

COMPÓSITOS POLIÉSTER–MADEIRA: SÍNTESE, CARACTERIZAÇÃO MULTIESCALAR E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Luiz Guilherme Meira de Souza¹;

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/0801747108308706>

Luan Carvalho Santana de Oliveira²;

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/4872074585274757>

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior³;

³Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/7353332474621022>

Cleiton Rubens Formiga Barbosa⁴.

⁴Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/8673332414572221>

RESUMO: A busca por soluções sustentáveis no Nordeste brasileiro, região marcada por vulnerabilidades ambientais e intensa atividade moveleira, tem estimulado o reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos na produção de novos materiais. Este estudo apresenta a síntese e caracterização multiescalar de compósitos de resina poliéster ortoftálica e tereftálica contendo 20% em massa de resíduo de madeira proveniente de marcenarias locais, avaliando três granulometrias distintas. As propriedades mecânicas indicaram reduções nas resistências à tração e à flexão em relação às matrizes puras, confirmando o papel do resíduo como carga e não como reforço estrutural. A formulação com partículas finas apresentou melhor desempenho, associada à maior homogeneidade e adesão interfacial. A densidade manteve-se estável, e a absorção de água aumentou com o tamanho das partículas, refletindo a natureza hidrofílica da madeira. As propriedades térmicas revelaram menor condutividade e maior resistência térmica, sugerindo potencial para aplicações de isolamento em edificações de baixo custo. A análise por MEV evidenciou melhor molhamento nas formulações tereftálicas e maior presença de vazios nas ortoftálicas. Após 12 meses de exposição ambiental, todas as amostras apresentaram perda de massa inferior a 2%, demonstrando estabilidade. Os compósitos poliéster–madeira mostraram-se alternativa viável e ambientalmente relevante para o contexto nordestino.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos poliéster–madeira. Sustentabilidade. Propriedades mecânicas e térmicas.

POLYESTER-WOOD COMPOSITES: SYNTHESIS, MULTI-SCALE CHARACTERIZATION AND PERFORMANCE EVALUATION

ABSTRACT: The search for sustainable solutions in Northeast Brazil, a region marked by environmental vulnerabilities and intense furniture manufacturing activity, has stimulated the reuse of lignocellulosic waste in the production of new materials. This study presents the synthesis and multiscale characterization of orthophthalic and terephthalic polyester resin composites containing 20% by mass of wood waste from local carpentry workshops, evaluating three distinct particle sizes. The mechanical properties indicated reductions in tensile and flexural strengths compared to the pure matrices, confirming the role of the waste as filler and not as structural reinforcement. The formulation with fine particles showed better performance, associated with greater homogeneity and interfacial adhesion. Density remained stable, and water absorption increased with particle size, reflecting the hydrophilic nature of wood. Thermal properties revealed lower conductivity and higher thermal resistance, suggesting potential for insulation applications in low-cost buildings. SEM analysis showed better wetting in the terephthalic formulations and a greater presence of voids in the orthophthalic ones. After 12 months of environmental exposure, all samples showed a mass loss of less than 2%, demonstrating stability. The polyester-wood composites proved to be a viable and environmentally relevant alternative for the Northeastern context.

KEY-WORDS: Polyester-wood composites. Sustainability. Mechanical and thermal properties.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por materiais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de reduzir impactos ambientais, promover a economia circular e valorizar resíduos sólidos. Nesse contexto, os compósitos madeira–polímero (Wood Plastic Composites – WPC) têm se destacado como alternativas tecnológicas promissoras, combinando matrizes poliméricas com partículas ou fibras lignocelulósicas provenientes de resíduos agroindustriais, florestais ou urbanos (Teixeira, 2005).

A versatilidade desses materiais, aliada ao baixo custo das matérias-primas e ao potencial de reaproveitamento de resíduos, tem ampliado seu uso em setores como construção civil, mobiliário, design de produtos e componentes estruturais de baixa solicitação mecânica (Li et al., 2021; Zhang et al., 2023).

A incorporação de resíduos lignocelulósicos em matrizes poliméricas apresenta vantagens ambientais e econômicas significativas. Além de reduzir a pressão sobre aterros sanitários, essa estratégia agrega valor a subprodutos de baixo custo e diminui a dependência de cargas minerais e fibras sintéticas, cuja produção é energeticamente intensiva (Santos et al., 2022).

A madeira, por sua vez, confere aos compósitos propriedades estéticas, térmicas e funcionais desejáveis, enquanto o polímero contribui para a resistência à umidade, ao ataque biológico e à degradação ambiental (Khalid et al., 2020). No entanto, o desempenho final desses compósitos depende fortemente da compatibilidade interfacial entre matriz e reforço, da granulometria das partículas e das condições de processamento (Khalid et al., 2023).

No Brasil, especialmente na região Nordeste, a atividade moveleira é responsável pela geração de grandes volumes de resíduos de madeira, cuja destinação inadequada representa um desafio ambiental crescente.

A ausência de políticas de reaproveitamento e a predominância de práticas de descarte inadequado agravam problemas como poluição do solo, emissões atmosféricas e desperdício de recursos naturais. Assim, o desenvolvimento de compósitos poliéster–madeira surge como alternativa estratégica para promover inovação tecnológica, sustentabilidade e geração de renda em pequenas indústrias e marcenarias locais.

As resinas poliéster insaturadas, particularmente as formulações ortoftálica e tereftálica, são amplamente utilizadas na indústria de compósitos devido ao baixo custo, facilidade de processamento e boas propriedades mecânicas e térmicas (Zhang et al., 2022).

A incorporação de partículas lignocelulósicas nessas matrizes tem sido objeto de crescente interesse científico, especialmente no que se refere à influência da granulometria, da fração mássica e das condições de cura sobre o desempenho final do material (Martins et al., 2022; Santos et al., 2024).

Diante desse cenário, este estudo apresenta a síntese e a caracterização multiescalar de compósitos poliéster–madeira contendo 20% de resíduo de jatobá em três granulometrias distintas. A abordagem experimental integra análises físicas, mecânicas, térmicas, morfológicas e ambientais, permitindo compreender de forma abrangente a relação entre microestrutura, composição e desempenho. A escolha do jatobá se fundamenta em sua elevada densidade e estabilidade dimensional, características que favorecem sua aplicação como carga em matrizes termofixas (Silva et al., 2021).

OBJETIVO

Ao correlacionar variáveis como tipo de resina, granulometria e comportamento sob envelhecimento ambiental, este trabalho tem como objetivo demonstrar a viabilidade técnica

e ecológica desses materiais compósitos de resina poliéster reforçados com resíduos de madeira, contribuindo para o avanço científico e para o desenvolvimento de soluções sustentáveis aplicáveis em diferentes setores produtivos.

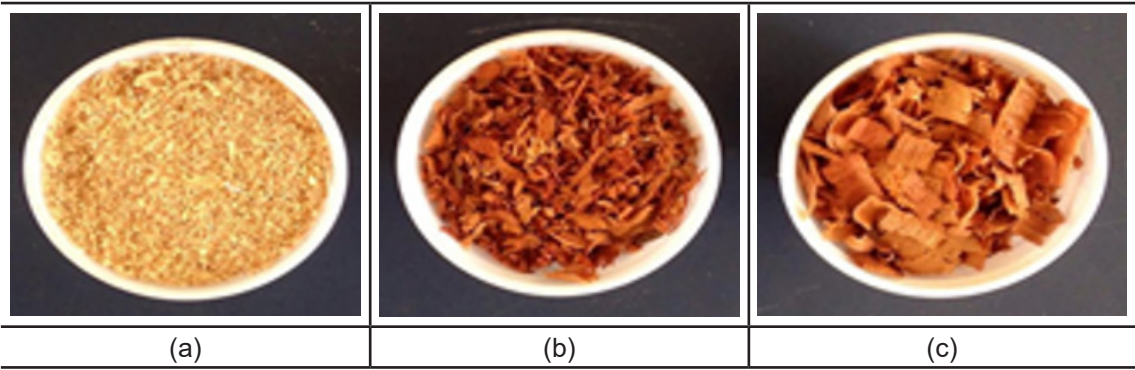
METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada para garantir rigor experimental, reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados, seguindo recomendações internacionais para caracterização de compósitos lignocelulósicos com matrizes termofixas (Fernandes et al., 2020; Zhang et al., 2022; Santos et al., 2024). O processo envolveu a preparação do resíduo lignocelulósico, a fabricação dos compósitos e a realização de ensaios físicos, mecânicos, térmicos, morfológicos e ambientais.

Materiais

O resíduo lignocelulósico (Figura 1) utilizado foi proveniente de madeira de jatobá (*Hymenaea courbaril*), coletado em marcenarias de Natal/RN. A escolha do jatobá se fundamenta em sua elevada densidade, estabilidade dimensional e resistência natural, características que favorecem sua aplicação como carga em compósitos poliméricos (Silva et al., 2021).

Figura 1: Resíduos de madeira jatobá: (a) partículas finas (b) partículas médias (c) partículas grossas



Fonte: Elaborado pelos autores.

As matrizes poliméricas empregadas foram resinas poliéster insaturadas orto-ftálica e tereftálica, amplamente utilizadas na indústria devido ao baixo custo, boa processabilidade e propriedades mecânicas adequadas para aplicações estruturais e semi-estruturais (Zhang et al., 2022).

O catalisador utilizado foi o peróxido de metil etil cetona (MEKP), na proporção de 2% em massa, conforme recomendações do fabricante. Moldes metálicos de ferro fundido (200 × 200 × 12 mm) foram empregados para garantir uniformidade geométrica e permitir

aplicação de pressão durante a cura.

Preparação do resíduo lignocelulósico

O resíduo de jatobá foi inicialmente seco ao ar e posteriormente submetido à secagem em estufa a 105 °C por 24 h, visando eliminar umidade residual. A remoção da umidade é essencial para evitar reações indesejadas entre água e o catalisador MEKP, que podem gerar bolhas e comprometer a integridade do compósito (Zhang et al., 2022; Santos et al., 2024).

Após a secagem, o material foi peneirado em peneira vibratória para obtenção de três granulometrias distintas: Partículas finas (PF) 0,2 mm; Partículas médias (PM) 2,5 mm; Partículas grossas (PG) 3,6 mm.

A granulometria exerce influência direta sobre a molhabilidade, a adesão interfacial e a distribuição das partículas na matriz, sendo considerada variável crítica no desempenho de compósitos lignocelulósicos (Khalid et al., 2023).

Fabricação dos compósitos

A produção dos compósitos foi conduzida de forma sistemática, visando garantir homogeneidade e controle das variáveis de processamento. A proporção de 20% em massa de resíduo foi definida com base em estudos preliminares e literatura especializada, que indicam que teores superiores a 25% tendem a gerar aglomeração de partículas e redução significativa da resistência mecânica (Martins et al., 2022).

O processo de fabricação seguiu as etapas:

- Mistura: a resina foi previamente catalisada com 2% de MEKP e o resíduo lignocelulósico foi incorporado gradualmente, com homogeneização manual por 10 min. A mistura foi monitorada até o início da reação exotérmica, aproximadamente 30 min após a adição do catalisador;
- Moldagem e prensagem: a mistura foi vertida em moldes metálicos previamente tratados com desmoldante à base de carnaúba. A prensagem foi realizada sob pressão de 147 MPa por 5 h, etapa essencial para reduzir porosidade e melhorar a compactação, conforme demonstrado em estudos recentes (Liu et al., 2021; García et al., 2023);
- Cura e usinagem: as placas foram curadas por 24 h em ambiente controlado (25 °C, 50% UR). Em seguida, foram lixadas com lixa 120 e cortadas em corpos de prova conforme normas ASTM aplicáveis a cada ensaio.

Ensaio realizados

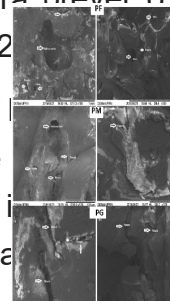
A caracterização multiescalar dos compósitos foi realizada por meio de ensaios físicos, mecânicos, térmicos, morfológicos e ambientais, seguindo normas técnicas reconhecidas internacionalmente. Essa abordagem integrada permite correlacionar microestrutura, composição e desempenho, conforme recomendado para compósitos lignocelulósicos (Fernandes et al., 2020; Santos et al., 2024).

a) Propriedades físicas: foram avaliadas densidade aparente, porosidade e estabilidade dimensional. A densidade foi determinada pela razão massa/volume, enquanto a porosidade foi estimada pela diferença entre densidade teórica e aparente, metodologia amplamente utilizada para inferir compactação e presença de microvazios (Martins et al., 2022). A estabilidade dimensional foi avaliada segundo ASTM D696, considerando variações higrotérmicas.

b) Propriedades mecânicas: os ensaios de tração (ASTM D638) e flexão (ASTM D790) foram realizados em máquina universal de ensaios. A literatura aponta que compósitos com partículas lignocelulósicas tendem a apresentar redução de resistência devido à menor adesão interfacial (Liu et al., 2021), justificando a necessidade de avaliação detalhada.

c) Propriedades térmicas: as propriedades térmicas foram determinadas com o equipamento KD2-Pro, baseado no método do transiente linear de calor. Foram obtidos valores de condutividade (k), difusividade (α), capacidade térmica volumétrica (C_v) e resistividade térmica (R_t). A caracterização térmica é fundamental para prever o comportamento dos compósitos em aplicações de isolamento (Zhang et al., 2022).

d) Absorção de água: a absorção hídrica foi avaliada segundo ASTM D568, por imersão em água destilada por até 168 h. A madeira, por ser hidrofílica, tende a absorver água devido à presença de grupos hidroxila, o que pode comprometer a adesão interfacial (Khalid et al., 2023). Parte das amostras foi imersa em solução salina (NaCl) para simular ambientes marinhos (García et al., 2023).



e) Degradação ambiental: a resistência ao intemperismo foi avaliada em câmara QUV/se, seguindo ciclos UV-condensação (ASTM D1435). A radiação UV promove reações foto-oxidativas que degradam a matriz polimérica (Carlsson & Wiles, 1976), sendo intensificadas pela presença de cromóforos naturais na madeira (Fernandes et al., 2020).

f) Análise morfológica: a morfologia das superfícies fraturadas foi analisada por MEV (ASTM E1382), permitindo avaliar molhamento, adesão interfacial e presença de vazios. A análise morfológica é essencial para correlacionar microestrutura e desempenho mecânico (Santos et al., 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos nos ensaios (Figura 2) permitiu avaliar, de forma integrada, a influência do tipo de resina (ortoftálica e tereftálica) e da granulometria do resíduo lignocelulósico (fina, média e grossa) sobre o desempenho físico, mecânico, térmico, morfológico e ambiental dos compósitos.

Figura 2: Ensaios dos compósitos: (a) corpos de prova e normas (b) propriedades térmicas (c) resistência a tração e compressão (d) degradação ambiental (e) MEV.

Tipo de Ensaio	Corpo de prova			Norma
	C	L	E	
	(mm)	(mm)	(mm)	
Tração			8	ASTM D638
200				
25				
Flexão	200	25	8	ASTM D790
Biodegradação	200	25	8	ASTM D5209
Degradação Ambiental	200	25	3	ASTM D1435
MEV	10	10	8	ASTM E1382
Absorção de água	10	10	8	ASTM D570
Densidade	10	10	3	ASTM D2726
(a)				

Material	k (MJ/m³.K)	α (mm²/s)	Cv (W/m.K)	Rt (C·-cm/W)
Ortoftálica	1,940	0,116	0,223	442,2
PF	1,891	0,111	0,210	494,7
PM	1,538	0,110	0,191	524,3
PG	1,491	0,105	0,155	602,7
Tereftálica	1,854	0,114	0,197	508,8
PF	1,805	0,112	0,191	509,5
PM	1,713	0,109	0,179	523,5
PG	1,642	0,107	0,166	530,1
(b)				

Adição (%)	Resistência à tração (MPa)		Resistência à flexão (MPa)	
	Ortoftálica	Tereftálica	Ortoftálica	Tereftálica
RE-SINA	36,34±1,7	38,56±1,9	50,8±4,7	49,4±2,3
PF 20%	12,96±1,1	15,20±1,1	32,8±2,1	37,5±5,6
PM 20%	12,78±3,4	11,20±1,6	23,8±3,9	33,8±5,3
PG 20%	9,36±4,4	10,37±0,7	22,4±0,9	31,3±4,2
(c)				

Amostras	Antes do ensaio (g)	Após o ensaio (g)	Perda de Massa (%)
PFV	55,4	54,6	1,46
PMV	51,9	51,5	0,77
PGV	48,0	47,7	0,62
PFC	49,5	48,6	1,85
PMC	50,5	50,0	1,01
PGC	49,5	49,1	0,81
(d)			

(e)			
-----	--	--	--

Fonte: Elaborado pelos autores.

A discussão foi conduzida à luz da literatura recente sobre compósitos híbridos sustentáveis, permitindo estabelecer correlações entre microestrutura, propriedades e potencial de aplicação (Fernandes et al., 2020; Martins et al., 2022; Santos et al., 2024).

Propriedades físicas

Os valores de densidade aparente mostraram tendência de aumento nas formulações contendo partículas finas, independentemente do tipo de resina. Essa elevação está associada à maior capacidade de preenchimento dos vazios intersticiais, resultando em microestrutura mais compacta e homogênea. A literatura confirma que partículas menores favorecem maior densificação e melhor empacotamento, reduzindo a porosidade interna (Zhang et al., 2022; Khalid et al., 2023).

Por outro lado, compósitos com partículas médias e grossas apresentaram densidades inferiores e maior porosidade aparente, reflexo da menor área superficial disponível para interação com a matriz. A presença de vazios e descontinuidades internas tende a comprometer propriedades mecânicas e aumentar a permeabilidade à água, como amplamente relatado em compósitos lignocelulósicos (Martins et al., 2022).

A estabilidade dimensional apresentou variações discretas entre as formulações, com maior expansão higrotérmica observada nos compósitos com partículas grossas. Esse comportamento está relacionado à maior presença de microcanais e regiões suscetíveis à absorção de umidade, conforme descrito por García et al. (2023).

Propriedades mecânicas

Os ensaios de tração e flexão evidenciaram reduções significativas nas resistências mecânicas dos compósitos em comparação às matrizes puras, comportamento típico de compósitos particulados com baixa adesão interfacial (Liu et al., 2021). A madeira, por ser hidrofílica e apresentar superfície quimicamente heterogênea, tende a interagir de forma limitada com a matriz poliéster, resultando em transferência de carga menos eficiente.

Entre as granulometrias avaliadas, as partículas finas apresentaram os melhores resultados mecânicos, tanto em tração quanto em flexão. Esse desempenho superior está associado à maior área de contato entre matriz e reforço, favorecendo o molhamento e reduzindo a formação de vazios. Estudos semelhantes relatam que partículas finas promovem melhor dispersão e maior coesão interfacial (Santos et al., 2024).

A resina tereftálica apresentou desempenho mecânico superior à ortoftálica em todas as granulometrias. Essa diferença pode ser atribuída à maior rigidez e resistência intrínseca da resina tereftálica, além de sua maior capacidade de molhamento das partículas lignocelulósicas, conforme observado em análises morfológicas e relatado por Zhang et al. (2022).

Propriedades térmicas

A caracterização térmica revelou que a incorporação de resíduo lignocelulósico reduziu a condutividade térmica dos compósitos, comportamento esperado devido à natureza isolante da madeira. A redução da condutividade foi mais acentuada nas formulações com partículas grossas, que apresentaram maior resistividade térmica (R_t). Esse efeito está relacionado à maior presença de vazios e à menor densidade, que dificultam a propagação de calor (Fernandes et al., 2020).

A difusividade térmica (α) apresentou valores menores nos compósitos em relação às matrizes puras, indicando menor capacidade de resposta a variações térmicas. Esse comportamento é desejável em aplicações de isolamento térmico, como painéis e divisórias de baixo custo.

A capacidade térmica volumétrica (C_v) variou de acordo com a densidade e a composição das formulações, sendo ligeiramente maior nas resinas puras e menor nos compósitos com partículas grossas. Esses resultados corroboram estudos que destacam a influência da microestrutura e da fração volumétrica de reforço no comportamento térmico de compósitos híbridos (García et al., 2023).

Absorção de água

A absorção de água aumentou proporcionalmente ao tamanho das partículas, sendo mais elevada nas formulações com partículas grossas. Esse comportamento decorre da maior porosidade e da menor área de contato entre matriz e reforço, que favorecem a penetração de água e o inchamento das partículas lignocelulósicas (Khalid et al., 2023).

Compósitos com partículas finas apresentaram menor absorção hídrica, resultado da maior compactação e da menor quantidade de microcanais. A aplicação de revestimento superficial com a própria resina reduziu significativamente a absorção em todas as granulometrias, confirmando a eficácia dessa estratégia para aumentar a durabilidade em ambientes úmidos, conforme também relatado por Santos et al. (2024).

A imersão em solução salina (3,5% NaCl) intensificou a absorção e a degradação superficial, especialmente nas formulações com partículas grossas, comportamento semelhante ao observado em compósitos expostos a ambientes marinhos (García et al., 2023).

Degradação ambiental

Os ensaios de envelhecimento acelerado revelaram que a exposição à radiação UV e à condensação promoveu alterações superficiais, como perda de brilho, microfissuras e leve amarelamento, fenômenos típicos de foto-oxidação em polímeros insaturados (Carlsson & Wiles, 1976; Britzki, 2011).

A perda de massa após 12 meses de exposição foi inferior a 2% em todas as formulações, indicando boa estabilidade ambiental. Compósitos com partículas finas apresentaram menor degradação mecânica e menor alteração colorimétrica, resultado da maior homogeneidade e menor formação de microfissuras.

A resina tereftálica demonstrou maior resistência à degradação UV, comportamento consistente com sua estrutura química mais estável e maior resistência mecânica intrínseca (Zhang et al., 2022).

Análise morfológica (MEV)

As micrografias obtidas por MEV revelaram diferenças significativas entre as formulações. Nas resinas puras, observou-se superfície homogênea e ausência de defeitos. Nos compósitos, a qualidade da interface matriz-partícula variou de acordo com a granulometria e o tipo de resina.

Compósitos com partículas finas apresentaram melhor molhamento, menor presença de vazios e distribuição mais uniforme das partículas, justificando o melhor desempenho mecânico.

Já as formulações com partículas grossas exibiram falhas interfaciais, regiões de descolamento e microfissuras, características que comprometem a transferência de carga e favorecem a absorção de água (Santos et al., 2024).

A resina tereftálica apresentou interface mais coesa e menor quantidade de vazios, reforçando sua superioridade em termos de adesão interfacial e desempenho global.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstraram que a incorporação de 20% de resíduo de jatobá em matrizes poliéster ortoftálica e tereftálica é tecnicamente viável e ambientalmente relevante. Embora o resíduo atue predominantemente como carga — reduzindo as resistências à tração e à flexão, conforme amplamente relatado para compósitos particulados lignocelulósicos (Liu et al., 2021; Martins et al., 2022) — as formulações com partículas finas apresentaram desempenho superior devido à maior área de contato e melhor adesão interfacial.

As propriedades térmicas indicaram redução da condutividade e aumento da resistividade, reforçando o potencial desses compósitos para aplicações de isolamento térmico, em concordância com estudos prévios sobre materiais lignocelulósicos (Fernandes et al., 2020). A absorção de água mostrou-se dependente da granulometria, sendo mais elevada em partículas grossas, resultado da maior porosidade e da natureza hidrofílica da madeira (Khalid et al., 2023).

O revestimento superficial com resina reduziu significativamente esse efeito. A resina tereftálica apresentou desempenho global superior, com melhor molhamento das partículas

e menor formação de vazios, o que se refletiu em maior estabilidade mecânica e ambiental, conforme também observado por Zhang et al. (2022). Após 12 meses de envelhecimento acelerado, todas as formulações mantiveram perda de massa inferior a 2%, evidenciando boa resistência ao intemperismo.

De modo geral, os compósitos poliéster–madeira desenvolvidos são adequados para aplicações de baixa solicitação mecânica, como painéis, divisórias e elementos decorativos, oferecendo alternativa sustentável para o reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos.

Recomenda-se que estudos futuros explorem tratamentos superficiais da madeira ou agentes de acoplamento para aprimorar a adesão interfacial e ampliar o potencial de aplicação desses materiais.

REFERÊNCIAS

- BRITZKI, M. **Degradação fotoquímica de polímeros**: mecanismos e aplicações. *Polímeros*, v. 21, n. 3, p. 245–252, 2011.
- CARLSSON, D. J.; WILES, D. M. **The photodegradation of polypropylene films**. *Journal of Macromolecular Science: Part C*, v. 14, n. 1, p. 65–106, 1976.
- FERNANDES, A. et al. **Thermal and mechanical behavior of polymer composites reinforced with lignocellulosic residues**. *Composite Structures*, v. 248, 2020.
- GARCÍA, M. et al. **Hygrothermal aging and saltwater degradation of natural fiber composites**: mechanisms and performance. *Construction and Building Materials*, v. 365, 2023.
- KHALID, M. et al. **Influence of lignocellulosic particle size on the interfacial adhesion and performance of polymer composites**. *Industrial Crops and Products*, v. 158, 2020.
- KHALID, M. et al. **Advances in wood–polymer composites**: interfacial chemistry, processing and performance. *Composites Part A*, v. 165, 2023.
- LI, X. et al. **Sustainable wood–plastic composites**: recent advances and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, v. 278, 2021.
- LIU, Y. et al. **Mechanical performance and failure mechanisms of natural fiber–reinforced thermoset composites**. *Materials Today Communications*, v. 26, 2021.
- MARTINS, J. et al. **Effect of lignocellulosic filler content on the mechanical and physical behavior of polymer composites**. *Polymer Testing*, v. 106, 2022.
- SANTOS, R. et al. **Wood–polymer composites**: processing, durability and environmental performance. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 21, 2022.
- SANTOS, R. et al. **Multiscale evaluation of polyester–wood composites**: interfacial phenomena and environmental durability. *Composites Science and Technology*, v. 245, 2024.
- SILVA, L. et al. **Dimensional stability and density effects of tropical hardwood residues**

in polymer composites. *Holzforschung*, v. 75, n. 8, p. 743–752, 2021.

TEIXEIRA, D. E. **Compósitos madeira-plástico:** fundamentos, propriedades e aplicações. São Paulo: IPT, 2005.

ZHANG, X. et al. **Polyester-based composites reinforced with natural fibers:** processing, microstructure and performance. *Polymer Composites*, v. 43, n. 5, p. 2561–2578, 2022.

ZHANG, X. et al. **Advances in sustainable wood-polymer composites:** mechanical, thermal and environmental aspects. *Composites Part B*, v. 245, 2023.