

Artigos

Predição da densidade básica de *Eucalyptus* sp. por meio da técnica não destrutiva de ultrassom

Basic density prediction of *Eucalyptus* sp. through the non-destructive ultrasound technique

Romário Alves Carvalho^I , Gilson Fernandes da Silva^I ,
Christiano Jorge Gomes Pinheiro^{II} ,
Wemerson Bruno Henriques^{III} ,
Manoel Filipe de Medeiros de Faria^{IV} 

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

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

^{III}Instituto Federal do Espírito Santo, Ibatiba, ES, Brasil

^{IV}Plugin Roast, Varre-Sai, RJ, Brasil

RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de estimar a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* sp., por meio da técnica não destrutiva de ultrassom. Para tal foram usados 113 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. Para realizar a estimativa da densidade, foi usado o modelo tridimensional que rege a propagação de ondas longitudinais em sólidos isotrópicos. Foram determinadas as variáveis de entrada do modelo, sendo o módulo de elasticidade longitudinal por flexão estática, o coeficiente de Poisson por métodos numéricos e a velocidade de propagação da onda de ultrassom por um equipamento de ensaios não destrutivos de ultrassom. Também foi obtida a densidade básica pelo método da balança hidrostática como valor de referência. A densidade básica média real foi de 595,40 kg.m⁻³ e a estimada de 591,21 kg.m⁻³. O valor estimado teve forte correlação com o valor observado com $r = 0,89$. A estimativa pelo modelo tridimensional apresentou baixo erro com RMSE de 6,50% e viés de 0,59%. A estimativa da densidade básica empregando este método obteve boa precisão, sendo semelhante à técnica de resistografia.

Palavras-chave: Avaliação não destrutiva; Madeira; Ondas; Densidade



ABSTRACT

This work aimed to estimate the basic density of *Eucalyptus* sp. wood, using the non-destructive ultrasound technique. For this, 113 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. To perform the density estimation, the three-dimensional model that governs the propagation of longitudinal waves in isotropic solids was used. The input variables of the model were determined, being the longitudinal modulus of elasticity by static bending, the Poisson's ratio by numerical methods and the propagation velocity of the ultrasound wave by a non-destructive ultrasound testing equipment. The basic density was also obtained by the hydrostatic balance method as a reference value. The actual average basic density was 595.40 kg.m⁻³ and the estimated one was 591.21 kg.m⁻³. The estimated value had a strong correlation with the observed value with $r = 0.89$. The estimation by the three-dimensional model showed a low error with an RMSE of 6.50% and a bias of 0.59%. The estimation of the basic density using this method obtained good precision, being similar to the resistography technique.

Keywords: Nondestructive testing; Wood; Waves; Density

1 INTRODUÇÃO

A densidade da madeira é um dos principais parâmetros de qualidade quando se visa sua utilização como matéria prima industrial ou energética. O conhecimento dessa propriedade possibilita ajustar o beneficiamento, a tomada de decisão da aplicação da madeira, os cálculos de transporte e logística. Quando aplicada ao inventário florestal, pode ser usada para estimar a quantidade de madeira em toneladas, bem como a massa de carbono fixado (ARANTES; TRUGILHO; TOMAZELLO FILHO; LIMA; VIDAURRE, 2016).

Nos dias atuais, para se determinar a densidade das árvores com precisão, é necessário utilizar técnicas destrutivas, um processo que é moroso e caro. Devido ao custo e mão de obra também há restrição no número de indivíduos a serem avaliados (GOUVÊA; TRUGILHO; GOMIDE; SILVA; ANDRADE; ALVES, 2011).

As técnicas não destrutivas contribuem pela agilidade e flexibilidade na obtenção dos resultados, com a possibilidade de diagnosticar a evolução temporal da qualidade da madeira (MEDEIROS NETO; PAES; SILVA, 2016). A utilização de técnicas de análises não destrutivas para a estimação da densidade da madeira pode permitir



a flexibilidade, agilidade, precisão, redução dos custos e manutenção da condição preliminar estrutural do material, quando comparadas aos métodos tradicionais destrutivos (SORIANO; VEIGA; MARTINS, 2015).

O ensaio não destrutivo de ultrassom é uma importante ferramenta para a determinação das propriedades físico-mecânicas da madeira, como módulo de elasticidade (MORROW; GORMAN; EVANS; KRETSCHMANN; HATFIELD, 2013; LIU; GAO; CHEN; LIU, 2014) e massa específica, por possuir diversas 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 (MANTILLA CARRASCO; PEREIRA; ALVES, 2013).

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.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo estimar a densidade básica da madeira adulta de *Eucalyptus* sp. utilizando o método não destrutivo de propagação de ondas de ultrassom e comparar os resultados com o método de referência da ABNT 11941(2003).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material utilizado

Foram utilizadas madeiras de eucalipto (*Eucalyptus* sp.) com 20 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, e na sequência três toras foram desdobradas em pranchas. Das pranchas produzidas, foram retirados 113 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), ASTM –D143 (2008) e com a NBR 15521 (2007). 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 Cálculo da densidade estimada

A modelagem matemática utilizada no cálculo da densidade foi a da propagação de ondas longitudinais na forma tridimensional (WANG, 2013): Para o cálculo da densidade básica estimada dos 113 corpos de prova, utilizou-se a Equação (1). Como *inputs* empregou-se a velocidade de propagação da onda ultrassônica em cada corpo de prova (CP) e a média do módulo de elasticidade dos 113 CPs. Também se calculou o coeficiente de Poisson, tendo-se como referência a Equação 1. O cálculo foi realizado de forma numérica, uma vez que as variáveis ρ , C e MOE foram obtidas experimentalmente para cada corpo de prova. Para a estimação da densidade básica, empregou-se o valor médio do coeficiente de Poisson, conforme Equação (1):

$$\rho_{est} = \left(\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{1}{C^2} \right) MOE \quad (1)$$

em que: C é a velocidade da onda longitudinal em meio ilimitado; MOE é o módulo de elasticidade longitudinal; ρ_{est} é densidade estimada do material; ν é a razão de Poisson do material.

2.3 Obtenção da velocidade de propagação da onda ultrassônica

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 fornece o tempo para que a onda ultrassônica percorra o comprimento da amostra. Para as medições do tempo de propagação da onda, os transdutores foram posicionados nas extremidades dos CPs (propagação no sentido longitudinal) de acordo com a NBR 15521/2007. Para o acoplamento dos transdutores com o material, utilizou-se o gel acoplante da marca Carbogel.

De posse do tempo de propagação da onda no sentido longitudinal madeira, determinou-se a velocidade de propagação da onda ultrassônica através do CP avaliado. Foram medidas as distâncias entre os transdutores com o auxílio do paquímetro digital da marca Digimess. Após a determinação do tempo de propagação e a distância entre os transdutores, a velocidade de propagação da onda ultrassônica foi calculada pela Equação (2):

$$C = \frac{L}{t} \quad (2)$$

em que: C é a velocidade em metros por segundo (m/s); L é a distância entre os pontos de acoplagem dos transdutores em (m); t é o tempo em segundos (s).

2.4 Determinação do módulo de elasticidade (MOE)

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.



2.5 Determinação da densidade básica da madeira

A determinação da densidade básica foi realizada de acordo com a NBR 11941 (2003). Os 113 CPs de 25 x 25 x 575 mm foram cortados em um novo CP derivado do primeiro nas dimensões de 25 x 25 x 50 mm. Estes foram devidamente identificados e ficaram submersos em água até a completa saturação. Após esse período foi aferido o volume das amostras pelo método da balança hidrostática. Em seguida, o material foi colocado em estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$, até atingirem peso constante e na sequência foram determinados seus pesos secos e calculada a densidade básica do material, que é madeira, definida pela norma NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2003) como a divisão da massa seca em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ pelo respectivo volume da madeira acima do ponto de saturação das fibras.

2.6 Comparação entre a densidade básica estimada e obtida pelo método de referência

A densidade básica obtida pelo método da balança hidrostática é considerada o valor verdadeiro (Y) e a densidade obtida pelo ultrassom o valor estimado (\hat{Y}). Para avaliar a qualidade da estimativa, calcularam-se as seguintes estatísticas:

– Raiz do quadrado do erro médio (RMSE).

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{Y}} 100 \quad (4)$$



– Viés:

$$V = \frac{\sum_i^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \quad (5)$$

$$V(\%) = \frac{V}{\bar{Y}} 100 \quad (6)$$

em que: RMSE = Raiz do quadrado do erro médio (kg.m⁻³); V = Viés (kg.m⁻³); Y = Densidade básica pelo método da ABNT NBR 11941 (2003) (kg.m⁻³); \hat{Y} = Valor estimado pelo densitômetro; n = Quantidade de corpos de prova.

Além do RMSE e Viés, a análise dos resultados também foi realizada por meio da análise gráfica do valor da densidade básica estimada versus a observada, pela análise gráfica dos resíduos e pelo histograma de frequência de erros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A densidade básica média do *Eucalyptus* sp. obtida pelo método de referência (ABNT NBR 11941/2003) foi de 595,40 kg.m⁻³ (Tabela 1). Os valores de densidade ficaram entre 430,93 e 744,61 kg.m⁻³, apresentando CV de 15,43%.

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

Propriedades	Média	CV (%)
ρ (kg m ⁻³)	595,40	15,43
C (m.s ⁻¹)	4.813,48	4,06
MOE (MPa)	11.099,01	17,42
ν	0,26	18,27
pest (kg m ⁻³)	591,21	15,36

Fonte: Autores (2022)

Em que: ρ = Densidade básica do corpo de prova; C= Velocidade da onda ultrassônica; MOE é o módulo de elasticidade estático; ν é a razão de Poisson do material; pest = densidade estimada do material, CV = coeficiente de variação em %.



A madeira de *Eucalyptus* sp. em estudo pode ser classificada, de acordo com Silva, Vale e Miguel (2015), como de média densidade. Houve uma variação na densidade de 15,43% para os 113 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 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).

A velocidade de propagação da onda ultrassônica oscilou entre 4.454,54 e 5.174,90, com média de 4.813,48 e CV de 4,06%. O MOE apresentou CV de 17,42%, média de 11.099,01. O coeficiente de Poisson obtido de forma numérica obteve média de 0,26. A pest apresentou valores semelhantes à densidade básica real, oscilando de 439,83 kg.m⁻³ a 743,28 kg.m⁻³, com a média de 591,21 kg.m⁻³ e CV de 15,36%.

A velocidade de propagação da onda ultrassônica apresentou variação entre os corpos de prova, essa variação ocorre porque esse processo físico é influenciado 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; DONG, 2022; GARCIA; CARVALHO; LATORRACA; MATOS; WANESSA; SANTOS; SILVA, 2012).

Os valores do MOE encontrados no presente estudo são semelhantes aos disponíveis na literatura. Silva, Matos, Oliveira e Evangelista (2005), caracterizando a madeira de *Eucalyptus grandis* com idades de 10, 14, 20 e 25 anos, encontraram valores médios de módulo de elasticidade de 10.131, 13.593, 14.912 e 13.056 MPa, respectivamente, mostrando que a idade tem efeito significativo sobre o módulo de elasticidade. A norma ABNT NBR 7190:1997 traz valores estabelecidos para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, estes são: 12,81 GPa e 13,16 GPa, respectivamente.



O coeficiente de Poisson obtido de forma numérica está dentro do esperado para a madeira. Segundo Hibbeler (2010), o coeficiente de Poisson é adimensional e para a maioria dos sólidos seu valor encontra-se, em geral, entre 1/4 e 1/3. O valor máximo possível para o coeficiente de Poisson é 0,5. Portanto, $0 \leq \nu \leq 0,5$ (HIBBELER, 2010).

Devido a essa grande variação da densidade, os CPs foram divididos em duas classes (Tabela 2) de acordo com a classificação de Vale, Sarmento e Almeida (2005), Silveira, Rezende e Vale (2013) e Silva, Vale e Miguel (2015), em que madeiras de baixa densidade apresentam valores abaixo de 550 kg.m^{-3} (Classe 2); e média densidade, densidade entre 0,550 e $0,720 \text{ kg.m}^{-3}$ (Classe 1). Para cada classe, foi calculado o seu respectivo MOE médio e este foi usado na estimação da densidade.

Tabela 2 – Classes de densidade básica e o seu correspondente módulo de elasticidade (MOE)

Classe	Densidade básica (kg.m^{-3})	MOE (MPa)
Classe 1	> 550	12.043,44
Classe 2	< 550	9.617,97

Fonte: Autores (2022)

Na Tabela 3, é possível observar os valores da raiz do quadrado do erro médio (RMSE) e o viés para a estimação da densidade básica com o modelo tridimensional da propagação de ondas de ultrassom. O RMSE foi baixo com valor absoluto de $38,73 \text{ kg.m}^{-3}$ e relativo de 6,50%, o viés teve valor absoluto de $3,53 \text{ kg.m}^{-3}$ e relativo de 0,59%. A densidade básica estimada foi muito semelhante à observada pelo método de referência. O baixo valor do RMSE e a ausência de viés demonstra a robustez da técnica proposta.

Tabela 3 - Resultados da raiz do quadrado do erro médio (RMSE) e viés obtido pelo método de estimação da densidade básica por ultrassom

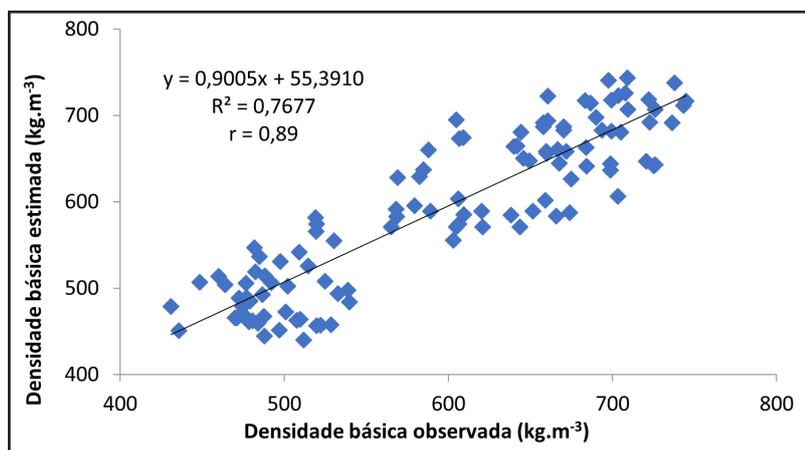
Estatística	Resultado
RMSE (kg.m^{-3})	38,73
RMSE (%)	6,50
VIÉS (kg.m^{-3})	3,53
VIÉS (%)	0,59

Fonte: Autores (2022)



A Figura 1 apresenta a comparação entre a densidade básica observada (densidade obtida pelo método de referência da ABNT) com a densidade estimada a partir da velocidade de propagação da onda de ultrassom. A densidade estimada apresenta alta similaridade com a observada com R^2 igual a 0,7677. Uma correlação significativa, forte e positiva de 0,89 foi observada entre os dados estimados e observados pelo método de referência.

Figura 1 – Densidade básica estimada versus a observada, coeficiente de determinação e correlação para a modelagem tridimensional da onda longitudinal para a estimação da densidade básica por ultrassom



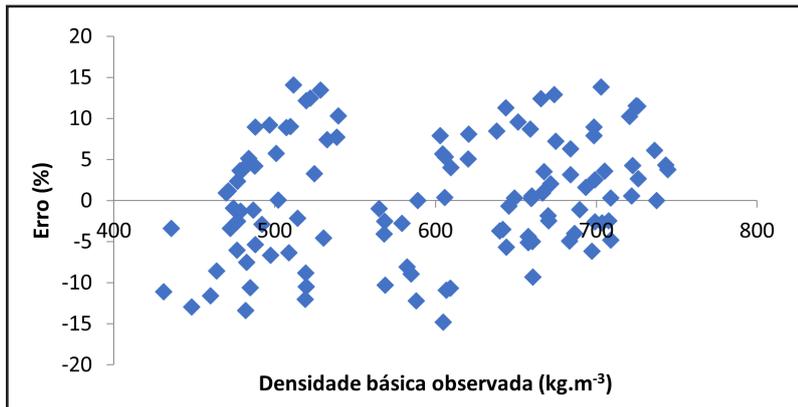
Fonte: Autores (2022)

Os resultados da estimação da densidade com o ultrassom são semelhantes aos métodos não destrutivos disponíveis no mercado, como o Pilodyn e Resistógrafo (GOUVÊA; TRUGILHO; COLODETTE; BIANCHI; SORAGI; OLIVEIRA, 2011; GONÇALVES; OLIVEIRA; TOMAZELLO FILHO; REZENDE, 2007; LIMA; TRUGILHO; CRUZ; SARTORIO, 2007). Nos estudos de Gonçalves, Oliveira, Tomazello Filho e Rezende (2007), foi encontrado R^2 de 0,3490 para a estimação da densidade de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com o Pilodyn. Na pesquisa de Gouvêa, Trugilho, Gomide, Silva, Andrade e Alves, (2011), foi encontrado R^2 igual a 0,199 para a estimação da densidade básica pelo Resistógrafo em seis clones de *Eucalyptus*. Lima, Trugilho, Cruz e Sartorio (2007) encontraram modelos com R^2 igual a 0,640 para a estimação da densidade básica de *Eucalyptus* com Resistógrafo.



A Figura 2 apresenta a distribuição dos resíduos do método de estimação da densidade proposta. Observa-se que não há erro sistemático na medição. A densidade estimada apresenta alta similaridade com a observada, com erros bem distribuídos e ausência de sub e superestimação.

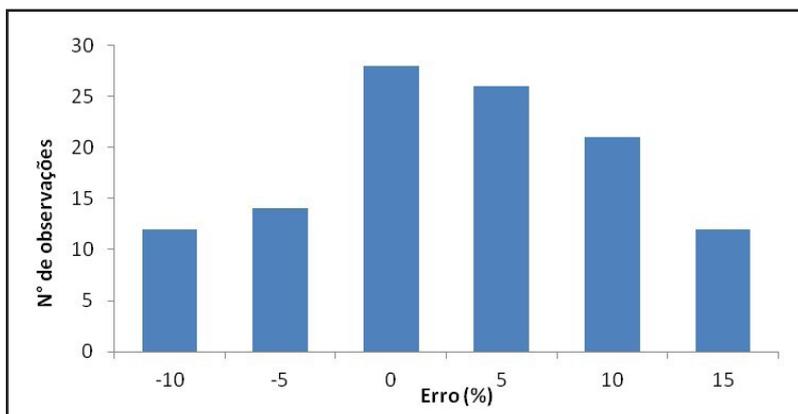
Figura 2 – Distribuição dos resíduos da estimação da densidade básica pelo ultrassom



Fonte: Autores (2022)

Conforme a Figura 3, a frequência de erros está distribuída entre -15 e 20%. Com 80% das observações concentrada na faixa de erro de -5 e 10%. Esses erros são semelhantes aos encontrados pelo Pilodyn e Resistógrafo (GOUVÊA; TRUGILHO; COLODETTE; BIANCHI; SORAGI; OLIVEIRA, 2011).

Figura 3 – Histograma de frequência dos erros percentuais usando a modelagem tridimensional da onda longitudinal para a estimação da densidade básica por ultrassom



Fonte: Autores (2022)



4 CONCLUSÕES

Os experimentos demonstram que os ensaios não destrutivos de ultrassom permitem estimação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* sp. A modelagem tridimensional da propagação de ondas de ultrassom se mostrou eficaz para o cálculo da densidade básica da madeira. A estimação apresentou alta similaridade com o valor de referência possuindo baixo erro médio e sem tendência de viés.

O método proposto para a estimação da densidade da madeira foi eficiente, com correlação forte entre o valor estimado e observado. Na ausência de correlação forte entre a densidade e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, a densidade básica pode ser estimada empregando a velocidade de propagação da onda ultrassônica como variável preditora e os valores médios do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. O ultrassom mostrou-se um instrumento de fácil operação em laboratório com grande potencialidade de sua utilização para trabalhos em campo.

REFERÊNCIAS

- 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, 2008. 20 p.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; TOMAZELLO FILHO, M.; LIMA, J. T.; VIDAURRE, G. B. Densitometria de raios x na madeira e carvão de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, Viçosa, v.40, n.1, p.155-162, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15521**: ensaios não destrutivos - ultrassom - Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. Rio de Janeiro, 2007.
- DUONG, D. V.; SCHIMLECK, L.; DONG, T. L. 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.



GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M.; LATORRACA, J. V. F.; MATOS, J. L. M.; WANESSA A.; SANTOS, W. A.; SILVA, R. F. 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.

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T da S.; TOMAZELLO FILHO, M.; REZENDE, G. D. S. P. Estimativa da densidade básica da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* por método não destrutivo. **Cerne**, Lavras, v. 13, p. 119-128, 2007.

GOUVÊA, A. de F. G.; TRUGILHO, P. F.; COLODETTE, J. L.; BIANCHI, M. L.; SORAGI, L. de C.; OLIVEIRA, A. C. Relação entre características da madeira da polpa celulósica de *Eucalyptus* com métodos não destrutivos na árvore viva. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 205-220, 2011.

GOUVÊA, A. de F. G.; TRUGILHO, P. F.; GOMIDE, J. L.; SILVA, J. R. M. da; ANDRADE, C. R.; ALVES, I. C. N. Determinação da densidade básica da Madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.2, p.349-358, 2011.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. — São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; CRUZ, C. R. da; SARTORIO, R. Use of the resistograph for *Eucalyptus* wood basic density and perforation resistance estimative. **Sci. For.**, Piracicaba, n. 75, p. 85-93, 2007.

LIU, H.; GAO, J.; CHEN, Y.; LIU, Y. Effects of moisture content and fiber proportion on stress wave velocity in cathay poplar (*Populus cathayana*) wood. **BioResources**, Raleigh, v. 9, n. 2, p. 2214-2225, 2014.

MANTILLA CARRASCO, E. V.; PEREIRA, N. C. S.; ALVES, R. C. Estimativa da densidade aparente, resistência à compressão e módulo de elasticidade da madeira por meio do resistógrafo. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 45-51, 2013.

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.

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.

MORROW, C.; GORMAN, T.; EVANS, J.; KRETSCHMANN, D.; HATFIELD, C. Prediction of wood quality in small-diameter Douglas-fir using site and stand characteristics. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 45, n. 1, p. 49-61, 2013.

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**. Wood head Publishing Limited, Cambridge, p. 58-75, 2014.

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.



SILVA, J.C; MATOS, J.L.M; OLIVEIRA, J.T.S.; EVANGELISTA, W.V. Influência da idade e da posição radial na flexão estática da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v.29, 5, p. 795-799, 2005.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 43, n. 2, p.179 – 184, 2013. DOI: 10.1590/S0044-59672013000200007

SORIANO, J.; VEIGA, N. S. da; MARTINS, I. Z. Wood density estimation using the sclerometric method. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 6, p. 753-758, 2015.

VALE, A. T.; SARMENTO, T. R.; ALMEIDA, A. N. Caracterização e uso de madeiras de galhos de árvores provenientes da arborização de Brasília - DF. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 15, n. 4, p. 411-420, 2005.

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

4 – Wemerson Bruno Henriques

Administrador, Especialista, Servidor Público Federal

<https://orcid.org/0000-0003-4595-533X> • wbhenriques@gmail.com

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

5 – Manoel Filipe de Medeiros de Faria

Engenheiro de Produção, Especialista em Engenharia e Segurança do Trabalho, Empresário

<https://orcid.org/0000-0002-8450-7620> • felipe.faria@hotmail.com.br

Contribuição: Conceitualização; Pesquisa; Metodologia; Disponibilização de ferramentas; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Design da apresentação de dados; Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

Carvalho, R. A.; Silva, G. F.; Pinheiro, C. J. G.; Henriques, W. B.; Faria, M. F. M. Predição da densidade básica de *Eucalyptus* sp. por meio da técnica não destrutiva de ultrassom. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 33, n. 2, e70092, p. 1-15, 2023. DOI 10.5902/1980509870092. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509870092>.