

ENTRE A SUSTENTABILIDADE E O DESEMPENHO: CAMINHOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE MADEIRA PLÁSTICA

Mayara Lopes Prado¹, Erika Peterson Gonçalves².

¹Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, mayaralopes50393@gmail.com, erika@univap.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo mostrar as características mecânicas de um material compósito feito com resina e madeira, mostrando sua capacidade de ter suas propriedades manipuladas de acordo com sua composição. Sendo assim, foram utilizadas múltiplas fontes afim de provar a sua importância, nas quais ajudaram a chegar à conclusão de que, apesar dos desafios em relação à durabilidade, resistência mecânica e viabilidade econômica em escala industrial, os materiais compósitos de madeira plástica ainda se apresentam como uma alternativa promissora diante da crescente demanda por materiais sustentáveis, tendo a capacidade de aliar desempenho mecânico, aproveitamento de resíduos e redução de impactos ambientais. Por fim, os compósitos naturais têm a capacidade de serem utilizados em diversas áreas, além de trazerem um menor dano ao meio ambiente em comparação a outros materiais.

Palavras-chave: Materiais compósitos. Madeira plástica. Meio ambiente.

Área do Conhecimento: Engenharias.

Introdução

O crescente impacto ambiental decorrente do acúmulo de resíduos plásticos e da exploração intensiva dos recursos florestais vem motivando a busca por alternativas tecnológicas sustentáveis que conciliem desempenho, viabilidade econômica e responsabilidade socioambiental. Nesse contexto, as madeiras plásticas, do inglês Wood Plastic Composites (WPC) surgem como um promissor material (Panthapulakkal *et al.*, 2006). Essa solução inovadora de combinar de polímeros com fibras ou partículas lignocelulósicas vem sendo estudada nas últimas duas décadas (Ramli, 2024).

Mas antes de abordar os compósitos de madeira/plástico (CMP) é importante apresentar a definição universalmente aceita para materiais compósitos. Estes são definidos como um sistema formado por dois ou mais materiais distintos que possuam uma interface reconhecível entre si. A fase contínua, denominada matriz é a responsável por aglutinar a fase particulada e transferir a ela os carregamentos sujeitos ao conjunto. Já a fase particulada é chamada de reforço e tem a função de suportar os carregamentos empregados (Callister Jr *et al.*, 2013).

Sua principal característica é o fato deles permitirem a manipulação das propriedades finais dos materiais, justamente por ser possível selecionar materiais com propriedades diferentes para criar um compósito perfeito para um objetivo específico. Isso possibilita uma melhor adequação dos materiais, tornando-os materiais versáteis.

Como já mencionado, o interesse científico e tecnológico por esse tipo de material intensificou-se a partir do início dos anos 2000, acompanhando o avanço dos estudos em polímeros reciclados e compósitos híbridos (Ramli, 2024). Desde então, pesquisas vêm sendo direcionadas para compreender as propriedades físicas, mecânicas e químicas desses compósitos, bem como para otimizar processos de produção, ampliar as aplicações industriais e reduzir custos de fabricação.

As madeiras plásticas apresentam vantagens significativas em relação à madeira natural, como maior resistência à degradação biológica, estabilidade dimensional e aproveitamento de resíduos tanto plásticos quanto de origem vegetal (Najafi, 2013). Entretanto, desafios técnicos ainda se impõem, como a compatibilidade entre as fases, a durabilidade em condições ambientais adversas e o desempenho em larga escala (Geyer *et al.*, 2017).

Diante da crescente demanda por alternativas sustentáveis à madeira natural, torna-se essencial compreender como a composição e o processo de fabricação influenciam as propriedades mecânicas da madeira plástica. Neste trabalho, o foco é investigar as soluções encontradas por pesquisadores que melhoraram essas propriedades, a partir da interpretação das combinações de materiais e parâmetros de produção que resultaram em um compósito mais resistente e durável. A expectativa é que os resultados obtidos possam nortear próximos estudos de desenvolvimento de madeira plástica como solução sustentável.

Metodologia

A metodologia adotada para a construção deste artigo de revisão consistiu em uma busca sistemática por publicações científicas nas bases de dados do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Elsevier (ScienceDirect), Google Acadêmico e SciELO. O levantamento abrangeu o período de 2000 a 2025, utilizando os descritores “*wood plastic composite*”, “*wood plastic production*” e “*wood plastic properties*”. Após a identificação das publicações, os títulos, resumos e, quando necessário, os textos completos foram analisados com o objetivo de verificar a pertinência em relação ao escopo da pesquisa. Estudos que não apresentavam aderência aos objetivos propostos foram excluídos da análise final.

Resultados e Discussões

A crescente preocupação mundial com as mudanças climáticas e a degradação ambiental tem impulsionado governos e organizações a estabelecerem metas rigorosas para o pico de emissões e a neutralização de carbono (Stark *et al.*, 2007) (Duarte, 2024).

Nesse contexto, o setor madeireiro ocupa papel central, pois o uso intensivo de madeira natural, aliado ao desequilíbrio entre a oferta e a demanda, pressiona ecossistemas florestais e contribui para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (Dos Santos *et al.*, 2017). Como resposta a esse cenário, a madeira plástica surge como alternativa estratégica, ao oferecer um material de desempenho técnico satisfatório que reduz a dependência de recursos florestais e promove o reaproveitamento de resíduos plásticos, alinhando-se tanto aos objetivos ambientais globais quanto aos princípios da economia circular.

A madeira plástica é um material ecologicamente correto e ambientalmente amigável, uma vez que pode ser produzido a partir dos resíduos de madeira gerados pela indústria moveleira. Sendo baseada na reciclagem de resíduos plásticos combinados ou não a fibras lignocelulósicas, contribui para a redução do volume de resíduos sólidos destinados a aterros e para a valorização de subprodutos agroindustriais.

Sua composição, é geralmente constituído por uma matriz de resina termoplástica, tais como polipropileno (PP), polietileno (PE), polietileno de alta densidade (HDPE), cloreto de polivinila (PVC) ou acrilonitrila butadieno estireno (ABS), incorporando fibras de biomassa, tais como madeira, bambu ou palha, como material de enchimento (Jeske *et al.*, 2012) (Chamas *et al.*, 2020). Essa tecnologia crescente vem alimentando o mercado de produção e consumo verde, que baseado na economia circular, visa reduzir os impactos ambientais ao mesmo tempo que valoriza os resíduos sólidos.

Apesar de apresentar vantagens quando comparado à madeira natural, como baixo coeficiente de deformação, boa resistência ao encharcamento, boas propriedades de amortecimento e isolamento de vibrações e boa resistência tanto à corrosão quanto ao ataques de pragas naturais como os cupins, os compósitos de madeira plástica ainda apresentam baixas resistência mecânica e a intempéries, o que resulta na limitação de espaços para aplicação destes materiais, sendo comumente utilizados em aplicações externas, como decks, jardins e materiais de construção (Lazrak *et al.*, 2019) (Kowalski *et al.*, 2002) (Friedrich, 2019) (Friedrich, 2016) (Li *et al.*, 2011) (Badji *et al.*, 2017) (Yang *et al.*, 2015).

Estudos mostram que a baixa coesão interfacial e por consequência a baixa resistência mecânica são resultado da composição e estrutura química das fibras de madeira sendo altamente hidrofílica apresenta forte polaridade química e elevada energia superficial. Uma vez que, a matriz polimérica, devido, principalmente, à sua estrutura macromolecular, tem característica apolar e hidrofobicidade

(Geyer *et al.*, 2017) (Li *et al.*, 2011) (Bouafif *et al.*, 2009) (Ghahri *et al.*, 2012) (Turku *et al.*, 2017) (Ferreira *et al.*, 2019).

Estas incompatibilidades químicas impactam na adesão interfacial entre as fibras e a matriz resultando em uma redução considerável na resistência mecânica dos compósitos finais (Hu *et al.*, 2020).

Além disso, as macromoléculas de celulose apresentam intensa interação por meio de ligações de hidrogênio, favorecendo a aglomeração quando misturadas à matriz polimérica. Essa tendência à formação de aglomerados compromete a dispersão homogênea da fase de reforço e dificulta a transferência eficiente de tensões na interface, resultando na redução da resistência mecânica do compósito (Ostle *et al.*, 2019). Alguns pesquisadores encontraram sucesso na somente com a saturação da madeira com polímeros, obtendo-se um acréscimo na resistência (Kowalski *et al.*, 2002). Porém a possibilidade da inserção de aditivos na formulação é relevante, pois estes tendem a ser mais baratos e melhoram a processabilidade.

Compostos, como lubrificantes e agentes de acoplamento, visam melhorar a processabilidade e otimizar a interação entre a matriz polimérica e as fibras lignocelulósicas.

Dentre eles, a introdução de um solvente interfacial no processamento da madeira plástica tem se mostrado uma estratégia eficaz para melhorar a adesão entre as fibras naturais e a matriz polimérica. Esse tipo de aditivo atua promovendo a solvatação parcial das superfícies, favorecendo maior contato e interação física entre as fases (Borrelle *et al.*, 2020). Como consequência, reduz-se a incompatibilidade química característica entre os componentes, decorrente da já discutida natureza hidrofílica das fibras lignocelulósicas e da natureza hidrofóbica da matriz polimérica. A ação deste solvente contribui para uma interface mais coesa e eficiente na transferência de tensões. A melhoria dessa interação interfacial reflete diretamente no desempenho mecânico do compósito, ampliando seu potencial de aplicação em contextos que demandam maior resistência e durabilidade (Taib *et al.*, 2019).

Outra abordagem amplamente utilizada para reduzir a incompatibilidade entre fibras naturais e matriz polimérica é a modificação superficial da própria matriz (Lau, 2020). Esse processo pode envolver tratamentos químicos ou físicos que introduzem grupos funcionais capazes de interagir mais efetivamente com as fibras lignocelulósicas, criando uma interface mais estável e aderente. Entre as técnicas mais empregadas estão a enxertia de monômeros polares na cadeia polimérica, a oxidação controlada da superfície e o uso de plasma para aumentar a energia superficial do material. Essas modificações não apenas melhoram a afinidade química entre as fases, mas também favorecem uma dispersão mais homogênea das fibras, reduzindo a formação de aglomerados e, consequentemente, elevando as propriedades mecânicas do compósito.

De forma análoga à modificação da matriz, tratamentos específicos podem ser aplicados diretamente à superfície das fibras naturais (Geyer *et al.*, 2017), com o objetivo de aumentar sua compatibilidade com a fase polimérica. Esses tratamentos, que incluem processos de mercerização, acetilação ou aplicação de agentes de acoplamento, promovem alterações químicas e físicas na superfície da fibra, reduzindo sua hidrofobicidade e favorecendo a formação de ligações mais estáveis com a matriz. Essa modificação superficial contribui para melhorar a dispersão das fibras, otimizar a transferência de tensões e, consequentemente, aprimorar o desempenho mecânico do compósito.

Outra possibilidade é a adequação do processamento desses materiais compósitos, principalmente, no que tange a proporção entre reforço e matriz. Com o aumento do teor de resíduo de madeira pode aumentar as propriedades mecânicas do material final e ainda reduzir consideravelmente o custo de produção de compósitos de madeira plástica. No entanto, quando o teor de resíduo é muito alto, implica em dificuldades no processo de conformação, limitando a aplicação desta solução (Ramli, 2024).

Mesmo com os esforços de pesquisadores e empresas, muitos modos de melhorar essa relação simbiótica entre matriz e reforço foram encontrados, porém além de serem complexos e apresentarem alto custo (Kamble *et al.*, 2017), ainda o impacto nas propriedades mecânicas ainda é ínfimo, estando longe de alcançar níveis seguros para a aplicação como material de construção estrutural (Hu *et al.*, 2020) (Ratanawilai *et al.*, 2018).

Assim, melhorar efetivamente a resistência mecânica das madeiras plásticas e, dotá-las de mais funções sendo possível concretizar diversos processamentos e aplicações ainda é um tópico desafiador.

Conclusão

Os compósitos de madeira plástica apresentam-se como uma alternativa promissora diante da crescente demanda por materiais sustentáveis, capazes de aliar desempenho mecânico, aproveitamento de resíduos e redução de impactos ambientais. Apesar dos avanços significativos nas últimas décadas, sobretudo no aprimoramento da interface entre matriz polimérica e fibras lignocelulósicas, desafios ainda persistem em relação à durabilidade, resistência mecânica e viabilidade econômica em escala industrial. As estratégias de modificação superficial, o uso de solventes interfaciais e a otimização da proporção entre matriz e reforço representam caminhos relevantes para mitigar tais limitações, embora seus resultados ainda estejam aquém das exigências de aplicações estruturais. Nesse sentido, torna-se essencial intensificar os esforços de pesquisa e desenvolvimento, explorando soluções híbridas, novos aditivos e rotas de processamento inovadoras, de modo a consolidar a madeira plástica como um material competitivo e sustentável no cenário global.

Referências

- BADJI, C.; SOCCALINGAME, L.; GARAY, H.; BERGERET, A.; BÉNÉZET, J.C. Influence of weathering on visual and surface aspect of wood plastic composites: Correlation approach with mechanical properties and microstructure. *Polymer Degradation and Stability.*, v. 137, p. 162-172, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.010>. Acesso em: 24 de ag. 2025.
- BORRELLE, S.B.; et al. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science.*, v. 369, p. 1515-1518, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aba3656>. Acesso em: 24 de ag. 2025.
- BOUAFIF, H.; KOUBAA, A.; PERRÉ, P.; CLOUTIER, A. Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.**, v. 40, n. 12, p. 1975-1981, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.06.003>. Acesso em: 24 de ag. 2025.
- CALLISTER JR, W.D; RETHWISCH, D.G. Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução. **LTC**, 2013.
- CHAMAS, A.; MOON, H.; ZHENG, J.; QIU, Y.; TABASSUM, T.; JANG, J.; ABU-OMAR, M.; SCOTT, S.L.; SUH, S. Degradation Rates of Plastics in the Environment. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering.**, v. 8, n. 9, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b06635>. Acesso em: 24 de ag. 2025.
- DOS SANTOS, M.A.; MONTEIRO, A.R.D.; LESSA, A.C.R.; Débora da Silva Paredes; DA SILVA, M.F. Poluição do Meio Ambiente. **LTC**. 2017
- DUARTE, B.B. Mudanças climáticas e mercado de carbono. **Editora Senac.**, São Paulo, 2024.
- FERREIRA, E. d. S. B.; LUNA, C. B. B.; ARAÚJO, E. M.; SIQUEIRA, D. D.; WELLEN, R. M. R. Polypropylene/wood powder composites: Evaluation of PP viscosity in thermal, mechanical, thermomechanical, and morphological characters. **Journal of Thermoplastic Composite Materials.**, v. 25, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0892705719880958>. Acesso em: 24 de ag. 2025.
- FRIEDRICH, D.; LUIBLE, A. Investigations on ageing of wood-plastic composites for outdoor applications: A meta-analysis using empiric data derived from diverse weathering trials. **Construction and Building Materials.**, v. 124, p. 1142-1152, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.123>. Acesso em: 24 de ag. 2025.
- FRIEDRICH, D. Effects from natural weathering on long-term structural performance of wood-polymer composite cladding in the building envelope. **Journal of Building Engineering.**, v. 23, p. 68-76, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.025>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

GEYER, R.; Jenna R. Jambeck JAMBECK, J.R.; LAVENDER, K. Law, production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, 2017. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

GHAHRI, S.; NAJAFI, S. K.; MOHEBBY, B.; TAJVIDI, M. Impact strength improvement of wood flour–recycled polypropylene composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.124, n. 2, p. 1074-1080, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.34015>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

HU, X.; LI, D.; LUO, B.; LI, L. Weathering characteristics of wood-plastic composites compatibilized with ethylene vinyl acetate. **BioRes.**, v. 15, n. 2, 2020. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/weathering-characteristics-of-wood-plastic-composites-compatibilized-with-ethylene-vinyl-acetate/>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

JESKE, H.; SCHIRP, A.; CORNELIUS, F. Development of a thermogravimetric analysis (TGA) method for quantitative analysis of wood flour and polypropylene in wood plastic composites (WPC). **Thermochimica Acta**, v. 543, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.05.016>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

KAMBLE, V. M.; SAMARTH, N. B.; MAHANWAR, P. A. Thermo-catalytic pyrolysis of waste high-density polyethylene: Effect of γ -ray irradiation on degradation. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 39, n. 11, p. 1102–1108, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1296905>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

KOWALSKI, S.J.; KYZIOŁ, L.; RYBICKI, A. Composite of wood and polymerized methacrylate. **Composites Part B: Engineering**, v. 33, n. 1, p. 77-86, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(01\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(01)00059-2). Acesso em: 24 abr. 2025.

LAU, W.W.Y.; et al. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. **Science**, v. 369, p.1455-1461, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aba9475>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

LAZRAK, C.; KABOUCHI, B.; HAMMI, M.; FAMIRI, A.; ZIANI, M. Structural study of maritime pine wood and recycled high-density polyethylene (HDPEr) plastic composite using infrared-ATR spectroscopy, X-ray diffraction, SEM and contact angle measurements. **Case Studies in Construction Materials**, v. 10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00227>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

LI, Y.F.; LIU, Y.X.; WANG, X.M.; WU, Q.L.; YU, H.P.; LI, J. Wood–polymer composites prepared by the in situ polymerization of monomers within wood. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 119, n. 6, p. 3207-3216, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.32837>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

NAJAFI, S.K. Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review. **Waste Management**, v. 33, n. 9, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.017>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

OSTLE, C.; THOMPSON, R.C.; BROUGHTON, D.; GREGORY, L.; WOOTTON, M.; JOHNS, D.G. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. **Nature Portfolio**, v. 10, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

PANTHAPULAKKAL, S.; ZERESHKIAN, A; SAIN, M. Preparation and characterization of wheat straw fibers for reinforcing application in injection molded thermoplastic composites. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 2, p. 265-272, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.043>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

RAMLI, R.A; A comprehensive review on utilization of waste materials in wood plastic composite.

Materials Today Sustainability., v. 27, 2024. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100889>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

RATANAWILAI, T.; TANEERAT, K. Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites:

Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering. **Construction and Building**

Materials., v. 172, p. 349-357, 2018. Disponível em

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

STARK, N.M.; MATUANA, L.M. Characterization of weathered wood–plastic composite surfaces using

FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS. **Polymer Degradation and Stability.**, v. 92, n. 10, 2007.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.06.017>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

TAIB, M. N. A. M.; JULKAPLI, N.M. 4 - Dimensional stability of natural fiber-based and hybrid

composites. Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and

Hybrid Composites, **Woodhead Publishing.** p. 61-79, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00004-7>. Acesso em: 24 de ag. 2025.

TURKU, I.; KESKISAARI, A.; KÄRKI, T.; PUURTINEN, A.; MARTTILA, P. Characterization of wood

plastic composites manufactured from recycled plastic blends. **Composite Structures.**, v. 161, p.

469-476, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.073>. Acesso em: 24 de

ag. 2025.

YANG, T.H.; YANG, T.H.; CHAO, W.C.; LEU, S.Y. Characterization of the property changes of

extruded wood–plastic composites during year round subtropical weathering. **Construction and**

Building Materials., v. 88, p. 159-168, 2015. Disponível:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.019>. Acesso em: 24 de ag. 2025.