

## Determinação do módulo de elasticidade de compósito plástico-madeira comercial por propagação de ondas de excitação

Nathália Gabriele Franca Dias<sup>1</sup>, Matheus Henrique dos Santos Albuquerque<sup>1</sup>, Gilson Mendonça de Miranda Júnior<sup>1</sup>, Rejane Costa Alves<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Jerônimo Monteiro/ES, Brasil - [nathaliagfdias@gmail.com](mailto:nathaliagfdias@gmail.com)

**Resumo:** O uso de ensaios não destrutivos para estimar propriedades da madeira está crescendo, e é importante expandi-lo para compósitos plástico-madeira, ainda pouco explorados. Este estudo visou estimar o módulo de elasticidade desses compósitos por meio de ensaios de excitação por impulso, avaliando os modos longitudinal, flexional e torcional. Foram testadas 25 peças de 20x20x300 cm, e após os ensaios dinâmicos, as peças passaram por ensaios de flexão estática conforme a NBR 7190 - 22. Os resultados mostraram  $R^2$  de 71,4% e 70,4% para os modos flexional e torcional, respectivamente, enquanto o modo longitudinal apresentou apenas 35,5%. Defeitos internos comprometeram a precisão do modo longitudinal, tornando-o não recomendado. Em contraste, os modos flexional e torcional mostraram-se eficazes e promissores para a estimativa do módulo de elasticidade em compósitos plástico-madeira.

**Palavras-chave:** Ensaios não destrutivos, Módulo de elasticidade, compósito plástico-madeira, excitação por impulso.

## Determination of the Modulus of Elasticity of Commercial Plastic-Wood Composite by Excitation Wave Propagation

**Abstract:** The use of non-destructive testing to estimate wood properties is increasing, and it is important to expand this method to plastic-wood composites, which are still underexplored. This study aimed to estimate the modulus of elasticity of these composites using impulse excitation tests, evaluating the longitudinal, flexural, and torsional modes. Twenty-five pieces measuring 20x20x300 cm were tested, and after dynamic tests, the pieces were subjected to static bending tests according to NBR 7190 - 22. The results showed  $R^2$  values of 71.4% and 70.4% for the flexural and torsional modes, respectively, while the longitudinal mode had only 35.5%. Internal defects compromised the accuracy of the longitudinal mode, making it not recommended. In contrast, the flexural and torsional modes proved to be effective and promising for estimating the modulus of elasticity in plastic-wood composites.

**Keywords:** Non-destructive testing, Modulus of elasticity, Plastic-wood composite, Impulse excitation.

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira plástica é um material compósito que combina resíduos plásticos e fibras de madeira, apresentando propriedades semelhantes às da madeira tradicional (Najafi, 2013). Este material é considerado uma alternativa ecológica, pois não apenas auxilia na reutilização de resíduos plásticos, reduzindo seu impacto ambiental, mas também contribui para a diminuição do desmatamento ilegal das florestas (Sommerhuber *et al.*, 2017). Além disso, a madeira plástica se destaca por suas propriedades superiores em alguns aspectos quando comparado a madeira, como baixa absorção de umidade, alta durabilidade e resistência a pragas, mofo e fungos (Oliveira *et al.*, 2013).

A produção de madeira plástica é vista como uma importante contribuição para a sustentabilidade por duas razões principais. Primeiramente, trata-se de um produto que é totalmente reciclado e reciclável, o que significa que pode ser reaproveitado no final de sua vida útil, reduzindo a demanda por recursos naturais (Talgatti *et al.*, 2017). Em segundo lugar, a fabricação da madeira plástica contribui para a remoção de resíduos plásticos do meio ambiente, transformando-os em um material útil para a sociedade (Kieling *et al.*, 2019; Schwarzer, 2021).

Apesar das vantagens ambientais da madeira plástica, é fundamental avaliar suas propriedades mecânicas para garantir sua adequação em aplicações estruturais e não estruturais. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo determinar o módulo de elasticidade de um compósito plástico-madeira comercial, utilizando a técnica de propagação de ondas de excitação. Este estudo busca contribuir para o desenvolvimento de métodos confiáveis e eficientes de caracterização desse material, sem comprometer sua integridade estrutural, permitindo seu uso posterior.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

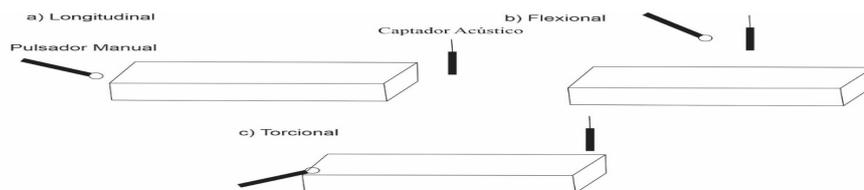
A madeira plástica utilizada foi fabricada por uma empresa brasileira localizada no Paraná/PR, utilizando o processo de extrusão. A composição do material consiste em uma mistura de 70% de resíduos de madeira, provenientes de espécies como pinus e eucalipto, e 30% de resíduos plásticos, especificamente Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Ao todo foram utilizadas quatro pranchas,

que posteriormente foram transformadas em 24 corpos de prova conforme o tamanho padrão especificado pela NBR 7190 - 22. Esta norma define as dimensões para ensaios de flexão estática como 20x20x300 mm. Para cada corpo de prova, foram medidas a massa, largura e espessura utilizando uma balança de precisão e um paquímetro digital calibrado.

O ensaio de propagação de ondas de excitação foi realizado com o equipamento Sonelastic, conforme a norma ASTM E1876 - 22. As dimensões e massa dos corpos de prova foram inseridas no software, que analisou as respostas acústicas captadas por um microfone após impulsos manuais.

Os corpos de prova foram avaliados em diferentes modos de vibração, incluindo os modos longitudinal, flexional e torcional. Para isso, o microfone foi posicionado estrategicamente, e o impulso mecânico foi aplicado em locais específicos, permitindo a identificação e análise separada de cada modo de vibração. (Figura 1).

**Figura 1.** Posições de captação das ondas de excitação no equipamento Sonelastic. Posição (a) Longitudinal, (b) Flexional e (c) Torcional.



Fonte: (Autor)

Para garantir a centralização correta nos diferentes modos de vibração, marcou-se a distância de  $0,224L$  para os ensaios longitudinal e flexional, e  $0,32L$  para o torcional, a partir das extremidades de cada amostra, sendo  $L$  o comprimento total.

O ensaio de flexão estática foi realizado na máquina de ensaios universal EMIC (modelo DL 10000) no Laboratório de Anatomia da Madeira em Jerônimo Monteiro - ES, Brasil. O procedimento foi realizado em conformidade com a norma NBR 7190 - 22, sendo utilizada uma célula de carga de 450 kgf e carregamento

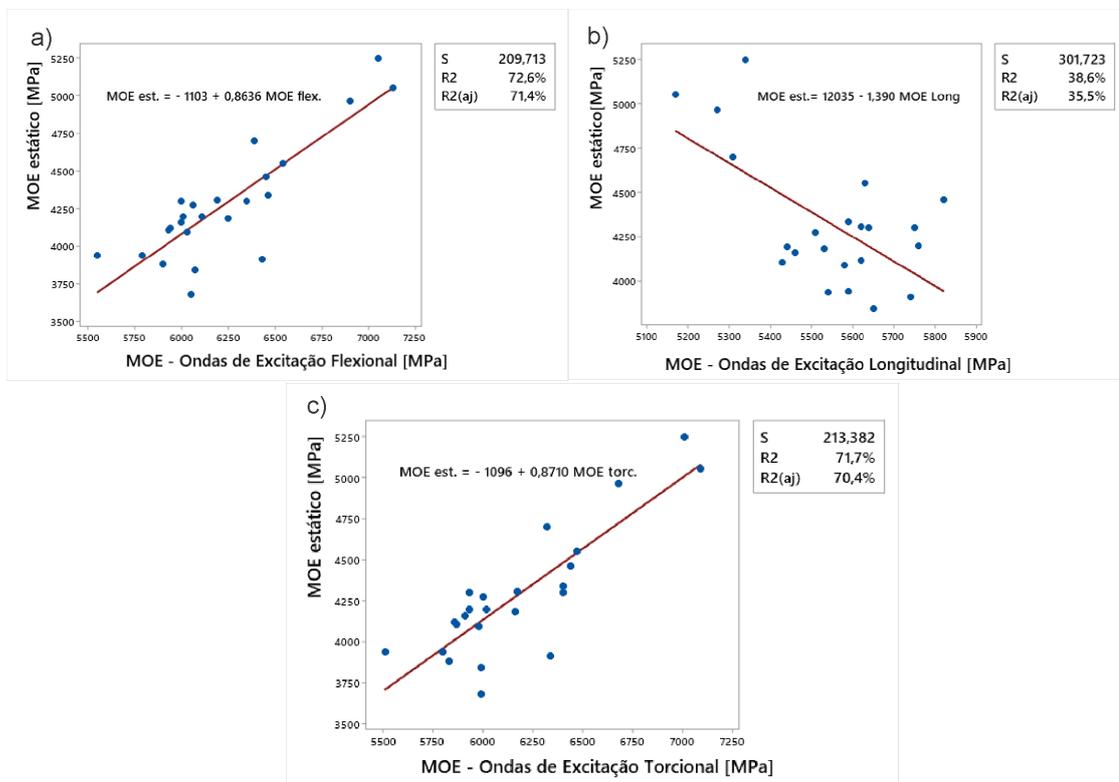
monotônico crescente correspondente a uma taxa de 10 MPa/min.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Minitab 19. Foram aplicados testes de regressão polinomial ( $R^2$ ) para avaliar a distribuição dos dados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de regressão linear para relação entre o Módulo de Elasticidade dinâmico e estático nos diferentes modos de vibração (longitudinal, flexional e torcional) são mostrados na Figura 2.

**Figura 2.** Relação entre o Módulo de Elasticidade Estático e Módulo de Elasticidade Dinâmico obtido por meio de regressão linear para ondas de excitação flexional (a), longitudinal (b) e torcional (c).



Fonte: (Autor)

Os modelos de regressão foram avaliados através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que indica o quanto da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos para MOE flexional e torcional foram superiores (71,4 % e 70,4%, respectivamente) em comparação com o longitudinal (35,5%), indicando melhor ajuste dos modelos de regressão e sugerindo

que os MOE flexional e torcional são melhores preditores do comportamento elástico do material em comparação com o MOE longitudinal.

O baixo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) observado para o MOE longitudinal pode ser explicado pelas limitações inerentes a esse modo de excitação. Candian e Sales (2009) destacam que a presença de defeitos no percurso da onda entre os pontos de medição pode levar a uma redução na taxa de propagação acústica, quando comparada a um valor padrão esperado para o material em condições ideais. Puccini *et al.* (2002) demonstram uma forte relação entre a diminuição da velocidade de propagação da onda e a presença de defeitos detectados pela análise visual. Com isso, observa-se que o percurso do som sofre maior influência durante a passagem no sentido longitudinal da amostra.

No contexto da madeira plástica, a complexa interação entre as partículas de madeira e a matriz polimérica, resultante do processo de extrusão, cria descontinuidades internas que aumentam a atenuação do som. Esse aumento de atenuação, tem impacto direto na redução na passagem do som na amostra, que por sua vez, impacta direto no valor estimado de módulo de elasticidade dinâmico (Bucur, 2006; Wegst, 2006).

De acordo com Otani (2022), o modo longitudinal é mais sensível às variações na estrutura interna do material, como a presença de defeitos, vazios ou heterogeneidades. Por essa razão, é comum na literatura encontrar discrepâncias de valores entre os modos flexional e longitudinal. Heyliger *et al.* (2001) e Bucur (2006) observam caso a amostra apresente pequenos defeitos como poros, trincas e em sua superfície, haverá uma disparidade nos valores obtidos pelo modo de passagem da onda. Essa variação ressalta a importância de considerar múltiplos modos de vibração na caracterização não destrutiva de materiais.

Por outro lado, os modos flexional e torcional são menos influenciados por essas variações internas, uma vez que a propagação das ondas ocorre de maneira diferente nesses modos de excitação (Otani, 2022). É importante ressaltar que, embora os ensaios não destrutivos para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) tenham se mostrado promissores em madeiras tradicionais, sua aplicação em compósitos de madeira plástica ainda é pouco estudada. Chauhan e Sethy (2016) destacam que, mesmo para madeiras naturais, ainda há uma compreensão incompleta sobre as diferenças entre MOEds determinados por

diversos métodos.

Esta observação ganha ainda mais relevância no contexto de compósitos de madeira plástica, onde o processo de extrusão e a interação entre os componentes de madeira e plástico podem variar e influenciar significativamente as propriedades acústicas e mecânicas (Fabiya e McDonald, 2010; Cabral *et al.*, 2016). Isso ressalta a necessidade de pesquisas adicionais para compreender completamente as relações entre as propriedades dinâmicas e estáticas em compósitos de madeira plástica, visando aprimorar a confiabilidade desses métodos não destrutivos para uma gama mais ampla de composições e aplicações destes materiais.

Os resultados deste estudo estão de acordo com pesquisas anteriores que mostraram a possibilidade e a eficiência do uso de ensaios não destrutivos para prever o MOE estático em materiais à base de madeira (Carrasco *et al.* 2017; Silva *et al.*, 2022).

#### 4. CONCLUSÃO

Pode concluir-se com a realização deste trabalho que:

- O estudo demonstrou que trincas afetam significativamente a resposta do ensaio no modo de vibração longitudinal.
- O ensaio de excitação por impulso, particularmente nos modos flexional e torcional, mostrou-se promissor para a estimativa não destrutiva do MOE de compósito plástico - madeira.
- Há a necessidade de estudos futuros para avaliar a influência da composição e da estrutura interna dos compósitos na eficácia deste método dinâmico.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo incentivo à publicação deste trabalho em congresso.

#### 6. REFERÊNCIAS



Engenharia  
Industrial  
Madeireira



SOCIEDADE BRASILEIRA  
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DA MADEIRA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1876: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. **West Conshohocken**, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

BUCUR, V., **Acoustics of Wood**. 2ª ed. Germany, Springer, 2006. p. 393.

CABRAL, S.C. et al. Características comparativas da madeira plástica com a madeira natural. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 1, 2016.

CANDIAN, M.; SALES, A.. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 83–98, out. 2009.

CARRASCO, E. V. M.; VARGAS, C. B.; SOUZA, M. F.; *et al.* Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, e11777, 2017.

CHAUHAN, S., & SETHY, A. (2016). Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(2), 373-382.

FABIYI, J. S.; MCDONALD, A. G. Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 41, n. 10, p. 1434-1440, 2010.

HEYLIGER, P., UGANDER, P., LEDBETTER, H. Anisotropic Elastic Constants: Measurement by Impact Resonance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, pp. 356-363, 2001.

KIELING, Antonio Claudio *et al.* Potencial econômico de plásticos recicláveis na cidade de Manaus (AM). **Scientia Amazonia**, v. 8, n. 1, p. B1-B14, 2019.

NAJAFI, S. K. Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review. **Waste Management**, v. 33, n. 9, p. 1898-1905, 2013.

OLIVEIRA, E. M. R. de; COSTA, R. A. **Dossiê Técnico –Madeira Plástica**. 29 p. Instituto Euvaldo Lodi –IEL/BA. SBRT –Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas. 2013.

OTANI, L. B.; ALVES, H.; MELO, J. D.; AMICO, S. C. Determinação dos módulos elásticos de compósitos empregando a Técnica de Excitação por Impulso. **Technical Report**, p. 1-10, 2022.

PUCCINI, C. T.; GONÇALVES, R.; MONTEIRO, M. E. A.. Avaliação estatística da variação da velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira em presença de defeitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 499–503, set. 2002.



SCHWARZER, Eduarda; DA ROCHA, Josy Anne dos Santos; SELEME, Robson. Análise da utilização da logística reversa e sustentabilidade em uma empresa

fabricante de madeira plástica. **Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo**, v. 6, n. 5, p. 109-133, 2021.

SILVA, L. S. Z. R. S.; CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; *et al.* Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cajueiro estimadas por métodos não destrutivos baseados na densidade aparente e frequência natural de vibração. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 1-10, 2022.

SOMMERHUBER, P. F.; WENKER, J. L.; RÜTER, S.; KRAUSE, A. Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 117, p. 235-248, 2017.

TALGATTI, M.; BALDIN, T.; SILVEIRA, A. G.; SANTINI, E. J.; VIDRANO, B. R. A. Compósito madeira-plástico a partir de resíduos de três espécies florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 37, n. 91, p. 277-283, jul./set. 2017.

WEGST, U.G.K. (2006), Wood for sound. **Am. J. Bot.**, 93: 1439-1448.