

USO DO ULTRASSOM PARA ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Peltophorum dubium*

Diego Martins Stangerlin¹, Darci Alberto Gatto², Rafael Rodolfo de Melo³,
Leandro Calegari⁴, Magnos Alan Vivian⁵, Patrícia Aparecida Rigatto Castelo⁶,
Rafael Beltrame⁷

Resumo: O objetivo do presente estudo foi avaliar o uso da constante elástica dinâmica obtida por meio de ensaio não-destrutivo como parâmetro na estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. obtidas por meio de ensaio destrutivo. Para tanto, utilizou-se equipamento emissor de ondas ultra-sônicas (método não-destrutivo) adaptado com transdutores de pontos secos de 45 kHz. A velocidade ultra-sônica foi determinada ao considerar a transmissão da onda ao longo do comprimento dos corpos-de-prova, que apresentavam dimensões nominais de 2,5 x 2,5 x 41 cm de espessura, largura e comprimento, respectivamente. Com base na relação entre velocidade ultra-sônica e massa específica da madeira determinou-se a constante elástica dinâmica. Para avaliar a sensibilidade do método ultra-sonoro, os corpos-de-prova foram ensaiados destrutivamente a flexão estática, com determinação dos módulos de elasticidade e de ruptura. Os resultados demonstraram que o método ultra-sonoro é uma ferramenta rápida e de eficácia moderada para inferência não-destrutiva das propriedades mecânicas da madeira. No entanto, verificou-se diferença quanto ao ajuste dos modelos estatísticos gerados para estimativa das propriedades, sendo encontrados melhores parâmetros de regressão na estimativa do módulo de elasticidade, em comparação com o módulo de ruptura.

¹ Engenheiro Florestal, M.Sc., Professor Assistente do Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais (ICAA), Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) – Campus de Sinop. Avenida Alexandre Ferronato, 1200, Setor Industrial, CEP: 78550-000 - Sinop, MT. <stangerlin@ufmt.br>

² Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, RS. <darciigatto@yahoo.com>

³ Engenheiro Florestal, M.Sc., Professor Assistente do Campus Professora Cinobelina Elvas, Universidade Federal do Piauí. Bom Jesus, PI. <rrmelo2@yahoo.com.br>

⁴ Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto da Unidade Acadêmica de Engenharia Florestal, Centro de Saúde e Tecnologia Rural, Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Patos, PB. <calegari@cstr.ufcg.edu.br>

⁵ Engenheiro Florestal, Mestrando em Engenharia Florestal, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria, RS. <magnosalan@yahoo.com.br>

⁶ Engenheira Florestal, Dr., Professora Adjunta do ICAA-UFMT. E-mail: patyrigatto@gmail.com

⁷ Engenheiro Florestal, M.Sc., Doutorando em Engenharia Florestal do PPGEF-UFSM. <browbeltrame@yahoo.com.br>

Palavras-chave: ensaios não-destrutivos; ondas ultra-sonoras; qualidade da madeira; módulo de elasticidade; módulo de ruptura.

USE OF ULTRASOUND FOR ESTIMATIVE OF MECHANICAL PROPERTIES OF *Peltophorum dubium* WOOD

Abstract: The aimed this study was evaluate the use of dynamic elastic constant obtained by non-destructive test as a parameter in the estimative of mechanical properties of *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. wood obtained by destructive test. For this, ultrasonic equipment (not-destructive method) was utilized with point-contact transducers of 45 kHz. The ultrasonic velocity was determined considering the wave transmission along the length of the samples, which dimensions of 2.5 x 2.5 x 41 cm in thickness, width and length, respectively. Based on the relationship between ultrasonic velocity and density of the wood was determined the dynamic elastic constant. The ultrasonic method sensibility was evaluated with subsequent static-bending test where modulus of elasticity and rupture determination. The results showed that ultrasonic method it's fast and moderately efficient tool for inference non-destructive of mechanical properties. However, was verified difference in the adjustment of statistical models generated to estimate the properties, and found the best regression parameters to estimate the modulus of elasticity, compared with the modulus of rupture.

Keywords: not-destructive methods; ultrasound waves; wood quality; modulus of elasticity; modulus of rupture.

1 INTRODUÇÃO

As avaliações de natureza destrutiva são, em geral, os principais métodos utilizados para o conhecimento das propriedades tecnológicas da madeira. Os resultados obtidos a partir dessa metodologia, por vezes, são onerosos em razão do tempo consumido com a confecção dos corpos-de-prova e custo dos equipamentos. Além disso, os resultados obtidos são apenas uma estimativa, já que os ensaios são realizados por meio de amostragem e não da peça real em uso.

Embora a hipótese básica para avaliação não-destrutiva da madeira tenha sido proposta por Jayne (1959), no Brasil essa técnica começou a ser estudada apenas no final

da década de 1980. Seu idealizador afirma que a armazenagem de energia e as propriedades de dissipação na madeira, que podem ser medidas por meio não-destrutivo, são controladas pelos mecanismos que determinam o comportamento desse material frente a solicitações estáticas. Microscopicamente, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e por sua composição estrutural, aspectos que influenciam as características elásticas da madeira. Essas propriedades são frequência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade de propagação da onda. Desse modo, as medidas das taxas de deterioração de vibrações livres ou atenuação de ondas acústicas são utilizadas para observar a propriedade de dissipação de energia na madeira.

Segundo Wang et al. (2007), significativos esforços estão sendo direcionados para o desenvolvimento de uma tecnologia consistente de avaliação não-destrutiva capaz de prever com eficácia as propriedades intrínsecas da madeira.

Com base nos princípios da propagação de ondas mecânicas, a avaliação não-destrutiva de madeiras por meio da técnica de emissão de ondas de ultrassom, atualmente, aparece como sendo um dos métodos mais aplicados e promissores, em função da facilidade de operação e custo relativamente baixo na aquisição e operacionalização do equipamento, quando comparado aos equipamentos utilizados em ensaios destrutivos.

De acordo com Gonzalez et al. (2001), classificam-se como ondas de ultrassom aquelas de frequência superior a 20 kHz. O método ultra-sonoro se baseia na análise da propagação das ondas ultra-sonoras e sua relação com as constantes elásticas da madeira.

Calegari (2006) cita que a propagação de ondas ultra-sônicas se dá por meio de um circuito eletrônico que emite pulsos elétricos. Esses pulsos são conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezolétrico, localizado nos transdutores. As vibrações mecânicas se deslocam pelo material que atenua o sinal emitido pelo gerador. O sinal retardado é recuperado por outro cristal piezolétrico, sendo então amplificado e transformado em pulsos elétricos novamente, de modo a permitir a medição do tempo de propagação. A partir da distância e do tempo de percurso da onda sonora, calcula-se a velocidade da mesma.

Apesar dos registrados avanços tecnológicos, as pesquisas envolvendo a utilização da avaliação não-destrutiva, visando à determinação das propriedades mecânicas da madeira ainda são incipientes no Brasil, quando comparadas aos países desenvolvidos. Conforme descrito por Oliveira (2001), os avanços tecnológicos tem permitido melhorar o aproveitamento da madeira e de seus derivados, criando novos produtos e ampliando sua

aplicação. Dentre esses avanços, pode-se destacar a técnica de ultrassom como uma importante ferramenta para classificar peças estruturais de madeira, e dessa forma, permitir um incremento na qualidade e na competitividade desse material. No entanto, para isso se faz necessária a compreensão do fenômeno de propagação das ondas ultra-sônicas no material, mediante estabelecimento de relações entre as diversas variáveis envolvidas.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o uso da constante elástica dinâmica obtida por meio de ensaio não-destrutivo (ultrassom) como parâmetro na estimativa das propriedades mecânicas (módulos de elasticidade e de ruptura) da madeira de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. obtidas por meio de ensaio destrutivo (flexão estática).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para realização do presente estudo foi utilizada madeira de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (canafistula), abatida de plantios homogêneos com 10 de anos de idade, instalados na Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária – Florestas (FEPAGRO), município de Santa Maria, RS. Foram selecionadas, de modo aleatório, seis árvores de bom fuste, grã reta e diâmetro a altura do peito (DAP) entre 20 e 30 cm, das quais foram retiradas toras de 1 m de comprimento cada.

Com auxílio de uma serra-de-fita, as toras foram desdobradas em tábuas de 2,5 cm de espessura. Posteriormente, de cada tábua foram retirados sarrafos com 2,5 cm de largura, a partir do quais, por meio de seccionamento transversal, foram confeccionados os corpos-de-prova para realização dos ensaios, com as seguintes dimensões: 2,5 x 2,5 x 41 cm (espessura, largura e comprimento). Selecionaram-se 20 corpos-de-prova, tendo o cuidado em descartar o material que apresentava defeitos, como, inclinação acentuada da grã, presença de nós e/ou medula.

Antecedendo os ensaios, destrutivo e não-destrutivo, os corpos-de-prova foram acondicionados em câmara climatizada (20° C de temperatura e 65 % de umidade relativa) até o momento em que os mesmos apresentaram um teor de umidade de equilíbrio equivalente a 12%.

Para a realização dos ensaios não-destrutivos foi utilizado equipamento de ultrassom dotado de transdutores de pontos secos com frequência de aproximadamente 45 kHz, que medem diretamente o tempo de propagação das ondas, em microssegundos (μ s).

A determinação do tempo de propagação das ondas ultra-sônicas foi realizada no centro das amostras, considerando a direção longitudinal da madeira. Realizaram-se duas leituras do tempo de propagação das ondas e, a partir da razão entre o valor médio dessas e a distância do trecho percorrido (comprimento real do corpo-de-prova) calculou-se a velocidade de propagação das ondas.

A constante elástica dinâmica (E_d) foi calculada por meio do produto entre a velocidade de propagação e a massa específica da madeira (Equação 1).

$$E_d = V^2 * ME \quad \text{(Equação 1)}$$

em que: E_d = Módulo de elasticidade dinâmico (MPa); V = Velocidade de propagação da onda ($m.s^{-1}$); ME = Massa específica da madeira a 12% de umidade ($kg.m^{-3}$).

Para avaliar a acurácia e a sensibilidade do método ultra-sonoro, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios destrutivos de flexão estática, com posterior obtenção dos módulos de elasticidade e de ruptura, utilizando-se de uma máquina universal de ensaio atendendo-se, no geral, as prescrições da norma American Society for Testing and Materials - ASTM D143-94 (1994).

Para análise dos resultados foi aplicada análise de regressão, em que a variável independente foi a constante elástica dinâmica obtida em ensaio de ultrassom e a variável dependente a propriedade mecânica de elasticidade ou de ruptura obtida em ensaio convencional de flexão estática.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 encontram-se, de modo detalhado, os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática (destrutivo) e ultrassom (não-destrutivo).

Observa-se que os dados apresentaram variabilidade considerável, exceto para a variável velocidade de propagação da onda ultra-sonora, acima de 10%, limite esse considerado como de ótima precisão. A variabilidade apresentada pode ser explicada devido a elevada proporção de madeira juvenil nos corpos-de-prova ensaiados. De modo geral, verifica-se na madeira juvenil uma maior variação das propriedades, com ascensão significativa, principalmente, nos primeiros anéis de crescimento e, posteriormente com a formação da madeira adulta ocorre a estabilização.

Tabela 1. Valores mínimos, máximos, médios e desvios padrões obtidos nos ensaios de flexão estática e de ultrassom.

Table 1. Minimum values, maximum, average and standard deviations obtained in the static bending and ultrasound.

	Ensaio ultra-sonoro		Ensaio de flexão estática	
	Vsom (m.s ⁻¹)	Ed (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Mínima	2906,89	5762,33	3707,38	58,97
Máxima	3705,72	11363,40	8334,28	92,62
Média	3309,91	7843,51	5738,81	77,38
DP	229,01	1486,94	1096,60	9,39
CV (%)	6,92	18,96	19,11	12,14

Em que: Vsom= velocidade de propagação da onda ultra-sonora; Ed= constante elástica dinâmica; MOE= módulo de elasticidade; MOR= módulo de ruptura; DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação.

Os valores médios da velocidade de propagação das ondas obtidas nos ensaios ultra-sônicos ficaram aquém do relatado por outros pesquisadores (BALLARIN; NOGUEIRA, 2005; PUCCINI, 2002; SIMPSON, 1998; GONÇALEZ et al., 2001), os quais citam valores entre 4000 a 6000 m.s⁻¹. As diferenças encontradas, provavelmente, estão intrinsecamente relacionadas às propriedades morfológicas (tipo de lenho e grã) e anatômicas (espécie) da madeira de canafistula em estudo, e não relacionadas a questões operacionais, como características dos transdutores e tipo de onda gerada. Segundo Shimoyama (2005), a madeira juvenil apresenta menor percentual de lenho tardio, fibras menos espessas, maior diâmetro de lume e menor massa específica, proporcionando menor velocidade das ondas ultra-sonoras quando comparada a madeira adulta.

Ao comparar a constante elástica dinâmica e o módulo de elasticidade pode-se verificar que o primeiro é cerca de 1,37 vezes superior ao segundo. Autores como, Bartholomeu (2001), Puccini (2002), Gonzalez et al., 2001 e Stangerlin et al., (2008) citam valores para tal razão entre 1,06 e 1,60. Simpson; Wang (2001) e Ouis (2002) afirmam que esse comportamento se deve a natureza viscoelástica da madeira. Oliveira et al. (2003) citam que na vibração de uma espécie de madeira, a força elástica restaurada é proporcional ao deslocamento e a força dissipativa é proporcional a velocidade. Portanto, quando a força é aplicada com curta duração, o material se comporta como um sólido elástico, enquanto que para uma longa duração o comportamento é igual ao de um líquido viscoso. Esse comportamento é mais proeminente no ensaio de flexão estática, o qual apresenta longa duração se comparado ao ensaio de ultrassom. Em consequência de tal comportamento a constante elástica dinâmica obtida em ensaio de ultrassom é, em geral, maior que o módulo de elasticidade à flexão estática.

Nas Figuras 1 e 2 são apresentados os modelos estatísticos gerados para a estimativa dos módulos de elasticidade e de ruptura obtidos no ensaio de flexão estática em função da constante elástica dinâmica obtida pelo ensaio de ultrassom.

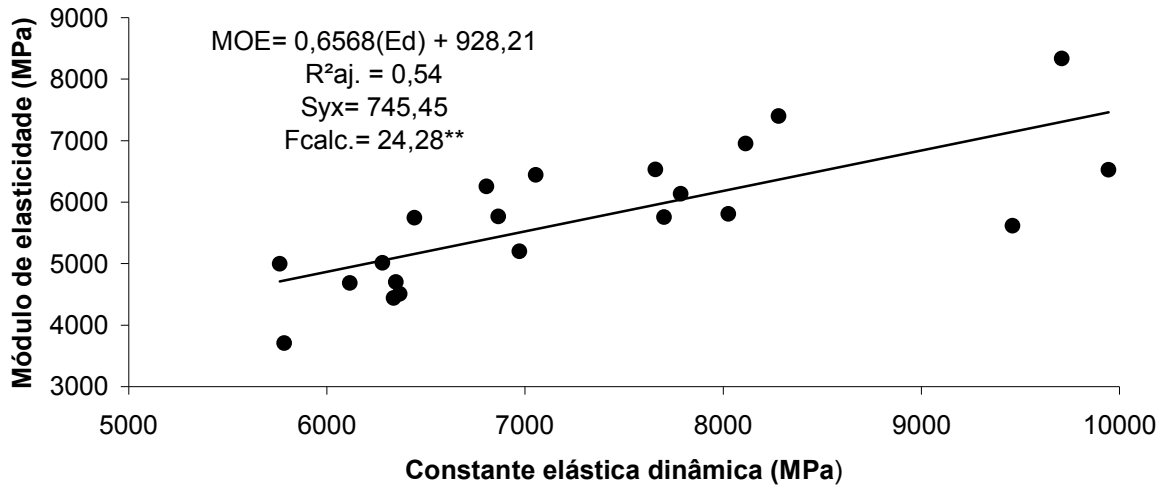


Figura 1. Modelo estatístico gerado para a estimativa do módulo de elasticidade a flexão estática em função da constante elástica dinâmica.

Figure 1. Statistical model to estimate of the modulus of elasticity in static bending as a function of the elastic constant dynamics.

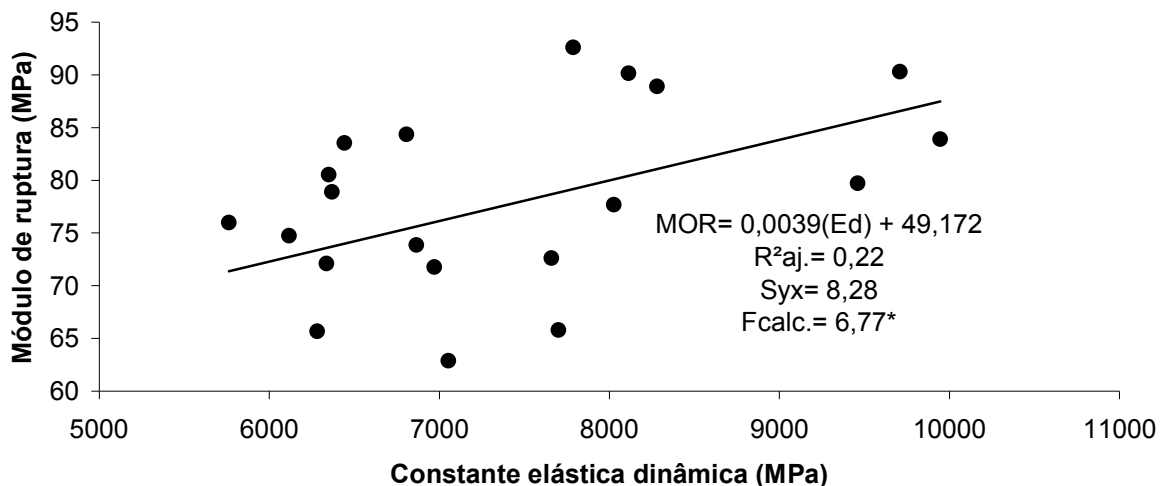


Figura 2. Modelo estatístico gerado para a estimativa do módulo de ruptura a flexão estática em função da constante elástica dinâmica.

Figure 2. Statistical model to estimate of the modulus of rupture in static bending as a function of the elastic constant dynamics.

Por meio dos parâmetros de regressão (maior coeficiente de determinação ajustado, menor erro padrão de estimativa e maior valor de F calculado) pode-se verificar que o melhor ajuste foi na estimativa do módulo de elasticidade, além disso, o mesmo foi significativo a 1%, enquanto que o modelo gerado para estimativa do módulo de ruptura apresentou significância a 5%. Tal resultado também foi constatado por Halabe et al. (1995) ao correlacionar os módulos de elasticidade e de ruptura (ensaios mecânicos) de diferentes espécies com as constantes elásticas dinâmicas obtidas mediante ensaios de propagação de ondas ultra-sonoras. Conforme Oliveira et al. (2003) e Miná et al. (2004) esse comportamento se deve ao fato que a tensão induzida na madeira durante os ensaios dinâmicos é muito pequena, ou seja, as medições dinâmicas são baseadas nas propriedades mecânicas apenas no limite elástico. O módulo de ruptura acontece em maior tensão e depois do limite elástico resultando, conseqüentemente, em predições menos eficazes por meio dos ensaios não-destrutivos.

Apesar dos modelos terem sido significativos, outros estudos (GONÇALEZ et al., 2001; SANDOZ, 1989; STANGERLIN et al., 2008; BUCUR, 2006; FEIO, 2006) têm demonstrado melhores ajustes na predição das propriedades mecânicas pelo método ultra-sonoro. A principal justificativa para tal comportamento no presente estudo, provavelmente, se deve a alta variabilidade nas propriedades mecânicas presente na madeira juvenil. No entanto, deve-se ressaltar que o uso do ultrassom não deve ser descartado em materiais jovens, sendo uma importante ferramenta para classificação da qualidade da madeira (PUCCINI, 2002), como segregação entre material juvenil e adulto.

4 CONCLUSÕES

Apesar dos valores absolutos dos módulos de elasticidade obtidos pelos métodos destrutivo e não-destrutivo serem diferentes em razão da natureza viscoelástica da madeira, o método ultra-sonoro foi eficiente por avaliar, de forma rápida e eficaz, as diferenças relativas à qualidade da madeira. Entretanto, com relação a estimativa do módulo de ruptura em função da constante elástica dinâmica recomenda-se cautela quanto ao emprego do ultrassom, visto que o modelo estatístico gerado não se mostrou tão satisfatório quanto ao verificado para estimativa do módulo de elasticidade. Da mesma forma, recomenda-se estudos com o uso do ultrassom para material procedentes de florestas adultas, tendo assim

uma maior caracterização das propriedades da madeira para a espécie *Peltophorum dubium*.

5 REFERÊNCIAS

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D-143**. Standard methods of testing small clear specimens of timber. Annual Book of ASTM Standards, v.4.10,p.24-65, 1994.

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, 2005.

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som**. Campinas: UNICAMP, 2001. 105f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade de Campinas, 2001.

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. 2 ed. Basileia, Birkhäuser, 2006. 393p.

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira**. Santa Maria: UFSM, 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

FEIO, A.J.O. **Inspection and diagnosis of historical timber Structures: NDT correlations and structural behavior**. Minho: UMinho, 2006. 219f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade do Minho, 2006.

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, 2001.

HALABE, U.B.; BIDIGALU, G.M.; GANGARAO, H.V.S.; ROSS, R.J. Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. **Materials Evaluation**, v.55, n.9, p.1013-1018, 1995.

JAYNE, B.A. Vibrational properties of wood as indices of quality. **Forest Products Journal**, Madison, v.9, n.11, p.413-416, 1959.

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.1, n.65, p.188-189, 2004.

OLIVEIRA, F.G.R. **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som**. São Carlos: USP, 2001. 55f. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, 2001.

OLIVEIRA, F.G.R.; CANDIAN, M.; LUCCHETTE, F.F.; CALIL Jr., C.; SALES, A. Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultra-som. In: PAN AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, 3., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Pan American Conference for Nondestructive Testing, 2003. 5p.

OUIS, D. Dispersion of wood as a consequence of its viscoelasticity. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 13., 2002, Berkeley. **Proceedings...** Berkeley: University of California, 2002. 8p.

PUCCINI, C.T. **Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som.** Campinas: UNICAMP, 2002. 139f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, 2002.

SANDOZ, J.L. Grading of construction timber by ultrasound. **Wood Science Technology**, New York, v.23, n.1, p.95-108, 1989.

SIMPSON, W.T. Relationship between speed of sound and moisture content of red oak and hard maple during drying. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.30, n.4, p.405-413, 1998.

SIMPSON, T.S.; WANG, X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying. **Forest Products Journal**, Madison, v.51, n.10, p.51-54, 2001.

SHIMOYAMA, V.R.S. **Estimativas de propriedades da madeira de Pinus taeda através do método não-destrutivo emissão de ondas de tensão, visando à geração de produtos de alto valor agregado.** Curitiba: UFPR, 2005. 151f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, 2005.

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**, Recife, v.3, n.2 p.145-150, 2008.

WANG, X.; CARTER, P.; ROSS, R.J.; BRASHAW. Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials – a path to increased profitability. **Forest Products Journal**, Madison, v.57, n.5, p.6-14, 2007.