

## Estimativa de propriedades da madeira Mandioqueira pela frequência natural de vibração e pela densidade aparente

Estimation of properties of Mandioqueira wood by natural frequency of vibration and apparent density

Larissa Soriani Zanini Ribeiro Soares<sup>1</sup>, Diogo Aparecido Lopes Silva<sup>2</sup>,  
Túlio Hallak Panzera<sup>3</sup>, Alfredo Manuel Pereira Geraldias Dias<sup>4</sup>,  
Francisco Antonio Rocco Lahr<sup>5</sup>, Andre Luís Christoforo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, CEP: 13565-905, São Carlos, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Produção, Sorocaba, CEP: 18052-780, Sorocaba, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Engenharia Mecânica, CEP: 36307-352, São João del-Rei, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, CEP: 3030-790, Coimbra, Portugal.

<sup>5</sup> Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, CEP: 13566-590, São Carlos, SP, Brasil.

e-mail: larissazanini@iftm.edu.br; diegoestruturas@gmail.com; christoforoal@yahoo.com.br, diogo.apls@ufscar.br, panzera@ufsj.edu.br, alfgdias@dec.upt.br, frocco@sc.usp.br

---

### RESUMO

Por ser um material anisotrópico e heterogêneo, o uso racional da madeira em estruturas requer o conhecimento de uma série de propriedades físicas e mecânicas. Parte das propriedades é obtida com o uso de equipamentos de grande porte, geralmente encontrados em poucos centros de pesquisas. A vibração transversal consiste em um método de ensaio não destrutivo utilizado na determinação da rigidez da madeira, em função agilidade proporcionada na realização dos ensaios. Essa pesquisa objetivou, com base na obtenção de dezessete propriedades entre físicas e mecânicas da madeira de Mandioqueira [*Ruizterania albiflora* (Warm.) Marc.-Berti, *Vochysiaceae*], espécie pouco conhecida na literatura nacional e internacional, avaliar a indicação de uso e relacionar suas propriedades físicas (estabilidade dimensional) e mecânicas (resistência e rigidez) com a densidade aparente e com a frequência natural do ensaio de vibração transversal por meio de modelos de regressão. Os resultados indicam o uso da madeira de Mandioqueira em estruturas, por apresentar propriedades equivalentes ou superiores às propriedades de outras comumente utilizadas na construção civil. Dos modelos de regressão, foram notadas fracas correlações entre a densidade e a frequência natural com as propriedades físico-mecânicas avaliadas, resultando em estimativas de baixa precisão. Entretanto, resultados mais abrangentes requerem maior número de espécies, e consistirão em objetivos de pesquisas futuras.

**Palavras-chave:** Mandioqueira, caracterização, vibração transversal, correlação.

---

### ABSTRACT

As it is an anisotropic and heterogeneous material, the rational use of wood in structures requires knowledge of a series of physical and mechanical properties. Part of the properties is obtained with the use of large equipment, generally found in a few research centers. Transverse vibration consists of a non-destructive test method used to determine the stiffness of the wood, due to the agility provided in carrying out the tests. This research aimed, based on obtaining seventeen physical and mechanical properties of Mandioqueira wood [*Ruizterania albiflora* (Warm.) Marc.-Berti, *Vochysiaceae*], a little known species in national and international literature, evaluate the indication of use and relate its properties physical (dimensional stability) and mechanical (strength and stiffness) to the apparent density and to the natural frequency of the transversal vibration test by means of regression models. The results indicate the use of Mandioqueira wood in structures,

as it has properties equivalent or superior to the properties of others commonly used in civil construction. From the regression models, weak correlations were observed between density and natural frequency with the evaluated physical-mechanical properties, resulting in low precision estimates. However, more comprehensive results require a greater number of species, and will consist in the objectives for future research.

**Keywords:** Mandioqueira, characterization, transversal vibration, correlation.

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material de origem natural com uma grande diversidade de possibilidades de uso, incluindo o emprego estrutural. Dentre os materiais comumente utilizados em estruturas, é renovável, apresenta uma elevada relação entre a resistência-peso e sua produção gera poucos impactos ambientais [1].

Segundo o relatório da Indústria Brasileira de Árvores [2] a área total de árvores plantadas no Brasil totalizou 7,83 milhões de hectares em 2018 e o país é referência mundial pela tecnologia florestal. O setor brasileiro tem a maior produtividade, considerando volume de madeira produzido por área ao ano, e uma das rotações mais curtas do mundo, considerando o tempo decorrido entre o plantio e a colheita das árvores. Em 2018, o Brasil apresentou uma produtividade média de 36,0 m<sup>3</sup>/ha.ano para os plantios de eucalipto, enquanto a dos plantios de pinus foi de 30,1 m<sup>3</sup>/ha.ano [2].

O uso da madeira para finalidade estrutural, com segurança e economia, requer o conhecimento das suas propriedades físicas e mecânicas [3-5]. Nesse sentido, a realização de ensaios é de suma importância para caracterizar as propriedades utilizadas no dimensionamento estrutural. O desconhecimento destes atributos da madeira inviabiliza sua correta utilização. Portanto, faz-se a avaliação das propriedades de resistência e rigidez, adequando-as às madeiras em condições de utilização.

A realização de ensaios é relativamente rápida, entretanto a confecção dos corpos de prova é uma etapa trabalhosa. Somado a esse fato se tem a questão da necessidade de instrumentos e equipamentos capazes de aferir as propriedades mecânicas, os quais apresentam alto custo para aquisição e manutenção.

O projeto de estruturas de madeira abrange o dimensionamento dos elementos estruturais e, além disso, a determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira a ser utilizada [6]. No Brasil, o projeto de estruturas e os métodos de ensaios para caracterização da madeira são realizados de acordo com as diretrizes estabelecidas pela Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ABNT NBR 7190:1997 “Projeto de Estruturas de Madeira”. O referido documento normativo estabelece relações para estimar a resistência característica, juntamente com três formas de caracterização da madeira, com destaque ao procedimento simplificado que possibilita, para espécies usuais, a obtenção dos valores característicos por meio de equações que correlacionam diferentes propriedades mecânicas [7].

A qualidade dos produtos provenientes da madeira depende do conjunto de suas características anatómicas, químicas, físicas e mecânicas. Neste sentido, a madeira serrada, extraída de diversas espécies florestais são largamente comercializadas com nomes populares; entretanto sem a devida caracterização e identificação de suas propriedades, portanto sendo utilizadas indevidamente [8-10].

A Mandioqueira [*Ruizterania albiflora* (Warm.) Marc. -Berti, *Vochysiaceae*] é uma espécie predominante na Floresta Amazônica com ocorrência no Brasil (Acre, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia), Guiana, Guiana Francesa, Suriname. Apresenta valor médio de resistência à compressão paralela às fibras e densidade aparente da ordem de 56,5 MPa e 0,65 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente [11].

Diversas pesquisas utilizando métodos de ensaios não destrutivos têm sido realizadas com a finalidade de diminuir os passos de classificação da madeira sem a necessidade de um aparato laboratorial específico e de forma mais rápida, tais como: Menezzi *et al.*(2010) [12], Leite *et al.*(2012) [13], Segundinho *et al.* (2013) [14], Rosa *et al.* (2014) [15], Ribeiro *et al.*(2016) [16], Faydi *et al.*(2017) [17], Segundinho *et al.* (2018) [18] e Júnior e Santos (2019) [19]. Nesse contexto, além dos ensaios destrutivos, os de vibração transversal e de ultrassom têm sido empregados, alternativamente, com o propósito da determinação da rigidez na flexão, por meio de comparações entre os resultados dos ensaios destrutivos e os de flexão estática.

Pode-se, ainda, destacar os estudos de Almeida (2015) [20], Simsek e Baysal (2015) [21], Christoforo *et al.* (2016) [22] e Almeida *et al.* (2017) [23], que avaliam a possibilidade da estimativa de propriedades mecânicas da madeira em função da densidade aparente, visando criar alternativas frente à execução dos ensaios em laboratórios. A densidade da madeira é uma das principais propriedades físicas da madeira, pois com isso é possível estimar suas propriedades mecânicas [24].

Ademais, o estudo de Castellanos e Calderon (2020) [25] associou o ensaio de vibração transversal com o de densidade aparente para avaliar os efeitos de diferentes concentrações de sais de boro nas propriedades físicas e mecânicas de três espécies de madeira, *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* e *Albizia*

*plurijuga*, sendo utilizadas 40 amostras para cada espécie. Os autores realizaram as correlações entre a densidade, módulos dinâmicos e seus coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Como resultado obtiveram  $R^2 = 0,72$ , antes do tratamento com sais de boro, e  $R^2 = 0,80$ , após o tratamento. Esses resultados indicam que a densidade é uma boa indicadora de módulos dinâmicos.

Essa pesquisa objetivou avaliar a indicação de uso da madeira Mandioqueira na construção civil e estabelecer as relações entre as propriedades físicas (estabilidade dimensional) e mecânicas (resistência e rigidez) da madeira Mandioqueira em função dos ensaios de densidade aparente e frequência natural de vibração transversal por meio de modelos de regressão.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Doze vigas de madeira de Mandioqueira provenientes de um lote homogêneo, com dimensões nominais de 6 cm × 12 cm × 300 cm, apresentando teor de umidade próximo de 12% (12,47%) e devidamente estocadas foram avaliadas na flexão estática de forma não destrutiva e também via o método de vibração transversal para a obtenção dos módulos de elasticidade. Posteriormente a esses testes foram realizados ensaios destrutivos, para tanto as vigas foram processadas para a geração dos corpos de prova com o intuito da obtenção de propriedades físicas (5 propriedades) e mecânicas (12 propriedades), cujas formas, dimensões, procedimentos e métodos de ensaios seguiram as prescrições da norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997) [26] “Projeto de estruturas de madeira”. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios da marca AMSLER, que possui capacidade de carga de 25 toneladas e está instalada no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP).

De cada uma das vigas foi retirado um corpo de prova para a obtenção de cada uma das propriedades a serem estudadas (Tabela 1), resultando em 204 determinações experimentais mais 24 outras (módulos de elasticidade) provenientes das próprias vigas.

**Tabela 1:** Propriedades físicas e mecânicas avaliadas.

PROPRIEDADE	SIGLA
Densidade aparente	$\rho_{12}$
Retração radial total	RRt
Retração tangencial total	RTt
Retração volumétrica total	RVt
Ponto de Saturação das fibras	PSF
Resistência à compressão paralela às fibras	$f_{c0}$
Resistência à tração paralela às fibras	$f_{t0}$
Resistência à tração perpendicular às fibras	$f_{t90}$
Resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras	$f_{v0}$
Resistência ao fendilhamento paralelo às fibras	$f_{s0}$
Resistência convencional no ensaio de flexão estática	$f_M$
Dureza paralela às fibras	$f_{h0}$
Dureza perpendicular às fibras	$f_{h90}$
Tenacidade	W
Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	$E_{c0}$
Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras	$E_{t0}$
Módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática	$E_M$

As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão estática com o objetivo de obter o módulo de elasticidade à flexão. O ensaio foi realizado em três pontos nas peças de madeira e conduzido de forma não destrutiva, para tanto respeitou-se o deslocamento máximo limitado ao comprimento do vão entre apoios ( $L$ ) dividido por 200 ( $L/200$ ) conforme ABNT NBR 7190 (1997), garantindo linearidade física e geométrica para as peças ensaiadas. A força aplicada no centro da viga foi medida instantaneamente por um dinamômetro e o deslocamento aferido por meio de relógio comparador, resolução 0,01 mm. O módulo de elasticidade à flexão ( $E_{Est}$ ) é dado pela Equação 01.

$$E_{Est} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (1)$$

Da Equação 1 tem-se: P = força aplicada no centro do vão (N); L = distância entre os apoios (mm);  $\delta$  = deslocamento vertical máximo devido à imposição da força (mm); I = momento de inércia da seção transversal (mm<sup>4</sup>).

A análise das peças em dimensões estruturais pelo método da vibração transversal foi realizada por meio do equipamento *Transverse Vibration E-Computer*, modelo 340 da Metriguard. Esse equipamento é composto por uma unidade de interface eletrônica, dois conjuntos de tripés, um peso de calibração, um módulo de software em disco, uma célula de carga e cabos de conexão necessários. Para que haja precisão nos resultados, o aparelho foi calibrado por meio de um material cujo módulo de elasticidade é conhecido (barra de alumínio).

Como dados de entrada, o programa solicita as dimensões da base, altura e comprimento da peça a ser avaliada, bem como a medida externa aos apoios. Ressalta-se que, o posicionamento da peça em análise deve ser precisamente correspondente à medida externa entre apoios informada. O peso do elemento é obtido automaticamente pela célula de carga existente. O início do ensaio se dá pela aplicação de uma força externa no meio do vão, através de um martelo (Figura 1), que provoca a vibração do elemento. Então, a célula de carga presente em um dos tripés capta a frequência de vibração, e envia os dados ao computador. Por fim, o programa computacional realiza os cálculos pertinentes e armazena os dados e resultados prontos em arquivo de texto, incluindo a frequência natural a ser utilizada nos modelos de regressão para a estimativa das propriedades. O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal ( $E_{din}$ ) é dado pela Equação 2.

$$E_{din} = \frac{f_r^2 \cdot P \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad (2)$$

Da Equação 2,  $f_r$  é a frequência de vibração (Hz), P é peso da viga (N), L é distância entre os apoios (m), I é o momento de inércia da seção transversal (m<sup>4</sup>) e g a aceleração da gravidade ((9,80665 m/s<sup>2</sup>)).

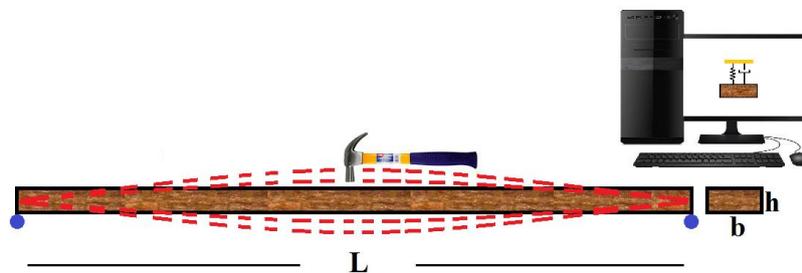


Figura 1: Ilustração do ensaio de vibração transversal.

De acordo com a ABNT NBR 7190 (1997) [26], as propriedades de resistência e de rigidez foram corrigidas (Equações 3 e 4) para o teor de umidade padrão (12%), e especificamente para as de resistência. Os valores característicos (Equação 5) foram determinados, cabendo destacar que o valor característico da resistência à compressão na direção paralela às fibras é responsável por enquadrar a espécie em uma das quatro classes de resistência (C 20, C 30, C 40, C 60) do grupo das folhosas estabelecidas pelo referido documento normativo.

$$f_{12} = f_{U\%} \cdot \left[ 1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right]; \quad 10 \leq U\% \leq 20 \quad (3)$$

$$E_{12} = E_{U\%} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot (U\% - 12)}{100} \right]; \quad 10 \leq U\% \leq 20 \quad (4)$$

$$f_{wk} = Máx \left\{ \begin{array}{l} f_1 \\ 0,7 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} \\ 1,1 \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2)-1} \right) - f_{n/2} \right] \end{array} \right. \quad (5)$$

Das Equações 3 e 4,  $f_{U\%}$  e  $E_{U\%}$  consistem nos valores de resistência e de módulo de elasticidade obtidos considerando o teor de umidade (U%) das peças (12,47%), respectivamente, e  $f_{12}$  e  $E_{12}$  são os valores de resistência e de módulo de elasticidade corrigidos para o teor de umidade padrão. Da Equação 5,  $f_{wk}$  é o valor característico obtido da referida propriedade de resistência,  $f_i$  é o valor amostral da resistência e  $n$  é o número de determinações da propriedade (na presente pesquisa,  $n = 12$ ).

A densidade aparente ( $\rho_{12}$ ) foi correlacionada com as dezesseis demais propriedades (físicas e mecânicas), enquanto que a frequência natural (fr) do ensaio de vibração transversal foi correlacionada apenas com as propriedades mecânicas (doze propriedades). Com o auxílio software Mathcad® 14, as correlações foram medidas pelo coeficiente R de Pearson ( $-1 \leq R \leq 1$ ), e a significância desses coeficientes foi medida pela análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância. Pela formulação do teste, p-valor (probabilidade p) igual ou superior ao nível de significância adotado implica em não ser significativa a correlação linear testada, e significativa (p-valor  $< 0,05$ ) em caso contrário.

Modelos de regressão linear foram gerados das correlações significativas e também avaliados pela análise de variância ao nível de 5% de significância, sendo a qualidade dos ajustes medida pelo coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ). Da ANOVA, p-valor  $\geq 0,05$  implica na não significância do modelo, e na significância em caso contrário (p-valor  $< 0,05$ ).

Modelos de regressão múltipla (Equação 6) dependentes da densidade aparente e da frequência natural de vibração foram gerados para a estimativa das dezesseis demais propriedades (físicas e mecânicas) na tentativa de ajustes de melhor precisão. Pela ANOVA dos modelos de regressão, p-valor inferior ao nível de significância adotado ( $\alpha = 0,05$ ) implica que o modelo e os termos do modelo são considerados significativos, e não significativos em caso contrário.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \rho_{12} + \beta_2 \cdot fr + \beta_3 \cdot \rho_{12}^2 + \beta_4 \cdot fr^2 + \beta_5 \cdot \rho_{12} \cdot fr + \varepsilon \quad (6)$$

Da Equação 6, Y denota as variáveis dependentes consideradas (dezesseis),  $\beta_i$  consistem nos coeficientes ajustados pelo método dos mínimos quadrados e  $\varepsilon$  é o erro aleatório, sendo a qualidade dos ajustes também avaliada pelo coeficiente de determinação ajustado.

Adicionalmente, também com o uso da ANOVA (5% de significância), foi avaliada a equivalência entre os módulos de elasticidade obtidos dos corpos de provas (pequenas dimensões e isentos de defeitos -  $E_M$ ), das vigas de dimensões estruturais ( $E_{Est}$ ) ensaiadas na flexão estática de forma não destrutiva e também via o ensaio de vibração transversal ( $E_{din}$ ), assim como a análise da equivalência entre as densidades das amostras e das vigas com dimensões estruturais.

O teste de normalidade de Anderson-Darling, ao nível de 5% de significância, foi utilizado para validação da ANOVA assim como dos intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade) obtidos das propriedades físicas e mecânicas avaliadas. Pela formulação do teste, p-valor maior ou igual ao nível de significância implica em normalidade na distribuição dos valores (reais ou dos resíduos no caso dos modelos de regressão), e na não normalidade em caso contrário (p-valor  $< 0,05$ ).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios ( $\bar{x}$ ), os coeficientes de variação (CV), os menores (Mín.) e os maiores (Máx.) valores, assim como os intervalos (IC) de confiança da média (95% de confiabilidade) referentes às propriedades físicas e mecânicas obtidas dos corpos de provas isentos de defeitos da madeira de Mandioqueira.

**Tabela 2:** Propriedades físicas e mecânicas avaliadas.

PROPRIEDADES	$\bar{x}$	CV (%)	Mín.	Máx.	IC (95%)	$f_{wk}$
$\rho_{12}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,87	4,66	0,82	0,96	(0,84; 0,89)	---
RRt (%)	4,64	9,98	3,97	5,61	(4,34; 4,93)	---
RTt (%)	9,24	10,36	7,34	10,94	(8,62; 9,84)	---
RVt (%)	14,02	10,12	11,21	16,84	(13,11; 14,92)	---
PSF (%)	23,29	21,13	18,64	36,04	(20,16; 26,42)	---
$f_{c0}$ (MPa)	71,35	13,88	60,50	93,40	(65,06; 77,64)	63,80
$f_{t0}$ (MPa)	97,12	28,44	50,10	140,00	(79,57; 114,66)	67,96
$f_{t90}$ (MPa)	2,56	43,48	1,40	5,50	(1,85; 3,26)	1,79
$f_{v0}$ (MPa)	16,64	15,11	12,20	21,30	(15,04; 18,24)	14,52
$f_{s0}$ (MPa)	0,54	24,21	0,40	0,70	(0,45; 0,62)	0,38
$f_M$ (MPa)	117,63	21,45	87,10	184,20	(101,60; 133,65)	97,90
$f_{h0}$ (MPa)	107,87	18,65	67,40	146,50	(95,09; 120,65)	79,64
$f_{h90}$ (MPa)	67,73	14,41	45,50	84,60	(61,52; 73,93)	60,50
W (daN·m)	1,20	15,48	0,86	1,50	(1,07; 1,31)	---
$E_{c0}$ (MPa)	19200	12,41	14200	23300	(17699; 20728)	---
$E_{t0}$ (MPa)	18800	11,07	15400	21900	(17432; 20070)	---
$E_M$ (MPa)	18500	16,41	14700	25500	(16528; 20376)	---

Da Tabela 2, por serem maiores do que 5% os p-valores do teste Anderson-Darling em todas as propriedades avaliadas, constata-se a normalidade na distribuição de todas as variáveis, validando os resultados obtidos dos intervalos de confiança da média.

Os coeficientes de variação (CV) para os valores de resistência à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras estão de acordo com as prescrições da ABNT NBR 7190 (1997) [26] que estabelece os coeficientes de variação de solicitações normais de 18% e solicitações tangenciais de 28%, considerando madeiras folhosas com umidade próxima a 12%, para fins de cálculos estruturais.

Em conformidade com os valores obtidos, a madeira da espécie considerada se enquadra na classe de resistência C60 de acordo com a ABNT NBR 7190 da ABNT (1997) [26], que define valores mínimos de resistência à compressão paralela às fibras de 60 MPa, módulo de elasticidade médio a compressão paralela às fibras de 24500 MPa e densidade aparente de 1,0 g/cm<sup>3</sup> a 12% de umidade, para essa classe.

Com uma densidade aparente média de 0,87 g/cm<sup>3</sup>, a espécie é considerada madeira de alta densidade, e indicada para uso na construção civil interna e elementos estruturais (tesouras, treliças, estruturas internas, plataformas e escadas) [27].

Na Tabela 3, são expostos os valores médios encontrados para a densidade aparente e principais propriedades mecânicas da espécie Mandioqueira comparados com os valores que constam na ABNT NBR 7190 (1997) [26] e com o estudo de Dias e Lahr (2004) [28].

**Tabela 3:** Comparativo das propriedades físicas e mecânicas da pesquisa com a ABNT NBR 7190 (1997) e literatura correlata.

PROPRIEDADES	$\bar{x}$ (pesquisa)	NBR 7190 (1997)	Dias e Lahr (2004)
$\rho_{12}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,87	0,86	0,86
$f_{c0}$ (MPa)	71,35	71,40	71,00
$f_{t0}$ (MPa)	97,12	89,10	93,00
$f_{t90}$ (MPa)	2,56	2,70	2,80
$f_{v0}$ (MPa)	16,64	10,60	17,20
$E_{c0}$ (MPa)	19200	18971	19274

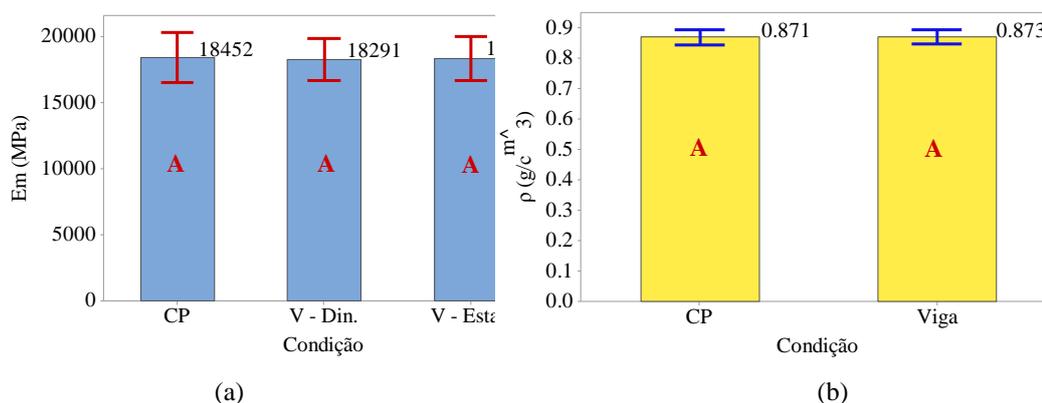
Da Tabela 3, observa-se que os valores obtidos neste estudo são equivalentes ou superiores aos apresentados por Dias e Lahr (2004) [28] e aos divulgados na ABNT NBR 7190 (1997) [26], fato que implica o

potencial de uso da espécie Mandioqueira em estruturas.

Destaca-se que os valores da literatura correlata e do documento normativo citado pertencem ao intervalo de confiança determinados neste estudo, Tabela 2, exceto o valor da resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras ( $f_{v0}$ ) da ABNT NBR 7190 (1997) [26].

A comparação entre os módulos de elasticidade obtidos dos ensaios de tração ( $E_{t0}$ ) e de compressão ( $E_{c0}$ ) na direção paralela às fibras pela ANOVA (5% de significância) evidenciou equivalência entre ambos ( $p$ -valor = 0,617), resultado esse em conformidade com o apresentado pela ABNT NBR 7190 (1997) [26], cabendo destacar que o  $p$ -valor do teste de normalidade de Anderson-Darling foi superior a 5%, o que valida os resultados obtidos da análise de variância.

Na Figura 2 são apresentados os resultados do teste de Tukey com o objetivo da comparação entre os valores médios dos módulos de elasticidade e das densidades obtidos dos corpos de prova e das vigas (peças de dimensões estruturais).



**Figura 2:** Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.

\* CP: corpo de prova de pequenas dimensões e isento de defeitos; V - Din: vigas ensaiadas via o método de vibração transversal; V - Est.: vigas ensaiadas na flexão estática de forma não destrutiva.

Os  $p$ -valores superiores a 0,05 (5%) do teste de Anderson-Darling indicam a normalidade nas distribuições das propriedades apresentadas na Figura 2, validando assim os resultados do teste de Tukey.

Como observado na Figura 2, os módulos de elasticidade foram considerados todos equivalentes, assim como as densidades. A equivalência estatística pode ser justificada em função da madeira ensaiada ser proveniente de um lote homogêneo, pela não existência de defeitos nas peças e por ser advinda de floresta nativa, ou seja, com idade maior para o tempo de corte, se comparado com madeiras de reflorestamento. De maneira análoga, a ABNT NBR 7190 (1997) [26] permite a caracterização da madeira para uso estrutural com base nos resultados que são obtidos por meio de ensaios com corpos de prova de pequenas dimensões.

Com relação à equivalência dos módulos de elasticidade, comparando-os com a literatura correlata, os resultados obtidos corroboram com os estudos de Batista *et al.* (2000) [29], em que a espécie *Cambará (Erismia uncinatum Warm.)* não apresentou diferenças significativas entre os módulos de elasticidade obtidos a partir de peças estruturais e corpos de prova normatizados. No mesmo contexto, Calil Júnior e Miná (2003) [30] avaliaram a existência da correlação entre o módulo de elasticidade estático (ensaio de flexão estática) e o módulo de elasticidade dinâmico (técnica de vibração transversal) da espécie *Southern Pine* e, ao final, constatou-se coeficiente de correlação linear equivalente a 0,98, o que indica forte relação entre as variáveis. Da mesma forma, Carreira *et al.* (2017) [31] avaliaram a eficácia do método de vibração transversal, comparado ao ensaio de flexão estática, para determinação do módulo de elasticidade de toras da espécie *Corymbia citriodora* e, como resultado, obtiveram correlação da ordem de 0,92, indicando que o método da vibração transversal livre fornece dados confiáveis quanto ao módulo de elasticidade à flexão no formato roloço.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos testes de correlação envolvendo a densidade aparente e as demais variáveis físicas e mecânicas e entre a frequência ( $f_r$ ) obtida do ensaio de vibração transversal e as propriedades mecânicas, cabendo destacar que a média, o coeficiente de variação e o intervalo de confiança da média (95% e confiabilidade) dos valores da frequência obtidos para as dozes peças de madeira de dimensões estruturais foram iguais a 33,90 Hz; 4,54 % e IC = (32,93; 34,88 Hz), respectivamente. O  $p$ -valor do

teste de normalidade para a frequência foi igual a 0,847, e por ser superior a 0,05, constata-se normalidade na distribuição, validando os resultados obtidos do intervalo de confiança da média.

**Tabela 4:** Resultados das análises de correlação.

PROPRIEDADES	$\rho_{12}$ (g/cm <sup>3</sup> )		fr (Hz)	
	R de Pearson	p-valor ANOVA	R de Pearson	p-valor ANOVA
RRt (%)	0,001	0,996	---	---
RTt (%)	-0,119	0,712	---	---
RVt (%)	-0,076	0,814	---	---
PSF (%)	0,327	0,299	---	---
$f_{c0}$ (MPa)	0,595	0,880	0,070	0,828
$f_{t0}$ (MPa)	0,490	0,041	0,696	0,012
$f_{t90}$ (MPa)	0,049	0,879	0,038	0,907
$f_{v0}$ (MPa)	0,293	0,356	0,430	0,163
$f_{s0}$ (MPa)	-0,161	0,617	-0,388	0,213
$f_M$ (MPa)	0,501	0,097	0,658	0,020
$f_{h0}$ (MPa)	-0,332	0,291	-0,475	0,119
$f_{h90}$ (MPa)	-0,384	0,217	-0,516	0,086
W (daN·m)	-0,160	0,619	-0,019	0,953
$E_{c0}$ (MPa)	0,318	0,314	0,198	0,537
$E_{t0}$ (MPa)	0,324	0,305	0,489	0,107
$E_M$ (MPa)	0,644	0,024	0,665	0,018

\* termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Da Tabela 4, a densidade aparente apresentou correlação significativa (p-valor < 0,05) em apenas duas ( $f_{t0}$  e  $E_M$ ) dentre as 16 demais variáveis confrontadas, e com relação à frequência, apenas duas ( $f_{t0}$  e  $f_M$ ) entre as 12 correlações testadas foram consideradas significativas pela análise de variância.

O modelo analítico do ensaio de vibração transversal, Equação 02, leva a uma relação quadrática entre o módulo de elasticidade e a frequência natural, motivo pelo qual pode-se justificar baixos coeficientes de correlação linear entre fr e  $E_M$ . No estudo em questão, embora obteve-se  $r = 0,665$  a correlação não foi significativa. Nesse mesmo modelo, a relação entre o módulo de elasticidade e a densidade aparente é linear, motivo pelo qual pode-se justificar a correlação significativa entre essas variáveis.

Verifica-se que tanto a densidade aparente quanto a frequência foram correlacionadas de forma significativa com a resistência à tração paralela às fibras. Observou-se que, na literatura existente, pesquisas como as de Santos (2007) [32], Calonego *et al.* (2013) [33], Souza (2013) [34] e Mascia, Krestchmann (2016) [35], peças de diferentes espécies, ensaiadas à flexão, sofreram ruptura por tração nas fibras inferiores, ou seja, evidenciando que os limites de resistência nesses tipos de esforços são dados em função das tensões de tração, que ocasionam a ruptura frágil da madeira, com baixos valores de deformação. Nesse contexto, e com bases nos resultados obtidos, pode-se inferir que as ações decorrentes de esforços de tração e flexão exibem comportamentos semelhantes.

Na Figura 3 são ilustrados e apresentados os modelos de regressão assim como os coeficientes de determinação ajustados ( $R^2$  aj) referentes às correlações significativas indicadas na Tabela 3.

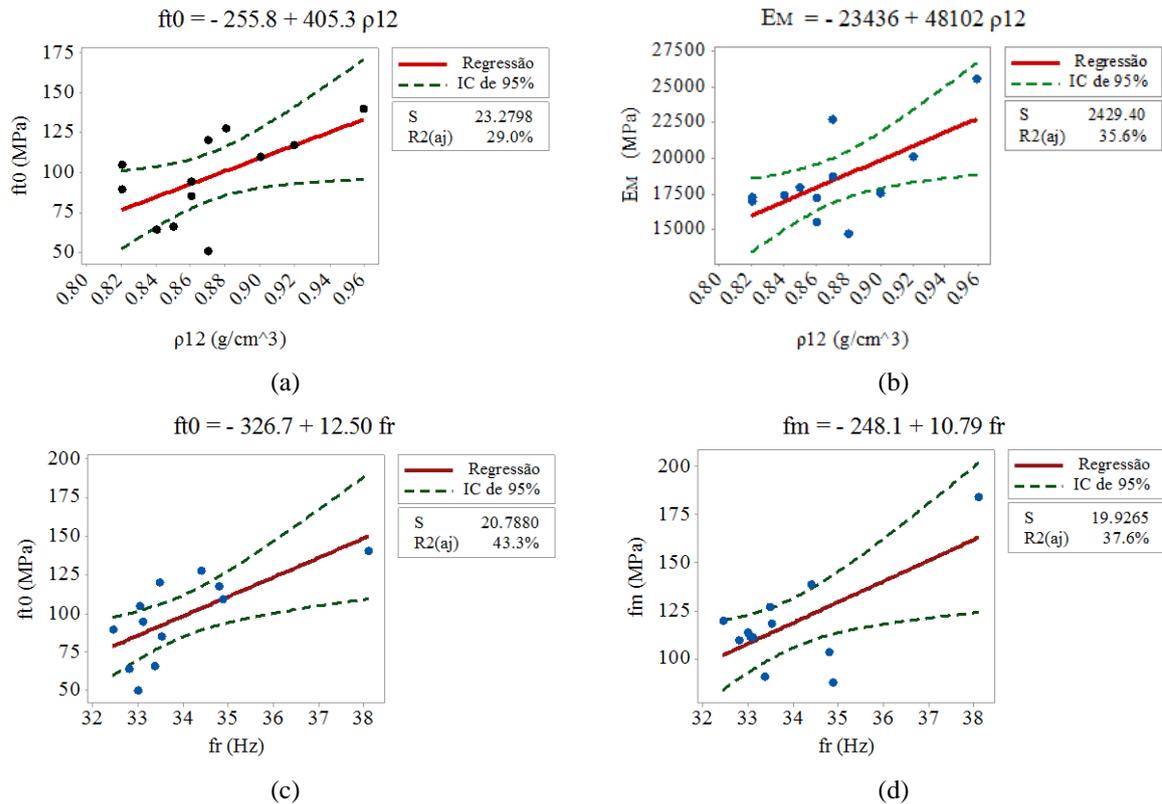


Figura 3: Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA.

Da Figura 3, o teste de Anderson-Darling sobre os resíduos da ANOVA dos modelos de regressão acusou normalidade em todos os casos ( $p - \text{valor} > 0,05$ ), o que valida os resultados da análise de variância. Mesmo sendo as correlações significativas, os coeficientes de determinação ajustado variaram de 29,0% a 43,30%, e isso implica em modelos pouco precisos a serem usados na estimativa das referidas propriedades. Tais resultados são visualizados pela notada dispersão dos pares de valores determinados experimentalmente com as curvas ajustadas.

Como referência dos coeficientes de determinação obtidos, DIAS e LAHR (2004) [28] estimaram as propriedades de resistência e rigidez da madeira (40 espécies das dicotiledôneas) por meio da densidade aparente seguindo a determinação da ABNT NBR 7190 (1997) [26] para caracterização mínima de espécies pouco conhecidas, o total de 12 corpos de prova para cada propriedade. Os autores obtiveram correlações significativas com coeficientes de determinação na ordem de  $R^2 = 0,63$  (relação entre a densidade aparente e a resistência à tração paralela às fibras),  $R^2 = 0,71$  (relação entre a densidade aparente e o módulo de elasticidade na flexão estática) e  $R^2 = 0,71$  (relação entre a densidade aparente e o módulo de elasticidade na flexão estática).

Com a mesma metodologia, Araújo (2007) [36] estudou as relações funcionais existentes entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira de uma amostra de dados de 163 espécies tropicais brasileiras e como resultado obteve a correlação da ordem de  $R^2 = 0,89$  para a relação entre o módulo de elasticidade convencional a flexão e a densidade. Candian e Sales (2009) [37] realizaram a avaliação da correlação entre o módulo de elasticidade médio, obtido por meio da flexão estática, e o obtido na técnica de vibração transversal, para 30 peças estruturais da espécie *Eucalyptus citriodora* (*Corymbia citriodora*), obtendo o valor do coeficiente de determinação da ordem  $R^2 = 0,80$ ; da mesma forma, Braun Júnior e Santos (2019) [38] avaliaram a correlação das propriedades elásticas e dinâmicas (vibração transversal e longitudinal) de três espécies de madeira nativa com o objetivo de comparar os métodos de ensaios destrutivos com o não destrutivo. Os resultados evidenciaram a eficiência do método de vibrações naturais, com correlações superiores a 80% entre o módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade longitudinal. As divergências dos valores dos estudos aqui citados para com o presente trabalho se devem em função de que os autores trabalharam com mais de uma espécie, bem como os valores médios das propriedades, possibilitando a redução da variabilidade e melhoria dos ajustes.

Na Tabela 5 são apresentados os modelos de regressão múltipla considerando a densidade aparente e a frequência natural do ensaio de vibração transversal como estimadores das demais propriedades físicas e mecânicas avaliadas, com o propósito melhorar a precisão alcançada dos modelos de regressão linear simples.

**Tabela 5:** Modelos de regressão múltipla quadráticos.

MODELOS	R <sup>2</sup> aj (%)	p-valor
$RR_t = 2 + 137 \cdot \rho_{12} - 3,33 \cdot fr - 86 \cdot \rho_{12}^2 + 0,049 \cdot fr^2 + 0,2 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	9,41	0,981
$RT_t = 31 - 301 \cdot \rho + 6,5 \cdot fr + 406 \cdot \rho^2 + 0,06 \cdot fr^2 - 12,2 \cdot \rho \cdot fr$	6,91	0,991
$RV_t = 36 - 226 \cdot \rho + 4,5 \cdot fr + 77 \cdot \rho^2 - 0,09 \cdot fr^2 + 2 \cdot \rho \cdot fr$	2,79	0,999
$PSF = -668 + 2342 \cdot \rho - 20,9 \cdot fr + 1815 \cdot \rho^2 + 2,43 \cdot fr^2 - 163 \cdot \rho \cdot fr$	13,64	0,956
$f_{c0} = 1630 - 2345 \cdot \rho - 30 \cdot fr - 14813 \cdot \rho^2 - 10,3 \cdot fr^2 + 833 \cdot \rho \cdot fr$	18,72	0,910
$f_{i0} = -1960 - 14452 \cdot \rho + 472 \cdot fr - 2215 \cdot \rho^2 - 13,4 \cdot fr^2 + 531 \cdot \rho \cdot fr$	63,12	0,203
$f_{i90} = 28 + 722 \cdot \rho - 19,8 \cdot fr - 964 \cdot \rho^2 - 0,08 \cdot fr^2 + 28 \cdot \rho \cdot fr$	25,70	0,823
$f_{v0} = 817 - 1475 \cdot \rho - 8,9 \cdot fr - 1731 \cdot \rho^2 - 1,59 \cdot fr^2 + 133 \cdot \rho \cdot fr$	43,86	0,518
$f_{s0} = 32,9 - 51,3 \cdot \rho - 0,52 \cdot fr + 125 \cdot \rho^2 + 0,065 \cdot fr^2 - 4,74 \cdot \rho \cdot fr$	64,62	0,184
$f_M = 2213 + 14093 \cdot \rho - 486 \cdot fr + 4753 \cdot \rho^2 + 15,8 \cdot fr^2 - 667 \cdot \rho \cdot fr$	70,94	0,112
$f_{h0} = -5487 + 8467 \cdot \rho + 110 \cdot fr + 9508 \cdot \rho^2 + 8,0 \cdot fr^2 - 740 \cdot \rho \cdot fr$	45,55	0,488
$f_{h90} = -3235 + 3186 \cdot \rho + 111 \cdot fr + 11163 \cdot \rho^2 + 7,05 \cdot fr^2 - 670 \cdot \rho \cdot fr$	65,29	0,175
$W = 103,7 - 223 \cdot \rho - 0,19 \cdot fr - 237 \cdot \rho^2 - 0,242 \cdot fr^2 + 18,8 \cdot \rho \cdot fr$	60,93	0,234
$E_{c0} = 160423 + 988224 \cdot \rho - 33435 \cdot fr + 3554288 \cdot \rho^2 + 3160 \cdot fr^2 - 209913 \cdot \rho \cdot fr$	40,64	0,576
$E_{i0} = -149077 - 541781 \cdot \rho + 22754 \cdot fr + 207439 \cdot \rho^2 - 349 \cdot fr^2 + 3794 \cdot \rho \cdot fr$	40,32	0,582
$E_M = 590270 - 47784 \cdot \rho - 32649 \cdot fr + 1538512 \cdot \rho^2 + 1435 \cdot fr^2 - 75901 \cdot \rho \cdot fr$	62,70	0,209

Os p-valores do teste de normalidade dos resíduos da ANOVA sobre todos os modelos de regressão múltipla da Tabela 5 foram superiores a 0,05, validando os resultados da análise de variância. Mesmo com a melhoria na precisão dos modelos de regressão múltipla quando comparados aos modelos de regressão simples apresentados na Figura 3, nenhum desses foi considerado significativo (p-valor  $\geq 0,05$ ), o que implica que variações nas variáveis independentes não explicam as variações sofridas pelas variáveis dependentes, resultado esse que pode ser melhorado com inclusão de novas espécies, e que consistirá no objetivo de trabalhos futuros.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos da presente pesquisa possibilitam concluir que:

- A madeira da espécie Mandioqueira estudada apresenta propriedades equivalentes ou superiores às propriedades de outras comumente utilizadas na construção civil, evidenciando seu potencial de utilização em estruturas;

- O módulo de elasticidade obtido por meio do método de vibração transversal foi equivalente aos módulos de elasticidade obtidos nos corpos de prova e nas vigas ensaiadas à flexão estática de forma não destrutiva;

- Os resultados das análises de correlação não foram satisfatórios, possivelmente, em função da quantidade de amostras ensaiadas (12 em cada caso), do uso de uma espécie apenas e da adoção de valores amostrais ao invés de valores médios (abordagem possível apenas em pesquisa com várias espécies), o que resultou em modelos de regressão lineares significativos, mas de pequena precisão. As correlações podem ser melhoradas com o aumento do número amostral e com a inclusão de novas espécies, possibilitando a redução da variabilidade e melhora dos ajustes;

- Os modelos de regressão múltipla, gerados com o propósito de melhorar a precisão dos modelos de regressão linear simples, não foram considerados significativos pela análise de variância, requerendo assim estudos posteriores com o objetivo de verificar tais relações para um maior número de amostras e de condições experimentais.

- As correlações lineares foram fracas, possivelmente, por haver um número pequeno de observações. Em consequência, as correlações múltiplas mostraram-se piores do que as correlações lineares, haja vista que seria necessário um número ainda maior de observações para validar o modelo.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] SILVA, L.S.Z.R.S., FERNANDES, F.P.D., PAULA, L.S., *et al.* Evaluation of the variability of compressive strength parallel to the fibers of hardwood species. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, [s.l.], n. , p. 0, 2020. SciELO Agencia Nacional de Investigacion y Desarrollo (ANID). <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2020005000207>.
- [2] IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório IBA 2019. São Paulo. 2019. Disponível em: <[https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2020.
- [3] TREVISAN, T. *et al.* Avaliação de propriedades físicas e mecânicas da madeira de cinco espécies florestais em função da deterioração em dois ambientes. *Revista Árvore*, Viçosa, v.31, n.1, pp. 93-101, 2007.
- [4] LIN, L., FU, F. Segregation of Eucalyptus lumbers for finger-jointed using longitudinal vibration. *Chinese Forestry Science and Technology*, v.7, n.1, p.64-70, 2008.
- [5] ALMEIDA, D.H. *et al.* Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais. *Revista Árvore*. v.37, n.6, pp. 1175-1181, 2013.
- [6] ALMEIDA, D.H., ALMEIDA, T.H., LAHR, F.A.R., *et al.* Estimativa de propriedades de resistência e rigidez na flexão estática através de parâmetros colorométricos da madeira. *Anais. Seropédica, RJ: SBC-TEM*, 2017.
- [7] WOLENSKI, A.R.V. *et al.* Modelos para estimativa das propriedades mecânicas de compressão e tração na direção paralela às fibras. *Ambiente Construído*, [s.l.], FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000100373>. v. 20, n. 1, p. 263-276, mar. 2020.
- [8] ALMEIDA, D.H., *et al.* (2014a). “Embedment strength of Pinus sp. wood to metal pins,” *Adv. Mater. Res.* 884/885, 653-656. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.884-885.653.
- [9] MOTTA, J.P. *et al.* Caracterização da madeira de quatro espécies florestais. *Ciência Rural*, [s.l.], v. 44, n. 12, pp. 2186-2192, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20130479>.
- [10] MOLINA, J.C., CALIL Neto, C., CHRISTOFORO, A.L. (2016). “Resistência à tração de emendas dentadas de madeira de *Manilkara huberi* para o emprego em madeira laminada colada,” *Ambiente Construído* v. 16, n.1, 221-227.
- [11] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, IPT,2020. Disponível em: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=15](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=15)>. Acesso em: 01 jun. 2020.
- [12] MENEZZI, C.H.S., SILVEIRA, R.R., SOUZA, M.R. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0044-59672010000200011>. *Acta Amazonica*, [s.l.], v. 40, n. 2, pp. 325-332, 2010.
- [13] LEITE, E.R.S., HEIN, P.R.G., SOUZA, T.M., *et al.* Estimation of the dynamic elastic properties of wood from *Copaifera langsdorffii* Desf using resonance analysis. *Cerne*, [s.l.], FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-77602012000100006>. v. 18, n. 1, pp. 41-47, mar. 2012.
- [14] SEGUNDINHO, P.G.A., *et al.* Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal. *Ambiente Construído*, [s.l.], FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212013000200002>. v. 13, n. 2, pp. 7-14, jun. 2013.
- [15] ROSA, R.A., *et al.* Caracterização da Madeira de Maçaranduba (*Manilkara* sp.) por Métodos Destrutivos e Não Destrutivos. *Revista Ciência da Madeira - Rcm*, [s.l.], *Revista de Ciência de Madeira*, <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v05n01a07>. v. 5, n. 1, pp. 68-78, 31 maio 2014.
- [16] RIBEIRO, E.S., GONÇALEZ, J.C., SOUZA, R.S., *et al.* Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. *Nativa*, [s.l.], *Revista Nativa*, <http://dx.doi.org/10.14583/2318-7670.v04n02a09>. v. 4, n. 2, pp. 103-106, 27 abr. 2016.
- [17] FAYDI, Y., BRANCHERIAU, L., POT, G., *et al.* 2017. Prediction of Oak Wood Mechanical Properties Based on the Statistical Exploitation of Vibrational Response. ISSN 1930-2126. *BioResources*, v. 12, no. 3, pp. 5913-5927.
- [18] SEGUNDINHO, P.G.A., *et al.* Variação dos módulos de elasticidade e ruptura em madeira de cedro-australiano por meio de ensaios não destrutivo e destrutivo. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509833392>. *Ciência Florestal*, [s.l.], v. 28, n. 3, p. 1163, 1 out. 2018.

- [19] JUNIOR, W.B., SANTOS, L.L. Correlação das Propriedades Elásticas Estáticas e Dinâmicas de Três Espécies Nativas de Madeira. Revista Científica FAESA, ISSN 2316-7327. Disponível em: <<http://revista.faesa.br/revista/index.php/Faesa/article/view/538>>. Acesso em: 28 maio 2020. [S.l.], v. 15, n. 2 Especial, pp. 52 - 70, jul. 2019.
- [20] ALMEIDA, T.H. (2015). Estudo da Estabilidade Dimensional de Madeiras Tropicais Brasileiras, Master's Thesis, Departamento de Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brazil.
- [21] SIMSEK, H., BAYSAL, E. (2015). "Some physical and mechanical properties of boratetreated oriental beech wood," DOI: 10.5552/drind.2015.1356. *Drvna Industrija* v. 66, n. 2, pp. 97-103.
- [22] CHRISTOFORO, A.L., *et al.* Shrinkage for Some Wood Species Estimated by Density. *International Journal of Materials Engineering*, v. 6, p. 23-27, 2016.
- [23] ALMEIDA, T.H., *et al.* (2017). "Density as estimator of dimensional stability quantities of Brazilian tropical woods", *BioRes.* v. 12, n.3, pp. 6579-6590, 2017.
- [24] ALMEIDA, D.H., *et al.* "Tenacidade da madeira como função da densidade aparente", *Revista Árvore*, v.38, pp.203-207, 2014b.
- [25] CASTELLANOS, J.R.S., CALDERÓN, L.E.A.A. "Densidade e módulo dinâmico de três madeiras mexicanas impregnadas com boro. Avaliação da vibração transversal. Revista Cubana de Ciencias Forestales", *Pinar del Río*, v. 8, n. 1, pp. 176-190, 04 abr. 2020.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- [27] GROBÉRIO, M.P. *Indicações para o emprego da madeira de espécies tropicais do Brasil*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. doi:10.11606/D.88.2016.tde-16092016-161856. Acesso em: 2020-06-01.
- [28] DIAS, F.M., LAHR, F.A.R. "Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente", *Scientia Forestalis*. n.65, pp. 102-113, 2004.
- [29] BATISTA, A.M., ROSSI, N., MASCIA, N.T., *et al.* Estudo da flexão estática: relação entre peças de madeira com dimensões estruturais e dimensões reduzidas. In: *ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA*. São Carlos, 2000.
- [30] CALIL JÚNIOR, C., MINÁ, A.J.S. "Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 2, pp. 335-338, 2003.
- [31] CARREIRA, M.R., DIAS, A.A., SEGUNDINHO, P.G.A. "Nondestructive Evaluation of Corymbia citriodora Logs by Means of the Free Transverse Vibration Test", *Journal of Nondestruct Evaluation*, v. 36, n. 26, 2017.
- [32] SANTOS, J.A. "Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira", *Tese de DSc.*, Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães, 2007.
- [33] CALONEGO, F.W., SEVERO, E.T.D., BRITO, A.F. *Tipos de Ruptura em Madeira de Eucalyptus grandis Modificada Termicamente*. Silva Lusitana. [online]. ISSN 0870-6352, v.21, n. Especial, pp.153-161, 2013.
- [34] SOUZA, T. M. Análise do mecanismo de ruptura de flexão estática em madeira por meio da técnica de velocimetria por imagem de partículas. 2013. 85 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia da Madeira, UFLA, Lavras, 2013.
- [35] MASCIA, N.T., KRESTCHMANN, D. F. "Flexão estática: módulos de elasticidade e de ruptura nas direções radial e tangencial da madeira", In: *XV EBRAMEM - ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA*, 15., 2015, Curitiba. CONGRESSO. Curitiba: EBRAMEM, 2015.
- [36] ARAÚJO, H.J.B. *Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras*. FLORESTA, [S.l.], dec. 2007. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.br/floresta/article/view/9937>. ISSN 1982-4688. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/9937>>. Acesso em: 05 jun. 2020.
- [37] CANDIAN, M., SALES, A. "Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira", *Ambiente construído*, Porto Alegre - RS, v. 9, n. 4, pp. 83-98, 2009.

[38] BRAUN JUNIOR, W., SANTOS, L.L. “Correlação das propriedades elásticas estáticas e dinâmicas de três espécies nativas de madeira. Associação Educacional de Vitoria”, <http://dx.doi.org/10.5008/1809.7367.157>. *Revista Científica Faesa*, [s.l.], v. 15, n. 2, pp. 52-70, 22 jul. 2019.

**ORCID**

Larissa Soriani Zanini Ribeiro Soares	<a href="https://orcid.org/0000-0001-6722-535X">https://orcid.org/0000-0001-6722-535X</a>
Diogo Aparecido Lopes Silva	<a href="https://orcid.org/0000-0002-7514-7467">https://orcid.org/0000-0002-7514-7467</a>
Túlio Hallak Panzera	<a href="https://orcid.org/0000-0001-7091-456X">https://orcid.org/0000-0001-7091-456X</a>
Alfredo Manuel Pereira Geraldes Dias	<a href="https://orcid.org/0000-0002-9752-1907">https://orcid.org/0000-0002-9752-1907</a>
Francisco Antonio Rocco Lahr	<a href="https://orcid.org/0000-0002-3510-8498">https://orcid.org/0000-0002-3510-8498</a>
Andre Luís Christoforo	<a href="https://orcid.org/0000-0002-4066-080X">https://orcid.org/0000-0002-4066-080X</a>