



ESTIMATIVA DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE E RUPTURA DA MADEIRA DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze POR MEIO DE MÉTODO NÃO-DESTRUTIVO

SCHNEID, Eduardo¹; GATTO, Darci Alberto²; STANGERLIN, Diego Martins³; CALEGARI, Leandro⁴; MELO, Rafael Rodolfo de³

¹Bolsista PIBIC, Acadêmico do Curso de Engenharia Industrial Madeireira - UFPel, Cx. Postal 354 - CEP 96019-900 - Pelotas (RS). eduardoschneid87@gmail.com

²Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Curso de Engenharia Industrial Madeireira - UFPel, Cx. Postal 354 – CEP 96019-900 Pelotas (RS). darcigatto@yahoo.com

³Engenheiro Florestal, M.Sc., Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade de Brasília - UnB. diego_stangerlin@yahoo.com.br

⁴Engenheiro Florestal, Dr., Pesquisador Colaborador do Curso de Engenharia Industrial Madeireira - UFPel. leandrocalegari@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

As avaliações destrutivas são, em geral, os principais métodos utilizados para o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira. A obtenção dos 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).

Várias tecnologias, como raio-x, análise química, propriedades vibracionais e transmissão de ondas sonoras, são utilizadas para avaliar a madeira de modo não-destrutivo (ROSS, 1999).

Com base nos princípios da propagação de ondas mecânicas, a avaliação não-destrutiva de madeiras por meio da técnica de emissão de ondas de ultra-som, 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 (STANGERLIN et al., 2008).

Segundo Bucur & Böhnke (1994), diversos fatores influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas na madeira, dentre os quais pode-se citar: propriedades físicas do substrato, características anatômicas da espécie, condições do meio (temperatura e umidade) e procedimento utilizado para a tomada das medidas.

A determinação das propriedades mecânicas da madeira utilizando a técnica de propagação de ondas baseia-se na relação entre a velocidade da onda, a massa específica e o módulo de elasticidade (BUCUR, 2006).

Segundo 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) das madeiras juvenil e adulta de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, obtidos por ensaios destrutivos de compressão paralela às fibras, por meio de ensaios não-destrutivos com ultra-som.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A madeira de *Araucaria angustifolia* utilizada neste estudo foi coletada em povoamento homogêneo, com 50 anos de idade, no município de São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul. Foram abatidas três árvores de bom fuste, boa forma florestal e diâmetro a altura do peito (DAP) superior a 40 cm, das quais foram seccionadas as duas primeiras toras com dois metros de comprimento. De cada tora foram retiradas duas pranchas centrais paralelas à medula, ambas com 5 cm de espessura. Dessas pranchas, retiraram-se quatro tábuas, com 5 cm de largura, duas próximas à medula (lenho juvenil) e duas próximas à casca (lenho adulto).

Posteriormente, as tábuas foram seccionadas, transversalmente, dando origem a corpos-de-prova de dimensões nominais de 5 x 5 x 20 cm (espessura, largura e comprimento). Os corpos-de-prova que apresentavam defeitos, como grande inclinação da grã ou presença de nós e medula, foram descartados.

Antecedendo os ensaios, os corpos-de-prova foram acondicionados em câmara climática (temperatura de 20°C e 65% de umidade relativa) até atingirem teor de umidade de equilíbrio de 12%. Após, determinaram-se as massas (g) e os volumes (cm³) dos corpos-de-prova, com auxílio de balança eletrônica e paquímetro digital, e pela relação entre as variáveis obteve-se a massa específica (g/cm³)

Os tratamentos basearam-se na combinação dos dois tipos de lenho (adulto e juvenil) e dois métodos de ensaio (destrutivo e não-destrutivo), totalizando quatro tratamentos. Para cada tratamento utilizaram-se 30 corpos-de-prova.

Os ensaios não-destrutivos foram executados com equipamento portátil de ultra-som, dotado de transdutores do tipo faces planas com diâmetro útil de 2,5 cm e frequência de aproximadamente 50 kHz. Esse equipamento mede diretamente o tempo de propagação da onda, 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. Para garantir o melhor contato entre a madeira e os transdutores, aplicou-se vaselina em pasta nos topos das peças ensaiadas. Realizaram-se duas leituras do tempo de propagação da onda. A partir da razão entre a média das leituras e o comprimento do trecho percorrido pela onda, calculou-se a velocidade de propagação (V_{som}), em metros por segundo (m/s). O módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{din}) foi determinado por meio do produto entre V_{som} e a massa específica.

Os ensaios destrutivos foram realizados após os ensaios não-destrutivos, a fim de avaliar a acurácia do método ultra-sonoro. Os corpos-de-prova foram submetidos ao teste de compressão paralela às fibras, em conformidade com a norma ASTM D 143 (1995), para obtenção do MOE e MOR. Para tanto, utilizou-se uma máquina universal de ensaios com capacidade para 20 toneladas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verifica-se na Tabela 1, que as propriedades mecânicas avaliadas, tanto por ensaios destrutivos quanto não-destrutivos, apresentaram comportamento diferenciado em relação ao tipo de lenho. Os valores médios de MOE, MOR, V_{som} e MOE_{din} foram significativamente maiores para os corpos-de-prova obtidos de lenho adulto em comparação com os registrados para lenho juvenil.

A madeira adulta, próxima à casca, apresenta maior percentual de lenho tardio, fibras mais espessas, menor diâmetro de lume e é mais densa, o que proporciona maiores valores de MOE e MOR. Para ensaios não-destrutivos, Ballarin & Nogueira (2005), Shimoyama (2005) e Stangerlin et al. (2008) citam que a madeira adulta proporciona maior V_{som} e MOE_{din} .

Os valores médios de V_{som} obtidos neste trabalho foram bastante próximos daqueles relatados por outros pesquisadores (BALLARIN & NOGUEIRA, 2005; CALEGARI et al., 2007; STANGERLIN et al., 2008) ao analisarem madeiras de *Pinus* spp.

Ao analisar os valores dos módulos de elasticidade, obtidos pelas duas metodologias, verifica-se que o MOE_{din} foi superior ao MOE. Segundo Ouis (2002) e Simpson e Wang (2001), considerando-se a natureza visco-elástica da madeira, quanto maior a frequência de excitação da fonte, maior é o valor inferido para o MOE_{din} .

Tabela 1. Valores de MOE, MOR, V_{som} e MOE_{din} para as amostras de lenho juvenil e adulta de *Araucaria angustifolia*

Espécie e tipo de lenho	MOE (MPa)	MOR (MPa)	V_{som} (m s^{-1})	MOE_{din} (MPa)
AA – LJ	10.897 b	38,099 b	5.367 b	14.976 b
AA – LA	14.367 a	43,836 a	6.062 a	19.379 a

Em que: AA= *Araucaria angustifolia*; LJ= lenho juvenil; LA= lenho adulto; Médias seguidas por letras opostas diferem significativamente entre si (LSD Fisher, $p > 0,05$).

Analisando-se a Tabela 2, pode-se verificar que as regressões, de estimativa do MOE e MOR em função do MOE_{din} , foram significativas a 1% de probabilidade de erro em termos dos parâmetros da regressão, exceto para a estimativa do MOR do lenho adulto, sendo esta significativa a 5% de probabilidade de erro.

Apesar dos modelos serem significativos, os parâmetros da regressão (R^2_{aj} , S_{yx} e F) foram inferiores nos modelos ajustados para estimativa do MOR em função do MOE_{din} . Sandoz (1989) e Gonzalez et al. (2001) verificaram boas relações entre estas duas variáveis para outras espécies de madeira. No entanto, os resultados verificados neste estudo estão de acordo com o verificado por Halabe et al. (1995) ao estudar o uso de ondas de tensão com objetivo de correlacionar MOE_{din} com MOR para madeira de *Pinus* sp. Segundo Miná et al., (2004) os baixos valores de R^2_{aj} , neste caso, ocorrem porque a tensão induzida na madeira durante ensaios não-destrutivos é pequena, ou seja, esses ensaios são baseadas nas propriedades mecânicas apenas no limite elástico.

Com relação à estimativa do MOE em função do MOE_{din} , diversas pesquisas nacionais e internacionais demonstram correlações significativas, com coeficientes de determinação (R^2) entre 0,57 e 0,89 (OLIVEIRA et al., 2005). Os valores de R^2_{aj} encontrados neste estudo são superiores ao mencionado pela autora anterior, demonstrando a viabilidade do emprego do ultra-som para estimar as propriedades mecânicas da araucária.

Tabela 2. Equações para a estimativa do MOE e MOR em função do MOE_{din}

Espécie e tipo de lenho	Equação de regressão	R ² _{aj.} (%)	S _{yx}	F
AA-LJ	MOE= 240,685 + 0,71155*MOE _{din}	91,08	289,36	327,58**
AA-LA	MOE= 716,634 + 0,70435*MOE _{din}	94,99	450,82	551,16**
AA-LJ	MOR= - 2,291 + 0,002697*MOE _{din}	58,75	2,91	46,58**
AA-LA	MOR= 22,609 + 0,001095*MOE _{din}	14,99	6,66	6,11*

Em que: AA= *Araucaria angustifolia*; LJ= lenho juvenil; LA= lenho adulto; R_{aj}²= coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}= erro padrão da estimativa; F= valor de F calculado; **= significativo ao nível de 99% de confiança; *= significativo ao nível de 95% de confiança.

4. CONCLUSÕES

O método ultra-sonoro, por meio da velocidade de propagação da onda, mostrou-se eficiente para avaliação das diferenças relativas ao tipo de lenho. Além disso, foi uma importante ferramenta para inferência não-destrutiva do MOE e MOR.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D 143. **Standard methods of testing small clear specimens of timber**. Annual Book of ASTM Standards, v.04.10, p.24-65, 1995.

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

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

CALEGARI, L. et al. Monitoramento do teor de umidade de madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do ultra-som. **Ciência Florestal**, v.17, n.4, p.399-408, 2007.

GONÇALEZ, J.C. et al. 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. et al. Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. **Materials Evaluation**. p.1013-1018. 1995.

MINÁ, A.J.S. et al. 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. Influência da seção transversal na velocidade ultra-sônica na madeira de *Eucalyptus citriodora*. **Cerne**, v.11, n.2, p.197-203, 2005

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. p.8.

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

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

SHIMOYAMA, V.R. de 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. 2005. 151f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

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

STANGERLIN, D.M. et al. 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.

WANG, X. et al. Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials – a path to increased profitability. **Forest Products Journal**, v.57, n.5, p.6-14, 2007.