

ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS MADEIRAS TROPICAIS POR MEIO DO ULTRASSOM

ESTIMATE OF ELASTIC STIFFNESS CONSTANTS OF TROPICAL HARDWOODS USING ULTRASON

R. C. Alves ⁽¹⁾, **V. T. Pizzol** ⁽²⁾, **E. V. M. Carrasco** ⁽³⁾

(1) Profa. Mestre, Doutoranda, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, Brasil

(2) Eng., Doutorando, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, Brasil

(3) Prof. Doutor, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, Belo Horizonte, Brasil

Endereço de contato: Rejanealves.ufes@gmail.com

Código de identificação: T3-31

Resumo

Este trabalho trata da estimativa do módulo de elasticidade da madeira pelo 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 180 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 nas direções normais à fibra. Para a frequência de 180 kHz, os valores de R^2 foram 75,7%, 79,7% e 50,7% para as direções tangencial, radial e longitudinal, respectivamente.

Palavras chave: ensaios não destrutivos; ultrassom; constante elástica; madeira

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 180 kHz transducer was used. The woods tested were angelim pedra, angelim vermelho, castanheira (Brazil nut), garapa, muiracatiara, pequi, and roxinho (purpleheart). Seven specimens of each species for each direction analyzed (longitudinal, tangential and radial) were used. Moisture content, apparent density, and elasticity modulus in compression were determined according to NBR 7190 (1997). The ultrasonic method proved to be efficient in estimating the modulus of elasticity of wood. The R^2 values were 75,7%, 79,7%, and 50,7% for the tangential, radial, and longitudinal directions, respectively.

Keywords: non-destructive testing; ultrasound; elastic stiffness constant; wood

1. INTRODUÇÃO

Os métodos não destrutivos para caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira está sendo utilizada de forma crescente com o intuito de eliminar a extração do corpo de prova em análise de campo e à rapidez em suas verificações. No Brasil, quando se refere a métodos não destrutivos para avaliação de madeira, geralmente se associa a técnicas de ultrassom (BALLARIN e NOGUEIRA (2005); CARRASCO e AZEVEDO JÚNIOR (2003); DEL MENEZZI et al. (2010); STANGERLIN et al. (2010); LATORRACA et al. (2011)). No entanto, a preocupação por desenvolvimento de outras metodologias e técnicas não destrutivas está ganhando força; pelo fato de não ser necessário à retirada de amostras de madeira da estrutura. Assim, os métodos não destrutivos apresentam-se como uma alternativa com elevado potencial, simples de utilizar e eficiente.

O módulo de elasticidade (E) dos materiais pode ser determinado por vários métodos, estático ou dinâmico (BARRETT e HONG, 2010). Os ensaios não destrutivos para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, utilizando diversos métodos de propagação de ondas foram empregados por Cunha e Matos (2010); Ballarin e Nogueira (2005); Targa et al. (2005); Murphy (2000) e Stangerlin et al. (2010). Os resultados obtidos por estes autores indicam que os métodos dinâmicos são adequados para a determinação de algumas características intrínsecas da madeira, em particular o módulo de elasticidade. Com base nisso, o objetivo do trabalho é estimar o módulo de elasticidade de sete madeiras brasileiras a partir do método de propagação de ondas ultrassônicas.

2. 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*). De cada espécie confeccionaram-se sete corpos de prova para cada direção analisada (longitudinal, tangencial e radial). De acordo com a NBR 7190 (1997) são necessários no mínimo 6 CPs para a caracterização de madeiras já conhecidas.

Os corpos de prova utilizados para os ensaios não destrutivos também foram utilizados para determinar o teor de umidade e densidade aparente. Os procedimentos de ensaio para determinação de características mecânicas seguiram as prescrições da NBR 7190 (1997).

Para cada uma das madeiras foram utilizadas sete vigas de 2,5 m de comprimento e seção transversal de 150x150 mm. As mesmas foram secas ao ar até atingir umidade de equilíbrio local (12%) e posteriormente desdobrada em peças menores. Em seguida foram armazenadas para estabilização da umidade, e posteriormente confeccionadas corpos-de-prova (CPs) de acordo com a norma NBR 7190 (1997), para determinação do teor de umidade.

2.1 Propagação de ondas ultrassônicas

Para o cálculo da velocidade de propagação de ondas foi utilizado o ultrassom James V Mk II (FIG. 1), com transdutor de frequência de 180 KHz. Este 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.

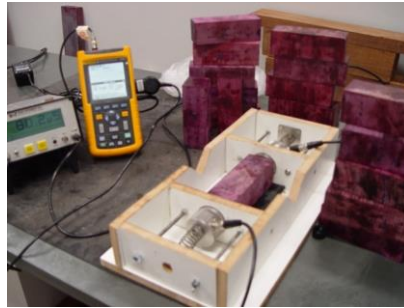


Figura 1: Ensaio com equipamento de ultrassom

Observa-se que os ensaios de propagação da onda foram realizados a partir de dois transdutores (50 mm), que são acoplados nas seções transversais do CP com auxílio de um gel. O transdutor emite o sinal da onda, que é captado pelo transdutor receptor.

Assim como muitos autores que consideram os valores de constante elástica (C) aproximados aos valores de E_{din} . Neste trabalho serão determinadas as CRs nas três direções longitudinal, tangencial e radial. A partir da equação 3.4 adotada por diversos autores (Sandoz (1990), Nogueira e Ballarin (2005), Gonçalves e Bartholomeu (2000)), é possível calcular as CRs da madeira conhecendo-se os valores de velocidade de propagação da onda e de densidade aparente a 12% de umidade.

$$C = V_o^2 \times \rho \times 10^{-6}, \quad (6)$$

em que:

C.R = Constante de rigidez, MPa;

V_o = Velocidade de propagação da onda, m/s;

ρ = Densidade da madeira; kg/m³.

O comprimento do CP é determinado a partir do comprimento de onda (λ). Existem ainda divergências sobre o valor mínimo necessário para que a velocidade da onda seja constante, a NBR 58000 (2007) prescreve que o comprimento do CP deve ser de no mínimo 3λ , já Bucur (1995) estabeleceu que deve ser no mínimo 2λ . Bucur (2006) e Aljets et al. (2010) afirmaram que, em meios finitos, a velocidade da onda depende também da sua frequência. Verifica-se que para o transdutor de 180 kHz, os valores dos comprimentos dos CPs estão de acordo com a norma, no entanto em meio finito, logo sofrerão uma pequena influência da frequência utilizada.

2.2 Determinação das características mecânicas através de ensaios destrutivos

Foram realizados os ensaios de: compressão nas direções longitudinal, radial e tangencial, de acordo com as especificações da NBR 7190 (1997).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na FIG. 2 são mostrados os valores de módulo de elasticidade estático em função da densidade aparente a 12% de umidade para todas as madeiras analisadas.

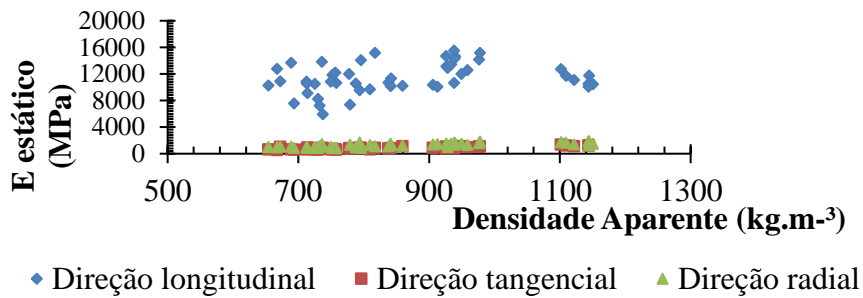


Figura 2: Gráfico de Módulo de elasticidade estático (E estático) em função da densidade da madeira

Observa-se na TAB. 1 que a madeira de angelim vermelho possui maior densidade aparente, diferenciando estatisticamente das demais, classificada como madeira de alta densidade. Já a madeira de castanheira obteve o menor valor em média, sendo classificada como de média densidade. As densidades aparentes da madeira de garapa e do roxinho foram estatisticamente iguais, pelo teste de Tukey a 5% de significância e foram classificadas como de alta densidade, como ocorreu também para as madeiras de pequi, muiracatiara e angelim pedra, que não se diferenciaram estatisticamente, mas classificadas como madeiras de densidade moderadamente alta.

Com relação ao módulo de elasticidade na direção tangencial (E_t) observa-se que os maiores valores são para as madeiras de alta densidade. De acordo com o teste de Tukey, as madeiras de angelim vermelho e garapa não se diferenciaram estatisticamente, e têm os maiores E_t s. Também as madeiras de castanheira, angelim pedra, muiracatiara e pequi não se diferenciaram estatisticamente, e têm os menores valores de E_t . Para o módulo de elasticidade radial (E_r), verifica-se um comportamento semelhante ao descrito para o E_t , no qual os maiores valores de E_r são correspondentes as maiores densidades. As madeiras de angelim vermelho, garapa, roxinho e pequi, obtiveram o E_r estatisticamente iguais.

Nota-se na TAB.1 que as relações entre os módulos de elasticidade longitudinal e tangencial e entre os módulos de elasticidade tangencial e radial as médias não se diferenciaram estatisticamente na maioria das vezes, pelo teste de Tukey. Contudo, para a relação entre os módulos de elasticidade longitudinal e radial, a madeira de angelim pedra obteve maior média, não se diferenciando estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de significância, das madeiras de roxinho, garapa e castanheira. Já as madeiras de angelim vermelho e pequi obtiveram menores valores nesta mesma relação, sendo estatisticamente iguais pelo teste de Tukey.

O valor médio das relações entre o E_L e E_T foi de 14,33 variaram de 9,95 a 17,83. O maior valor médio foi de 17,8 para a madeira de angelim pedra e o menor valor médio de 9,95, encontrado para a madeira de pequi. Já o valor médio das relações entre E_L e E_R foi de 9,99, com o maior valor médio de 14,38 para a madeira angelim pedra e o menor valor médio de 6,97 para a madeira de angelim vermelho. Os valores das relações encontradas anteriormente foram inferiores aos valores propostos pela NBR 7190 (1997). Esta norma considera que a relação entre o módulo de cisalhamento paralelo e normal às fibras deve ser de 20, sem levar em consideração se é a direção tangencial ou radial. Fazendo a análise estatística de hipótese nula da diferença entre os pares de valores (p -valor = 0,002), foi verificado que os E_t e E_r não se diferenciam estatisticamente, o que já era esperado pela literatura.

Observou-se que para as madeiras analisadas, os valores de E_T/E_L variaram de 9,95 a 17,83 para o intervalo de densidade aparente a 12% de 650 a 1100 kg.m^{-3} . Kretschmann (2010) encontrou valores de 12,2 a 20 para a mesma relação, em madeiras com densidade aparente de 510 a 680 kg.m^{-3} . Já para a relação E_R/E_L foram encontradas no presente trabalho, as médias variando de 6,97

a 14,38. Enquanto o Kretschmann (2010) cita 6,3 a 12,8 para o intervalo de densidade de 510 a 680 kg.m⁻³.

Tabela 1 – Valores médios das características das madeiras (médias seguidas pela mesma letra na mesma linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade)

Propriedade	Madeira							
	Castanheira	A. pedra	Muiracatiara	Pequi	Roxinho	Garapa	A. vermelho	
Densidade aparente (kg.m ⁻³)	696 D (35)	761 C (42)*	780 C (63)	783 C (38)	933 B (23)	946 B (17)	1131 A (20)	
Módulo de elasticidade estatico (MPa)	EL	9007 CD (1173)	12077 AB (1174)	8729 CD (923)	7345 D (1553)	12024AB (1999)	12258A (1448)	9909 BC (808)
	ET	678 D (169)	750 CD (94)	788 CD (267)	821 CD (84)	911 BC (85)	1048 AB (169)	1228 A (92)
	ER	969 C (78)	1052 BC (226)	1055 BC (152)	911 BC (85)	1486 A (275)	1483 A (114)	1600 A (237)
	EL/ET	16,23 A (4,22)	17,83 A (2,13)	13,22 A (3,22)	9,95 A (3,51)	17,18 A (9)	14,54 A (6,3)	11,38 A (4,55)
	EL/ER	9,89 AB (2,3)	14,38 A (3,85)	9,68 AB (0,79)	6,99 B (2,36)	11,87 AB (4,66)	10,17 AB (4,01)	6,97 B (3,22)
	ET/ER	0,64 A (0,2)	0,80 A (0,23)	0,77 A (0,17)	0,74 A (0,21)	0,73 A (0,17)	0,71 A (0,05)	0,62 A (0,16)

Médias seguidas pela mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). *Desvio padrão em Kg/m³ e MPa.

Na TAB. 2 encontra-se a análise entre as velocidades de propagação da onda nas madeiras. Quando se analisa as velocidades de propagação da onda nas direções longitudinal, tangencial e radial, verifica-se que as velocidades diferem entre si, conforme já comprovado por Bucur (1995).

De acordo com o teste de Tukey a 5% de significância, as madeiras de castanheira e roxinho não se diferenciaram estatisticamente, e apresentaram os maiores valores de velocidade de propagação. As madeiras de muiracatiara, pequi e angelim vermelho não se diferenciaram estatisticamente, obtendo os menores valores de velocidade. Destaca-se que algumas madeiras obtiveram valores de velocidade de propagação estatisticamente iguais a todas as outras madeiras pelo teste de Tukey, são elas o angelim pedra e a garapa. Já para a direção tangencial, verifica-se que as madeiras de pequi, roxinho e garapa obtiveram os maiores valores de velocidade de propagação da onda, estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Enquanto as madeiras de castanheira, angelim pedra e muiracatiara obtiveram os menores valores de velocidade de propagação das ondas. Para a direção radial, a madeira de garapa obteve maior valor médio de velocidade de propagação. Enquanto as madeiras de castanheira, angelim pedra e muiracatiara obtiveram os menores valores de velocidade de propagação das ondas de acordo com o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 2: Análise das velocidades médias (m/s) de propagação de onda

Madeira	ρ a 12% (kg.m ⁻³)	Velocidade média		
		Longitudinal	Tangencial	Radial
Castanheira	696 D (35)*	4857 AB (287,5)	1319 D (44,9)	1483 C (38,7)
A. pedra	761 C (42)	4671 ABC (292,1)	1403 BCD (131,4)	1649 C (29,7)
Muiracatiara	780 C (63)	4341 C (288,9)	1373 CD (46,8)	1784 BC (28,7)
Pequi	783 C (38)	4503 BC (291,0)	1476 ABC (67,6)	1985 B (62,1)
Roxinho	933 B (23)	5071 A (442,8)	1591 A (88,9)	2014 B (94,9)
Garapa	946 B (17)	4744 AB (136,8)	1522 ABC (50,6)	1685 C (510,9)
A. vermelho	1131 A (20)	4442 BC (214,4)	1448 BC (11,8)	2050 B (46,8)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). *Desvio padrão em Kg/m³ e m/s.

Nota-se na tabela 3, que os valores das constantes de rigidez calculados com as velocidades determinadas com frequência longitudinal de 180 kHz na direção longitudinal, relacionaram-se com a densidade das madeiras analisadas. Neste caso, madeiras de elevada densidade como o angelim vermelho e roxinho apresentaram maiores valores, sendo estatisticamente iguais a madeira de garapa, pelo teste estatístico. Esta semelhança foi observada na direção tangencial, onde as mesmas madeiras obtiveram resultados superiores, considerados estatisticamente diferentes das demais pelo teste de Tukey. Já na direção radial, destaque para as madeiras de angelim vermelho e castanheira com o maior e menor valor, respectivamente, diferenciando-se pelo teste de Tukey.

Tabela 3: Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico

Propriedade	Madeira							
	Castanheira	Angelim pedra	Muiracatiara	Pequi	Roxinho	Garapa	Angelim vermelho	
Densidade aparente (kg.m ⁻³)	696 D (35)	761 C (42)*	780 C (63)	783 C (38)	933 B (23)	946 B (17)	1131 A (20)	
Eest (Mpa)	Eest _L	9007 CD (1173)	12077 AB (1174)	8729 CD (923)	7345 D (1553)	12024 AB (1999)	12258 A (1448)	9909 BC (808)
	Eest _T	678 D (169)	750 CD (94)	788 CD (267)	821 CD (84)	911 BC (85)	1048 AB (169)	1228 A (92)
	Eest _R	969 C (78)	1052 BC (226)	1055 BC (152)	911 BC (85)	1486 A (275)	1483 A (114)	1600 A (237)
Constante de rigidez (Mpa) 180 kHz	C _{LL}	15906 C (2106)	17104 BC (2404)	13969 C (3213)	15078 C (1658)	23958 A (4104)	21304AB (1363)	22155 A (1916)
	C _{TT}	1196 C (88,2)	1612 B (315)	1469 BC (165)	1663 B (170)	2362 A (293)	2192 A (105)	2308 A (49,9)
	C _{RR}	1533 E (93)	2152 D (144)	2278 D (200)	2913 C (220)	3801 B (535)	—**	4662 A (234)

Médias seguidas pela mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). *Desvio padrão em Kg.m⁻³ ou em Mpa. Eest é módulo de elasticidade estático. C_{LL}, C_{TT} e C_{RR} são as constantes de rigidez longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. Eest_L, Eest_T e Eest_R são módulos de elasticidade estático longitudinal, tangencial e radial, respectivamente.** Valores não calculados de C_{RR}, já que os valores de velocidade estão incoerentes.

A correlação entre Eest e as constantes de rigidez é sempre significativa a 5% de significância para as três direções de corpos de prova estudadas, Tabela 4. Os coeficientes de determinação (R²) para as madeiras são, respectivamente, 52%, 76% e 80% para as direções longitudinal, tangencial e radial, calculados com a velocidade determinada com o transdutor longitudinal de 180 kHz. Nogueira e Ballarin (2003) encontraram valores de 97%, 42% e 82% para a madeira de *Pinus taeda*, nas direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. De acordo com Feio et al. (2004) os valores de R² para a madeira de castanheira foram de 74% na direção longitudinal e 86% para as direções tangencial e radial. Já Stangerlin et al. (2008) obtiveram valores de R² variando de 84,45 a 87,95% para madeira de *Patagonula americana*, cuja densidade é 740 kg.m⁻³ e de 91,08 a 95% para a madeira de *Araucaria angustifolia*, cuja densidade foi de 520 kg.m⁻³, por meio de compressão paralela às fibras.

Tabela 4: Análise de regressão entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico em cada direção analisada

Direção	R ² ajust	R ²	p-valor
Longitudinal	52	50,7	0,000
Tangencial	76,4	75,7	0,000
Radial	80,2	79,7	0,000

4. CONCLUSÃO

O método de propagação de onda ultrassônica mostrou ser uma ferramenta eficiente para estimar o módulo de elasticidade de madeiras brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALJETS, D.; CHONG, A.; WILCOX, S. Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array. In: EUROPEAN WORKING GROUP ON ACOUSTIC EMISSION – EWGAE. Viena, Áustria. 9p. 2010.
- [2] 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.
- [3] BARRETT, J. D.; HONG, J. Moisture content adjustments for dynamic modulus of elasticity of wood members. Wood Sci. Technol., v. 44, n. 3, p. 485-495, 2010.
- [4] BUCUR, V. Acoustics of wood. New York: CRC Press, 1995.
- [5] 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.
- [6] CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JÚNIOR, A. P. Avaliação não-destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultrassom – fundamentos físicos e resultados experimentais. Cerne, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178-191, 2003.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] KRETSCHMANN D, E. Mechanical properties of wood. In: Forest Products Laboratory. Wood handbook: wood as an engineering material. Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. Cap. 5, p. 1-44.
- [12] LATORRACA, J. V. F.; RODRIGUES, N. D.; VIEIRA, M. C.; OHANA, C. C. O.; TEIXEIRA, J. G. Efeito da umidade da madeira na propagação de ondas mecânicas. Floresta e Ambiente. v. 4, n. 18, out.-dez., p. 451-459. 2011.
- [13] MURPHY, J. F. Commentary on factors affecting transverse vibration using an idealized theoretical equation. Madison: Forest Products Laboratory, 4p. 2000.

- [14] 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.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT- NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- [16] NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A. W. Sensibilidade dos ensaios de ultra-som à ortotropia elástica da madeira. Pan- American Conference for Nondestructive Testing. 2003.
- [17] SANDOZ, J. L. Triage et fiabilité de bois de construction. 186p. Tese (Doutorado em Sciences Techniques) – Département de Génie Civil, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Suisse. 1990.
- [18] 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.
- [19] STANGERLIN, D. M.; GONÇALEZ, 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.
- [20] 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, v. 25, n. 2, p. 291-299, 2005.