



## Métodos não-destrutivos para aferição dos módulos de elasticidade de madeiras em duas condições de climatização

Rogério Rodrigues Santos<sup>1\*</sup>, Alexandre Miguel do Nascimento<sup>1</sup>, Jaqueline Rocha de Medeiros<sup>1</sup>,  
Francisco Antônio Lopes Laudares<sup>1</sup>

**RESUMO:** O objetivo dessa pesquisa foi avaliar diferentes métodos para aferição do módulo de elasticidade nas madeiras de *Corymbia citriodora*, *Pinus sp.*, *Khaya ivorensis* e *Eucalyptus paniculata*, em duas condições de umidade. Foram aplicados métodos não-destrutivos vibracional longitudinal e transversal, assim como método da máquina de ensaios universal, sendo os resultados obtidos pelos métodos, comparados entre si. O método vibracional transversal foi o que obteve resultados mais próximos daquele obtido pela máquina de ensaio. Métodos de vibração sempre apresentaram valores mais elevados. Madeiras com maior grau de desvio de grã ou grã reversa, resultaram em menores estimativas de módulo, quando ensaiadas pelo método de vibração longitudinal. Maior teor de umidade da madeira reduz o módulo de elasticidade.

**Palavras-chave:** rigidez, teor de umidade higroscópico, madeira de reflorestamento.

## NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR MEASUREMENT OF MODULES ELASTICITY OF WOOD IN TWO CONDITIONS CLIMATE

**ABSTRACT:** The objective of this research was to evaluate different methods for measuring the modulus of elasticity in the wood of *Corymbia citriodora*, *Pinus sp.*, *Khaya ivorensis* and *Eucalyptus paniculata*, under two humidity conditions. Longitudinal and transversal vibrational non-destructive methods were applied, as well as the universal testing machine method, with the results obtained by the methods being compared with each other. The transverse vibrational method was the one that obtained results closest to those obtained by the testing machine. Vibration methods always presented higher values. Wood with a greater degree of grain deviation or reverse grain resulted in lower modulus estimates when tested using the longitudinal vibration method. Higher moisture content in wood reduces the modulus of elasticity.

**Keywords:** rigidity, hygroscopic moisture content, reforestation wood.

## INTRODUÇÃO

Apesar de ser um dos maiores produtores de madeira do mundo e exportar espécies raras e valiosas para construção de instrumentos musicais (DINISIA, 2019), o Brasil é essencialmente um país importador madeiras tradicionais (DER SLOOTEN, 1987), sendo ainda pequeno o número de pesquisas científicas que consolidem o conhecimento de madeiras brasileiras como úteis para esse fim.

Dessa forma, estudos que ratifiquem o potencial de uso de madeiras já difundidas no mercado brasileiro são úteis no desenvolvimento de uma oferta local. Para isso, é fundamental o desenvolvimento de ferramentas que permitam a avaliação de suas propriedades.

O presente estudo teve por objetivos a comparação do módulo de elasticidade através do ensaio em máquina de ensaios universal e dos métodos não-destrutivos, a saber: método vibracional longitudinal, método vibracional transversal, com amostras em dois teores de umidade, 12% e 18%.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Material

Foram utilizadas madeiras exóticas plantadas de *Corymbia citriodora*, *Pinus sp.*, *Khaya ivorensis*, *Eucalyptus paniculata* e *Pinus caribaea*, com dimensões de 400mm x 25mm x 10mm, referentes à comprimento, largura e espessura, respectivamente, sendo sete repetições para cada madeira. no caso da madeira de *Khaya ivorensis* a madeira foi separada em dois grupos de densidade, abaixo de 0,550 g.cm<sup>-3</sup> e acima deste valor, denominadas então como madeira de baixa densidade e alta densidade, respectivamente.

As madeiras foram climatizadas em duas condições diferentes, a saber: temperatura de 22°C e umidade relativa de 65%, e temperatura de 22°C e umidade relativa de 85%.

### Métodos de ensaios

#### Método vibracional transversal e longitudinal

Os ensaios vibracionais transversal e longitudinal foram realizados seguindo as instruções descritas nas

normativas ASTM E – 1876 (2007) e ASTM C – 215 (2008), e utilizado a primeira frequência natural de ressonância, para o cálculo do módulo de elasticidade.

### Método de flexão estática em máquina de ensaios

O módulo de elasticidade foi calculado, de forma não destrutiva, em ensaio de flexão estática realizado em máquina de ensaios universal modelo CAP 30TF UMC 300, com célula de carga de 500kgf, segundo a norma ASTM D 198 (2009). As amostras foram ensaiadas na menor inércia, com vão de 38 cm e aplicado duas cargas que não ultrapassaram o limite de proporcionalidade (LP) das madeiras. Com a diferença entre as cargas (P2-P1) e as respectivos deslocamentos ( $\delta_2 - \delta_1$ ), foi calculado o módulo de elasticidade estático. Para determinação do LP, algumas amostras de cada espécie foram ensaiadas até a ruptura.

### Análise dos dados

Os dados obtidos para variável módulo de elasticidade tiveram ou não tiveram distribuição

paramétrica e não atenderam aos pressupostos da análise de variância. Deste modo, o teste de Kruskal Wallis foi aplicado. Para diferenciação entre médias dos postos, foi usado o teste de Dunn, ao nível de 5% de significância. Coeficientes de correlação de Spearman foram aplicados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Módulo de elasticidade

Os métodos vibracionais transversal (VT) e vibracional longitudinal (VL), obtiveram valores mais próximos entre si tanto para condição de 12,2% de teor de umidade quanto para condição de 18,4%, e o método vibracional transversal foi o que mais se aproximou do método por máquina de ensaios, considerados equivalentes estatisticamente, com exceção da madeira de pinus e citriodora (Tabela 1). Mantilla e Azevedo (2003) sugerem que material com composição mais heterogênea interferem na obtenção de resultados, por métodos não destrutivos.

Tabela 1. Módulo de elasticidade em duas condições de umidade de equilíbrio para as diferentes madeiras e métodos de ensaio.

Método	<i>K. ivorensis</i> e densidade				<i>Pinus sp.</i>	<i>C. citriodora</i>	<i>E. paniculata</i>								
	baixa		alta												
22°C e UR=65%															
E	9,7	86,3	a	10,6	112,5	c	8,7	150,4	c	19,9	58,1	a	21,7	59,6	bc
VT	10,4	146,3	a	11,1	133,2	abc	9,4	221,1	ab	21,7	126	bc	23,1	119,7	ab
VL	10,4	145,6	a	12,0	168,2	ab	9,7	245,9	ab	21,8	141,7	bc	23,8	152,8	a
22°C e UR=85%															
VT2	10,2	125	b	10,8	120,3	c	9,1	184,8	bc	21,3	108,4	abc	22,8	107,1	ab
VL2	10,1	124,3	b	11,6	152,8	abc	9,3	200,5	abc	21,9	130,8	abc	23,3	125,8	ab
E/VT	<b>0,93</b>			<b>0,95</b>			<b>0,93</b>			<b>0,92</b>			<b>0,94</b>		
E/VL	0,93			0,88			0,90			0,91			0,91		
VT/VL	1,00			0,93			0,97			1,00			0,97		

Valores médios dos módulos de elasticidade (GPa); número sobrescrito é média do posto, por Kruskal-Wallis; letras minúsculas distintas na mesma coluna, indicam diferenças estatísticas, pelo método de Dunn, ao nível de 5% de significância, método de vibração longitudinal (VL), transversal (VT) e E na máquina de ensaio.

A razão entre VT/VL, oscilaram entre 0,93 e 1,0, obtendo menor valor para a madeira de mogno com densidade alta, que apresentação maiores inclinações

e com grã reversa bem marcante. O método VT teve valores mais próximos aos valores obtidos por (E).

Tabela 2. Valores de densidade aparente e teor de umidade de equilíbrio, após 15 dias de umidificação

Madeiras	22°C UR=65%		22°C UR=85%	
	Tu	Da	Tu	Da
<i>Khaya ivorensis</i> *	12,3	0,512	18,9	0,523
<i>Pinus sp.</i>	11,9	0,580	20,3	0,587
<i>Khaya ivorensis</i> **	12,2	0,715	17,4	0,729
<i>Corymbia citriodora</i>	12,1	0,796	18,7	0,816
<i>Eucalyptus paniculata</i>	12,5	1,069	16,9	1,093
média	12,2		18,4	

Para *Khaya ivorensis*, \* indica baixa densidade e \*\* indica alta densidade.

Havendo tendência que o método VL apresente valores mais elevados que aqueles obtidos por VT, sugerindo que o método VT substitui de forma mais precisa aquele feito na máquina de ensaio (E).

Na condição à 18,4% houve aumento de densidade aparente e redução do módulo de elasticidade.

Danihelová (2022) sugere que com a redução do conteúdo de água, há aumento da rigidez, redução do atrito interno e aumento na velocidade de propagação de ondas sonoras, com ganhos desejáveis para madeiras tonais, aquelas destinadas a construção de instrumento musicais. Os coeficientes de correlação

de Sperman, entre os módulos de elasticidade determinados por flexão (E) e por VT e VL foram de 0,97 e 0,98, respectivamente, para condição de 22°C UR=65%.

## CONCLUSÃO

Método de vibração transversal estima melhor a modulo de elasticidade, com equivalência ao método por aplicação de carga. Os módulos de vibração tendem a apresentar valores numéricos acima dos valores obtidos em máquina de ensaio. Ocorrem com mais frequência, equivalências entre valores dos módulos de elasticidade estático e aqueles obtidos pelo método de vibração transversal.

O aumento da umidade da madeira reduziu significativamente os valores dos módulos de elasticidade. Método de vibração longitudinal, quando aplicado em madeira com grã reversa e/ou mais inclinada, subestimam os valores de rigidez

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C - 215**: standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2008. 7 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E - 1876**: standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2007. 6 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 198**: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia: ASTM, 2009.
- DANIHELOVÁ, A. et al. Thermal Modification of Spruce and Maple Wood for Special Wood Products. **Polymers**, 2022, 14, 2813. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym14142813>>. Acesso em: 30 out. 2023.
- DI NISCIA, A. L. Unveiling the dark side of tonewoods: A case study about the musical instrument demand for the Venezuelan youth orchestra El Sistema. **Action, Criticism, and Theory for Music Education**, v. 18, n. 3, p. 259-88, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.22176/act18.3.259>>. Acesso em 21 de nov. 2023.
- SLOOTEN, H. J; SOUZA, M.R. **Avaliação das espécies madeireiras da Amazônia selecionadas para a manufatura de instrumentos musicais**. INPA, 1987. Disponível em: <<https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/5432>>. Acesso em: 30 out. 2023.
- MANTILLA, E. V. C.; AZEVEDO, A. P. J. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som fundamentos físicos e resultados experimentais. **Revista Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178-191, 2003. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/18192>>. Acesso em: 30 out. 2023.