








Artigos

Predição do módulo de elasticidade estático de *Eucalyptus* sp. por meio de duas técnicas não destrutivas

Prediction of the static modulus of elasticity of *Eucalyptus* sp. through two nondestructive techniques

Romário Alves Carvalho^I 
Gilson Fernandes da Silva^I 
Christiano Jorge Gomes Pinheiro^{II} 
Leonor da Cunha Mastela^I 
Clara Gaspar Fossi de Souza^{III} 
Alehando Lopes Gamas^{II} 
Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho^I 

^IUniversidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil

^{II}Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, Brasil

^{III}Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil

RESUMO

Os ensaios não destrutivos que utilizam o princípio de propagação de ondas têm potencial para prever as propriedades mecânicas da madeira ainda em campo, se conhecida as variáveis deste processo. Este trabalho teve o objetivo de estimar o módulo de elasticidade à flexão estática da madeira de *Eucalyptus* sp., por meio de duas técnicas não destrutivas: ultrassom e *stress wave*. Para tal foram usados 60 corpos de provas com dimensões nominais de 2,5 x 2,5 x 57,5 cm (tangencial x radial x longitudinal), estando na umidade de equilíbrio. Os testes não destrutivos foram realizados por meio de um equipamento de ultrassom e um de ondas de tensão, enquanto que os testes destrutivos de flexão estática foram realizados em uma máquina universal de ensaios. Os resultados experimentais mostraram que os módulos de elasticidade obtidos pelas técnicas não destrutivas foram superiores à obtida pela técnica destrutiva. Os modelos matemáticos ajustados apresentaram erro padrão da estimativa (S_{yx}) de 11,39 e 10,78%. Logo, houve correlação média positiva entre o módulo estático e dinâmico. As técnicas de ondas de tensão e ultrassom podem ser empregadas com o intuito de estimar o módulo de elasticidade da madeira de *Eucalyptus* sp.

Palavras-chave: Avaliação não destrutiva; Ultrassom; *Stress wave*



ABSTRACT

Non-destructive tests that use the principle of wave propagation have the potential to predict the mechanical properties of wood while still in the field, if the variables of this process are known. This work aimed to estimate the modulus of elasticity to static bending of *Eucalyptus* sp. wood, using two non-destructive techniques: ultrasound and stress wave. For this, 60 specimens with nominal dimensions of 2.5 x 2.5 x 57.5 cm (tangential x radial x longitudinal) were used, being in equilibrium humidity. The non-destructive tests were carried out using an ultrasound and a stress wave equipment, while the destructive static bending tests were carried out in a universal testing machine. The experimental results showed that the elastic modulus obtained by the non-destructive techniques were superior to that obtained by the destructive technique. The adjusted mathematical models presented standard error of the estimate (S_{yx}) of 11.39 and 10.78%. There was a positive mean correlation between the static and dynamic module. Stress wave and ultrasound techniques can be used to estimate the modulus of elasticity of *Eucalyptus* sp.

Keywords: Nondestructive testing; Ultrasound; Stress wave

1 INTRODUÇÃO

Um ensaio não destrutivo é aquele que identifica as propriedades físicas e mecânicas de um material sem alterar suas capacidades de uso final. Tais avaliações se baseiam em tecnologias de teste para fornecer informações precisas de acordo com as propriedades, desempenho ou condição do material (ROSS, 2015; GUPTA; KHAN; BUTOLA; SINGARI, 2021).

As principais técnicas de ensaios não destrutivos (NDTs) usadas para a madeira são: vibração transversal, onda de tensão (*stress wave*), ultra-som (SEGUNDINHO; OLIVEIRA; GONÇALVES; LOPES; ALVES; AZEVEDO, 2021); resistência elétrica, colorimetria, propriedades dielétricas e raios-X (SCHIMLECK; DAHLEN; APIOLAZA; DOWNES; EMMS; EVANS; MOORE; PÂQUES; BULCKE; WANG, 2019; SOUSA; BARBOSA; SOARES; GOULART; PROTÁSIO, 2020).

As técnicas não destrutivas têm sido frequentemente usadas para prever as propriedades mecânicas da madeira, como o módulo de elasticidade (MOE) (MVOLO; STEWART; KOUBAA, 2021; CANDIAN; SALES, 2021). O módulo de elasticidade é a capacidade do material resistir às deformações produzidas pela força aplicada e tornar-se completamente recuperável após as cargas serem removidas (GUAN; LIU; ZHANG; WANG; ZHOU, 2019).



A propagação de ondas de tensão na madeira é um processo que está diretamente relacionado com as propriedades físico-mecânicas. Esta técnica é empregada principalmente para o controle de sanidade de árvores urbanas, uma vez que defeitos naturais na madeira provocam o aumento do tempo de propagação do som, dessa forma avaliam-se as condições internas das árvores, medindo o tempo de propagação na direção radial (ALLISON; WANG; SENALIK, 2020).

A medição das velocidades das ondas ultrassônicas na madeira é a base da avaliação não destrutiva de suas propriedades elásticas ou viscoelásticas (FATHI; KAZEMIRAD; NASIR, 2021). Dessa forma, no uso aplicado, a propagação de ondas de ultrassom apresenta muita versatilidade, tanto em árvores, toras e em peças estruturais.

O uso dos ensaios de ondas de tensão ou ultrassom pode trazer vantagens quando comparado aos métodos destrutivos. Dentre estas, Shokrieh e Mohammadi (2014) destacam a economia de tempo e recursos financeiros na obtenção dos dados. Além disso, tais técnicas fornecem informações sem causar falha ou alteração na amostra a ser ensaiada (MIRBOLOUK; ROOHNIA, 2015), sendo uma importante alternativa para estimativas das características da madeira (CARRASCO; VARGAS; SOUZA; MANTILLA, 2017).

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo prever o módulo de elasticidade na flexão estática da madeira de *Eucalyptus* sp. por meio de técnicas de ultrassom e *stress wave*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material utilizado

Foram utilizadas madeiras de eucalipto (*Eucalyptus* sp.) com 25 anos, proveniente de um plantio florestal da área experimental do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, município de Alegre-ES (20°45'1.483" de latitude sul e 41°29'19".867 de longitude oeste). As árvores



foram abatidas e ficaram no campo em processo de secagem natural por 6 meses, e na sequência três toras foram desdobradas em pranchas. Das pranchas produzidas, foram retirados 60 corpos de provas para os ensaios nas dimensões de 25 x 25 x 575 mm (tangencial x radial x longitudinal), conforme a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1997) e ASTM –D143.

Depois de serrados, os corpos de prova foram acondicionados em câmara de climatização (Eletrolab, EL011) com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $60 \pm 5\%$ de umidade relativa, até atingirem a umidade de equilíbrio de 12%.

2.2 Ensaios não destrutivos

O módulo de elasticidade dinâmico (MOE_d) foi determinado pela técnica não destrutiva de Ultrassom (MOE_{dus}) e *Stress Wave* (MOE_{dsw}). Para o ensaio de ultrassom, foi usado o equipamento V-meter MK IV, com dois transdutores de faces planas de 500 kHz. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 15521/2007. A técnica empregada foi a de transmissão direta. O equipamento usado para determinação do MOE_{dus} fornece o tempo para que a onda ultrassônica percorra o comprimento da amostra. O comprimento das amostras foi medido e dividido pelo tempo, dessa forma calculou-se a velocidade de propagação. A partir dessa velocidade de propagação, foi calculado o MOE_{dus} (Equação 1).

$$MOE_{dus} = (V^2 \cdot \rho_{12\%}) \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

Em que: MOE_{dus} é o Módulo de elasticidade dinâmico pelo Ultrassom (MPa); V é a Velocidade de propagação da onda ultrassônica ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); $\rho_{12\%}$ é a Massa específica aparente do corpo de prova a 12% de umidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

O ensaio de *Stress Wave* foi realizado com o equipamento *Fakopp* (Modelo *Microsecond Timer*). O instrumento fornece o tempo para que a onda de tensão percorra o comprimento da amostra. Dividindo o comprimento da amostra pelo tempo



de propagação da onda de tensão, obteve-se a velocidade (V). Com V foi calculado o MOE_{dsw} (Equação 2).

$$MOE_{dsw} = (V^2(V^2 \cdot \frac{\rho_{12\%}}{g})). 10^{-5} \quad (2)$$

Em que: MOE_{dsw} é o Módulo de elasticidade dinâmico pelo *Stress Wave* (MPa); V é a Velocidade de propagação da onda de tensão ($m \cdot s^{-1}$); $\rho_{12\%}$ é a Massa específica aparente do corpo de prova a 12% de umidade ($kg \cdot m^{-3}$); g é a Aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$).

A massa específica aparente foi determinada conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997) no mesmo teor de umidade e com os respectivos corpos de prova utilizados nos ensaios não destrutivos. O volume foi mensurado com paquímetro digital (0,01 mm) e a massa obtida em balança semi-analítica (0,01g).

2.3 Flexão estática

Para a mensuração do módulo de elasticidade estático (MOE), seguiu-se a norma ABNT NBR 7190 (1997). Foi utilizado o método da flexão estática, empregando a máquina universal de ensaios (EMIC, DL 10000) com tomada de dados automatizada e capacidade de 100 kN. Respeitaram-se as proporções estabelecidas na norma ABNT NBR 7190 (1997), com a razão mínima de L/h (comprimento/altura) igual a 21. A distância entre apoios dos CPs foi de 525 mm (L). O carregamento foi aplicado no vão central da peça até atingir um deslocamento da peça sem ruptura. O carregamento foi definido com base na flecha máxima igual a L/200, em que L é comprimento entre apoios. Na determinação do MOE estático a madeira também estava com 12 % de umidade.

2.4 Análise Estatística

A comparação do MOE dinâmico com o MOE estático foi realizada de forma quantitativa pela correlação linear de Pearson. Uma vez que o MOE estático apresentou correlação significativa com o MOE_{dus} e MOE_{dsw} , foram ajustados modelos lineares (Equação 3) pela análise de regressão linear, para a sua estimação.



$$MOE = \beta_0 + \beta_1 MOE_d + e \quad (3)$$

Em que: *MOE* é o valor estimado do módulo de elasticidade estático (variável dependente); β_0 é a constante de regressão (intercepto da reta com o eixo Y); β_1 é o coeficiente de regressão; *MOE_d* é o valor do módulo de elasticidade dinâmico obtido pelos métodos de ultrassom e *stress wave* (variável independente); *e* é o erro da regressão.

Os modelos lineares ajustados foram analisados pela significância da análise de regressão (teste F) e de todos os coeficientes da equação (teste t), pelo coeficiente de determinação (R^2) e erro padrão da estimativa (S_{yx}) e pela análise gráfica. Para todos os testes estatísticos, utilizou-se o nível de 5% de significância com o uso do *software* RStudio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A espécie estudada apresentou a densidade aparente média de 664,0 kg.m⁻³ (Tabela 1). O material em estudo pode ser classificado como madeira de média densidade de acordo com Silva, Vale e Miguel (2015).

Houve uma variação na densidade de 9,93% para os 60 corpos de prova. Essa diferença é esperada devido ao fato de que dentro de uma mesma árvore também ocorre variação da densidade da madeira, assim como entre indivíduos de uma mesma espécie, tal variabilidade ocorre em função de fatores genéticos (gêneros, espécies, origem), fatores do meio (clima, solo, topografia) e silviculturais (espaçamento, fertilização, idade de corte, desbaste, desrama) (SILVA; VALE; MIGUEL, 2015).

A massa específica aparente também pode variar em função das características anatômicas, como proporção de vasos, espessura e comprimento da parede da fibra, largura e diâmetro do lúmen (COUTO, 2022).



Tabela 1 – Valores médios das propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus* sp

Propriedades	Média	CV (%)
$\rho_{12\%}$ (kg m ⁻³)	664,01	9,93
V_{us} (m.s ⁻¹)	4.924,68	3,94
V_{sw} (m.s ⁻¹)	3.956,97	4,44
MOE _{duS} (MPa)	16.138,39	13,11
MOE _{dsw} (MPa)	10.611,33	12,41
MOE (MPa)	10.280,15	15,24

Fonte: Autores (2023)

Em que: $\rho_{12\%}$ é a Massa específica aparente do corpo de prova a 12% de umidade, V_{us} é a Velocidade da onda ultrassônica, V_{sw} é a Velocidade da onda de tensão, MOE_{duS} é o Módulo de elasticidade dinâmico pelo Ultrassom, MOE_{dsw} é o Módulo de elasticidade dinâmico pelo *Stress Wave*, MOE é o módulo de elasticidade estático.

A velocidade de propagação da onda ultrassônica (Tabela 1) foi em média 24,5% superior à velocidade da onda de tensão. Ambas apresentaram baixo coeficiente de variação, demonstrando que a técnica apresenta reprodutibilidade. Uma das justificativas pela diferença na velocidade dos dois métodos de ensaios não destrutivos é a frequência da oscilação. O transdutor de ultrassom utilizado possui frequência de 500 kHz e gera ondas cujo comprimento é comparável às dimensões anatômicas dos elementos que constituem a madeira e estes são os que vibram como ressonadores elementares. Somente o componente de frequência que corresponde à frequência natural desses ressonadores pode fornecer uma resposta detalhada ao sistema de interação madeira-onda (MELO; BARBOSA; BELTRAME; ACOSTA; PIMENTA; MASCARENHAS, 2021).

Dessa forma, o ultrassom utiliza altas frequências enquanto o *stress wave* utiliza baixos movimentos moleculares de tensão para medir duas propriedades fundamentais da madeira: a energia armazenada e a dissipação. A energia armazenada manifesta-se pela velocidade com a qual a onda de tensão percorre o material. Em contraste, a taxa sob a qual a onda é atenuada é a indicação da dissipação da energia (QIN; LIU; ABEELE; CUI, 2018). A maior atenuação no *stress wave* promove a menor velocidade da onda, empregando este método.



O MOE_{dus} e o MOE_{dsw} em média foram superiores ao MOE, havendo tendência de superestimar o módulo de elasticidade. Essa diferença entre os valores médios do módulo de elasticidade obtida através de métodos não destrutivos e técnicas destrutivas também foi observada em outros estudos usando ultrassom (FATHI; NASIR; KAZEMIRAD, 2020; CADEMARTORI; MISSIO; GATTO; BELTRAME, 2014) e *stress wave* (MEDEIROS NETO; PAES; SILVA, 2016). Essa diferença entre os módulos é resultante da característica viscoelástica do material, que passa simultaneamente por deformações elásticas e viscosas e, assim o módulo dinâmico superestima o estático (BORŮVKA; NOVÁK; ŠEDIVKA, 2020).

Conforme as Equações 1 e 2 o aumento da velocidade de propagação da onda promove maiores valores do módulo de elasticidade dinâmico, e esta velocidade é influenciada por fatores inerentes à espécie, como, dimensões das fibras, frequência de raios, densidade, lenho de reação, presença de nós, ângulo de grã, teor de umidade, anisotropia, lenho juvenil e adulto, além de outros fatores, como temperatura, umidade relativa, e os procedimentos utilizados para obtenção das medidas (DUONG; SCHIMLECK; TRAN; VO, 2022; GARCIA; CARVALHO; LATORRACA; MATOS; SANTOS; SILVA, 2012).

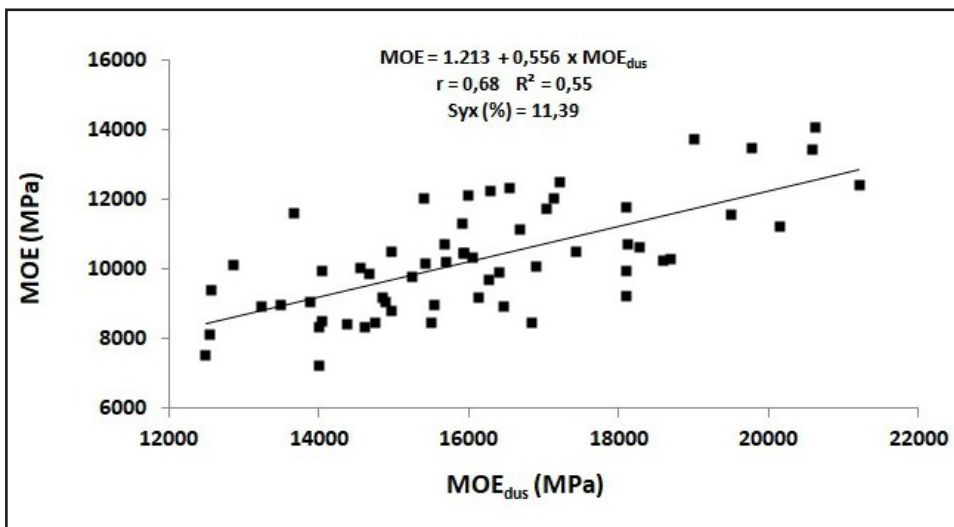
Deve-se observar que existe uma tendência significativa entre as espécies para o aumento da velocidade ultrassônica em função da massa específica, o que contribui para maiores valores do módulo de elasticidade dinâmico (KHARRAT; KOUBAA; KHLIF; BRADAI, 2019).

Com os resultados de MOE_{dus} e o MOE_{dsw} , ajustaram-se modelos matemáticos para estimar o módulo de elasticidade estático (Figura 1 e 2). O modelo de regressão ajustado para estimar o MOE a partir do MOE_{dus} foi significativo ($F_{calculado} = 51,05$; $p\text{-valor} < 0,05\%$), assim como os coeficientes β_0 ($t_{calculado} = 1,82$; $p\text{-valor} < 0,05\%$) e β_1 ($t_{calculado} = 7,14$; $p\text{-valor} < 0,05\%$). Da mesma forma o modelo ajustado usando como variável independente o MOE_{dsw} foi significativo ($F_{calculado} = 61,93$; $p\text{-valor} < 0,05\%$), assim como os coeficientes β_0 ($t_{calculado} = 1,04$; $p\text{-valor} < 0,05\%$) e β_1 ($t_{calculado} = 7,87$; $p\text{-valor} < 0,05\%$).



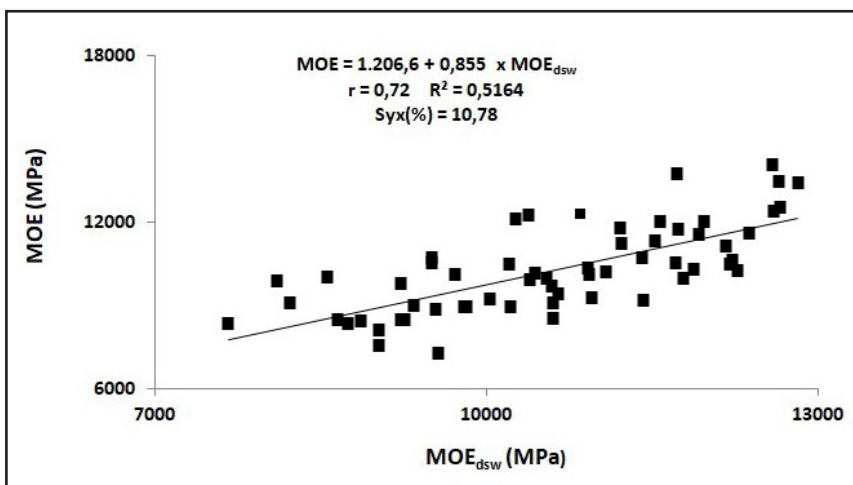
Uma correlação significativa, mediana e positiva de 0,68 e 0,72 foi observada entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático. Os modelos apresentaram valores de coeficiente de determinação de 0,55 e 0,52. O erro padrão da estimativa (Syx) foi de 11,39 e 10,78%.

Figura 1 – Gráfico de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o MOE_{duS}



Fonte: Autores (2023)

Figura 2 – Gráfico de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o MOE_{dsw}



Fonte: Autores (2023)



O coeficiente de determinação (R^2) demonstrou que aproximadamente 50% da variação do módulo de elasticidade estático ocorre em função da variabilidade do módulo de elasticidade dinâmico com erros médios percentuais próximos a 10%, conforme o erro padrão da estimativa (S_{yx}). Tendo em vista a necessidade de se obter dados da madeira ainda em campo, verifica-se que o MOE estático tem forte relação com o MOE dinâmico (CADEMARTORI; MISSIO; GATTO; BELTRAME, 2014; FATHI; NASIR; KAZEMIRAD, 2020), sendo possível estimar as propriedades da madeira de forma não destrutiva com equipamentos portáteis como os ultrassons e *stress waves*.

Como as maiores velocidades ultrassônicas e de *stress wave* são geralmente alcançadas em espécies de madeira com maior densidade, também é possível empregar essas técnicas para se estimar a densidade da madeira ainda em campo, uma vez que a modelagem matemática da propagação de ondas longitudinais em sólidos elásticos sustenta que é possível predizer a densidade da madeira se conhecida a velocidade de propagação do som no material, seu módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson (WANG, 2013).

4 CONCLUSÕES

Os experimentos demonstram que os testes não destrutivos permitem a previsão das propriedades mecânicas estáticas, obtidas por meio de ensaios destrutivos. O ultrassom e o *stress wave* possuem as mesmas capacidades de predizer o módulo de elasticidade estático. Devido à alta frequência o ultrassom possui maior velocidade de propagação da onda e exibe um maior módulo de elasticidade dinâmico.

Os módulos de elasticidade dinâmicos foram superiores ao estático, nas duas técnicas empregadas. O desenvolvimento de modelos de regressão permitiu estimar o MOE com precisão. Os resultados obtidos no presente estudo mostraram que as técnicas de ondas de tensão e ultrassom podem ser empregadas para a predição do módulo de elasticidade da madeira de *Eucalyptus* sp.



REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2007). **NBR 15521** - Ensaio não destrutivo - ultrassom - Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. Rio de Janeiro, 2007.

ALLISON, R. B.; WANG, X.; SENALIK, C. A. Methods for Nondestructive Testing of Urban Trees. **Forests**, v. 11, n. 12, p. 1341, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f11121341>

BORŮVKA, Vlastimil; NOVÁK, David; ŠEDIVKA, Přemysl. Comparison and analysis of radial and tangential bending of softwood and hardwood at static and dynamic loading. **Forests**, v. 11, n. 8, p. 896, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f11080896>

CADEMARTORI, P. H. G. de; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R. Prediction of the modulus of elasticity of *Eucalyptus grandis* through two nondestructive techniques. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 369-375, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.042313>

CANDIAN, Marcela; SALES, Almir. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente construído**, v. 9, p. 83-98, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212009000400519>

CARRASCO, E. V. M.; VARGAS, C. B.; SOUZA, M. de F.; MANTILLA, J. N. R. Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0272>

COUTO, A. M.; MONTEIRO, T. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. Influence of physical-anatomical wood variables on charcoal physical-mechanical properties. **Journal of Forestry Research**, p. 1-8, 2022.

DUONG, D. V.; SCHIMLECK, L.; TRAN, D. L.; VO, H. D. Radial and among-clonal variations of the stress-wave velocity, wood density, and mechanical properties in 5-year-old *Acacia auriculiformis* clones. **BioResources**, v. 17, n. 2, p. 2084, 2022. DOI:10.15376/biores.17.2.2084-2096

FATHI, H.; KAZEMIRAD, S.; NASIR, V. Lamb wave propagation method for nondestructive characterization of the elastic properties of wood. **Applied Acoustics**, v. 171, p. 107565, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107565>

FATHI, H.; NASIR, V.; KAZEMIRAD, S. Prediction of the mechanical properties of wood using guided wave propagation and machine learning. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120848, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120848>

GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. de; LATORRACA, J. V. de F.; MATOS, J. L. M. de; SANTOS, W. A.; SILVA, R. F. de M. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 52, p. 41–52, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0387-6>



GUAN, C.; LIU, J.; ZHANG, H.; WANG, X.; ZHOU, L. Evaluation of modulus of elasticity and modulus of rupture of full-size wood composite panels supported on two nodal-lines using a vibration technique. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 64-72, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.086>

GUPTA, M.; KHAN, M. A.; BUTOLA, R.; SINGARI, R. M. Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review. **Advances in Materials and Processing Technologies**, p. 1-22, 2021.

KHARRAT, W.; KOUBAA, A.; KHLIF, M.; BRADAI, C. Intra-ring wood density and dynamic modulus of elasticity profiles for black spruce and jack pine from X-ray densitometry and ultrasonic wave velocity measurement. **Forests**, v. 10, n. 7, p. 569, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f10070569>

MEDEIROS NETO, P. N.; PAES, J. B.; SILVA, J. G. M. Efeito do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade da madeira por técnica não destrutiva. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 112, p. 917-924, 2016. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n112.13](https://doi.org/10.18671/scifor.v44n112.13).

MELO, R. R. de; BARBOSA, K. T.; BELTRAME, R.; ACOSTA, A. P.; PIMENTA, A. S.; MASCARENHAS, A. R. P. Ultrasound to determine physical-mechanical properties of *Eucalyptus camaldulensis* wood. **Wood Material Science & Engineering**, v. 16, n. 6, p. 407-413, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1830435>

MIRBOLOUK, P.; ROOHNIA, M. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of medium density fiberboard panel from longitudinal vibration tests on specimens. **BioResources**, Raleigh, v. 10, n. 1, p. 613-621, 2015.

MVOLO, C. S.; STEWART, J. D.; KOUBAA, A. Comparison between static modulus of elasticity, non-destructive testing moduli of elasticity and stress-wave speed in white spruce and lodgepole pine wood. **Wood Material Science & Engineering**, p. 1-11, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1871949>

QIN, J.; LIU, X.; ABEELE, K. Van Den; CUI, G. The study of wood knots using acoustic nondestructive testing methods. **Ultrasonics**, v. 88, p. 43-50, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.01.004>

ROSS, R. J. Nondestructive evaluation of wood: second edition. General Technical Report FPL-GTR-238. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, **Forest Products Laboratory**. 169 p. July 2015.

SCHIMLECK, L.; DAHLEN, J.; APIOLAZA, L. A.; DOWNES, G.; EMMS, G.; EVANS, R.; MOORE, J.; PÂQUES, L.; BULCKE, J. Van den; WANG, X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. **Forests**, v. 10, n. 9, p. 728, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f10090728>

SEGUNDINHO, P. G. de A.; OLIVEIRA, R. G. E. de; GONÇALVES, F. G.; LOPES, N. F.; ALVES, R. C.; AZEVEDO, M. S. de. Avaliação da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* para utilização em madeira lamelada colada. **Revista Matéria**, v. 26, n. 3, 2021.



SHOKRIEH, M. M.; MOHAMMADI, A. R. G. Non-destructive testing (NDT) techniques in the measurement of residual stresses in composite materials: an overview. In: SHOKRIEH, M. M. (Org.). **Residual stresses in composite materials**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2014. p. 58-75. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9780857098597.1.58>

SILVA, C. J.; VALE, A. T.; MIGUEL, E. P. Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de Cerradão no estado de Tocantins. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S. l.], v. 35, n. 82, p. 63-75, 2015. DOI: 10.4336/2015.pfb.35.82.822.

SOUSA, W. C. S.; BARBOSA, L. D. J.; SOARES, A. A. V.; GOULART, S. L.; PROTÁSIO, T. D. P. Wood colorimetry for the characterization of amazonian tree species: A subsidy for a more efficient classification. **Cerne**, v. 25, p. 451-462, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01047760201925042650>

WANG, X. Acoustic measurements on trees and logs: a review and analysis. **Wood Sci Technol**, v. 47, p. 965-975, 2013.

Contribuição de Autoria

1 Romário Alves Carvalho

Engenheiro Químico, Mestre, Doutor em Ciências Florestais, Servidor Público Federal
<https://orcid.org/0000-0003-3325-4739> • romario.carvalho@ifes.edu.br

Contribuição: CConceitualização; Curadoria de dados; Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Administração do projeto; Disponibilização de ferramentas; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Supervisão; Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados; Redação do manuscrito original; Escrita – revisão e edição

2 Gilson Fernandes da Silva

Engenheiro Florestal, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0001-7853-6284> • fernandes5012@gmail.com

Contribuição: Conceitualização; Curadoria de dados; Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Administração do projeto; Disponibilização de ferramentas; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Supervisão; Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados; Escrita – revisão e edição



3 Christiano Jorge Gomes Pinheiro

Físico, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0003-2898-8738> • christrieste@gmail.com

Contribuição: Conceitualização; Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Disponibilização de ferramentas; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Validação de dados e experimentos; Escrita – revisão e edição

4 Leonor da Cunha Mastela

Engenheira Civil, Doutora em Ciências Florestais, Servidora Pública Federal

<https://orcid.org/0000-0003-1393-3283> • leonor.mastela@ufes.br

Contribuição: Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Disponibilização de ferramentas; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Validação de dados e experimentos; Redação do manuscrito original; Escrita – revisão e edição

5 Clara Gaspar Fossi de Souza

Engenheira Industrial Madeireira, Mestra, Doutoranda em Engenharia e Ciências dos Materiais

<https://orcid.org/0000-0002-4811-4037> • clara.gaspar@hotmail.com

Contribuição: Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Disponibilização de ferramentas; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Validação de dados e experimentos; Redação do manuscrito original; Escrita – revisão e edição

6 Alehandro Lopes Gamas

Graduando em Engenharia Florestal

<https://orcid.org/0000-0003-1537-6089> • alehandolopesgamas@gmail.com

Contribuição: Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Validação de dados e experimentos; Redação do manuscrito original

7 Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Engenheiro Civil, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0002-4393-8686> • p_gutemberg2001@yahoo.com.br

Contribuição: Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Disponibilização de ferramentas; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Validação de dados e experimentos; Redação do manuscrito original; Escrita – revisão e edição



Como citar este artigo

CARVALHO, R. A.; SILVA, G. F.; PINHEIRO, C. J. G.; MASTELA, L. C.; SOUZA, C. G. F.; GAMAS, A. L.; SEGUNDINHO, P. G. A. Predição do módulo de elasticidade estático de *Eucalyptus* sp. por meio de duas técnicas não destrutivas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 33, n. 3, e70019, p. 1-15, 2023. DOI 10.5902/1980509870019. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509870019>. Acesso em: dia mês abreviado. ano.