

VALIDAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA PARA FABRICAÇÃO DE EMBALAGEM AUTOMOTIVA

VALIDATION OF NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR WOOD CHARACTERIZATION FOR AUTOMOTIVE PACKAGING MANUFACTURING

*Calline Chaves de Jesus¹, Douglas Edson Carvalho², Beatriz Alves Lins³, Ricardo Jorge Klitzke⁴,
Mauro Vitor Greco Tavora⁵*

¹Universidade Federal do Sul da Bahia, Itabuna, Bahia, Brasil – douglasedsoncarvalho@gmail.com

²Universidade Federal do Sul da Bahia, Itabuna, Bahia, Brasil – callinejesus@hotmail.com

³Universidade Federal do Sul da Bahia, Itabuna, Bahia, Brasil – beatrizlinsalves@gmail.com

⁴Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – rjklitzke@gmail.com

⁵Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – mauro.tavora@gmail.com

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da madeira de eucalipto e pinus utilizada no processo produtivo de fabricação de pallets, tomando como referência o ensaio destrutivo de flexão estática realizado em Máquina Universal de Ensaio Mecânicos (EMIC). Para efeito de comparação, foram aplicados ensaios não destrutivos – Stress-Grade Machine e Stress Wave Timer. As propriedades físicas, massa específica e o teor de umidade das amostras foram analisados, bem como MOE e MOR. A abordagem comparativa permitiu verificar a confiabilidade dos métodos não destrutivos em relação ao ensaio destrutivo, destacando seu potencial para a avaliação eficiente de madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*.

PALAVRAS-CHAVE: ensaios não destrutivos; qualidade da madeira; flexão estática.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the quality of eucalyptus and pine wood used in the pallet manufacturing process, using the static bending destructive test performed on a Universal Testing Machine (EMIC) as a reference. For comparison purposes, non-destructive tests—Stress-Grade Machine and Stress Wave Timer—were applied. The physical properties, specific gravity, and moisture content of the samples were also analyzed. The comparative approach allowed for assessing the reliability of the non-destructive methods in relation to the destructive test, highlighting their potential for the efficient evaluation of *Pinus* and *Eucalyptus* wood.

KEYWORDS: Wood quality; Non-destructive testing; Static bending

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções logísticas eficientes, seguras e sustentáveis tem impulsionado a adoção de embalagens industriais em madeira (SILVA & PÅLSSON, 2022). No setor automotivo, a busca por padrões de qualidade para o transporte de componentes de alto valor agregado exige rigorosos processos de embalagem, manuseio e controle logístico (JONES *et al.*, 2024). Nesse contexto, torna-se essencial garantir que a matéria-prima utilizada, majoritariamente oriunda de plantios comerciais de *Eucalyptus* e *Pinus*, atenda aos requisitos de resistência, estabilidade dimensional e durabilidade exigidos pelo setor.

O Brasil possui mais de 10 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo 7,83 milhões de hectares de eucalipto, 1,92 milhão de hectares de pinus e 500 mil hectares de outras espécies (IBÁ, 2024). O setor se destaca mundialmente em produtividade, inovação e sustentabilidade, com a maior parte da madeira utilizada na indústria de transformação proveniente de plantios comerciais.

As espécies de *Eucalyptus* e *Pinus* apresentam características adequadas para o uso em embalagens industriais. O eucalipto possui maior resistência mecânica e rigidez, além de massa específica superior, variando de 430 a 750 kg/m³, dependendo da espécie. O pinus, com massa específica entre 380 a 550 kg/m³, destaca-se pela boa trabalhabilidade, preço acessível e ampla aplicação industrial (ZOBEL & RHODES, 1955; HILLIS & BROWN, 1984).

A massa específica é uma das principais propriedades físicas da madeira e apresenta forte correlação com suas propriedades mecânicas, como resistência e rigidez (DINWOODIE, 2000). No contexto de embalagens, essas propriedades são fundamentais para o desempenho estrutural durante o transporte e armazenamento (MESSIAS, 2015). Para exportação, a madeira utilizada em embalagens deve atender às exigências fitossanitárias estabelecidas pela NIMF-15, sendo submetida a tratamentos como o térmico (HT) ou fumigação, sob fiscalização do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2006).

No setor automotivo, a madeira destinada à confecção de embalagens deve apresentar elevada resistência e estabilidade, visto que muitas caixas são projetadas com sistemas de travamento interno e cremalheiras específicas para o transporte de peças de alto valor agregado (MESSIAS, 2015). Neste contexto, o presente estudo foi conduzido com amostras de madeiras fornecidas por uma empresa do setor de fabricação de

Pallets, visando à caracterização da massa específica, teor de umidade e resistência mecânica, por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos.

MATERIAL E MÉTODOS

Preparação do material

Foram utilizadas amostras de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., provenientes de lote industrial destinado à fabricação de embalagens. Para cada gênero, foram selecionadas aleatoriamente 20 peças, totalizando 40 amostras. Para elaboração dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios físicos e mecânicos. As amostras foram acondicionadas em ambiente climatizado com controle de temperatura e umidade relativa de 20 ± 2° C e 65 ± 3% UR até atingirem equilíbrio higroscópico. Este procedimento foi realizado com o objetivo de padronizar as condições de umidade antes da realização dos ensaios.

Foram utilizadas amostras para determinar das seguintes propriedades:

- Massa Específica aparente (12% de umidade) - MEap (g.cm³);
- Teor de umidade da madeira (%);
- Análise destrutiva via ensaio de Resistência Mecânica - Flexão Estática: Determinação de Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) em Máquina Universal de Ensaio (EMIC – DL 30.000).
- Análises não destrutivas: Determinação do módulo de elasticidade no equipamento (1) Stress Grading Machine (SGM); e (2) Stress Wave Timer (SWT);

Massa específica e teor de umidade

Para a determinação da massa específica aparente e do teor de umidade, foram utilizadas amostras com dimensões de 20 mm × 20 mm × 100 mm, retiradas das peças originais. A massa específica aparente (ρ) foi determinada pela razão entre a massa e o volume das amostras, conforme a Equação 1:

$$\rho = m/v \quad (1)$$

em que:

ρ é a massa específica aparente (g/cm³);

m é a massa da amostra (g) e;

V é o volume (cm³),

obtido a partir da medição das dimensões com

paquímetro digital (precisão de 0,01 mm). A massa foi determinada em balança analítica com precisão de 0,01 g. Posteriormente, para determinação da massa específica e teor de umidade, foram retiradas duas amostras de cada tábua e uma amostra para confecção do corpo-de-prova para ensaio destrutivo de flexão estática (Figura 1).

Após preparação das amostras, determinou-se o volume (cm³) de cada peça, por meio da medição de suas dimensões com paquímetro (precisão de 0,01 mm). A massa foi obtida em balança digital com precisão de 0,01g, considerando-se a condição de equilíbrio higroscópico das amostras. A partir desses dados, foi determinada a massa específica aparente 12% (g/cm³), conforme os procedimentos descritos na ABNT NBR 7190/2022.

Posteriormente as mesmas foram submetidas à secagem em uma estufa (103 + 2°C) com controle de temperatura e ventilação forçada para secagem e posterior determinação do teor de umidade base peso seco (ABNT NBR 7190-1/2022).

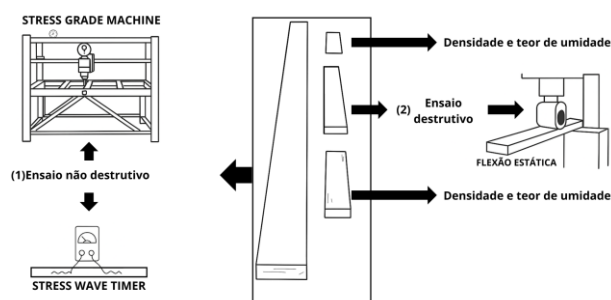


Figura 1. Esquema ilustrativo para determinação das propriedades das madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus*.

Testes não destrutivo

Para o ensaio não destrutivo de flexão estática (1), utilizou-se o equipamento Stress Grading – MK III – TIMBER GRADER (Figura 2). Os corpos de prova apresentaram dimensões de 20 mm × 20 mm × 1160 mm e foram posicionados sobre dois apoios inferiores com vão de 90 cm, sendo submetidos à aplicação de carga dentro do limite proporcional na maior face da peça. A partir da relação entre carga aplicada e deformação, foi estimado o módulo de elasticidade (MOE) das amostras.



Figura 2. Equipamento Stress Grading Machine.

No ensaio não destrutivo (2), utilizando o aparelho Stress Wave Timer (SWT), Modelo 239A (Metriguard), foram realizadas leituras de tempo de propagação de ondas tensão ao longo do comprimento dos corpos de prova (Figura 3), também com dimensões de 20 mm × 20 mm × 1160 mm. A partir do tempo de propagação da onda, foi determinada a velocidade (V), conforme a Equação 2:

$$V = \frac{d}{t} \quad (2)$$

em que:

V = velocidade de propagação da onda (m.s⁻¹);
d = distância entre os sensores (m);
t = tempo de propagação da onda (s).



Figura 3. Aparelho Stress Wave Timer.

O ensaio foi realizado com os corpos de prova posicionados entre dois sensores instalados em suas extremidades, correspondendo a uma distância aproximada de 1,16 m entre sensores. O procedimento consistiu na fixação do corpo-de-prova entre os sensores, soltando um pêndulo que se choca com o sensor e emite uma onda que percorre o corpo-de-prova longitudinalmente até o sensor receptor, calculando-se o módulo de elasticidade dinâmico através da Equação 3.

$$MOEd = \rho * V^2 * \left(\frac{1}{g}\right) \quad (3)$$

Em que:

MOEd= módulo de elasticidade dinâmico (MPa);
V = velocidade (cm.s⁻¹);
ρ = massa específica aparente (g/cm³);
g = aceleração da gravidade (9,80665 m.s⁻²).

Teste destrutivo – Flexão estática

O ensaio destrutivo de flexão estática seguiu os padrões recomendados pela norma COPANT 555/1972, ajustados ao teor de umidade de 12% (Figura 4).



Figura 4. Máquina Universal de Ensaio.

Análise estatística

As médias dos resultados das propriedades mecânicas da madeira foram submetidas à análise de variância (ANOVA) para verificar a existência de diferenças significativas entre as espécies. Quando identificada significância estatística ($p < 0,05$), aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparação das médias. As análises estatísticas foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Massa específica e teor de umidade

Os teores de umidade obtidos nas duas espécies analisadas estão dentro da faixa adequada para produção de embalagens (12 – 18%) (CENTER FOR PACKAGING AND UNIT LOAD DESIGN, 2023), com baixos coeficientes de variação (<20%) entre as amostras, demonstrando que as madeiras foram secas adequadamente (Figura 5).

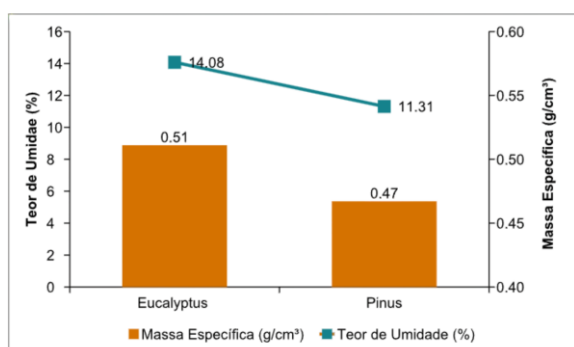


Figura 5. Massa específica e Teor de umidade da madeira de Eucalipto e Pinus.

Foi observado que mesmo com teor de umidade

superior ao pinus a madeira de eucalipto foi superior em termos de resistência mecânica. É notório que a resistência mecânica, abaixo do ponto de saturação das fibras, tem uma relação inversa com o teor de umidade da madeira (DINWOODIE, 2000). Desta forma fica evidente a qualidade da madeira de eucalipto superior em termos de resistência à flexão estática, quando comparado a madeira de *Pinus*.

A massa específica da madeira de eucalipto foi em média 8% maior que a madeira de *Pinus*. Apesar deste fato ambas são classificadas pela norma técnica IAWA (1989) como de média massa específica. De modo geral, se enquadram como madeiras que sofrem menos rachaduras quando pregadas, desde que não sejam secas a níveis excessivamente baixos de umidade (<6% de umidade), além de boa trabalhabilidade e resistência a choques.

Resistência mecânica da madeira - flexão estática

As avaliações destrutivas são, em geral, os métodos mais utilizados para a determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira. A obtenção dos resultados a partir dessas metodologias, por vezes, se torna inviável em razão do tempo consumido para a confecção dos corpos-de-prova e custo do material (VIVIAN et al., 2012).

Em contrapartida, as avaliações não destrutivas permitem a obtenção de informações precisas e amplas, medindo-se um maior número de amostras, em função da rapidez dos testes (STANGERLIN et al., 2008). Ensaios não destrutivos de madeira podem ser definidos como métodos utilizados para identificação das propriedades físicas e mecânicas de um material sem que haja o comprometimento de seu uso final (GABRIEL, 2001).

As amostras do gênero *Eucalyptus* apresentam valores superiores em relação às amostras do gênero *Pinus* em todas as propriedades analisadas (Figura 6). Por apresentarem maior massa específica, as madeiras do gênero *Eucalyptus* apresentam maiores valores de rigidez (MOE) e de resistência (MOR) em comparação as madeiras do gênero *Pinus* em todos os ensaios mecânicos realizados, portanto são mais indicadas para situações que exijam esforços nas peças, sendo o gênero mais recomendado na fabricação de embalagens.

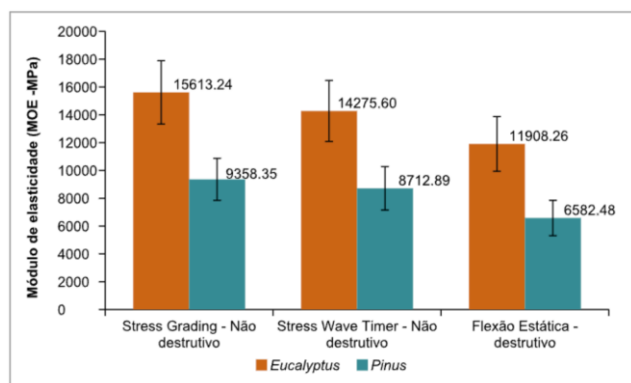


Figura 6. Módulo de elasticidade no teste destrutivo e não destrutivo de *Pinus* e *Eucalyptus*.

Os resultados médios dos módulos de elasticidade no esforço em flexão estática no teste não destrutivo e destrutivo obtidos estão classificados de acordo com a norma NBR 17222 DE 01/2025 na classe de resistência C20 em ambas as madeiras para uso estrutural, na construção de embalagens (Figura 6). Os coeficientes de variação estão abaixo de 20%, dentro do esperado para o material madeira (NOWAK et al., 2021).

Os resultados do teste de médias indicaram ausência de diferença estatística significativa ($p > 0,05$) entre os valores obtidos pelos métodos destrutivos e não destrutivos na determinação do módulo de elasticidade (MOE) (Tabela 1).

Tabela 1. Teste de Tukey ($p < 0,05$) para as propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.*

Espécie	Destrutivo	Não destrutivo	
	Flexão estática (MPa) $\pm$ EP	SWT (MPa) $\pm$ EP	SGM (MPa) $\pm$ EP
<i>Eucalyptus</i>	12674,87 a (469,84)	14627,88 a (826,88)	15658,66 a (879,37)
<i>Pinus</i>	6536,47 a (419,14)	8561,67 a (495,78)	9347,14 a (506,14)

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Os valores entre parênteses representam o erro padrão da média (EP).

A ausência de diferença estatística é altamente relevante, pois reforça a viabilidade técnica da aplicação de métodos não destrutivos (ND) como alternativa eficaz para a caracterização mecânica da madeira, especialmente no quesito de aplicação a nível industrial, escalonado, propiciando a avaliação e classificação de peças para usos na fabricação de pallets.

Para o ensaio destrutivo das amostras foi verificado que 55% das amostras do gênero *Eucalyptus*

apresentaram orientação tangencial. Já no gênero *Pinus* 45% das amostras analisadas apresentaram tal orientação. Ou seja, tal orientação representa a situação mais frágil da madeira, acarretando em maior suscetibilidade ao rompimento das mesmas quando submetida a esforços, similar ao esforço sofrido pela embalagem quando em uso.

A heterogeneidade da orientação das peças utilizadas resulta em valores variados das propriedades mecânicas (MOE e MOR), o que pode ser percebido nos valores mínimos e máximos, acarretando em coeficientes de variação das amostras em torno de 15% para amostras do gênero *Eucalyptus* e próximos a 20% para amostras do gênero *Pinus*. É importante destacar que essas variações refletem as condições reais observadas no setor industrial, onde o controle rigoroso da orientação das peças nem sempre é viável ou economicamente justificável. Este cenário evidencia a necessidade de maior atenção na padronização de processos, como processos de desdobro específicos, e que considerem a variabilidade natural da madeira e suas implicações na qualidade final dos produtos.

A convergência entre os métodos indica que, mesmo sem comprometer a integridade física das amostras, os ensaios não destrutivos são capazes de estimar a resistência da madeira, que tradicionalmente requer o rompimento do material.

Do ponto de vista industrial, sobretudo em contextos como o de embalagens automotivas, onde a madeira é utilizada em grande escala essa equivalência metodológica representa uma vantagem significativa. Ela possibilita a implementação de protocolos de controle de qualidade não destrutivos, reduzindo perdas materiais e custos operacionais, ao mesmo tempo em que assegura a confiabilidade técnica exigida para o uso final das peças.

Ademais se deve atentar a orientação dos anéis de crescimentos das peças utilizadas, pois para os ensaios não destrutivos (Stress Grading e Stress Wave Timer) foi observado que a maior parte das amostras não apresentava orientação definida, ou seja, com plano determinado como intermediário. A inclinação dos anéis de crescimento no plano das peças além de influenciar na resistência da madeira poderá influenciar também na fixação de pregos ou grampos no momento da montagem das embalagens, podendo facilitar a ocorrência de rachaduras nas peças principalmente na madeira de pinus devido à resistência no lenho outonal na peça ser maior.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que há

robustez na aplicação dos métodos não destrutivos na estimativa do módulo de elasticidade associado a potencial de aplicação prática em contextos industriais. O uso das técnicas não destrutivas é uma ferramenta confiável para a avaliação mecânica da madeira, com potencial de uso em larga escala. As amostras analisadas apresentaram valores de massa específica compatíveis com a faixa de média densidade, com valores superiores observados no gênero *Eucalyptus* em relação ao *Pinus*. Os teores médios de umidade foram de 13,6% para *Eucalyptus* e 11,3% para *Pinus*, situando-se dentro dos limites adequados para a produção de embalagens. A resistência mecânica à flexão é adequada para aplicações estruturais leves.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projetos de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022. 81 p.
- CENTER FOR PACKAGING AND UNIT LOAD DESIGN. *FAQs – Wood Moisture Content and Packaging Performance*. Virginia Tech – **Department of Sustainable Biomaterials**, 2023. Disponível em: <https://www.unitload.vt.edu/education/faqs>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- DINWOODIE, J.M. **Timber: its nature and behaviour**. E & FN Spon, London. 2000.
- GABRIEL, M.S.C.; Ballarin, A.W. 2001. Mechanical characterization of *Pinus taeda* wet wood by stress wave non-destructive method. **Energia na Agricultura**, 16: 8-16.
- HILLIS, W. H.; BROWN, A. G. *Eucalyptus for wood production*. Melbourne: **CSIRO**, 1984. 434 p.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2024, 2024. Disponível em <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf>>. Acesso em: 08 ago 2025.
- IAWA Committee. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, v.10, n.3, p.221-359, 1989.
- JONES, A.; CAI, Y. C.; KAMASAK, R. Examining sustainable packaging designs in the automotive industry: a case study of a luxury car manufacturer. Strategies for environmentally responsible supply chain and production management. **IGI Global**
- MAPA - Ministério de agricultura pecuária e abastecimento. **Manual com procedimentos para tratamentos fitossanitários com fins quarentenários**. 2006. 68 pg.
- MESSIAS, A. M. K. **Estudo de mercado do setor de embalagens de madeira**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Industrial Madeireira, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná 2015, 49p.
- NOWAK, T. P.; PATALAS, F.; KAROLAK, A. Estimating mechanical properties of wood in existing structures—selected aspects. **Materials**, v. 14, n. 8, art. 1941, 13 abr. 2021. DOI: 10.3390/ma14081941
- R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: **R Foundation for Statistical Computing**, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- SILVA, N.; PÅLSSON, H. Industrial packaging and its impact on sustainability and circular economy: *A systematic literature review*. **Journal of Cleaner Production**, v. 333, art. 130165, p. 1–—, 20 jan. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621043304>. Acesso em: 5 ago. 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130165
- VIVIAN, M. A. *et al.* Estimativa da resistência e rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* por meio de onda ultrassônica. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 69, p. 109-109, 2012.
- ZOBEL, B. J.; RHODES, R. R. Relationship of wood specific gravity in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) to growth and environmental factors. College Station, Tex.: **Texas Forest Service**, 1955. 32 p. (Technical report, no. 11).