



Propriedades mecânicas de madeiras amazônicas estimadas por meio de métodos de propagação de ondas ultrassônicas

Diego Martins STANGERLIN^{1*}, Caio Felipe Pereira CAVALCANTE¹, Cristiano Alves da COSTA¹, Elisângela PARIZ¹, Rafael Rodolfo de MELO², Onice Teresinha DALL'OGGIO¹

¹Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, Mato Grosso, Brasil.

²Departamento de Ciências Agrônômicas e Florestais, Universidade Federal do Semi-Árido, Mossoró, RN, Brasil.

E-mail: stangerlin@ufmt.br

Recebido em maio/2017; Aceito em agosto/2017.

RESUMO: Este estudo teve como objetivo avaliar o emprego de diferentes métodos de propagação de ondas ultrassônicas para estimativa das propriedades mecânicas de dez madeiras amazônicas. Para tanto, amostras de madeira de angelim-pedra, amescla, cambará, canelão, cedrinho, cumaru, garapeira, itaúba, jatobá e sucupira-preta foram submetidas a ensaios de ultrassom por meio do emprego de métodos direto, indireto e semidireto de propagação das ondas, sendo determinada a velocidade ultrassônica e o módulo de elasticidade dinâmico. A acurácia de cada método de propagação das ondas ultrassônicas foi avaliada a partir de testes destrutivos de compressão paralela, com determinação dos módulos de elasticidade e de ruptura. O módulo de elasticidade dinâmico obtido por meio dos ensaios de ultrassom foi eficiente na predição dos módulos de elasticidade e de ruptura à compressão paralela. O método direto de propagação das ondas de ultrassom possibilitou a obtenção de melhores resultados para estimativa das propriedades mecânicas, em comparação aos métodos semidireto e indireto.

Palavras-chave: ultrassom, ensaios não destrutivos, módulo de elasticidade, módulo de ruptura, madeira tropical.

Mechanical properties of Amazonian woods estimated by ultrasound waves propagation methods

ABSTRACT: This study aimed to evaluate the use of different ultrasound waves propagation methods to estimate the mechanical properties of ten Amazonian woods. Therefore, angelim-pedra, amescla, cambará, canelão, cedrinho, cumaru, garapeira, itaúba, jatobá and sucupira-preta woods were subjected to ultrasound tests using direct, indirect and semi direct methods of waves propagation in which ultrasound velocity and dynamic modulus of elasticity were determined. The accuracy of each ultrasound waves propagation method was evaluated from destructive tests of parallel compression, with determination of modulus of elasticity and rupture. The dynamic modulus of elasticity obtained by the ultrasound tests was efficient in the prediction of the modulus of elasticity and rupture in parallel compression. The direct method of ultrasound waves propagation allowed to obtain better results to estimate the mechanical properties, in comparison to the semi direct and indirect methods.

Keywords: ultrasound, non-destructive tests, modulus of elasticity, modulus of rupture, tropical wood.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização das propriedades mecânicas das madeiras é de fundamental importância para definição da adequabilidade de uma determinada espécie florestal quanto ao seu emprego para fins estruturais ou não estruturais. Para tanto, podem ser realizados ensaios destrutivos ou não destrutivos para caracterização tecnológica das madeiras.

Os ensaios não destrutivos destacam-se pela possibilidade de realização de inspeções periódicas em peças estruturais de madeira em serviço, devido ao uso de equipamentos portáteis e que não proporcionam desgaste ao material testado.

Dentre os ensaios não destrutivos, a propagação de ondas de ultrassom é uma das técnicas mais conhecidas e empregadas para avaliação das propriedades de diferentes materiais, sendo que no setor florestal é utilizada na avaliação tecnológica de árvores em pé, peças roliças (toras e

postes), madeiras serradas, lâminas de madeira e painéis reconstruídos (TEREZO; SZÜCS, 2010; SCHNEID et al., 2011; ALMEIDA et al., 2012; BELTRAME et al., 2015; MELO; DEL MENEZZI, 2016).

A velocidade de propagação das ondas é o principal parâmetro avaliado durante a realização de ensaios de ultrassom em peças de madeira (TRINCA; GONÇALVES, 2009). A partir da relação entre a velocidade de propagação das ondas de ultrassom e a densidade do material testado pode-se determinar o módulo de elasticidade dinâmico. O módulo de elasticidade dinâmico pode ser empregado como parâmetro de estimativa de propriedades mecânicas obtidas por meio de ensaios destrutivos, como no caso da flexão estática e compressão paralela.

Dependendo do posicionamento dos transdutores emissor e receptor dos pulsos elétricos, a propagação das ondas de

ultrassom na madeira pode ser realizada de forma direta, indireta e semidireta (STANGERLIN et al., 2011).

Na propagação direta, os transdutores são posicionados nas extremidades da peça de madeira, ao longo do comprimento (plano transversal), sendo esse o principal método de ensaio empregado em estudos (BUCUR, 2006). Quando não é possível o acesso de pelo menos uma das extremidades da madeira, realiza-se a propagação indireta ou semidireta, sendo esses métodos utilizados principalmente em madeiras em condições de serviço. Na propagação indireta, os transdutores são dispostos na superfície da madeira, por sua vez, a propagação semidireta caracteriza-se pela disposição de um dos transdutores na extremidade da madeira e o outro na superfície (BUCUR, 2006).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o emprego dos métodos direto, semidireto e indireto de propagação de ondas ultrassônicas para estimativa das propriedades mecânicas de dez madeiras amazônicas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foram utilizadas madeiras de dez espécies amazônicas, sendo essas obtidas em madeira certificada no município de Sorriso, Mato Grosso (Tabela 1). A escolha das espécies foi baseada na importância econômica das mesmas no setor madeireiro local e que são empregadas para fins estruturais. A identificação das espécies foi realizada por meio de análise macroscópica.

Tabela 1. Madeiras amazônicas utilizadas no estudo.

Table 1. Amazonian woods used in the study.

Espécie	Nome popular
<i>Trattinnickia burserifolia</i> Mart.	amescla
<i>Hymenolobium petraeum</i> Ducke	angelim-pedra
<i>Qualea paraensis</i> Ducke	cambará
<i>Ocotea velutina</i> Mart.	canelão
<i>Erisma uncinatum</i> Warm.	cedrinho
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	cumarú
<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vog.) Macbr.	garapeira
<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub.	itaúba
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	jatobá
<i>Diploptropis purpurea</i> Kunth.	sucupira-preta

A partir de madeira serrada tangencialmente, confeccionaram-se 20 corpos de prova por espécie, todos oriundos do cerne e com dimensões de 5 x 5 x 20 cm (espessura, largura e comprimento, respectivamente). Posteriormente, os corpos de prova foram mantidos em climatização até atingirem umidade de equilíbrio de aproximadamente 12%, massa constante nas condições ambientais de temperatura de 20°C e umidade relativa de 65%.

Antecedendo os ensaios não destrutivos e destrutivos, foi obtida a massa e as dimensões de cada um dos corpos de prova para determinação da massa específica aparente a 12% de umidade.

Os ensaios não destrutivos foram realizados utilizando-se um aparelho emissor de ondas de ultrassom, dotado de transdutores de face plana com frequência de 54 kHz, a partir do qual foi obtida velocidade de propagação das ondas diretamente no mostrador digital (Figura 1).

Em cada ensaio foi aplicada uma fina camada de vaselina nos transdutores, de modo a evitar a presença de ar na interface transdutor-madeira.

Para o método de propagação direto, a distância do trecho percorrido pelas ondas foi considerada igual ao comprimento real de cada corpo de prova. Por sua vez, nos métodos semidireto e indireto os transdutores emissor e receptor foram distanciados entre si em 15 cm (Figura 2).



Figura 1. Aparelho emissor de ondas ultrassônicas e seus componentes: cabos coaxiais, transdutores de faces planas e cilindro calibrador.

Figure 1. Ultrasonic wave emitter and components: coaxial cables, flat-face transducers and calibrator cylinder.

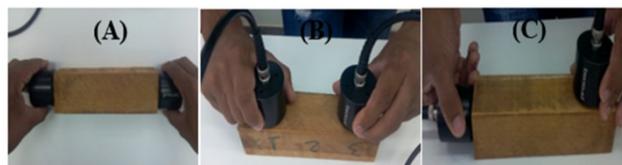


Figura 2. Modo de disposição dos transdutores de faces planas durante os ensaios de ultrassom: método direto (A), método indireto (B) e semidireto (C).

Figure 2. Arrangement mode of flat face transducers during ultrasound tests: direct (A), indirect (B) and semi-direct (C) methods.

O módulo de elasticidade dinâmico das madeiras, em cada método de propagação, foi determinado pela relação entre a velocidade de propagação das ondas de ultrassom e a massa específica (Equação 1).

$$MOEd = (V_{som})^2 * ME \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: MOEd = módulo de elasticidade dinâmico (MPa); V_{som} = velocidade de propagação das ondas de ultrassom ($m.s^{-1}$); ME = massa específica aparente a 12% de umidade ($kg.m^{-3}$).

Para avaliação da eficiência dos métodos ultrassonoros, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios destrutivos de compressão paralela, de acordo com os procedimentos descritos na normativa D 143 da American Society for Testing and Materials – ASTM (2014). Em cada ensaio de compressão paralela foram obtidos os módulos de elasticidade estático e de ruptura.

Os dados de massa específica, velocidade de propagação das ondas de ultrassom, módulos de elasticidade dinâmico e estático e o módulo de ruptura foram submetidos a análise de variância com posterior comparação de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Adicionalmente, foram

estabelecidas correlações de Pearson entre as variáveis e modelos estatísticos para predição das propriedades mecânicas de compressão paralela a partir dos módulos de elasticidade dinâmico obtidos por meio dos ensaios de ultrassom.

3. RESULTADOS

As médias das velocidades das ondas de ultrassom diferiram estatisticamente entre os métodos de propagação, exceto nos ensaios realizados com as madeiras de amescla, cedrinho e cumarú (Tabela 2). A propagação das ondas ultrassonoras pelo método direto proporcionou resultados

com menores valores de desvio padrão em comparação aos métodos semidireto e indireto.

Com relação aos módulos de elasticidade dinâmico, verifica-se que os valores médios, a partir de todas as espécies, foram 1,73 (método direto), 1,98 (método semidireto) e 2,09 (método indireto) vezes superiores aos obtidos destrutivamente por meio do ensaio de compressão paralela (Tabela 3). Os valores dos módulos de elasticidade à compressão paralela diferiram estatisticamente daqueles obtidos por meio dos ensaios de ultrassom, com exceção da madeira de angelim ensaiada pelo método semidireto.

Tabela 2. Valores médios das velocidades de propagação das ondas de ultrassom obtidas pelos métodos direto, semidireto e indireto e da massa específica aparente a 12% de umidade.

Table 2. Mean values of the propagation velocities of the ultrasound waves obtained by the direct, semi-direct and indirect methods and of the density at 12% moisture.

Espécie	Velocidade de propagação das ondas ultrassonoras (m.s ⁻¹)			Massa específica aparente à 12% de umidade (kg.m ⁻³)
	Direto	Semidireto	Indireto	
Amescla	5369 ± 62 Aa	5366 ± 233 Aa	4986 ± 588 Aa	551 ± 30 A
Angelim-Pedra	5878 ± 251 Bb	4883 ± 514 Aa	5293 ± 754 Ba	792 ± 46 D
Cambará	5326 ± 327 Aa	6026 ± 435 Bb	6209 ± 1120 Db	786 ± 33 D
Canelão	5483 ± 185 Ba	6275 ± 384 Cb	5667 ± 960 Ca	680 ± 59 C
Cedrinho	4919 ± 339 Aa	5097 ± 349 Aa	4771 ± 624 Aa	622 ± 58 B
Cumarú	5534 ± 165 Ba	5710 ± 263 Ba	5423 ± 840 Ba	1058 ± 84 I
Garapeira	5386 ± 293 Aa	5985 ± 450 Bb	6302 ± 1135 Db	856 ± 67 E
Itaúba	5284 ± 255 Aa	5774 ± 272 Bb	5778 ± 1001 Cb	995 ± 98 H
Jatobá	5593 ± 257 Ba	6295 ± 462 Cb	7306 ± 1230 Ec	954 ± 103 G
Sucupira-Preta	5586 ± 124 Ba	6208 ± 305 Cb	6211 ± 1232 Db	908 ± 59 F

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 3. Valores médios dos módulos de elasticidade dinâmico (métodos direto, semidireto e indireto de propagação) e das propriedades mecânicas de compressão paralela.

Table 3. Mean values of the dynamic modulus of elasticity (direct, semi direct and indirect methods) and of the mechanical properties of parallel compression.

Espécie	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)			Módulo de elasticidade (MPa)	Módulo de ruptura (MPa)
	Direto	Semidireto	Indireto		
Amescla	16209 ± 986 Ab	16222 ± 1764 Ab	14106 ± 3576 Ab	9979 ± 606 Aa	37 ± 2 A
Angelim-Pedra	28087 ± 3734 Cc	19696 ± 5840 Aa	22924 ± 5607 Bb	15151 ± 1861 Ba	53 ± 8 C
Cambará	22871 ± 3597 Bb	29279 ± 4597 Bc	31744 ± 11098 Cc	14316 ± 2451 Ba	56 ± 8 C
Canelão	20908 ± 2308 Bb	27483 ± 4509 Bc	22973 ± 9762 Bb	13118 ± 2426 Ba	45 ± 6 B
Cedrinho	15470 ± 2848 Ab	16525 ± 2403 Ab	14730 ± 4512 Ab	9125 ± 1656 Aa	37 ± 8 A
Cumarú	33046 ± 2665 Db	35289 ± 4358 Db	32757 ± 13426 Cb	19766 ± 2272 Ba	86 ± 11 E
Garapeira	25593 ± 4688 Cb	31683 ± 6446 Bc	36225 ± 13837 Dc	13553 ± 2374 Ba	66 ± 4 D
Itaúba	28344 ± 3395 Cb	34003 ± 5322 Dc	34958 ± 12817 Dc	16606 ± 1874 Ba	66 ± 7 D
Jatobá	30690 ± 5390 Db	38926 ± 7961 Dc	52990 ± 16474 Ed	16792 ± 2236 Ba	67 ± 11 D
Sucupira-Preta	28932 ± 2291 Cb	36383 ± 3670 Dc	37364 ± 16552 Dc	15692 ± 1882 Ba	65 ± 10 D

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

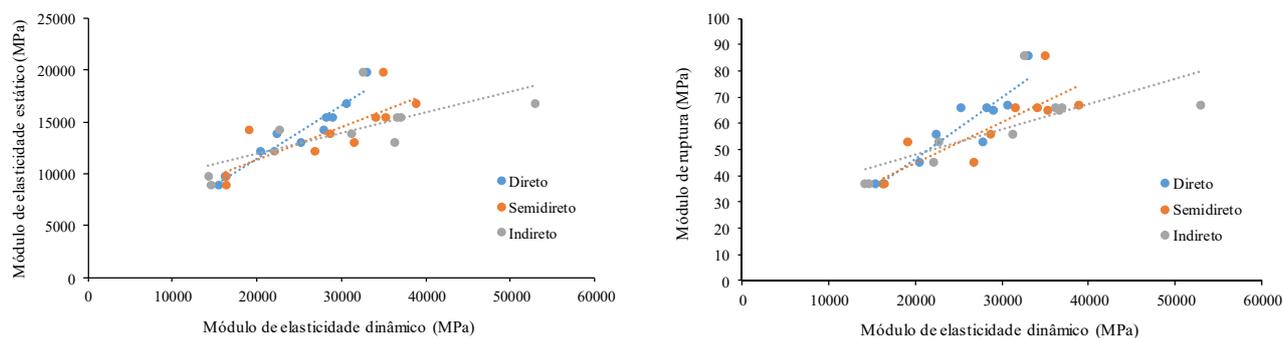
Tabela 4. Correlação de Pearson entre a massa específica, velocidades de propagação das ondas de ultrassom, módulos de elasticidade dinâmico e as propriedades mecânicas de compressão paralela.

Table 4. Pearson's correlation between the density, propagation velocities of the ultrasound waves, dynamic modulus of elasticity and the mechanical properties of parallel compression.

	ME	VSDir	VSSd	VSInd	MOEDir	MOESd	MOEInd	MOE	MOR
ME	1	0,32**	0,30**	0,32**	0,91**	0,81**	0,60**	0,81**	0,82**
VSDir		1	0,27**	0,22**	0,68**	0,37**	0,27**	0,45**	0,37**
VSSd			1	0,45**	0,34**	0,79**	0,46**	0,27**	0,33**
VSInd				1	0,34**	0,49**	0,94**	0,28**	0,33**
MOEDir					1	0,78**	0,57**	0,82**	0,79**
MOESd						1	0,66**	0,66**	0,70**
MOEInd							1	0,49**	0,54**
MOE								1	0,82**
MOR									1

em que: ME = massa específica aparente à 12% de umidade; VSDir = velocidade das ondas ultrassonoras propagadas pelo método direto; VSSd = velocidade das ondas ultrassonoras propagadas pelo método semidireto; VSInd = velocidade das ondas ultrassonoras propagadas pelo método indireto; MOEDir = módulo de elasticidade

dinâmico obtido pelo método direto; MOESd = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método semidireto; MOEInd = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método indireto; MOE = módulo de elasticidade à compressão paralela; MOR = módulo de ruptura à compressão paralela; ** = significativo a 1% de probabilidade de erro.



Modelos estatísticos:	R ²	Syx	F calc.
$1/MOE = 0,0000152757 + 1,36586*(1/MOEDir)$	0,70	$1,21 \times 10^{-5}$	421,33**
$\sqrt{MOE} = 87,1169 + 0,00112549*(MOESd)$	0,44	11,71	151,51**
$1/MOE = 0,0000437048 + 0,721605*(1/MOEInd)$	0,47	$1,58 \times 10^{-5}$	169,45**
$1/MOR = 0,00230602 + 381,475*(1/MOEDir)$	0,69	$3,28 \times 10^{-3}$	446,60**
$1/MOR = 0,00772825 + 278,939*(1/MOESd)$	0,54	$4,07 \times 10^{-3}$	223,92**
$1/MOR = 0,00981909 + 211,619*(1/MOEInd)$	0,53	$4,12 \times 10^{-3}$	213,22**

em que: MOEDir = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método direto; MOESd = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método semidireto; MOEInd = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método indireto; MOE = módulo de elasticidade à compressão paralela; MOR = módulo de ruptura à compressão paralela; R² = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão de estimativa; F calc. = valor de F; ** = significativo a 1% de probabilidade de erro.

Figura 3. Modelos estatísticos de predição das propriedades mecânicas de compressão paralela em função dos módulos de elasticidade dinâmico obtidos pelos métodos direto, semidireto e indireto de propagação das ondas de ultrassom.

Figure 3. Statistical models of prediction of the mechanical properties of parallel compression as function of the dynamic modulus of elasticity obtained by the direct, semi direct and indirect methods of ultrasound waves propagation.

A madeira de cumarú apresentou os maiores valores de massa específica e de módulo de ruptura, diferindo estatisticamente das demais espécies. Por sua vez, o módulo de elasticidade à compressão paralela denotou diferença estatística apenas em comparação às madeiras de amescla e cedrinho, sendo igual estatisticamente às demais espécies.

Na Tabela 4 são apresentadas as correlações de Pearson entre as variáveis obtidas de modo destrutivo e não destrutivo.

A massa específica e as velocidades das ondas de ultrassom, independentemente do método de propagação, correlacionaram-se estatisticamente entre si, sendo verificados valores similares de coeficiente de correlação ($r=0,30$ a $0,32$). As correlações positivas entre as duas variáveis demonstram que as madeiras mais densas proporcionam maiores velocidades de propagação das ondas ultrassônicas.

As correlações de Pearson entre os módulos de elasticidade dinâmico e os módulos de elasticidade e de ruptura à compressão paralela foram estatisticamente significativas, entretanto os valores dos coeficientes de correlação variaram conforme o método de propagação das ondas de ultrassom. As melhores correlações foram verificadas ao empregar o método direto ($r=0,82$ e $r=0,79$), seguido dos métodos semidireto ($r=0,70$ e $r=0,66$) e indireto ($r=0,54$ e $0,49$).

Ao empregar o módulo de elasticidade dinâmico como parâmetro estimador das propriedades mecânicas de compressão paralela (Figura 3), pode-se observar que pelo método direto as melhores estimativas (maior valor de R² e menor valor de erro padrão de estimativa) foram obtidas para o módulo de elasticidade estático. Por sua vez, nos métodos semidireto e indireto de propagação das ondas ultrassônicas,

as melhores estimativas foram verificadas para o módulo de ruptura.

4. DISCUSSÃO

As médias das velocidades de propagação das ondas de ultrassom (5434, 5770 e 5806 m.s⁻¹, métodos direto, semidireto e indireto, respectivamente), verificadas no presente estudo, estão dentro do limite de 4000 a 6000 m.s⁻¹ relatado em diversos estudos (BALLARIN; NOGUEIRA, 2005; STANGERLIN et al., 2008; VIVIAN et al., 2012; CADEMARTORI et al., 2014).

A menor variabilidade da velocidade das ondas de ultrassom propagadas pelo método direto (CV - coeficiente de variação de 6,08%), em comparação aos métodos semidireto (CV de 10,56%) e indireto (CV de 20,56%), pode ser justificada pela disposição dos transdutores nas madeiras durante os ensaios. No método direto, as ondas de ultrassom são propagadas paralelamente às fibras, o que favorece um meio contínuo de transmissão. Por sua vez, nos métodos semidireto e indireto as ondas de ultrassom são propagadas paralelamente e perpendicularmente às fibras, sendo que nessa última direção as ondas são atenuadas pela formação de um meio não contínuo de transmissão.

Os maiores valores dos módulos de elasticidade dinâmico, em comparação aos obtidos pelo ensaio destrutivo de compressão paralela, estão relacionados com a natureza visco-elástica da madeira, sendo esse resultado também verificado por outros pesquisadores (BUCUR 2006; GONÇALVES et al., 2011; RIBEIRO et al., 2013). De acordo com Ballarin; Nogueira (2005) e Targa et al. (2005) quanto maior for a frequência de excitação do material,

maior será a diferença entre os valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático.

A correlação positiva entre as velocidades de propagação das ondas de ultrassom e a massa específica da madeira corrobora com os resultados apresentados por Oliveira; Sales (2006), Calegari et al. (2011) e Ribeiro et al. (2013). De modo geral, a maior densidade de uma madeira favorece a formação de um meio contínuo para propagação das ondas de ultrassom, uma vez que menor será a porosidade da mesma, assim aumentando a velocidade das ondas. Deve-se ressaltar que, por vezes, outros fatores também podem apresentar uma maior influência na velocidade de propagação das ondas, como no caso do ângulo microfibrilar (DEL MENEZZI et al., 2010).

Em relação aos modelos estatísticos de predição das propriedades mecânicas, pode-se verificar que os resultados obtidos corroboram com a literatura (MINÁ et al., 2004; BUCUR, 2006; STANGERLIN et al., 2008; RIBEIRO et al., 2013; CADEMARTORI et al., 2014), demonstrando a acurácia do ultrassom para estimar os módulos de elasticidade e de ruptura à compressão paralela. Entretanto, era esperado que as melhores estimativas fossem verificadas para a relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico, sendo que esse resultado foi verificado apenas para o método direto de propagação das ondas.

De acordo com Miná et al. (2004), a tensão aplicada nos ensaios não destrutivos é baixa, sendo limitada ao momento elástico da madeira. Por sua vez, nos ensaios destrutivos de determinação do módulo de ruptura a tensão aplicada é superior, atingindo o limite plástico da madeira. Nesse sentido, as correlações entre os módulos de ruptura e de elasticidade dinâmico são inferiores às verificadas entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico (STANGERLIN et al., 2011). No presente estudo, resultados opostos foram verificados para os métodos semidireto e indireto de propagação das ondas de ultrassom, porém corroboram com pesquisas desenvolvidas por Gonzalez et al. (2001) e Vivian et al. (2012).

5. CONCLUSÕES

O módulo de elasticidade dinâmico obtido por meio dos ensaios de ultrassom foi eficiente na predição dos módulos de elasticidade e de ruptura à compressão paralela das 10 madeiras amazônicas.

O método direto de propagação das ondas de ultrassom possibilitou a obtenção dos melhores resultados para estimativa das propriedades mecânicas das madeiras.

Os métodos semidireto e indireto podem ser empregados em situações em que não seja possível a propagação das ondas pelo método direto, de modo a permitir a caracterização mecânica das madeiras, por meio de técnicas não destrutivas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo auxílio financeiro para execução desta pesquisa (Edital 002/2012 - Programa Primeiros Projetos, nº do processo 160338/2012).

7. REFERÊNCIAS

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, nov. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v03n02a06>
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 143**: Standard methods of testing small clear specimens of timber. West Conshohocken: ASTM International, 2014. 31p.
- BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, jan./abr. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162005000100003>
- BELTRAME, R.; PERES, M. L.; DELUCIS, R. A.; FREITAS, D. L.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Tensões de crescimento longitudinais e propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 1061-1074, out./dez. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620150004.0108>
- BUCUR, V. **Acoustics of wood**. 2 ed. Basileia: Birkhäuser, 2006. 393p.
- CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R. Prediction of the modulus of elasticity of *Eucalyptus grandis* through two nondestructive techniques. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 3, p. 369-375, jul./set. 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.042313>
- 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 Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 2, p. 325-332, abr./jun. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672010000200011>
- GONÇALEZ, J. C.; VALLE, A. T.; COSTA, A. F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 81-92, abr./jun. 2001.
- GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. P. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing. **Wood and Fiber Science**, Hanover, v. 43, n. 1, p. 64-75, jan. 2011.
- 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, v. 65, p. 188-189, jun. 2004.
- MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. Estimativas das propriedades físico-mecânicas de compostos LVL confeccionados com paricá por meio de ultrassom. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 263-272, jan./mar. 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.5902/1980509821118>
- OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 18, p. 2443-2446, dec. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.050>
- RIBEIRO, P. G.; GONÇALEZ, J. C.; GONÇALVES, R.; TELES, R. F.; SOUZA, F. Ultrasound waves for assessing the technological properties of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and *Eucalyptus grandis* wood. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 15, n. 2, p. 195-204, ago. 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000016>

- SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G.; HAMM, L. G.; STANGERLIN, D. M. Avaliação não destrutiva de postes de madeira utilizados na rede elétrica da região metropolitana de Porto Alegre. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 2, n. 1, p. 43-52, mai. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v02n01a04>
- 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. **Agrária**, Recife, v. 3, n. 2, p. 145-150, abr./jun. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v3i2a284>
- STANGERLIN, D. M.; CADEMARTORI, P. H. G.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L.; MELO, R. R.; VIVIAN, M. A.; MODES, K. S. Propagação indireta e semidireta de ondas ultrassônicas na estimativa de propriedades mecânicas da madeira. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 2, n. 2, p. 85-95, nov. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v02n02a03>
- 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. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 291-299, mai./aug. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162005000200001>
- TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. Análise de desempenho de vigas em madeira-laminada-colada de parica (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 471-480, set. 2010.
- TRINCA, A. J.; GONÇALVES, R. Effect of the transversal section dimensions and transducer frequency on ultrasound wave propagation velocity in wood. **Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 177-184, jan./fev. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622009000100019>
- VIVIAN, M. A.; SANTINI, E. J.; MODES, K. S.; CARVALHO, D. E.; MORAIS, W. W. C.; SOUZA, J. T. D. Estimativa da resistência e rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* por meio de onda ultrassônica. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 109-113, jan./mar. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.4336/2012.pfb.32.69.109>