

## **Verificação da eficiência de métodos vibracionais na determinação do módulo de elasticidade em madeiras de reflorestamento**

**Resumo:** Grande parte da produção madeireira brasileira é de reflorestamento, assegurando produtividade e baixo impacto ambiental. No entanto, devido a variabilidade da material madeira, há necessidade de determinar suas propriedades físicas e mecânicas. Surgem então, métodos vibracionais não destrutivos, que tem baixo custo e elevada eficiência, se comparados à métodos convencionais. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi verificar a eficiência de dois métodos vibracionais na determinação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento. Para isso amostras de *Corymbia citriodora* de duas idades e de *Eucalyptus paniculata* foram testadas por métodos vibracionais longitudinal e transversal, buscando-se correlacionar métodos e madeiras. Observou-se que o método vibracional transversal é o que melhor se correlaciona com os valores obtidos em máquina de ensaios, que o método vibracional longitudinal é confiável para madeiras com baixo ou sem ondulação de grã.

**Palavras-chave:** Ensaios não-destrutivos; propriedades mecânicas; madeira de reflorestamento.

## **Verification of the efficiency of vibrational methods in determining the modulus of elasticity in reforestation woods**

**Abstract:** A large part of Brazilian timber production is reforested, ensuring productivity and low environmental impact. However, due to the variability of the wood material, there is a need to determine its physical and mechanical properties. Non-destructive vibrational methods, which have low cost and high efficiency, are compared to conventional methods. In this context, the objective of this work was to verify the efficiency of two vibrational methods in determining the modulus of elasticity of reforestation woods. For this, samples of *Corymbia citriodora* of two ages and *Eucalyptus paniculata* were tested by longitudinal and transverse vibrational methods, trying to correlate methods and woods. It was observed that (1) the transverse vibrational method is the one that most correlates with those obtained in a test machine, that (2) the longitudinal vibrational method is reliable for wood with low or without grain deviation.

**Key words:** Non-destructive testing; mechanical properties; reforested wood.

### **1. INTRODUÇÃO**

Grande parte da produção brasileira de madeira é fundamentada em espécies oriundas de plantios florestais, que além do alto volume de produção tem em sua essência baixo impacto ambiental (Oliveira & Oliveira, 2017). No entanto, devido ser um material orgânico e altamente heterogêneo em sua estrutura, apresenta variabilidade em suas propriedades físicas e mecânicas, sendo necessária sua avaliação para que seja destinado à sua finalidade adequada.

Há diversos métodos que possibilitam avaliação das propriedades físicas e mecânicas

da madeira, dentre elas aquelas classificadas como técnicas de Avaliação Não-Destrutivas, que, conforme citado por Carreira (2012), permitem o cálculo do módulo de elasticidade a partir da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (ultrassom), ondas de choque (ondas de tensão) ou pela frequência fundamental de vibração transversal do elemento (vibração transversal). Dentre esses, os métodos vibracionais têm destaque, tendo baixo custo de aquisição e operação, possibilitando obtenção rápida de resultados com alta correlação. (Segundinho et al., 2012)

A aplicação dos métodos vibracionais pode ser feita, analisando a vibração percorrida pelo sentido paralelo às fibras, ou pelo sentido transversal as fibras. Esses métodos se baseiam na relação existente entre a rigidez e a frequência natural de vibração (Candian & Sales 2009), permitindo comparação entre métodos vibracionais e método de flexão estática.

Mediante esse contexto, o objetivo desse trabalho foi verificar a eficiência de dois métodos vibracionais para determinação do módulo de elasticidade em três madeiras de reflorestamento.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Corpos de prova**

Os corpos de prova foram produzidos com madeiras sem defeitos e visualmente homogêneos, de plantios de Eucaliptos do campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ. As espécies selecionadas foram *Corymbia citriodora* com 17 e 60 anos de idade e *Eucalyptus paniculata* 60 anos, dimensionados com 400mm x 25mm x 10mm, referentes à comprimento, largura e espessura, respectivamente.

### **2.2 Densidade aparente**

A densidade aparente foi determinada através da razão entre massa e o volume das amostras no mesmo teor de umidade. Essa determinação foi feita para que se pudesse calcular o módulo de elasticidade. As medições de massa e volume foram feitas sempre pouco antes dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade.

**Equação 1.** Equação para determinação da Densidade aparente

Onde,

m = massa, em gramas (g); v = volume, em centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>);

### 2.3 Ensaio

O módulo de elasticidade foi determinado pelos métodos vibracional longitudinal, vibracional transversal e em máquina de ensaio. Os métodos de vibração consistiram na suspensão do corpo de prova sobre dois elastômeros paralelos entre si, nos pontos nodais da madeira, com distância entre as extremidades das amostras e o apoio nos elastômeros de  $0,224 L$ , onde  $L$  é o comprimento das amostras.

Para geração das ondas no método longitudinal, impactos foram aplicados numa extremidade das amostras e na direção do crescimento das fibras, por meio de martelo de madeira devidamente dimensionado à massas da amostras, e na outra extremidade um microfone. No método vibracional transversal, o impacto foi feito no meio do corpo de prova, perpendicularmente ao sentido das fibras, onde também foi posicionado o microfone.

As ondas geradas pelo impacto no centro das amostras ou nas extremidades foram analisadas por software usando a Transformada de Fourier. O pico espectral advindo da transformação, equivale à frequência de ressonância do objeto ensaiado.

### 2.4 Determinação do Módulo de Elasticidade em Máquina de Ensaio

**Equação 2.** Equação para determinação do módulo de elasticidade em máquina de ensaios

Onde:

$\Delta P$  = Variação de carga;  $L$  = Comprimento da barra prismática;  $I$  = Momento de inércia do objeto.  $\Delta \delta$  = Variação da flecha formada, entre 20 e 30% da expectativa de resistência à flexão, E abaixo do limite de proporcionalidade esperado para espécie;

**Equação 3** Equação para determinação do módulo de elasticidade em método vibracional longitudinal

Onde:

$\rho$  = densidade aparente da madeira;  $V$  = velocidade do som obtida nos ensaios.

**Equação 4.** Equação para determinação do modulo de elasticidade pelo método vibracional transversal

Onde:  $f_n$  = frequência de vibração transversal;  $\gamma_n$  = número do modo de vibração;

$$\frac{(n+0.5)}{I^2}$$

$$\gamma = 2,267; m$$

$L$

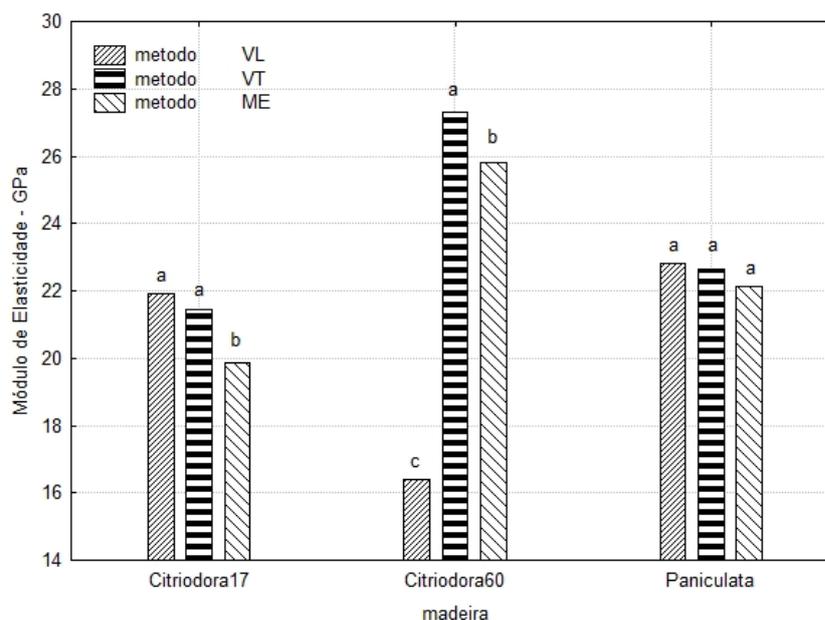
, salvo n=1, quando  
barra; = inercia da barra.

= massa da barra; = comprimento da

### 3. RESULTADOS

**Tabela 1.** Análise de variância (ANOVA) a 1% de significância para os fatores métodos de ensaio, tipos de madeiras e interação entre métodos e madeiras.

FV	QM	F
método	516,8	53,70**
madeira	724,0	75,23**
método*madeira	854,6	88,81**
Resíduo	9,6	



**Figura 1.** Valores das médias dos módulos de elasticidade obtidos por diferentes métodos, agrupado por espécie. Letras minúsculas indicam diferença estatística entre métodos de medição, para cada tipo de madeira, pelo método de Tukey ( $p=0,05$ ), onde VL é o método de vibração longitudinal, VT é o método de vibração transversal e ME é o método da máquina de ensaio.



**Figura 2.** Grã de *C. citriodora* de 17 anos (A), *C. citriodora* 60 anos (B) e *E. paniculata* (C).

**Tabela 2.** Valores médios de densidade aparente e dos módulos de elasticidade obtidos para as

madeiras ensaiada e obtidos na máquina de ensaios (ME) pelo método vibracional transversal (VT) e vibracional longitudinal (VL).

	<b>Da</b>	<b>ME</b>	<b>VL</b>	<b>VT</b>	<b>MÉDIA</b>
<i>C. citriodora</i> de 17 anos	0,819 <sup>(0,052)</sup>	19,88 <sup>(1,90)</sup>	21,91 <sup>(1,20)</sup>	21,46 <sup>1,67</sup>	21,09 <sup>(2,07)</sup>
<i>C. citriodora</i> de 60 anos	1,005 <sup>(0,050)</sup>	25,80 <sup>(3,04)</sup>	16,40 <sup>(6,03)</sup>	27,31 <sup>2,60</sup>	24,15 <sup>(5,64)</sup>
<i>E. paniculata</i>	1,093 <sup>(0,025)</sup>	22,16 <sup>(1,85)</sup>	22,81 <sup>(1,80)</sup>	22,66 <sup>1,71</sup>	22,73 <sup>(1,88)</sup>

Em que: valores entre parênteses e sobre escrito são os valores dos desvios padrões

**Tabela 3.** Correlação geral e por espécies entre os módulos de elasticidade obtidos em máquina de ensaio (ME) e os métodos vibracionais longitudinal (VL) e transversal (VT).

Correlação Geral e Parcial		
	VL	VT
<i>Todas as espécies</i>	0,78	0,99
<i>Corymbia citriodora</i> com 17 anos (C17)	0,65	0,74
<i>Corymbia citriodora</i> com 60 anos (C60)	0,97	0,97
<i>Eucalyptus paniculata</i> (EP)	0,72	0,90

#### 4. DISCUSSÃO

Na análise de variância o efeito das madeiras, dos métodos e da interação método x madeira foi significativo (Tabela 1). Na figura 1 observa-se que, de forma geral, os métodos vibracionais tendem apresentar valores superiores ao da máquina de ensaio, com exceção na madeira de paniculata. Na madeira de C60, o método VL apresentou valores muito abaixo dos outros métodos usados, apresentando também o maior valor de desvio padrão.

O método de ensaio referência foi a da máquina de ensaio (ME) e este foi correlacionado com os demais métodos (VL e VT). Apesar dos valores de modulo de elasticidade da ME serem inferiores aos valores obtidos por VL e VT, obteve coeficientes de correlação sempre acima de 0,65 (Tabela 3). Vê-se que as correlações entre ME e VT apresentaram os maiores índices para todas as madeiras conjuntamente (0,99) e também quando considerada as madeiras individualmente. A madeira de C17 teve os menores índices de correlações e a madeira C60, apesar de subestimar os valores reais de MOE, obteve boa proporcionalidade entres os valores obtidos por VL, VT e ME ( $r=0,97$ ).

##### 4.1 EFEITO DA GRÃ NO MÉTODO LONGITUDINAL

Stangerlin et al (2011) afirma que entre outros fatores, o ângulo de grã ou o desvio da grã afeta na propagação de ondas acústica e assim podem interferir diretamente nos resultados gerados por métodos vibracionais.

Obataya (2000) estudando *Picea Sitchensis Carr.* verificou correlação positiva entre a variação do ângulo de grã e propriedades acústicas da madeira e que maior inclinação de grã diminui o valor de módulo de elasticidade em relação à densidade. Foi observada a presença de grande ondulação de grã em *C. citriodora* de 60 anos (figura 2) em detrimento das outras espécies e assim esse desvio ocasionou descontinuidade no percurso das ondas vibracionais, gerando captação de frequências menores que geraram subestimação do módulo de elasticidade e elevado desvio padrão, como pode ser observado na tabela 2.

## 5. CONCLUSÕES

O método vibracional transversal foi o mais confiável para determinação do módulo de elasticidade ao se comparar com o método da máquina de ensaio ; o método vibracional longitudinal não é confiável para todos os tipos de madeira utilizados e que a precisão e confiabilidade dos métodos depende do tipo de madeira utilizada. Os métodos vibracionais, de forma geral, apresentam maiores valores de modulo de elasticidade.

## 6. REFERÊNCIAS

Candian M, Sales A. Aplicação das técnicas não destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. Ambiente Construído 2009; 9(4): 83-98.

Carreira MR. Avaliação da rigidez a flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal [tese]. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; 2012.

Obataya E et al, 2000. Vibrational properties of wood along the grain. Journal of materials Science 2000; 35(2000): 293-301.

Oliveira YMMde, Oliveira EBde. Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental. 1a ed. EMBRAPA, 2017.

Segundinho PGA et al. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. Revista Arvore 2012; 36 (6): 1155-1161.

Stangerlin DM et al. Propagação indireta e semidireta de ondas ultrassônicas na estimativa de propriedades mecânicas da madeira. Ciência da Madeira 2011; 2(2): 85-95