

ESTIMATIVA DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE E RUPTURA DA MADEIRA DE *Eucalyptus cloeziana* F. Muell POR MEIO DE MÉTODO NÃO DESTRUTIVO

Magnos Alan Vivian¹, Karina Soares Modes², Elio José Santini³, Douglas Edson Carvalho⁴,
Wesley Wilker Corrêa Morais⁵, Joel Telles de Souza⁶, Darci Alberto Gatto⁷

Resumo: O presente estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o uso da constante elástica dinâmica obtida por meio de ensaio não destrutivo, como parâmetro na estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana* obtidas por meio de ensaio destrutivo. Para tanto, com um equipamento emissor de ondas ultrassônicas adaptado com transdutores de pontos secos de 45 kHz, determinou-se a velocidade ultrassônica relacionando-se a distância e o tempo de transmissão da onda ao longo do comprimento de corpos de prova com dimensões nominais de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm de espessura, largura e comprimento, respectivamente. Para avaliar a sensibilidade do método ultrassonor, os corpos de prova foram ensaiados destrutivamente na máquina universal de ensaio para a determinação dos módulos de elasticidade e ruptura em flexão estática. Os resultados demonstraram que o método ultrassonor é uma ferramenta rápida e eficaz para inferência não destrutiva das propriedades mecânicas da madeira. No entanto, diferenças quanto ao ajuste dos modelos estatísticos evidenciaram que os melhores parâmetros de regressão foram obtidos para estimativa do módulo de elasticidade, em comparação com o módulo de ruptura.

Palavras-chave: Qualidade da madeira, onda ultrassonora, ensaio não destrutivo, módulo de elasticidade, módulo de ruptura.

¹ Engenheiro Florestal, M.Sc., Doutorando em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura ãLuiz de Queiroz (ESALQ). Piracicaba, SP, <magnosalan@yahoo.com.br>.

² Engenheira Florestal, M.Sc., Professora Assistente do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Rondônia (UNIR) - Campus de Rolim de Moura. Rolim de Moura, RO, <ksmodes@gmail.com>.

³ Engenheiro Florestal, Dr., Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, <ejsantini@gmail.com>.

⁴ acadêmico do Curso de Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, <douglasecar@hotmail.com>.

⁵ Engenheiro Florestal, M.Sc., Professor Assistente do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Estadual de Roraima (UERR), São João da Baliza, RR, <wesley_eng@yahoo.com.br>.

⁶ Engenheiro Florestal, Mestre em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, <joeltelles@hotmail.com>.

⁷ Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Curso de Engenharia Industrial Madeireira, UFPel. Pelotas, RS, <darciatto@yahoo.com>.

ESTIMATION OF MODULUS OF ELASTICITY AND RUPTURE OF

Eucalyptus cloeziana F. Muell WOOD THROUGH NON-DESTRUCTIVE METHOD

Abstract: This study was developed aiming at evaluating the use of constant dynamic elastic obtained by non-destructive testing, as a parameter in the estimation of mechanical properties of *Eucalyptus cloeziana* obtained by destructive test. With equipment emitting ultrasonic waves from transducers adapted to dry spots of 45 kHz, we determined the ultrasonic velocity relates to distance and time of transmission of the wave along the length of specimens used in test with nominal dimensions of 2.0 x 2.0 x 30.0 cm in thickness, width and length, respectively. To assess the sensitivity of ultrasound, the samples were tested for evidence-destructively in a universal test for determining the modulus of elasticity and rupture in static bending. The results showed that the ultrasonic method is a fast and efficient tool for inference of non-destructive wood mechanical properties. However, differences in the adjustment of statistical models showed that the best regression parameters were obtained to estimating the modulus of elasticity, compared with the modulus of rupture.

Keywords: wood quality, ultrasound waves, not-destructive testing, modulus of elasticity, modulus of rupture.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Bodig & Jayne (1982), a madeira apresenta grande variabilidade nas suas propriedades, o que é resultado, em parte, das condições de crescimento das árvores. As propriedades físicas da madeira também são influenciadas pela sua estrutura interna complexa, resultando em um comportamento anisotrópico. Além da variabilidade natural e anisotropia, a madeira também apresenta como características a porosidade e a não homogeneidade.

Atualmente, a caracterização das propriedades mecânicas da madeira é feita por meio da avaliação destrutiva de corpos de prova, o que pode resultar na variabilidade dos resultados devido a fatores como uma amostragem inadequada ou problemas na confecção do corpo de prova.

É possível uma caracterização eficaz da madeira por meio de métodos não destrutivos, nos quais não é necessária a extração de corpos de prova, uma vez que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura. Segundo Ross et al. (1998), a avaliação não destrutiva é definida

como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar as suas capacidades de uso final.

As avaliações destrutivas são, em geral, os principais métodos utilizados para o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira. A obtenção de resultados a partir dessas metodologias, por vezes, é onerosa, em razão do tempo consumido para a confecção dos corpos de prova e custo do material. Por sua vez, as avaliações não destrutivas permitem a obtenção de informações mais precisas e mais amplas, medindo-se um maior número de amostras, em função da rapidez dos testes (STANGERLIN et al., 2008).

Conforme Stangerlin et al. (2010), fundamentado 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.

Segundo Bucur & Böhnke (1994), diversos fatores influenciam a propagação de ondas ultrassônicas na madeira, dentre os quais se podem citar: propriedades físicas do substrato, características anatômicas da espécie, condições do meio (temperatura e umidade) e procedimento utilizado na sua medição.

Segundo Erikson et al. (2000), a avaliação não destrutiva é uma importante ferramenta para a caracterização da madeira, podendo ser utilizada pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos através de uma maior uniformidade na matéria prima e em seus derivados.

De acordo com Ross (1999), várias tecnologias, como raios-X, análise química, propriedades vibracionais e transmissão de ondas sonoras, são usadas para avaliar a madeira de modo não destrutivo.

Cada uma das técnicas não destrutivas apresenta vantagens e desvantagens que afetam seu uso. A aplicação adequada das técnicas possibilita uma avaliação mais confiável das propriedades do material garantindo sua integridade para o uso estrutural.

O ultrassom é caracterizado por frequências acima de 20000 Hz. De acordo com Oliveira (2001), entre as vantagens de sua utilização, vale destacar o baixo custo de aquisição do equipamento quando comparado com o das máquinas de classificação automática, e o treinamento relativamente simples da mão de obra para utilização do equipamento, possibilitando que o método seja facilmente difundido em revendedores e indústrias de madeiras e derivados.

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

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo estimar os módulos de elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR) da madeira *Eucalyptus cloeziana*, obtidos por ensaios destrutivos de flexão estática, por meio de ensaios não destrutivos com ultrassom.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste estudo foi coletado em um povoamento pertencente à empresa FLOSUL Madeiras, localizada no município de Capivari do Sul ó RS. As árvores de *Eucalyptus cloeziana*, com 16 anos de idade, foram abatidas, transformadas em toras de 2,0 m de comprimento e transportadas para a serraria da empresa. Na serraria, as toras foram desdobradas em tábuas com as dimensões de 2,2 x 9,0 x 200,0 cm, de acordo com os padrões utilizados pela FLOSUL para a produção de decks de madeira.

Em seguida, essas tábuas foram encaminhadas para o Laboratório de Produtos Florestais (LPF) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e, com auxílio de uma serra circular, realizada a confecção dos corpos de prova com as dimensões de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm (espessura, largura e comprimento), conforme a norma COPANT 30:1-006 (1972). Selecionaram-se 15 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 mantidos em câmara climatizada (20 °C de temperatura e 65 % de umidade relativa) até a estabilização do 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 (Figura 1), que medem diretamente o tempo de propagação das ondas, em microssegundos (μ s).



Figura 1. Ultrassom utilizado para realização do ensaio não destrutivo.

Figure 1. Ultrasound for non-destructive testing.

A determinação do tempo de propagação das ondas ultrassônicas 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).

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

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

Para avaliar a acurácia e a sensibilidade do método ultrassonoro, 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 Ensaios Mecânicos, com capacidade de 20 toneladas de carga, dotada de um computador acoplado com software específico para aquisição dos dados.

Para avaliação estatística dos resultados foi aplicada uma análise de regressão, em que a variável independente foi a constante elástica dinâmica (E_d) obtida em ensaio de ultrassom e a variável dependente a propriedade mecânica de elasticidade (MOE) ou de ruptura (MOR) 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 aceitável, abaixo de 10%, limite esse considerado como de ótima precisão (STANGERLIN et al., 2010), exceto para as variáveis de constante elástica dinâmica e módulo de elasticidade, que estão acima de 10%.

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.

	ME (g.cm ⁻³)	Ensaio ultrassonoro		Ensaio flexão estática	
		V som (m.s ⁻¹)	Ed (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Mínimo	0,72	3780,00	10226,04	12839,87	113,31
Máximo	0,92	4290,00	16905,14	20081,89	157,65
Médio	0,80	4116,00	13544,68	15954,80	130,57
s	0,07	139,89	1884,56	2165,99	12,55
CV%	8,26	3,40	13,91	13,58	9,61

Em que: V_{som}= velocidade de propagação da onda ultrassonora; E_d= constante elástica dinâmica; MOE= módulo de elasticidade; MOR= módulo de ruptura; s= desvio padrão; CV%= coeficiente de variação.

Os valores médios da velocidade de propagação das ondas obtidas nos ensaios ultrassônicos ficaram dentro da média relatada por outros pesquisadores (BALLARIN & NOGUEIRA, 2005; PUCCINI, 2002; SIMPSON, 1998; GONÇALEZ et al., 2001), os quais obtiveram valores entre 4000 a 6000 m.s⁻¹. Entretanto algumas amostras apresentaram valores de velocidade de propagação abaixo deste intervalo, o que provavelmente está intrinsecamente relacionado com as propriedades morfológicas (tipo de lenho e grã) e anatômicas da espécie.

Em relação ao MOE e MOR, os valores encontrados estão consoantes aos observados por Vivian (2011), para a mesma espécie em questão, com 16045,6 e 124,5 MPa, respectivamente, para MOE e MOR.

Nas Figuras 2 e 3 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.

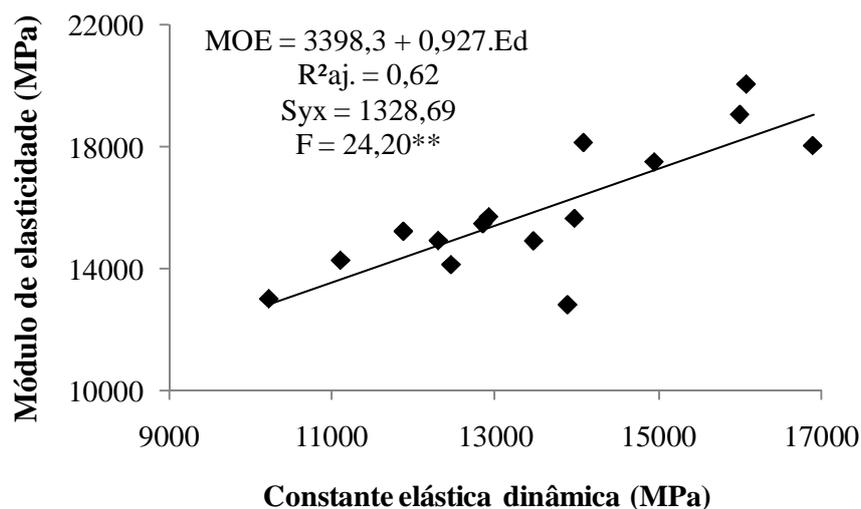


Figura 2. Modelo estatístico para a estimativa do módulo de elasticidade a flexão estática em função da constante elástica dinâmica.

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

Conforme Oliveira et al. (2005) diversas pesquisas demonstram correlações significativas para a estimativa do MOE em função do Ed, com coeficientes de determinação (R^2) entre 0,57 e 0,89. O valor do $R^2_{aj.}$ encontrado no presente estudo para estimativa do MOE em função do Ed situa-se dentro do intervalo mencionado pelo autor, o que evidencia um bom ajuste dos dados.

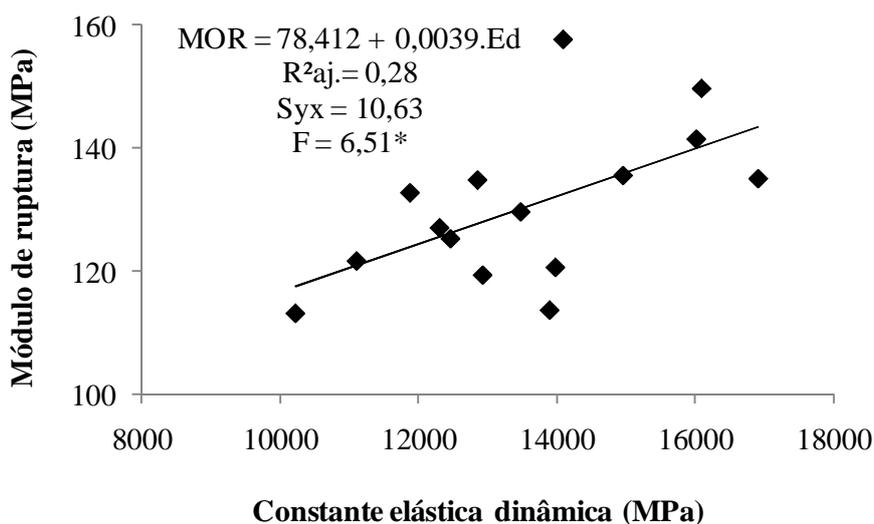


Figura 3. Modelo estatístico para a estimativa do módulo de ruptura a flexão estática em função da constante elástica dinâmica.

Figure 3. Statistical model to estimate of the modulus of rupture in static bending as a function of the elastic constant dynamics.

O ajuste observado para o MOR em função da Ed foi relativamente baixo, porém superior ao encontrado por Stangerlin et al. (2010), que obtiveram um R^2_{aj} de 0,22. Com base nos parâmetros de regressão (maior coeficiente de determinação ajustado e maior valor de F calculado) pode-se verificar que o melhor ajuste foi na estimativa do módulo de elasticidade. Acrescenta-se a isso, que o ajuste foi significativo a 1% de probabilidade, enquanto o modelo gerado para estimativa do módulo de ruptura apresentou significância a 5%. Resultados similares também foram constatados por Halabe et al. (1995) e Stangerlin et al. (2010) ao correlacionarem os módulos de elasticidade e de ruptura obtidos nos ensaios mecânicos de diferentes espécies com as constantes elásticas dinâmicas estimadas mediante ensaios de propagação de ondas ultrassônicas.

Segundo 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 ser muito pequena, ou seja, as medições dinâmicas são baseadas nas propriedades mecânicas apenas no limite elástico. Já para o módulo de ruptura acontece maior tensão e depois do limite elástico resultando, conseqüentemente, em predições menos eficazes por meio dos ensaios não destrutivos.

A correlação de Pearson estabelecida entre a massa específica, flexão estática e ensaio ultrassônico é apresentada na Tabela 2. Essa análise evidencia que à exceção da relação entre ME e MOR, as variáveis estão altamente correlacionadas entre si, apresentando valores significativos para todas as demais relações.

Tabela 2. Correlação de Pearson entre as variáveis na flexão estática e ensaio ultrassônico.
Table 2. Pearson correlation between the variables in static bending and ultrasound waves.

	ME	MOE	MOR	V. SOM	Ed
ME	1				
MOE	0,77**	1			
MOR	0,47 ^{ns}	0,85**	1		
V. SOM	0,73**	0,71**	0,62*	1	
Ed	0,95**	0,81**	0,58*	0,90**	1

Em que: ME=massa específica, $g.cm^{-1}$; MOE= módulo de elasticidade, MPa; MOR= módulo de ruptura, MPa; V_{som}= velocidade de propagação da onda ultrassônica, $m.s^{-1}$; Ed= constante elástica dinâmica, MPa. *= significativo ao nível de 5%; **= significativo ao nível de 1%; ^{ns}= não significativo.

De acordo com McDonald et al. (1990), altas correlações foram observadas entre os módulos de elasticidade obtidos a partir das técnicas de ondas acústicas (Ed) e flexão estática (MOE). O autor afirma que é mais difícil relacionar MOR com Ed, pois a presença de defeitos

e a inclinação das fibras têm efeito mais significativo no MOR do que na velocidade longitudinal da onda ultrassonora.

4 CONCLUSÕES

O método do ultrassom é uma importante ferramenta para inferência não destrutiva do módulo de elasticidade e de ruptura da madeira.

O método ultrassonoro foi eficiente por avaliar, de forma rápida e eficaz, as diferenças relativas à qualidade da madeira. Os valores dos coeficientes de determinação estão compatíveis com os usualmente encontrados na literatura, e são considerados altamente satisfatórios para um material de origem natural e anisotrópico como a madeira.

O modelo estatístico usado para estimar as propriedades de flexão em função da constante elástica dinâmica da madeira apresentou melhor ajuste para o MOE do que para o MOR. Os resultados evidenciaram que a técnica ultrassônica pode ser utilizada como um método rápido e eficiente para a inferência não destrutiva do módulo de elasticidade e de ruptura da madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

5 REFERÊNCIAS

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

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982. 712p.

BUCUR, V.; BÖHNKE, I. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. **Ultrasonics**, v.32, n.5, p. 385-390, 1994.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS - COPANT 30: 1- 006. Maderas: método de determinación de flexión estática, 1972.

ERICKSON, R. G.; GORMAN, T. M.; GREEN, D. W.; GRAHAM, D. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine, and grand Lr trees. **Forest Prod. J.**, Madison, v.50, n.7/8, p. 59-65, 2000.

GONÇALEZ, J. C.; VALLE, A. T.; COSTA, A. F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, 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.

MCDONALD, K. A.; FALK, R. H.; MALLORY, M. P. Nondestructive testing of wood products and structures: state of the art and research needs. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, **Forest Products Laboratory**. p. 137-147, 1990.

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**, 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**. 2001. 104f. Dissertação (Mestrado em 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.

OLIVEIRA, F. G. R. Influência da seção transversal na velocidade ultra-sônica na madeira de *Eucalyptus citriodora*. **Cerne**, v.11, n.2, p. 197-203, 2005.

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

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

ROSS, R. J. Using sound to evaluate standing timber: review. **Forest Products Journal**, Madison, v.49, p. 43-44, 1999.

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

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.

STANGERLIN, D. M.; GATTO, D. A.; MELO, R. R.; CALEGARI, L.; VIVIAN, M. A.; CASTELO, P. A. R.; BELTRAME, R. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**, v.01, n.02, p. 44-53, 2010.

VIVIAN, M. A. **Resistência biológica da madeira tratada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana* em ensaios de laboratório e campo.** 2011. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

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