

## **Avaliação das propriedades mecânicas de *Pinus elliottii* tratadas com biodiesel de óleo residual de fritura**

Henrique Vahl Ribeiro<sup>1</sup>; André Tremper Minasi<sup>2</sup>; Rafael Beltrame<sup>2</sup>; Cláudio Martin Pereira de Pereira<sup>2</sup>; Bruno Nunes da Rosa<sup>2</sup>; Maurício Alves Ramos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Engenharias (CEng), Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas/RS, Brasil; <sup>2</sup> Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDTec), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas/RS, Brasil – [ppgcem.ufpel@gmail.com](mailto:ppgcem.ufpel@gmail.com)

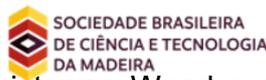
**Resumo:** A madeira é um recurso renovável e versátil, amplamente utilizado em diversas aplicações. Espécies exóticas como *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.*, comuns em climas tropicais como o Brasil, frequentemente precisam de melhorias nas propriedades mecânicas. O biodiesel, obtido pela transesterificação de óleos e gorduras, é um produto renovável e biodegradável que pode ser usado para impregnar a madeira, aumentando seu desempenho e durabilidade. Neste estudo, madeira da espécie *Pinus elliottii* foi impregnada com biodiesel derivado de óleo residual de fritura e avaliada em termos de compressão paralela e flexão estática. Os resultados mostraram que, para compressão paralela, a densidade aumentou em média 44,15%, com um acréscimo de 3,65% na resistência e 6,01% no módulo de elasticidade. Para flexão estática, a densidade subiu 32,48%, e a resistência e o módulo de elasticidade aumentaram 17,44% e 12,27%, respectivamente. O biodiesel teve um efeito positivo na densidade e nas propriedades mecânicas das amostras.

**Palavras-chave:** Tratamento da madeira, Resistência mecânica, Qualidade da madeira.

### **Assessment of the mechanical properties of *Pinus elliottii* treated with waste cooking Oil Biodiesel**

**Abstract:** Wood is a renewable and versatile resource, widely used in various applications. Exotic species such as *Pinus sp.* and *Eucalyptus sp.*, common in tropical climates like Brazil, often require improvements in mechanical properties. Biodiesel, produced through the transesterification of oils and fats, is a renewable and biodegradable product that can be used to impregnate wood, enhancing its performance and durability. In this study, wood from the *Pinus elliottii* species was impregnated with biodiesel derived from used frying oil and evaluated for parallel compression and static bending properties. The results showed that for parallel compression, the density increased on average by 44.15%, with a 3.65% rise in strength and a 6.01% increase in modulus of elasticity. For static bending, the density rose by 32.48%, with strength and modulus of elasticity increasing by 17.44% and 12.27%, respectively. Biodiesel had a positive effect on both the density and mechanical properties of the samples.

**Keywords:** Wood treatment, Mechanical resistance, Wood quality.



## 1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material renovável e versátil, cuja multifuncionalidade está relacionada às diferentes utilizações, sendo matéria prima para diversos produtos e atividades. Segundo De Araújo *et al.* (2017) o processo de silvicultura preserva diversas espécies nativas, em especial pelo plantio de espécies exóticas, como o *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.*, por outro lado, essas madeiras, especialmente as cultivadas em países tropicais como o Brasil, apresentam uma fragilidade mecânica quando comparada com outras espécies nativas. Essa fragilidade compromete a resistência e durabilidade do material, devido ao uso prematuro das florestas (Acosta *et al.* 2020).

Assim, pesquisas descrevem que o tratamento da madeira visa à melhoria do seu desempenho e a extensão da sua vida útil em serviço, no entanto, o estudo das propriedades físicas e mecânicas de madeiras tratadas é fundamental para determinar a sua aplicação como elemento construtivo, uma vez que o tratamento pode afetar de diferentes formas a sua capacidade estrutural (Moreschi, 2013).

Como alternativa para a melhoria das propriedades da madeira, o biodiesel surge como um composto biodegradável e renovável, que segundo Oliveira *et al.* (2013), é constituído por uma mistura de ésteres de ácidos graxos, que podem ser obtidos pela transesterificação de triglicerídeos (óleos e gorduras). Embora o termo biodiesel nos remeta ao seu uso como um combustível, De Paola e Lopresto (2021) indicam que este é um promissor material para ser aplicado em sistemas construtivos, em especial do ponto de vista econômico e sustentável, pois podem ser produzidos a partir do óleo residual de fritura e promover melhorias em suas propriedades mecânicas e térmicas.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico da madeira de *Pinus elliottii*, submetida ao tratamento de impregnação com biodiesel produzido a partir de óleo residual de fritura.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS



Engenharia  
Industrial  
Madeireira



SOCIEDADE BRASILEIRA  
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DA MADEIRA

### 2.1 Confecção de corpos de prova

A madeira utilizada no estudo foi oriunda de um plantio comercial de *Pinus elliottii*, com aproximadamente 22 anos de idade, localizado na região sul do Rio Grande do Sul. Para tanto, as toras foram desdobradas em tábuas para posterior confecção de corpos de prova com dimensões reduzidas, conforme prevê a norma D143 (ASTM, 2022), medindo 25 mm x 25 mm x 100 mm (radial x tangencial x longitudinal) para os ensaios de compressão paralela e 15 mm x 15 mm x 240 mm para os ensaios de flexão estática.

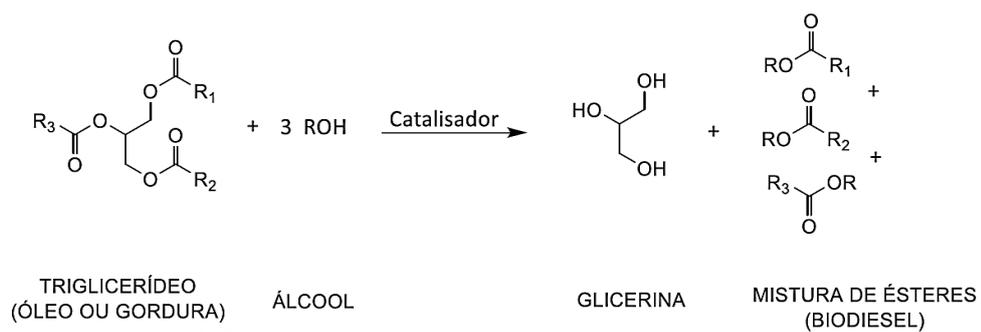
Para cada tipo de ensaio mecânico, foram preparados 14 corpos de prova: sete tratados e sete de controle. Todos foram mantidos em sala climatizada ( $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $65\% \pm 3\%$ ) até atingirem equilíbrio higroscópico de 12%.

## 2.2 Biodiesel

A produção do biodiesel se deu por meio da transesterificação do óleo de soja residual de fritura (ORF), provido pelo Restaurante Universitário da Universidade Federal de Pelotas, o qual é utilizado na fritura de alimentos servidos à comunidade acadêmica do Campus Capão do Leão e descartado antes da saturação.

O processo de transesterificação (Figura 1) se deu conforme procedimento simplificado apresentado por Neto *et al.* (2020), no qual a produção do biodiesel ocorre por catálise básica e agitação em liquidificador, sendo utilizado como álcool primário o metanol. O metanol foi utilizado em excesso para garantir a conversão do óleo em biodiesel, sendo o excedente removido via rotaevaporação.

**Figura 1.** Reação de transesterificação de triglicerídeo.



Fonte: Neto *et al.* (2020)

Para cada batelada de produção de biodiesel foram utilizadas 500 ml de ORF (filtrado em papel), 10 g de hidróxido de potássio (KOH) e 400 ml de metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). O hidróxido de potássio foi dissolvido em metanol (Figura 2-a), formando o metóxido de potássio, e este adicionado ao liquidificador junto ao ORF. A mistura foi deixada em agitação por 20 minutos (Figura 2-b). Uma vez realizada a transesterificação do ORF no liquidificador, a mistura de biodiesel e glicerol foi rotaevaporada para remoção do excesso de metanol (Figura 2-c). Após a rotaevaporação, foi feita a separação do biodiesel e glicerol por funil separador (Figura 2-d), sendo o glicerol retido na porção inferior do funil e o biodiesel na superior.

Considerando o volume da autoclave utilizada e quantidade de corpos de prova a serem tratados, foram realizadas 3 bateladas de produção para obtenção de biodiesel suficiente ao processo de impregnação dos corpos de prova.

**Figura 2.** Etapas do processo de produção do biodiesel.



Fonte: (Autor)

### 2.3 Impregnação da madeira

O processo de impregnação ocorreu em uma autoclave horizontal de pequeno porte (Figura 3-a), por meio de um sistema de vácuo e pressão. Este é um processo de célula cheia, pois o vácuo inicial remove um grande volume de ar da madeira antes do tratamento, permitindo que este seja substituído pela solução impregnante. A primeira etapa da impregnação ocorreu por aplicação de vácuo a 0,8 kgf/cm<sup>2</sup> durante 20 minutos.

Em uma segunda etapa o biodiesel foi inserido no sistema por meio de diferença de pressão, enchendo totalmente a autoclave. Em seguida, com o uso de

um compressor, aplicou-se pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup> durante 90 minutos. O processo de impregnação na autoclave se deu à temperatura ambiente.

Finalizada a impregnação, o biodiesel não impregnado foi drenado da autoclave e os corpos de prova enxugados, medidos e pesados, ficando dispostos em grelha para escorrer por um período de 24 h (Figura 3-b). Por fim, as amostras foram alocadas em câmara climatizada, com temperatura e umidade controlada, onde permaneceram nessas condições até massa constante. Para tal, os corpos de prova foram pesados diariamente, até verificada uma variação de massa inferior a 1%. A partir dessas condições foi determinada a capacidade de absorção de biodiesel pelas amostras.

**Figura 3.** Autoclave para impregnação da madeira e amostras tratadas.



Fonte: (Autor)

## 2.4 Ensaios mecânicos

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de flexão estática e compressão paralela usando uma máquina universal de ensaios mecânicos (EMIC DL30000N) com capacidade de 300 kN, conforme a norma ASTM D143 (ASTM, 2022) (Figura 4). A tabela 1 apresenta a relação de ensaios, propriedades mecânicas avaliadas e a velocidade de execução.

**Figura 4.** Ensaio de compressão paralela (esquerda) e flexão estática (direita).



Fonte: (Autor)

**Tabela 1.** Ensaios com respectiva propriedade mecânica avaliada e velocidade de teste.

Ensaio	Propriedade	Velocidade de Ensaio (mm/min)
<b>Compressão Paralela</b>	Módulo de elasticidade (E)	0,6
	Resistência à compressão (fc)	
<b>Flexão Estática</b>	Módulo de elasticidade (MOE)	1,3
	Módulo de ruptura (MOR)	

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Impregnação do biodiesel na madeira

As amostras tratadas foram mantidas em câmara climatizada até estabilização de massa, que ocorreu após 7 dias do tratamento. Dos 14 corpos de prova tratados, 7 foram usados para flexão estática e 7 para compressão paralela. Os valores médios de volume, massa e densidade antes e depois do tratamento estão na tabela 2.

**Tabela 2.** Valores médios de volume, massa e densidade das amostras

Ensaio	Amostras		
	Pré-tratamento	Pós-tratamento	
<b>Compressão Paralela</b>	Volume (cm <sup>3</sup> )	62,75	62,75
	Massa (g)	32,01	46,14
	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,51	0,74
	Variação (%)	44,15	
	Volume impregnado (cm <sup>3</sup> )	16,17	
<b>Flexão Estática</b>	Volume (cm <sup>3</sup> )	57,22	57,22
	Massa (g)	35,05	46,43
	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,61	0,81
	Variação (%)	32,48	
	Volume impregnado (cm <sup>3</sup> )	13,02	

Os resultados mostram que a madeira de *Pinus elliottii* tratada com biodiesel aumentou sua densidade média, sendo este na ordem de 44,15% para as amostras de compressão paralela e de 32,48% para amostras de flexão estática. Considerando a densidade do impregnante (0,874 g/cm<sup>3</sup>), as amostras submetidas a testes de compressão paralela e flexão estática apresentaram uma capacidade média de impregnação de 25,76% e 22,76% do seu volume inicial, respectivamente.

O tratamento realizado indica que a madeira de *Pinus elliottii* apresenta uma capacidade de impregnação de biodiesel na ordem 24,26% de seu volume, permanecendo com dimensões e massa estáveis após sete dias do tratamento.

### 3.2 Ensaios de compressão paralela e flexão estática

Os valores médios de Módulo de Ruptura e Módulo de Elasticidade dos corpos de prova para os ensaios de compressão paralela e flexão estática são apresentados na tabela 3. Para os corpos de prova analisados, foram descartados o valor máximo e mínimo observados e determinadas as suas médias, desvios padrão e coeficientes de variação.

**Tabela 3.** Resultados dos ensaios de compressão paralela e flexão estática.

Amostras	Compressão Paralela		Flexão Estática		
	fc <sub>12%</sub>	E <sub>12%</sub>	MOR <sub>12%</sub>	MOE <sub>12%</sub>	
<b>Controle</b>	Média (MPa)	34,21	4213,02	83,99	10857,91
	Desv. Padrão (MPa)	3,40	550,15	10,86	2790,64
	Coef. Var. (%)	9,93	13,06	12,93	25,70
<b>Tratadas</b>	Média (MPa)	35,47	4466,30	94,30	12751,83
	Desv. Padrão (MPa)	3,26	611,85	8,91	1018,27
	Coef. Var. (%)	9,19	13,70	9,45	7,99

Com relação ao ensaio de compressão paralela é possível observar que o tratamento da madeira com biodiesel aumentou sua capacidade em resistir ao esforço de compressão paralela às fibras em 3,65%, aumentando seu módulo de elasticidade em 6,01%.

Para o ensaio de flexão estática, o tratamento com biodiesel aumentou em 12,27% a capacidade resistente e elevou o módulo de elasticidade em 17,44%. Esses resultados para flexão estáticas se justificam pelo aumento da densidade da

madeira, condição também descrita por Pertuzzatti (2018) e Acosta *et al.* (2020), os quais observaram que amostras tratadas com diferentes materiais, apresentam um ganho significativo na resistência à flexão, fato esse que se explica pela densificação da madeira, que proporciona o preenchimento dos vazios com material impregnante e distribuição das tensões internas.

Os resultados indicam que o tratamento ainda apresenta uma menor influência na resistência da madeira à compressão comparada à flexão, ainda que se tenha considerável aumento de densidade, indicando que o biodiesel apresenta maior incremento na capacidade resistente de tração das fibras da madeira.

#### 4. CONCLUSÃO

Pode concluir-se com a realização deste trabalho que:

- A produção e uso do biodiesel a partir do óleo residual de fritura é um processo sustentável e viável para uso como impregnante em madeiras;
- A madeira de *Pinus elliottii* é capaz de reter uma parcela significativa de biodiesel, mantendo sua estabilidade mássica após 7 dias de impregnação;
- A madeira tratada apresentou um ganho significativo em sua densidade e capacidade resistente à flexão, bem como melhoria do módulo de elasticidade;
- A resistente à compressão paralela e respectivo módulo de elasticidade aumentou, embora não tenha sofrido ganhos significativos.

#### 5. REFERÊNCIAS

ACOSTA, A. P.; SCHULZ, H. R.; BARBOSA, K.T.; *et al.* Dimensional stability and colour responses of *Pinus elliottii* wood subjected to furfurylation treatments.

**Maderas Ciencia y Tecnología**. v. 22, n. 3, p. 303-310, 2020.

ACOSTA, A. P.; LABIDI, J.; SCHULZ, H. R.; *et al.* Thermochemical and Mechanical Properties of Pine Wood Treated by In Situ Polymerization of Methyl Methacrylate (MMA). **Forests** v. 11, p. 768, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143-22**: Standard methods of testing small clear specimens of timber. West Conshohocken: ASTM, 2022.

DE ARAÚJO, V. A.; GARCIA, J. N.; CORTEZ-BARBOSA, J.; *et al.* Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 37, n. 90, p. 189-200, 2017.

DE OLIVEIRA, D.; ONGRATTO, D.; FONTOURA, L. A.; *et al.* Obtenção de biodiesel por transesterificação em dois estágios e sua caracterização por cromatografia gasosa: óleos e gorduras em laboratório de química orgânica. **Química Nova**. v.36, n.5, p.734-737, 2013.

DE PAOLA, M.; LOPRESTO, C. Waste oils and their transesterification products as novel bio-based phase change materials. **Journal of Phase Change Material**. v.1, n.1, 2021.

MORESCHI, J. C. Biodegradação e preservação da madeira. 4 ed. Curitiba: Departamento de engenharia e tecnologia da UFPR, 2013.

NETO, J. E. S.; SILVA, J. R. A.; CARDOSO, C. C. Experimentos para aulas de química envolvendo biodiesel. 1 ed. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2020.

PERTUZZATTI, Anderson. **Propriedade tecnológicas da madeira de densificada de eucalipto submetida ao tratamento em óleo vegetal**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.