizados os ensaios de densidade e teor de umidade. O trabalho tem como objetivo analisar a influência da densidade aparente na velocidade de propagação de onda em sete espécies de madeiras tropicais, com densidade variando de 650 a 1150 Kg.m⁻³. Como resultado foi verificado que os valores de velocidade de propagação da onda nas madeiras diferenciaram-se entre si. Isto foi verificado pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. Os maiores valores foram encontrados para a madeira de garapa e os menores valores para a madeira de muiracatiara. O coeficiente de determinação entre a velocidade de propagação da onda e a densidade aparente dos corpos-de-prova foi 58%.

PALAVRAS-CHAVE: Tomógrafo Acústico; Velocidade de Propagação; Densidade Aparente da Madeira.

EFFECT OF DENSITY ON WAVE PROPAGATION SPEED IN SEVEN TROPICAL WOOD SPECIES

ABSTRACT

Acoustic tomography applied to pieces of wood allows their cross section to be mapped by means of the physical principle of acoustic wave emission and path. However, propagation speed values undergo the effect of some factors, among them, wood density. Seven species of tropical wood were evaluated by means of the acoustic tomography equipment Fakopp 3D. The entire destructive experimental methodology followed the requirements of NBR 7190/97, carrying out tests for density and moisture content. The purpose of this study is to analyze the effect of apparent density on wave propagation speed of seven tropical wood species, with densities ranging from 650 to 1150 Kg.m⁻³. As a result, it was observed that the values for wave propagation speed of the woods differed among themselves by the Tukey test at 95% probability. The greatest values were found for garapa wood and the lowest values for muiracatiara wood. The coefficient of determination between wave propagation speed and apparent density of the test specimens was 58%.

KEYWORDS: Acoustic Tomography; Propagation Speed; Apparent Density of Wood.

Natural Resources, Aquidabã, v.3, n.1, Set, Out, Nov, Dez 2012, Jan, Fev 2013.

ISSN 2237-9290

SECTION: *Produção Florestal*



DOI: 10.6008/ESS2237-9290.2013.001.0001

Rejane Costa Alves

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8580447433109486>
rejanecosta@ufmg.br

Tatiane Martins

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
tatimrts@hotmail.com

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3716965047168777>
mantilla@dees.ufmg.br

Received: 08/01/2013

Approved: 04/02/2013

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Referencing this:

ALVES, R. C.; MARTINS, T.; CARRASCO, E. V. M..
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. DOI: <http://dx.doi.org/10.6008/ESS2237-9290.2013.001.0001>

INTRODUÇÃO

A influência da densidade da madeira no comportamento da velocidade de propagação da onda ultrassônica foram estudadas por Oliveira e Sales (2000), Bartholomeu (2001), Carrasco e Azevedo Junior (2003), Wang et al. (2003) e Oliveira e Sales (2005). As conclusões são contraditórias.

Bartholomeu (2001) afirma que a velocidade de propagação da onda esta mais associada à estrutura celular da madeira do que a sua densidade aparente. O mesmo é descrito por Oliveira e Sales (2005), quando afirmam que mais importante que a própria densidade, é a estrutura anatômica da madeira, e dizem que um dos exemplos mais claros é a obtenção de maiores velocidades em algumas coníferas, mesmo com menores valores de densidade.

Já Carrasco e Azevedo Junior (2003), alegam que o aumento da densidade deveria provocar a redução da velocidade de propagação da onda. Em contrapartida, Oliveira e Sales (2000) por sua vez afirmam que se mantendo a umidade da madeira constante, o aumento da densidade propicia uma maior velocidade de propagação em qualquer das três direções da madeira. Wang et al. (2003), asseguram que o comportamento da velocidade é diferente dependendo da direção do estudo. Os autores concluíram que no sentido longitudinal, a velocidade tende a diminuir linearmente com o aumento da densidade, e, no sentido radial, tende a aumentar. Brancheriau et al. (2008) afirmam que há uma tendência da diminuição da velocidade até o ponto de saturação da fibra, devido aos efeitos combinados da diminuição do módulo de elasticidade e o aumento da densidade. O que é confirmado por SHAJI et al. (2000), quando mencionam que a velocidade de propagação ultrassônica depende da densidade e das propriedades elásticas do material.

Carrasco e Azevedo Júnior (2002) afirmam que mesmo que haja aumento da densidade, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo aumento da rigidez. Já de acordo com Oliveira e Sales (2005) a influência da densidade nas ondas ultrassônicas é dependente da espécie analisada, da estrutura da madeira e da direção da medição. Pereira et al. (2007) calcularam a correlação da velocidade de propagação da onda com a densidade para árvores das madeiras de eucalipto, guapuruvu e pau-brasil. E acharam valores de R^2 de 0,50, 0,74 e 0,53 para estas madeiras, respectivamente. No entanto afirmam devem ser feitas mais experimentações para relacionar áreas internas do lenho com valores de densidade de árvores maduras. Rollo (2009) relata em seu trabalho que a densidade básica apresenta um coeficiente de correlação de Pearson com a velocidade de onda mecânica de $r = 0,64$ quando se leva em consideração todo o conjunto de espécies. Já quando divide este conjunto de espécies em classes de densidade, o valor encontrado é de $r = 0,65$ para a classe de menores densidades básicas e $r = 0,44$ para a classe com madeiras de maiores densidades.

Amodei et al. (2010) utilizaram o aparelho tomógrafo de impulso para determinar a presença de defeitos na madeira de teca (*Tectona grandis*) através da diferença de densidade

existente no tronco da árvore. Em função das controversas sobre a influência da densidade na velocidade de propagação da onda ultrassônica encontradas na literatura e o pouco estudo sobre as ondas mecânicas, o presente trabalho tem como objetivo verificar a influência da densidade aparente na velocidade de propagação de onda mecânica em sete espécies de madeiras tropicais, com densidade variando de 650 a 1150 Kg.m⁻³.

MATERIAL E MÉTODO

Os ensaios destrutivos e não destrutivos foram realizados no Centro de Pesquisa Avançado da Madeira e novos Materiais (CPAM³), 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 lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*).

Foram utilizadas sete vigas de 2500 mm de comprimento e seção transversal de 150 x150 mm para cada espécie de madeira. As mesmas foram secas ao ar e posteriormente desdobradas em peças menores. A partir de cada viga de madeira foram retirados cubos com dimensões de 150 mm. Na figura1 é mostrado o esquema de retirada dos CPs.

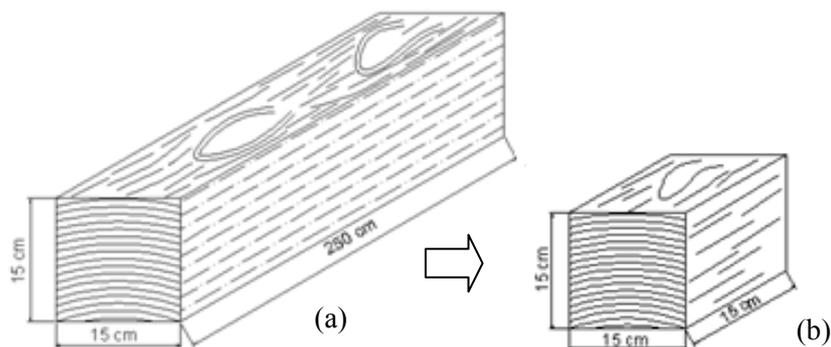


Figura 1: Esquema de retirada dos corpos de prova. (a) Viga de madeira; (b) Cubo de 15 cm.

Para o ensaio de tomografia acústica foi utilizado CPs com formato cúbico de 150 mm de dimensão, conforme Figura 2. Em cada peça, oito sensores foram acoplados, 2 sensores em cada face vertical, alinhados de modo a formar um plano.

A umidade e a densidade aparente calculados em estufa foram determinadas de acordo com a NBR 7190 (1997). E a umidade e densidade aparente dos CPs (cubo 150 mm) foram determinadas utilizando as equações apresentadas pela ASTM D 2395 (1998) e a ISO 3130 (1975). Para estimativa do teor de umidade dos CPs (U_{cp}) antes da realização dos ensaios foi utilizada a equação 1 deduzida da equação 2 da ASTM D 2395 (1998).

$$D_{ap,cp} = \frac{D_{ap,in}}{1 - D_{ap,in} \times 0,009 \times (U_{in} - U_{cp})} \quad (1)$$

$$U_{cp} = \frac{D_{ap,in} - D_{ap,cp}}{D_{ap,in} \times D_{ap,cp} \times 0,009} + U_{in} \quad (2)$$

em que:

U_{in} = Teor de umidade determinado experimentalmente, %;

U_{cp} = Teor de umidade do corpo de prova, %;

$D_{ap,cp}$ = Densidade aparente do corpo de prova, kg/m³;

$D_{ap,in}$ = Densidade aparente inicial, com U% de umidade (Determinado experimentalmente), kg/m³.

O aparelho utilizado foi o *Fakopp 3D Acoustic Tomograph*, com 8 transdutores piezos elétricos, e um *software*. Na Figura 2 visualiza-se a posição dos transdutores instalados para o ensaio. Este ensaio consiste em impulsionar cada transdutor com pancadas através de um martelo, emitindo assim a onda mecânica. O tempo de percurso do pulso entre os sensores é medido e o software calcula a velocidade da onda mecânica. O gráfico de superfície da seção transversal, ou imagem tomográfica, é produzido por meio dos valores de velocidades das ondas de tensão produzidos em cada CP, figura 2.

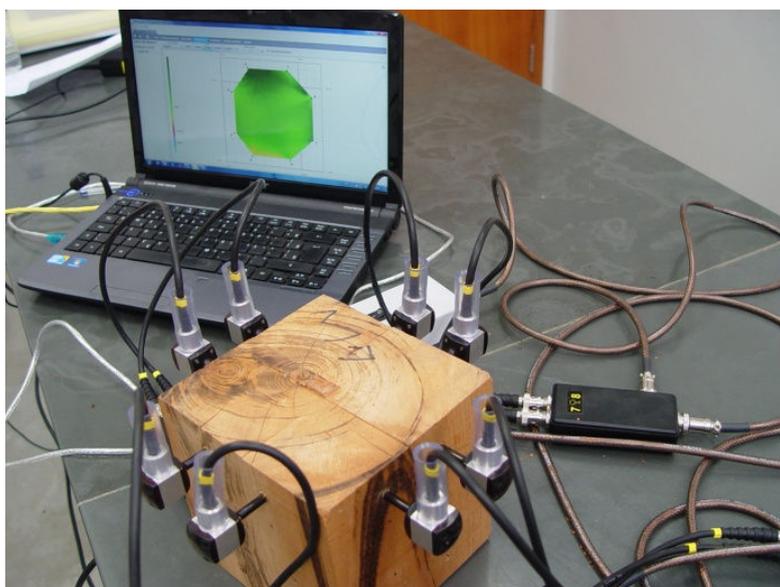


Figura 2: Ensaio de tomografia acústica e seus resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As relações entre as velocidades de propagação da onda (VPO) e a densidade aparente dos CPs encontram-se na FIGURA 3. A partir da matriz de velocidades fornecidas para cada CP ensaiado (21 velocidades), foi calculada a velocidade média para determinar o coeficiente de determinação da velocidade média para cada CP e a espécie (Tabela 1).

Observa-se que para as madeiras analisadas na direção normal às fibras, os valores das velocidades de propagação das ondas de tensão variaram de 1347 m.s⁻¹ a 1628 m.s⁻¹ para as madeiras de muiracatiara e garapa, respectivamente.

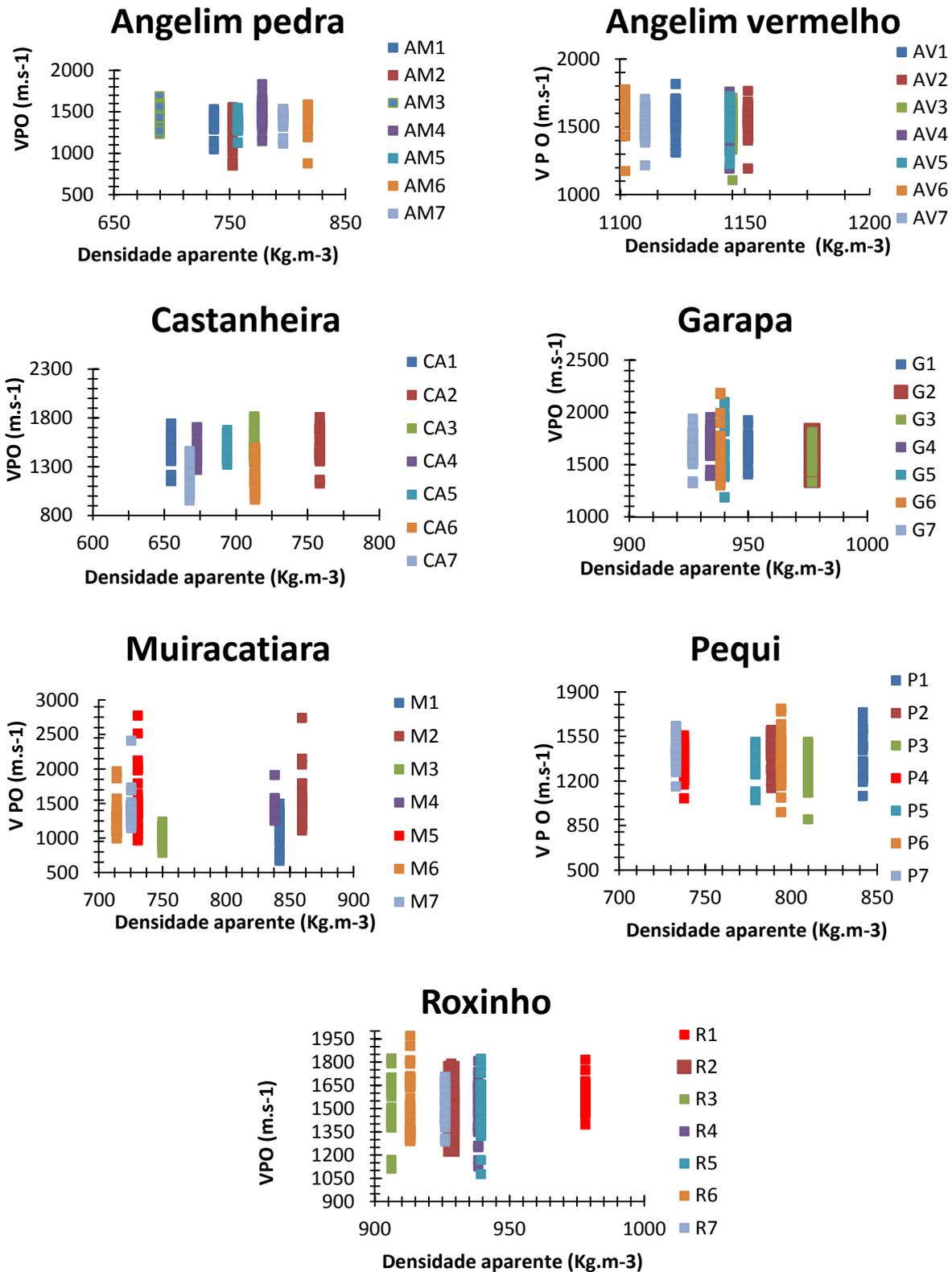


Figura 3: Relação entre a velocidade de propagação da onda (V P O) e a densidade aparente a 12% de umidade de cada uma das sete madeiras ensaiadas.

Tabela 1: Valores médios de densidade aparente, velocidade de propagação média e também seu intervalo de confiança para cada uma das madeiras analisadas.

Madeiras	D. ap. (Kg.m ⁻³)	Velocidade de propagação da onda (m.s ⁻¹)	
		Média (m.s ⁻¹)	Int. Conf. (m.s ⁻¹)
Angelim pedra	761 (C)	1397 (CD)*	(1833;855)
Angelim vermelho	1131 (A)	1547(B)	(1816; 1108)
Castanheira	696 (D)	1415 (C)	(1817; 954)
Garapa	946 (B)	1628 (A)	(2187; 1189)
Muiracatiara	780 (C)	1347 (D)	(2777; 674)
Pequi	783 (C)	1388 (CD)	(2941; 902)
Roxinho	933 (B)	1528 (B)	(1971; 1078)

D.P.= Desvio Padrão da V.P.M. *Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; p > 0,05).

Bucur (2006) afirma que a diminuição da velocidade de propagação de uma onda ultrassônica na direção radial é influenciada pelo aumento da densidade e a conformação das paredes celulares. De acordo com Haines (1979), citado por Bucur (2006), a regra geral para a madeira é que a velocidade diminui com o aumento da densidade. O que não é confirmado para as madeiras analisadas, mostrando que não apenas a densidade da madeira influencia na velocidade de propagação da onda, mas também outros fatores como suas constituições anatômicas, já que o valor da análise de regressão da velocidade de propagação média e a densidade da madeira foi de R²= 0,58 (Figura 4). Já Pereira et al. (2007) utilizaram madeiras de eucalipto, guapuruvu e pau-brasil obteve valores de R² de 0,50, 074 e 0,53, respectivamente. Enquanto que Rollo (2009) encontrou uma correlação de Pearson r=0,65 para madeira com classe de menores densidades básicas e r = 0,44 madeiras com classe de maiores densidades.

Observa-se na Tabela 1 que os valores contidos nos intervalos de confiança são amplos por caracterizarem toda a seção transversal do CP analisado. Ou seja, transmitem ondas mecânicas que percorrem não apenas áreas livres de defeitos, como também a própria medula da madeira. Mostrando assim que é um ensaio capaz de caracterizar todo o material, sendo então mais representativo quando comparado a outros ensaios não destrutivos pontuais.

A análise de regressão entre as velocidades de propagação da onda e a densidade aparente a 12% de umidade das madeiras encontram-se na Figura 4.

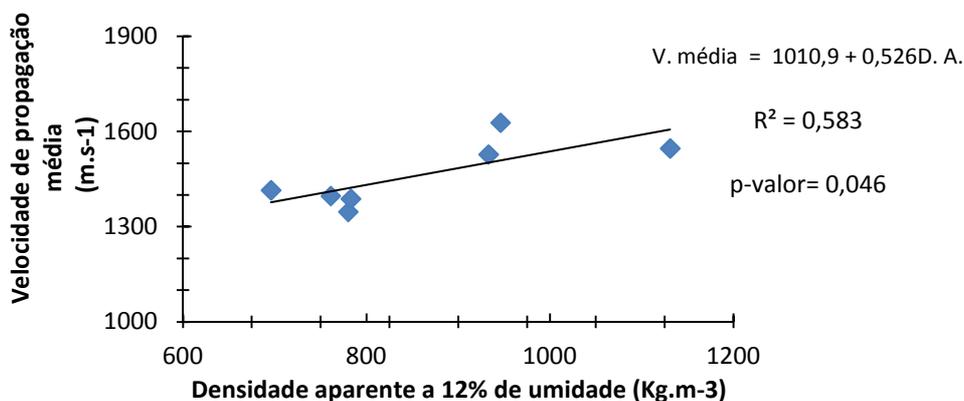


Figura 4: Relação entre a velocidade média da propagação das espécies de madeira e sua densidade aparente a 12% de umidade.

CONCLUSÃO

- Os valores de velocidade de propagação da onda diferenciaram estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. Os maiores valores foram encontrados para a madeira de garapa e os menores valores para a madeira de muiracatiara.
- O aumento da densidade propicia maior valor de velocidade de propagação da onda na direção normal às fibras. No entanto conclui-se que a densidade não é o único parâmetro que afeta a velocidade.
- O valor do coeficiente de determinação entre a velocidade de propagação da onda e a densidade da madeira é de $R^2 = 0,58$.
- Há a necessidade de estudos anatômicos das madeiras analisadas para justificar o valor de R^2 encontrado.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMODEI, J. B.; OLIVEIRA, B. R. U.; GURGEL, M. M.; CARVALHO, A. M.; MEDEIROS, R. A.; LATORRACA, J. V. F.. Avaliação Preliminar da Qualidade da Madeira de *Tectona grandis* L. f. através da Tomografia de Impulso. **Floresta e Ambiente**, v.17, n.2, p.124-128, 2010.

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

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: 1997.

BARTHOLOMEU, A.. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade de Campinas, Campinas, 2001.

BRANCHERIAU, L.; LASAYGUES, P.; DEBIEU, E.; LEFEBVRE, J. P.. Ultrasonic tomography of green wood using a non-parametric imaging algorithm with reflected waves. **Annals of Forest Science**, v.65, n.7, 2008.

BUCUR, V.. **Acoustics of wood**. Berlin: Springer-Verlag, 2006.

CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JUNIOR, A. P.. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som – fundamentos físicos e resultados experimentais. **Cerne**, v.9, n.2, p.178-191, 2003.

CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JÚNIOR, A. P.. Princípios gerais de propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURA DE MADEIRA, 8. **Anais**. Uberlândia: FACIV-UFU, 2002. CD-ROM.

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

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A.. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultrassônica da madeira. **Minerva**, São Carlos, v.2, n.1, p.25-31, 2005.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A.. Propagação de ondas acústicas na madeira. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 7. **Anais**. São Carlos: 2000.

PEREIRA, L. C.; SILVA FILHO, D. F.; TOMOZELLO FILHO, M.; COUTO, H. T. Z. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v.2, n.2, p.65-75, 2007.

ROLLO, L. C. P. **Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira.** Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

SHAJI, T.; SOMAYAJI, S.; MATHEWS, M. S.. Ultrasonic pulse velocity technique for inspection and evaluation of timber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.12, n.2, 2000.

WANG, S. Y.; LIN, C. J.; CHIU, C. M.. The adjusted dynamic modulus of elasticity above the fiber saturation point in *Taiwania* plantation wood by ultrasonic-wave measurement. **Holzforschung**, v.57, n.5, p.547-552, 2003.