

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ÓPTICAS DE MADEIRA TRANSPARENTE ELABORADA COM PECÍOLOS DAS PALMEIRAS JUPATILuiza V. A. Pereira IC¹, Mercês C. Silva PQ¹¹ Universidade Federal de Itajubá.**Palavras-chave:** Branqueamento. Lignina. Peróxido de hidrogênio. Compósito.**Introdução**

A madeira é um material de origem vegetal amplamente utilizado na engenharia, caracterizado pela presença de fibras de celulose embebidas em uma matriz de hemicelulose e lignina. Essa composição confere ao material resistência mecânica, estabilidade e durabilidade (KUMAR; JYSKE; PETRIČ, 2021).

A proporção desses constituintes varia conforme a espécie, influenciando diretamente suas propriedades físicas e químicas. A celulose, um polímero semicristalino, é responsável pela elevada resistência mecânica; a hemicelulose, de natureza amorfa, confere flexibilidade; enquanto a lignina, um polímero aromático amorfo, atua como um “cimento” entre as fibras, garantindo rigidez e impermeabilidade. Ela também contribui para a coloração escura e a opacidade do material (GOMIDE; DEMUNER, 1986).

O desenvolvimento de madeira transparente (MT) requer a remoção total ou parcial da lignina, uma vez que seus cromóforos absorvem radiação UV-visível, limitando a passagem de luz (CHEN et al., 2025). Para alcançar uma boa transparência óptica no compósito final, é essencial que o índice de refração da matriz modificada seja próximo ao da celulose, minimizando descontinuidades ópticas.

Tradicionalmente, o branqueamento da madeira utilizava agentes como hipoclorito de sódio e clorito de sódio. No entanto, métodos mais sustentáveis vêm sendo adotados, como o uso de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) associado à radiação ultravioleta (UV), que promovem a quebra dos cromóforos da lignina sem degradar significativamente a estrutura celular. A adição de hidróxido de sódio (NaOH) potencializa esse processo ao provocar a abertura parcial da parede celular, facilitando a difusão do peróxido e acelerando a oxidação da lignina (XIA et al., 2021).

No presente trabalho, foi desenvolvido um planejamento fatorial (Design of Experiments – DOE) para avaliar a influência da concentração de H₂O₂, do tempo de imersão em NaOH e da exposição à radiação UV no

branqueamento do pecíolo da palmeira Jupati. Essa espécie, nativa da Amazônia, possui pecíolos com baixa densidade e estrutura porosa — características que favorecem tanto a penetração de agentes químicos quanto a posterior impregnação de resinas poliméricas, etapa fundamental na elaboração do compósito transparente. Tais propriedades tornam o Jupati uma alternativa promissora para a produção de MT.

Como variável de resposta no DOE, foi adotada a perda de massa das amostras após o tratamento. Diferentemente do que é comumente relatado na literatura, neste estudo foram testados tempos de imersão variando em soluções de NaOH com concentrações entre 5 e 15% (m/m). A concentração de 10% (m/m), utilizada por Xia et al. (2010), também favorece a formação do íon hidroperóxido (HOO⁻), derivado do peróxido de hidrogênio, que atua na oxidação dos grupos cromóforos da lignina, reduzindo sua absorção na faixa do visível (SILVA, 2023).

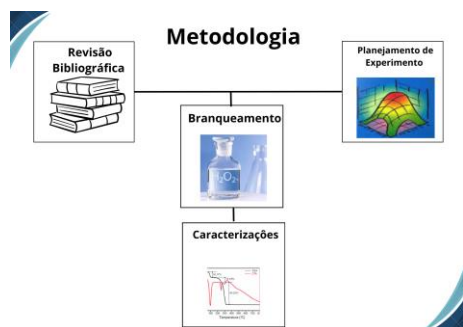
No entanto, concentrações elevadas de NaOH podem não apenas promover a remoção da lignina, ceras e graxas dos materiais lignocelulósicos, como também levar à degradação das fibras de celulose (GEORGE et al., 2001). A estabilidade térmica das amostras foi avaliada por Termogravimetria. As caracterizações mecânicas e ópticas estão em andamento e serão discutidas em etapas posteriores desse estudo.

Metodologia

A Figura 1 apresenta o fluxograma da metodologia adotada nesse estudo, destacando o procedimento de branqueamento aplicado à madeira de Jupati, a qual, após o tratamento, foi classificada como madeira branqueada (denominada JIN).

Figura 1 - Esquema resumido da metodologia.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”



Fonte produzida pelo autor

Inicialmente, as amostras foram cortadas longitudinalmente e padronizadas com dimensões médias de 1,5 cm × 10 cm × 3 mm. Em seguida, foram lixadas para minimizar imperfeições superficiais. As variáveis utilizadas como pontos centrais no DOE foram: tempo de imersão do pecíolo de Jupati em solução de NaOH a 10% (m/m) por 10 minutos; concentração de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) a 30% (v/v); e tempo de exposição da amostra imersa à radiação ultravioleta (UV) por 180 minutos, baseados no trabalho de Xia et al.(2021) e testes iniciais para a amostra JIN. Os níveis inferiores (-1) e superiores (+1), usados no DOE são reportados na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis de planejamento experimental 2³ com três pontos centrais

Variáveis	Níveis de entrada		
	-1	0	+1
TE-UV (min)	60	180	360
[H ₂ O ₂] (%)	25	30	35
T1-NaOH (min)	5	10	15

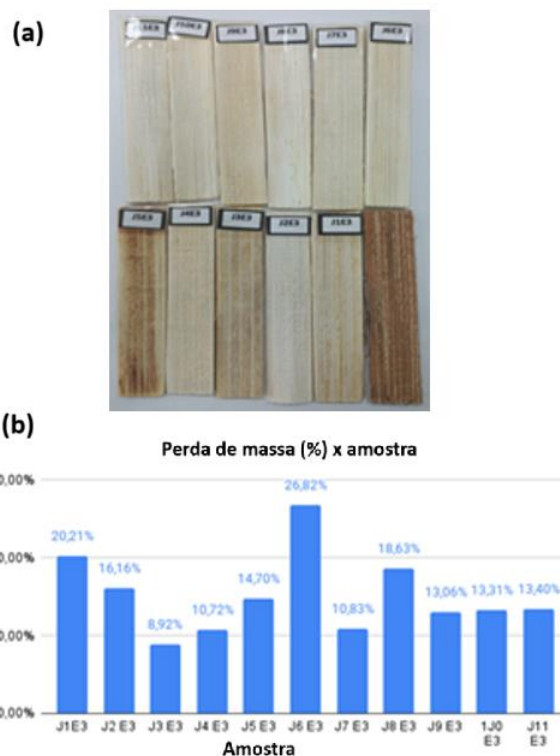
TE - tempo de exposição; T1 - tempo de imersão
UV - Ultravioleta; [] - concentração

Após o processo de branqueamento, as amostras foram lavadas com água destilada para remover resíduos do tratamento químico. Na última lavagem, foram adicionadas três gotas de clorofórmio, com o objetivo de minimizar o crescimento de fungos. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 85 °C por 4 horas para que a perda de massa das amostras fosse determinada pela equação 1, sendo m_i suas massas iniciais e m_f suas massas finais.

$$\text{Perda de massa (\%)} = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \text{ equação (1)}$$

A Figura 2 apresenta uma imagem fotográfica das amostras JIN e amostras pós-branqueamento, juntamente com um gráfico que reporta a variação percentual da perda de massa dessas amostras. A análise visual sugere que as amostras J2E3 e J8E3 apresentam colorações mais próximas do branco em comparação às demais e que a remoção de suas cores foi significativa em relação à amostra do pecíolo natural da palmeira, indicando que os parâmetros experimentais utilizados para o tratamento dessas amostras foram mais eficazes na desativação dos cromóforos da lignina.

Figura 2 - Imagem fotográfica das amostras de (a) JIN antes e após-branqueamento e (b) o gráfico reportando a variação do percentual de suas perdas de massa.



Fonte produzida pelo autor

A amostra J3E3, tratada com a combinação TE-UV/[H₂O₂] /TI-NaOH nos níveis -1/+1/-1 apresentou menor perda de massa de 8,92 %. Já o emprego desses parâmetros nos níveis +1/-1/+1 para a amostra J6E3 resultou na maior perda de massa (26,82%). Essas duas amostras têm colorações mais escuras que as amostras J2E3 e J8E3, com perdas de massa de 16,16% e 18,63%, e tratadas com a combinação das variáveis nos níveis +1/-1 e +1/+1/+1, respectivamente.

A correlação perda de massa e combinação dos níveis dos

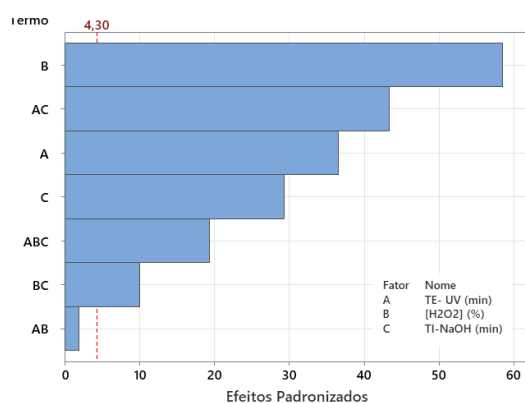
Resultados e discussão

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

parâmetros experimentais dessas amostras sugere que o tempo de imersão da amostra na solução básica não é o principal fator influente na perda de massa do pecíolo de Jupati. Para uma análise mais detalhada dos efeitos das variáveis do estudo, foi conduzida uma análise estatística do DOE com um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta "perda de massa" está apresentado na Figura 3. A partir desse gráfico, observa-se que apenas a interação entre as variáveis TE-UV (A) e $[H_2O_2]$ (B) possui magnitude inferior à linha de t crítico (valor de 4,30). Isso indica que o efeito dessa interação sobre a perda de massa das amostras pode ser desconsiderado neste estudo. A rejeição dessa interação foi confirmada pela ANOVA, cujo valor P foi maior que 0,05.

Figura 3- Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, onde TE é tempo de exposição ao UV e TI tempo de impregnação da amostra JIN em solução de NaOH.



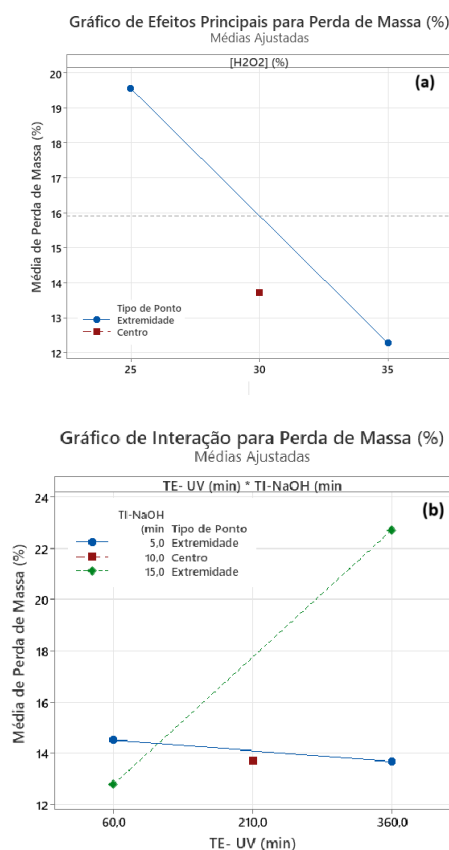
Fonte produzida pelo autor

Por outro lado, as variáveis principais $[H_2O_2]$ e TE-UV, assim como a interação entre as variáveis TE-UV e TI-NaOH, apresentaram magnitudes superiores, sugerindo uma maior influência sobre a resposta observada. Os níveis dessas variáveis com maiores efeitos sobre a perda de massa das amostras foram avaliados a partir do gráfico dos efeitos principais e suas interações nas Figuras 4a e 4b, respectivamente, a qual mostra que o emprego da concentração de H_2O_2 à 25% v/v, tempo de exposição da amostra nessa solução à radiação ultravioleta por 360 minutos após imersão da amostra natural do pecíolo da palmeira Jupati em solução de NaOH 10% m/m por 15 minutos, tem maior efeito sobre a perda de massa da amostra. Esses parâmetros são os empregados para a amostra J6E3 e correspondem ao observado para essa amostra na Figura 2b.

A relação entre a perda de massa da amostra J3E3 (menor

perda de massa) e J6E3 (maior perda de massa) com as amostras J2E3 e J8E3 e suas cores, indica que a descoloração da amostra JIN irá ocorrer com perda média de 17%. A vantagem do processo de modificação da lignina em relação à sua remoção para o branqueamento da lignina e que esse processo provoca menor perda de lignina, favorece a integridade da fibra de celulose e a obtenção de madeiras transparentes com elevada transmitância e melhores propriedades de mecânicas como a resistência à tração (Xia et al, 2021).

Figura 4 – Gráfico de efeitos para (a) a variável $[H_2O_2]$ sobre a perda de massa (%) e para (b) a interação entre as variáveis TE-UV e TI-NaOH.



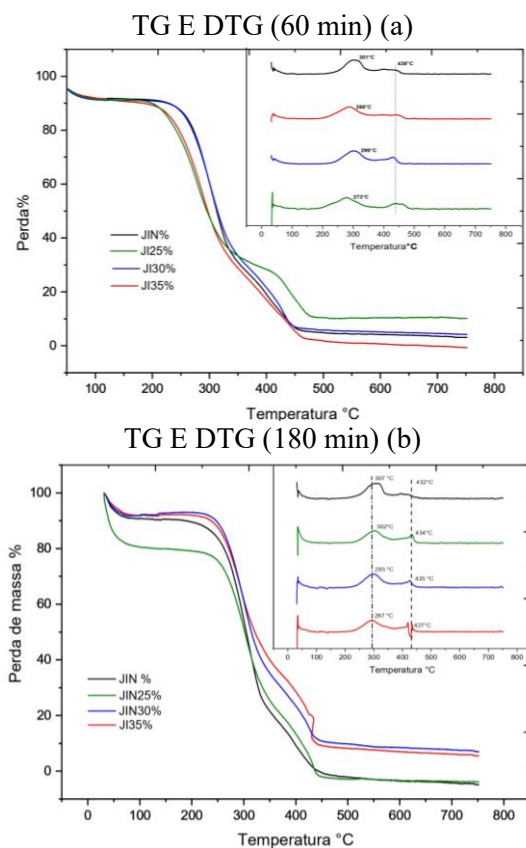
Fonte produzida pelo autor

A análise térmica da madeira branqueada (JIN) foi realizada por Termogravimetria sob atmosfera de ar sintético, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, conforme apresentado nas Figuras 5a e 5b. As curvas TG e DTG indicaram três principais eventos de degradação: (i) até 100 °C, atribuído à perda de umidade livre da amostra; (ii) entre 240 °C e 310 °C, associado à decomposição da hemicelulose, da celulose e da lignina residual; e (iii) acima de 400 °C, relacionado à combustão

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

dos produtos de degradação, com liberação de compostos voláteis e formação de resíduos carbonáceos, em concordância com estudos anteriores (RODRIGUES, 2017). Comparando as curvas TG/DTG, observa-se que as amostras submetidas a 180 min de exposição à radiação UV apresentam degradação iniciando em temperaturas mais baixas, indicando menor estabilidade térmica em relação às amostras expostas por 60 min.

Figura 5 – Curvas TG e DTG para amostras de palmeira Jupati antes do branqueamento e branqueadas com diferentes concentrações de H₂O₂, tempo de imersão em NaOH sob UV por 60 min.



Fonte produzida pelo autor

Conclusão

Os resultados desse estudo indicam a combinação das variáveis TE-UV, [H₂O₂] e TI-NaOH nos níveis +1(360 minutos) /-1 (25% v/v) /+1 (15 minutos) promove maior perda de massa da amostra JIN pós-branqueamento. A caracterização térmica mostra que a perda de estabilidade aumenta com o aumento do tempo de exposição da amostra à radiação UV.

O clareamento observado por análise visual das amostras,

em especial a amostra J2E3, sugere a necessidade do uso de metodologias quantitativas de análise de cor, como o sistema CIELAB, que fornece cores em coordenadas definidas pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE) com base na percepção humana, para otimizar adequadamente o processo.

Agradecimentos

Agradeço à UNIFEI, ao LIMCOP, ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), à minha orientadora, e aos projetos APQ 02290-23 da FAPEMIG e Relan PVDI452-2023.

Referências

XIA, Q. et al. Solar-assisted fabrication of large-scale, patternable transparent wood. *Science Advances*, v. 7, n. 4, eabd7342, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd7342>.

KUMAR, S. et al. Delignified Wood: From Understanding the Hierarchically Aligned Cellulosic Structures to Creating Advanced Functional Materials. *Advanced Sustainable Systems*, v. 5, n. 6, p. 2000285, 2021. DOI: [10.1002/advs.202000251](https://doi.org/10.1002/advs.202000251).

CHEN, H. et al. Photon walk in transparent wood: scattering and absorption in hierarchically structured materials. *Wallenberg Wood Science Center, Department of Fiber and Polymer Technology, KTH Royal Institute of Technology*, 2025. DOI: [10.1002/adom.202102732](https://doi.org/10.1002/adom.202102732).

George, J. et al. A Review on Interface Modification and Characterization of Natural Fiber Reinforced Plastic Composites. *Polymer Engineering and Science*, 41, 1471-1485, 2001.

GOMIDE, J. L. and DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. *O Papel*, v. 47, n. 1, p. 36-42, 1986. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/284128446>

RODRIGUES, Roberta. Uso do pecíolo de buriti como matéria-prima para a obtenção de uma “madeira transparente”. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Itajubá, Itabira, 2017.

SILVA, R. T. Branqueamento da madeira pinus a partir de peróxido de hidrogênio/radiação ultravioleta visando a elaboração de madeira transparente. 78 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Itabira, Itabira, 2023.