

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ÓPTICAS DE MADEIRA TRANSPARENTES ELABORADAS COM MADEIRA DE REFLORESTAMENTO**Hethaly B. Marques¹ (IC), Mercês C. Silva (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itabira, MG.**Palavras-chave:** Branqueamento. Compósito. Madeira transparente. Modificação da lignina. Pinus.**Introdução**

A madeira transparente (MT) é um material compósito formado a partir de madeira branqueada impregnada com resina polimérica (Fink, 1992). Este material tem sido considerado uma alternativa promissora e sustentável quando comparado ao vidro por ter propriedades ópticas semelhantes, mas apresentar tenacidade superior e menor densidade (Pan et al, 2024). Além disso, a madeira transparente apresenta diversas vantagens, como leveza, proteção contra radiação UV, baixa expansão térmica, redução do brilho, maior resistência mecânica e origem renovável. Graças a essas características, tem sido objeto de investigação em diferentes pesquisas, com múltiplas propostas de aplicação tecnológica. Entre seus potenciais usos destacam-se o setor da construção civil, na fabricação de janelas, telhas transparentes, elementos de decoração e sistemas de iluminação; o setor tecnológico, como substrato para células solares e dispositivos eletrônicos; e a indústria, na produção de embalagens, embalagens inteligentes e outros produtos de alto valor agregado. (Hai et al., 2025; Pandit et al., 2024).

O branqueamento da madeira pode ser conduzido por meio da remoção total da lignina, ou pela modificação dos seus grupos cromóforos, que são grupos funcionais responsáveis pela coloração marrom do material na região do visível (Xia et al., 2021). A modificação estrutural da lignina, um componente essencial do tecido lenhoso para a integridade estrutural da madeira, em vez de sua remoção, favorece a resistência mecânica da MT. Além disso, essa metodologia não gera subprodutos e, por isso, não resulta em efluentes poluidores, não demanda consumo elevado de água para purificação da amostra e tem gasto de energia consideravelmente inferior. Nesse processo, utiliza-se a solução de NaOH para preparar a superfície das amostras, removendo impurezas como graxas e ceras, além de promover o inchamento das fibras da madeira, o que facilita a penetração dos agentes de branqueamento. O NaOH também desempenha um papel fundamental na modificação química da lignina, convertendo grupos fenólicos em compostos como enonas e quinonas

(cromóforos modificados), que são grupos também encontrados na madeira quando exposta à radiação UV. Além disso, o NaOH na concentração de 10% m/m também favorece o pH da solução branqueadora favorecendo a formação de íons hidroperóxido (HOO⁻). O íon HOO⁻ e a radiação UV entre 300 e 400 nm, irão converter os cromóforos de enonas e quinonas em grupos funcionais que não absorvem na região do visível (Silva, 2023).

Neste trabalho, foram elaboradas amostras de madeira transparente (MT) a partir da madeira de *Pinus* (*Pinus elliottii*) branqueada e comparadas com MT obtidas da madeira de Balsa (*Ochroma pyramidale*), espécie mais utilizada nessa área de pesquisa devido à sua baixa densidade (0,01–0,38 g/cm³) e elevada porosidade (Yin, Zhang and Hu, 2023). A escolha do *Pinus* se justifica por sua ampla disponibilidade no território nacional, baixo custo e origem de reflorestamento. No entanto, essa madeira ainda é pouco explorada para a produção de MT, em razão de sua maior densidade e menor porosidade, características que impõem limitações ao processo de branqueamento escolhido para esse estudo. Nesse contexto, buscou determinar as condições ótimas para a desativação dos cromóforos de lignina, avaliando a concentração de peróxido de hidrogênio, o tempo de exposição à radiação ultravioleta e o tempo de impregnação em solução de NaOH como variáveis para um planejamento experimental (*Design of Experiments – DOE*). O emprego do DOE possibilita extrair o máximo de informações com o mínimo de experimentos, reduzindo o custo e tempo do processo (Neto et al., 2007). Após o branqueamento, as amostras foram impregnadas com resina epóxi para a obtenção de MT e caracterizadas em termos de transmitância. Com esse estudo buscou-se oferecer alternativas para o desenvolvimento de materiais de alto desempenho e menor impacto ambiental, promovendo a integração entre ciência, inovação e sustentabilidade ambiental.

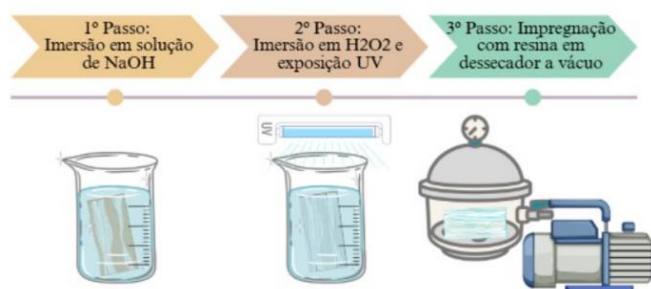
Metodologia

Para o desenvolvimento da madeira transparente,

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

utilizaram-se amostras de madeiras da espécie Pinus e Balsa cortados em placas com aproximadamente 10 cm de comprimento, 1,5 cm de largura e espessura de ~1mm. A elaboração das MT foi adaptada a partir da metodologia de Xia et al. (2021) e executada em três etapas como ilustrado na Figura 1. Primeiramente, as amostras foram imersas em uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) por um tempo determinado. Em seguida, transferidas para uma solução de peróxido de hidrogênio H_2O_2 em diferentes concentrações e submetidas imediatamente à radiação ultravioleta (UV) por um tempo definido. As amostras branqueadas foram lavadas com água destilada, secadas para análise por UV e em seguida imersas em água até a etapa de impregnação (infiltração) com resina epóxi sob vácuo, momento em que adquirem a característica óptica do vidro, conforme ilustrado na figura abaixo:

Figura 1 - Sequência da metodologia, sistema contendo as lâmpadas UV usadas no branqueamento e impregnação das amostras das madeiras Pinus e Balsa.



Fonte: elaborado pelo autor.

As variáveis desse estudo foram otimizadas com o planejamento de experimento fatorial 2^3 com três pontos centrais (Neto et al., 2007), Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis de planejamento experimental 2^3 com três pontos centrais

Variáveis	Níveis de entrada		
	-1	0	+1
Tempo de exposição ao UV (min)	60	180	360
Concentração de H_2O_2 (% v/v)	25	30	35
Tempo de imersão em NaOH 10 % m/m (min)	5	10	15

Fonte: Elaborado pelo autor.

Resultados e discussão

Os valores de transmitâncias obtidos por espectroscopia na região do ultravioleta para as amostras branqueadas de

madeira Pinus e Balsa, além de amostras das madeiras naturais estão reportados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de transmitância das amostras branqueadas de madeiras Pinus e Balsa naturais e branqueadas.

Amostras	Transmitância (%)	
	Pinus	Balsa
1	12,10	8,90
2	11,40	12,90
3	10,30	11,30
4	11,40	10,20
5	12,40	8,50
6	11,00	10,00
7	10,80	9,60
8	9,40	11,40
9	11,40	11,60
10	10,67	9,40
11	11,30	11,10
Madeira Natural	7,5	8,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

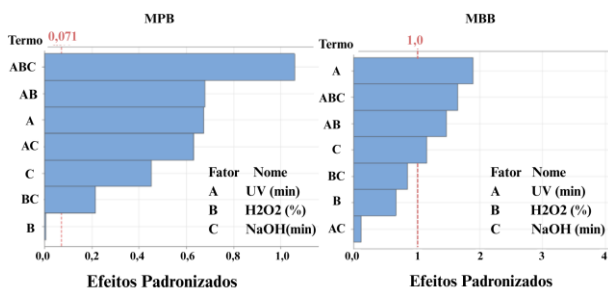
A forma como a luz, enquanto radiação eletromagnética, interage com a superfície de um material e atravessa um meio pode definir a sua propriedade óptica. A radiação incidente pode ser transmitida, absorvida ou refletida dentro ou através deste e esses fenômenos podem ocorrer individualmente ou combinados (Callister, W. D and Rethwisch, 2007). Na madeira predominam os fenômenos de reflexão e absorção da radiação, e em função da sua porosidade, uma pequena fração da radiação incidente pode ser transmitida pelo material (Fink, 1992). Como pode ser observado nos valores de transmitâncias, a madeira natural Pinus (MNP) apresentou um valor inicial de 7,5%, enquanto a madeira natural Balsa (MNB) apresentou valor de 8,1%. Esses valores são baixos e compatíveis com materiais opacos como a madeira. Ao avaliar as amostras de Madeira Pinus Branqueada (MPB), nota-se que os valores de transmitância variam entre 9,4 e 12,4%, enquanto para as amostras de Madeira Balsa Branqueada (MBB) a variação foi entre 8,5 a 12,9%. Atribui-se a essa variação a remoção dos grupos cromóforos da lignina e a um possível aumento da porosidade das amostras.

A análise do DOE foi realizada empregando-se o software *Minitab Statistical*. Os gráficos de Pareto das amostras de Pinus e Balsa são apresentados na Figura 2a e 2b, respectivamente. Para a análise estatística desse estudo considerou-se o nível de significância de 5%. Analisando-se o gráfico de Pareto para a MPB, observa-se uma linha de significância em 0,071 e que todos os efeitos padronizados principais e de interações estão

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

acima dela. Esse resultado sugere que todas as variáveis do experimento e suas interações têm efeito sobre os valores de transmitância das amostras MPB (Figura 2a).

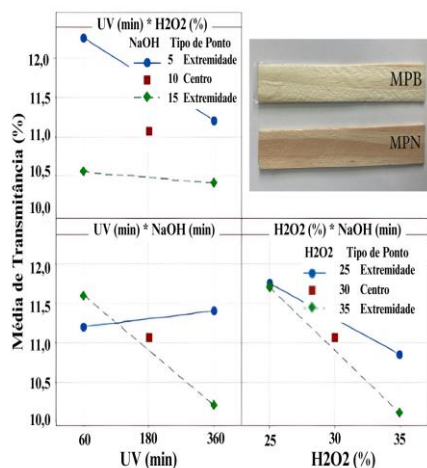
Figura 2 - Gráficos de Pareto para os efeitos padronizados para as amostras MPB e MBB.



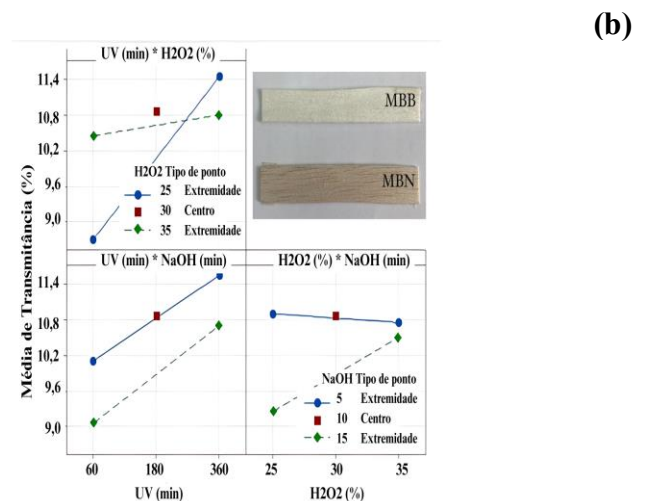
Fonte: Elaborado pelo autor (Minitab Statistical Software).

O Gráfico de Pareto para amostra MBB apresentou linha de significância em 4,303, o que indica que, para as condições experimentais e nível de confiança adotados para a madeira Balsa, nenhum dos fatores tem um efeito estatístico relevante. Optou-se por não reduzir o nível de significância para reanálise desses resultados e, apenas para efeito de comparação com a madeira Pinus, verificar como a interação entre as variáveis influenciam na transmitância das amostras por meio do gráfico fatorial, apresentado na Figura 3, que também contém imagens fotográficas mostrando a variação de cor das madeiras.

Figura 3 - Gráfico de interação entre (a) as três UV, H₂O₂ e NaOH para amostras de MPB e (b) entre as variáveis UV e H₂O₂ para amostras da madeira MBB



(a)



Fonte: Elaborado pelo autor (Minitab Statistical Software).

A análise dos resultados indicou que os maiores valores de transmitância para as amostras de madeira Pinus, Figura 3a, foram obtidos com 60 minutos de exposição à radiação UV, 25% v/v de solução de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e 15 minutos de impregnação em solução de NaOH. Contudo, valores ainda mais elevados de transmitância foram observados ao se considerar a interação entre H₂O₂ e NaOH. Nesse caso, verifica-se que, em baixas concentrações de peróxido de hidrogênio, os valores de transmitância permanecem muito próximos. Assim, a redução do tempo de imersão da madeira natural em solução básica para 5 minutos poderia representar menor custo e duração do processo. Entretanto, como o NaOH pode aumentar a porosidade da madeira, propriedade fundamental para a impregnação da amostra branqueada com resina epóxi, recomenda-se a quantificação dessa propriedade para a definição do tempo ideal de imersão. A análise visual da coloração da madeira antes e após o tratamento revelou um clareamento parcial em relação ao fundo utilizado para aquisição da imagem, sugerindo que o método foi eficiente para a modificação dos cromóforos da lignina. Para a madeira Balsa, Figura 3b, os maiores valores de transmitância foram obtidos com 360 minutos de exposição à radiação UV, 25% v/v de solução de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e 5 minutos de imersão em solução de NaOH.

Testes iniciais de impregnação de amostras das madeiras branqueadas impregnadas com resina epóxi, caracterizadas por espectroscopia de UV-vis, apresentaram transmitância aproximada de 69%. Esse estudo encontra-se em fase de conclusão, bem como a caracterização das amostras por microscopia eletrônica de varredura.

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

O estudo demonstrou a viabilidade da produção de madeira transparente (MT) a partir de espécies de reflorestamento, como o *Pinus elliottii*. Os resultados indicaram que as condições de branqueamento influenciam significativamente a transmitância, e que, para o Pinus, todas as variáveis e interações avaliadas mostraram estatístico relevante. Os níveis sugeridos para as variáveis são os menores testados, indicando que é possível obter bons níveis de transparência com menor consumo de reagentes e energia em comparação a metodologias anteriores. Conseguir parâmetros para a desativação da madeira Pinus empregando-se uma metodologia ambientalmente correta configura-se como alternativa promissora para o desenvolvimento de materiais sustentáveis, com potencial aplicação em setores tecnológicos e da construção civil.

Agradecimentos

À UNIFEI, LIMCOP, ao Programa PIVIC 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. 5, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd7342>. Acesso em: 06 ago. 2025.

PAN, N. et al. Synthesis of lignin-based resin and fabrication of sustainable transparent wood based on bio-recycling concept. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 268, p. 131620, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131620>. Acesso em: 11 ago. 2025.

FINK, S. Transparent wood – A new approach in the functional study of wood structure. *Holzforschung*, v. 46, n. 5, p. 403–408, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/hfsg.1992.46.5.403>. Acesso em: 06 ago. 2025.

WASTOWSKI, A. D. **Química da madeira**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2018. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BARROS NETO, B. de; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. Campinas, SP: UNICAMP, 2007.

HIRSCHLER, R. Whiteness, yellowness, and browning in food colorimetry: A critical review. In: **Color in Food**. [S.l.]: CRC Press, 2012. p. 93–104.

DURMUS, D. CIELABcolor space boundaries under theoretical spectra and 99 test color samples. *Color Research and Application*, v. 45, n. 5, p. 796–802, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/col.22511>. Acesso em: 11 ago. 2025.

VAN HAI, L. et al. Transparent wood fabrication and applications: A review. *Molecules*, v. 30, n. 7, p. 1506, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules30071506>. Acesso em: 18 ago. 2025.

PANDIT, K. H. et al. A review on recent developments in transparent wood: sustainable alternative to glass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05574-z>. Acesso em: 13 ago. 2025.

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

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7. ed. New York: Wiley, 2007.