

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA UMIDADE E FUNGOS EM MADEIRA MACIÇA E COMPÓSITOS DE MADEIRA-PLÁSTICA

EVALUATION OF THE EFFECTS OF MOISTURE AND FUNGI IN SOLID WOOD AND PLASTIC-WOOD COMPOSITES

Fernando Gonçalves ¹; Viviane Teleginski Mazur ²; Maurício Marlon Mazur ³; Aderson Amaro Turri ⁴; Nikelan Rox ⁵; Gustavo de Miranda Saleme Gidrão ⁶; Marcelo Henrique Granza ⁷.

¹ Licenciado | fgoncalves.2024@alunos.utfpr.edu.br | UTFPR | Guarapuava, Brasil; ² Doutora | vivianemazur@utfpr.edu.br | UTFPR | Guarapuava, Brasil; ³ Doutor | mzmauricio@utfpr.br | UTFPR | Curitiba, Brasil; ⁴ Especialista | anderson.turri@millpar.com | MILLPAR S.A. | Guarapuava, Brasil; ⁵ Engenheiro | nikelan.rox@millpar.com | MILLPAR S.A. | Guarapuava, Brasil; ⁶ Doutor | gidrao@utfpr.edu.br | UTFPR | Guarapuava, Brasil; ⁷ Doutor | marcelogranza@utfpr.edu.br | UTFPR | Guarapuava, Brasil.

Resumo:

A madeira, apesar de sua beleza e origem renovável, apresenta limitações quando exposta a umidade e agentes biológicos, como fungos. Por isso, buscam-se alternativas mais duráveis e sustentáveis, sendo o compósito madeira-plástico (WPC) um material resistente e versátil, que combina resíduos de madeira e polímeros. No presente estudo, os WPCs foram fabricados com 30% de reforço lignocelulósico (em forma de maravalha e pellets) e matriz composta por resíduos plásticos diversos, incluindo polipropileno, PET, PVC e polímeros multicamadas. Após a extrusão, corpos de prova foram cortados, medidos e submetidos a ciclos de imersão em água, seguidos de exposição em um ambiente úmido por 30 dias para observar o desenvolvimento de fungos. A variação de massa foi registrada ao longo dos ciclos de 60 dias, as amostras foram avaliadas quanto ao módulo de elasticidade dinâmico. Ao comparar o desempenho dos WPCs com a madeira maciça, verificou-se que os WPCs, especialmente com pellets, apresentaram desempenho superior após exposição prolongada à água e presença superficial de fungos, restando propriedades mecânicas. Esses resultados indicam que os WPCs são alternativas viáveis para substituir parcialmente madeiras em aplicações não estruturais sujeitas à umidade.

Palavras-chave:

Compósitos madeira plástico; Madeira serrada; Decaimento fúngico; Sustentabilidade; Reciclagem.

Abstract:

Wood, despite its beauty and renewable origin, presents limitations when exposed to moisture and biological agents such as fungi. Therefore, more durable and sustainable alternatives are sought, with wood-plastic composites (WPCs) emerging as resistant and versatile materials that combine wood residues and polymers. In the present study, WPCs were manufactured using 30% lignocellulosic reinforcement (in the form of wood shavings and pellets) and a matrix composed of various plastic residues, including polypropylene, PET, PVC, and multilayer polymers. After extrusion, test specimens were cut, measured, and subjected to water immersion cycles, followed by exposure to a humid environment for 30 days to observe fungal development. Mass variation was recorded over 60-day cycles, and samples were evaluated for Dynamic Modulus of Elasticity. When comparing the performance of WPCs to solid wood, it was found that WPCs—especially those reinforced with pellets—exhibited superior performance after prolonged water exposure and superficial fungal presence, retaining their mechanical properties. These results indicate that WPCs are viable alternatives to partially replace solid wood in non-structural applications exposed to moisture.

Keywords:

Wood plastic composites; Saw-wood; Fungal decay; Sustainability; Recycling.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material natural obtido de florestas manejadas (natural) ou cultivada (reflorestamento), amplamente empregada em estruturas para construção civil. Estruturas de concreto e aço demandam maior energia incorporada e operacional em comparação com estruturas de madeira (BAHRAMIAN e YETILMEZSOY, 2020). Estudos apontam que o consumo global de madeira está sendo impulsionado e deverá atingir em 2030 mais de 2 bilhões de metros cúbicos (LOCK *et al.*, 2021), pois há uma recente tendência dos países do hemisfério Norte (que já tem a madeira como principal material de construção) em utilizar estruturas total ou parcialmente com madeira (BAHRAMIAN e YETILMEZSOY, 2020; VOULPIOTIS *et al.*, 2021; SVATOŠ-RAŽNJEVIĆ, OROZCO, MENGES, 2022). Isso porque o sequestro de carbono e demais benefícios provenientes do manejo e reflorestamento de florestas, tais como melhora da qualidade da água e recuperação de solo, se destacam mediante o combate às mudanças climáticas (LI *et al.*, 2025).

O processamento da madeira gera resíduos em formas diversas como o pó, cavacos, fibras entre outras (ASHORI e NOURBAKHS, 2009). A incorporação desses resíduos de madeira em uma matriz polimérica, chamado de compósito de madeira plástico (WPC, do inglês *Wood Plastic Composite*), tem sido estudada desde a década de 1980 (JONES e BRISCHKE, 2017). Entretanto, bases de dados como *Scopus* e *Web of Science* apresentam um aumento expressivo no número de pesquisas e publicações científicas sobre o tema desde 2003. Esse crescimento pode ser atribuído a diversos fatores convergentes, como a crescente demanda por materiais sustentáveis e com menor impacto ambiental, o qual estimulou o desenvolvimento de alternativas que utilizam resíduos lignocelulósicos e plásticos recicláveis, característica central dos WPCs.

Paralelamente, os avanços nas tecnologias de processamento, como extrusão e moldagem, permitiram melhorias significativas no desempenho mecânico e na durabilidade desses materiais, viabilizando sua aplicação em escala industrial. O setor da construção civil passou a incorporar os WPCs em aplicações externas como decks (BOLIN e SMITH, 2011) cercas, mobiliário e coberturas (TOGHYANI, MATTHEWS e VARIS, 2020), o que aumentou a demanda por estudos que avaliassem suas propriedades físicas, mecânicas e ambientais. A disponibilidade crescente de matéria-prima reciclável e o fortalecimento das redes de pesquisa internacionais contribuíram para consolidar o WPC como um campo promissor de investigação científica e tecnológica. Portanto, a reciclagem eficiente de plásticos e resíduos de madeira desempenha um papel são cruciais na promoção do desenvolvimento sustentável e na conservação ambiental.

Quando colocados em ambientes externos contendo umidade, radiação ultravioleta e outras intempéries, as madeiras maciças e até certo grau, também os WPCs ficam suscetíveis a danos estruturais e dimensionais, além de ataque biológico como fungos. Tais fatores são importantes para se definir a durabilidade desses materiais e a partir desse conhecimento proporcionar a correta seleção e dimensionamento de produtos e estruturas. Variando-se as espécies de madeira ou o método de produção dos WPCs com diferentes tipos de plásticos e/ou resíduos de madeira incorporados, a resposta às intempéries e ataques biológicos varia muito. Considerando que os WPCs apresentam boa resistência à umidade, à fluência e estabilidade dimensional (Zhou *et al.*, 2022), conhecer e comparar suas propriedades com as madeiras maciças é crucial para que novas possibilidades de aplicações sejam obtidas, seja na substituição total ou parcial de partes de produtos que ficam expostas ao ambiente externo. O aumento do tempo de vida útil com implicação na redução potencial das manutenções e das substituições previstas impacta de forma positiva nas questões ambientais e de segurança.

Neste trabalho, corpos de prova de madeira maciça de duas variedades de pinus e dois tipos de WPCs com diferentes tipos de reforços, além da matriz polimérica, foram submetidos a ciclos de imersão em água e proliferação fúngica. Foram realizadas análises em relação a alterações no módulo de elasticidade dinâmico (MOE), o qual foi correlacionado ao dano gerado na integridade dos corpos de prova devido a umidade e ao crescimento das colônias de fungos, de forma comparativa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A madeira é um material poroso e hidrofílico, constituído por celulose, lignina e hemicelulose, ricos em grupos funcionais, como as hidroxilas, que interagem facilmente com moléculas de água presentes no ambiente, por meio de ligações de hidrogênio. Quando exposta à umidade ou à imersão, a madeira pode ter variações dimensionais em espessura, comprimento e largura (HOSSEINIHASHEMI *et al.*, 2016).

O teor de umidade também impacta diretamente no crescimento de fungos, que propicia o chamado decaimento fúngico, ou seja, uma diminuição das propriedades da madeira devido a degradação dos seus componentes estruturais causada pela ação metabólica e enzimática dos fungos. Devido a isso, tratamentos térmicos que reduzem a quantidade de hidroxilas (HOSSEINIHASHEMI *et al.*, 2016), como aqueles aplicados em autoclave são amplamente utilizados no Brasil, embora na maioria dos países do hemisfério Norte essas técnicas tenham sido gradativamente banidas devido a questões relacionadas à saúde e ao meio ambiente. Surge então a necessidade de se desenvolver alternativas técnica e economicamente viáveis para suplantarem a necessidade de tratamentos de madeiras maciças, especialmente aqueles que possam ser prejudiciais ao meio ambiente, à saúde e à sustentabilidade dos recursos naturais.

Enquanto as madeiras maciças podem ser degradadas continuamente por fungos em condições favoráveis, os WPCs podem apresentar uma alternativa interessante do ponto de vista de aumento da vida útil de partes expostas a intempéries. Desta forma, os WPCs contribuem significativamente com o desenvolvimento de novos processos de fabricação e produtos que tem como premissa a reciclagem de circuito fechado, ou seja, mesmo após vários ciclos de reciclagem, os materiais mantêm suas características e qualidades sem degradação substancial (BOLIN, 2011).

Considerando-se que a seção transversal dos WPCs pode estar exposta (Figura 1 e) absorvendo umidade, suas fibras naturais podem ser igualmente atacadas por fungos, que metabolizam e degradam os constituintes da madeira de reforço ao longo do tempo (MEYER;e BRISCHKE, 2015), levando ao decaimento fúngico, assim como nas madeiras maciças. Por volta de 30 a 60% do total de material em um WPC são compostos por madeira em diferentes formas, seja em pó, cavacos, fibras entre outras (ASHORI e NOURBAKHS, 2009). Além disso, variações no teor de umidade podem resultar na deterioração das propriedades físicas e mecânicas do compósito, causando trincas, fendilhamento ou empenamento, além de afetar negativamente a estabilidade estrutural como um todo.

Segundo a norma ASTM E1876 (ASTM, 2007), uma das formas de se avaliar efetivamente os efeitos ambientais e também do decaimento fúngico (LI *et al.*, 2016) é a utilização da técnica não destrutiva de excitação por impulso, obtendo-se o valor do MOE a partir das frequências naturais de vibração de um corpo de prova de geometria regular. Para isso, aplica-se um impacto mecânico de curta duração, seguido da captação da resposta acústica por um sensor piezoelétrico (SONELASTIC, 2025). Os principais fatores que reduzem os valores do MOE em madeiras maciças incluem o aumento do teor de umidade devido ao amortecimento promovido pela água; exposição às temperaturas acima de 60°C que aumentam a flexibilidade; baixa densidade e desalinhamento das fibras; decaimento fúngico que reduz a rigidez; micro trincas e fissuras internas, presença de nós e a direção de medição, sendo que o MOE é menor no modo transversal às fibras.

Já nos WPCs, esses fatores incluem o uso de madeiras menos densas e menor quantidade de reforço; uso de polímeros flexíveis na matriz do compósito; método de fabricação que influencia na orientação das fibras de reforço; níveis baixos de adesão entre o reforço e a matriz; degradação de propriedades tanto da matriz como do reforço devido a intempéries e degradação fúngica do reforço. Quanto maior o valor do MOE, maior a rigidez do material, indicando o quanto ele resiste à deformação sob carga. Assim, o MOE é uma propriedade chave para a obtenção de argumentos técnicos e científicos que permitam comparar diferentes materiais, destacando suas vantagens e desvantagens, fomentando o uso mais amplo dos WPCs em comparação às madeiras maciças.

3. MÉTODOS

Foram utilizados três tipos de corpos de prova prismáticos de madeira maciça: cipreste amarelo do Alasca (*Cupressus nootkatensis*), *Pinus taeda* de alta e de baixa densidade (Figura 1 a, b, c). Além disso, foram utilizados dois tipos de WPCs com reforço de madeira na forma de pellets e maravalha, juntamente com corpos de prova (CPs) da matriz polimérica sem reforço de madeira (Figura 1 d, e, f), para comparar os efeitos dos diferentes tipos de reforço.

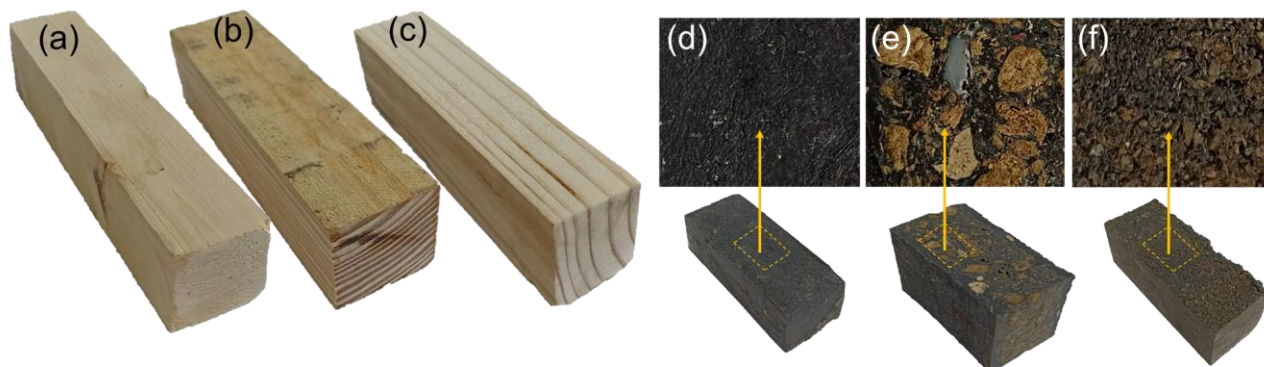


Figura 1: (a) Cipreste amarelo do Alasca, (b) *Pinus taeda* de alta densidade, (c) *Pinus taeda* baixa densidade, (d) Matriz polimérica sem reforço, (e) WPC com 30% de pellets e (f) WPC com 30% de maravalha.

Fonte: os autores (2025).

Na Tabela 1 são descritas algumas propriedades dos CPs, sendo que as medidas foram realizadas no momento do recebimento, em condições ambiente.

Corpos de prova	Umidade à seco (%)	Volume inicial (cm ³)	Massa inicial (g)	Densidade inicial (g/cm ³)
Cipreste amarelo do Alasca	11,2 ± 0,1	162	81,70	0,49 ± 0,1
<i>Pinus Taeda</i> de alta densidade	13,8 ± 0,1	218	150,58	0,69 ± 0,1
<i>Pinus Taeda</i> de baixa densidade	12,2 ± 0,1	226	108,48	0,47 ± 0,2
Matriz polimérica	14,9 ± 0,1	110	119,94	1,11 ± 0,2
WPC pellets	15,8 ± 0,1	137	148,39	1,1 ± 0,1
WPC maravalha	13,9 ± 0,1	212	209,11	0,97 ± 0,1

Tabela 1: Detalhamento dos corpos de prova utilizados nos experimentos.

Fonte: os autores (2025).

Os compósitos madeira-plástico (WPCs) foram produzidos a partir da mistura e extrusão (150-180°C) de uma matriz polimérica com 30% de reforço de madeira. A matriz polimérica é composta de resíduos diversos de tipos de polímeros da indústria de injeção, polipropileno, PET, resíduos da indústria de fiação elétrica, polímeros diversos multi-camada e PVC. Já o reforço é composto de resíduos de madeiras diversas em formato de pellets e maravalha. Pellets são pequenos cilindros de resíduo moído compactado e maravalha são fibras curtas e finas.

Cortou-se com disco de serra de carbeto de tungstênio os CPs nas dimensões aproximadas de 11 x 3 x 3 cm, sendo a medida maior paralela às fibras das madeiras maciças e perpendicular ao sentido de extrusão dos WPCs. Cada CP foi medido com paquímetro 0,05 mm na largura, comprimento e espessura. Determinou-se a massa dos CPs com balança Marte científico, modelo AD3300 (precisão de 0,01 g). O teor de umidade foi medido com um hidrômetro compacto, marca Gann.

Realizou-se dois ciclos de imersão completa em água destilada durante 24 e 48 horas, sendo que a massa das amostras foi aferida após cada ciclo de imersão. Após o ciclo de imersão, as amostras

foram acondicionadas em ambiente fechado e úmido durante 30 dias e então fotografadas, para evidenciar o crescimento de fungos.

Para as análises de Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOE), foi utilizado um equipamento ATCP Engenharia Física, modelo Sonelastic®, com a técnica de excitação por impulso (ASTM, 2007), medindo na direção transversal, após 60 dias. Um tratamento matemático foi aplicado pelo *software* Sonelastic® (Figura 3 c) no sinal medido para a obtenção do espectro de frequências (COSSOLINO e PEREIRA, 2010). A partir das frequências, dimensões, geometria e massa dos CPs obteve-se o MOE.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 é mostrado o gráfico comparativo do teor de umidade para as diferentes madeiras maciças, para a matriz polimérica e para os WPCs, em função do tempo de imersão. O cipreste amarelo do Alasca apresentou o menor teor de umidade inicial (11,2%), indicando que é naturalmente mais seco. Os dois tipos de *Pinus taeda* de alta e baixa densidade apresentam valores iniciais de 15,4% e 13,8%, respectivamente, sugerindo uma maior capacidade de absorver e reter água naturalmente.

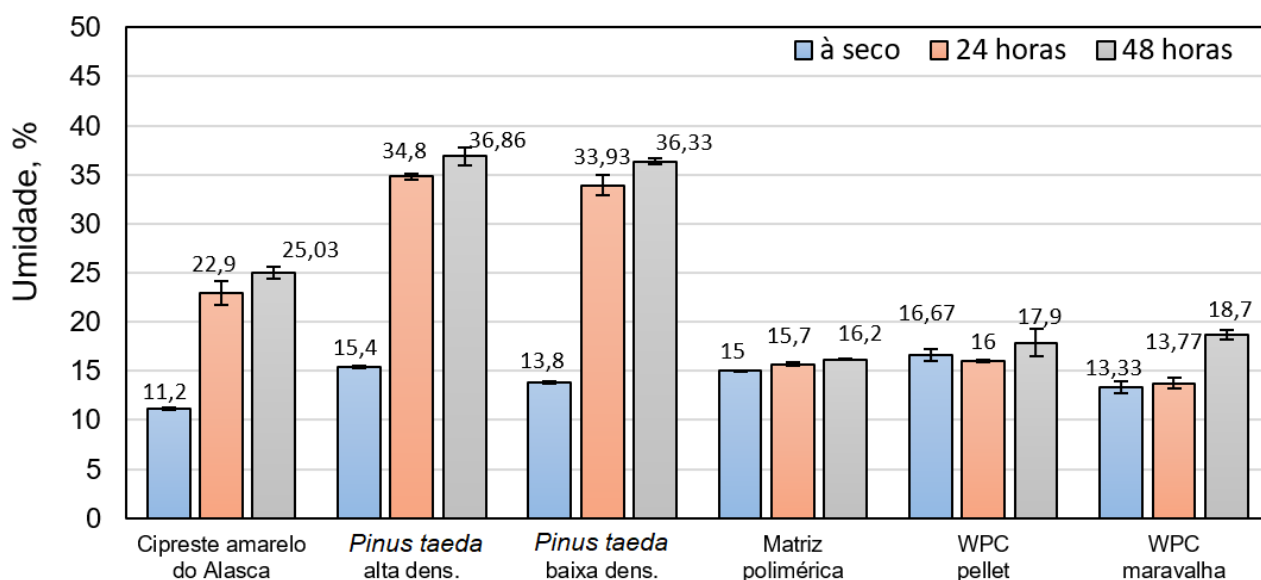


Figura 2: Teor de umidade para as madeiras maciças, matriz polimérica e WPCs, em função do tempo de imersão. Fonte: os autores (2025).

Após 24 h de imersão o cipreste aumentou o teor de umidade para 22,9%. Já o *Pinus taeda* de alta densidade aumentou para 34,8%, enquanto que o de baixa densidade foi para 33,93%. Esses resultados sugerem que o cipreste apresente maior resistência à absorção rápida de umidade em relação aos pinus. O ganho percentual de umidade após 48 h de imersão foi de 2,13% para o cipreste, 2,06% para o pinus de alta densidade e 2,4% para o de baixa densidade, mostrando que a maior taxa de absorção acontece nas primeiras 24 horas. Os pinus absorveram quase 10% a mais de água que o cipreste e a densidade tem pouca influência na capacidade de absorção de água quando os CPs de pinus estão em imersão.

Os resultados da Figura 2 indicam que o teor de umidade inicial para a matriz polimérica (15,0%) e para o WPC com pellets (16,67%) é similar, levemente maiores que o WPC com maravalha (13,33%). Isso sugere que a matriz polimérica reciclada tem alguma capacidade de retenção de umidade.

Após as 24h de imersão, o teor de umidade na matriz aumentou 0,7%, no WPC com pellets manteve-se em torno de 16% (dentro do erro experimental) e no WPC com maravalha aumentou 0,44%. Todos os materiais apresentaram menos de 1% de absorção de água, o que demonstra

resistência à umidade superior às madeiras maciças, dificultando a penetração rápida da água. A variação após 48 h de imersão indica que a matriz polimérica tem o comportamento mais estável, conforme se espera para o comportamento geral de um polímero, aumentando 0,5% em relação às 24 h. Contudo, a introdução de pellets e maravalha reflete as diferenças na morfologia e distribuição dos reforços, fazendo com que houvesse absorção adicional de 1,9% e 4,9% de umidade, respectivamente. O reforço de maravalha promoveu uma absorção maior de água a partir das 24 h, indicando que a forma mais fibrosa e distribuída dos resíduos de madeira cria canais que facilitam a penetração da água com o tempo. Desta forma, o reforço de pellets favorece a resistência à absorção de água em comparação à maravalha.

Após 30 dias em contato com umidade os CPs foram fotografados, como mostra a Figura 3. Observa-se que a madeira cipreste amarelo do Alasca (Fig. 4 a) mostrou alta resistência ao ataque fúngico, sem crescimento visível de colônias. Esse comportamento pode ser atribuído à presença natural de compostos antifúngicos em espécies de ciprestes (Okino *et al.*, 2010). Entretanto, ao se comparar a coloração da madeira antes e depois do ensaio imersão (Figura 1 a em comparação à Figura 4 a), reforça-se a hipótese de penetração profunda de água, que alterou a refratividade da luz e/ou gerou oxidação de compostos, tornando-a mais escura.

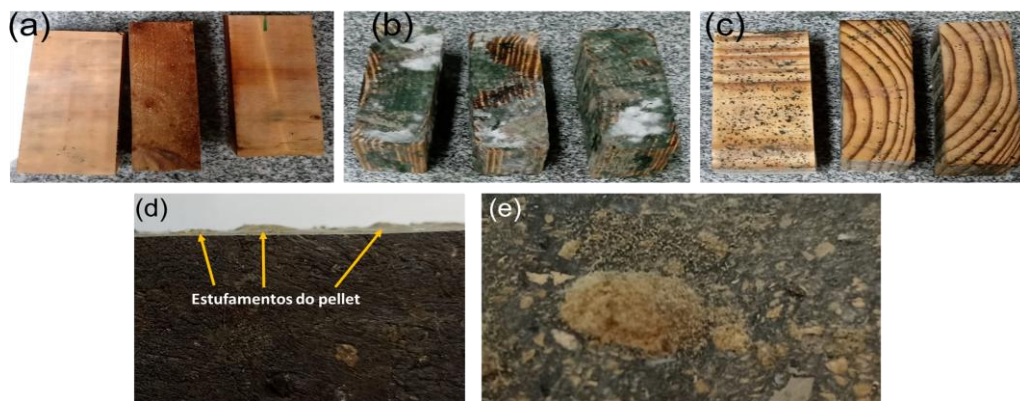


Figura 3: Aspecto dos CPs após 30 dias em contato com alta umidade (a) cipreste amarelo do Alasca, (b) *Pinus taeda* de alta densidade e (c) *Pinus taeda* de baixa densidade, (d) WPC com reforço de pellets com estufamento e (e) crescimento fúngico no reforço.

Fonte: os autores (2025).

O *Pinus taeda* de alta densidade exibiu intenso desenvolvimento fúngico (branco e pardo) em todas as superfícies, indicando maior suscetibilidade à colonização (Figura 3 b). A sua maior densidade, conferida pelo maior teor de lignina, não impediu a infestação, possivelmente devido à disponibilidade de nutrientes ou à retenção de umidade suficiente para favorecer o crescimento microbiano. Segundo Schilling e colaboradores (2021) fungos de podridão branca, como por exemplo *Phialocephala dimorphospora*, um Ascomycota, degradam os três principais componentes estruturais da madeira, sendo que algumas espécies priorizam a degradação da lignina enquanto outros degradam os componentes juntos. Os fungos de podridão parda (*Gloeophyllum trabeum* ou *Fomitopsis pinicola*, por exemplo, ambos Basidiomycota) degradam celulose e hemicelulose, mas não ou apenas parcialmente a lignina (Schilling *et al.*, 2021).

O *Pinus taeda* de baixa densidade também apresentou crescimento fúngico pardo, mas em quantidade menor e distribuição esparsa (Figura 3 c), principalmente ao longo das fibras (seção longitudinal) e nas regiões claras dos anéis de crescimento (lenho inicial), o que sugere que essas regiões menos densas e menos ricas em lignina, oferecem condições mais favoráveis ao crescimento dos fungos pardos, que se alimentam preferencialmente de celulose e hemicelulose.

Na amostra da matriz polimérica a inspeção visual não revelou crescimento de fungos, o que indica boa resistência biológica. Também no WPC com maravalha não se verificou a formação de colônias, o que pode ser atribuído à distribuição uniforme e ao pequeno tamanho das fibras de maravalha. Em contraste, o WPC com pellets apresentou estufamento dos reforços (Figura 3 d) e colonização por fungos (Figura 3 e), concentrados na seção transversal, perpendicular à direção de extrusão.

Devido ao maior tamanho e à distribuição irregular dos pellets, mas que ficam confinados principalmente no interior do compósito, formou-se regiões vulneráveis nas superfícies de corte dos CPs, facilitando a colonização fúngica.

Quando a madeira está seca, as paredes celulares estão firmes e o material é relativamente rígido. Ao entrar em contato com a água, ocorre sua penetração nas paredes celulares, separando os componentes celulose, hemicelulose e lignina, rompendo ou afrouxando as ligações de hidrogênio, diminuindo a coesão da estrutura celular e aumentando a deformabilidade da estrutura lignocelulósica. A avaliação do MOE foi realizada para quantificar essa diminuição, conforme mostrado na Figura 4. Quanto menor o valor do MOE, menor a rigidez do material, o que significa que ele apresenta menor resistência à deformação sob carga.

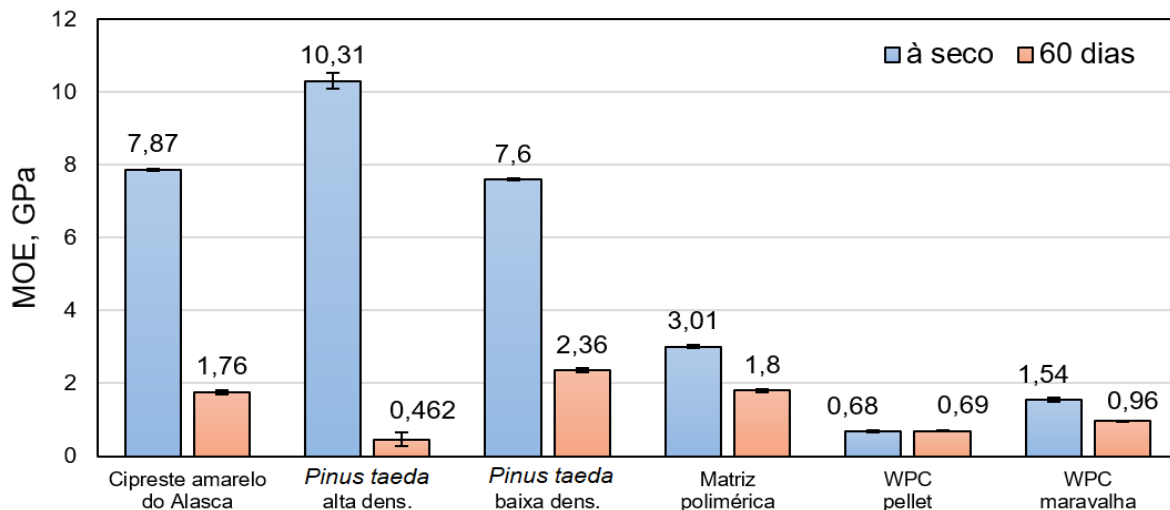


Figura 4: Módulo de Elasticidade para as madeiras maciças, matriz polimérica e WPCs, antes e após ataque fúngico. Fonte: os autores (2025).

No cipreste amarelo do Alasca houve queda de 78% no MOE, saindo de 7,87 para 1,76 GPa, atribuindo-se o fenômeno exclusivamente ao efeito da absorção de umidade. Como resultado, houve uma redução significativa na rigidez transversal, onde a madeira se torna mais flexível, menos resistente e com maior capacidade de amortecer vibrações. Para o *Pinus taeda* de alta densidade os valores do MOE caíram ~95% e para o de baixa densidade 69%. Embora a quantidade de água absorvida pelos dois tipos de pinus tenha sido semelhante, a estrutura inicial mais rígida do pinus de alta densidade promoveu uma perda relativa mais acentuada. Além disso, a susceptibilidade ao ataque de fungos brancos, que se alimentam de lignina e introduzem descontinuidades superficiais, também podem ter contribuído para a redução no MOE no pinus de alta densidade. A colonização esparsa de fungos pardos no pinus de baixa densidade resultou em menor impacto nos valores medidos.

Mesmo sendo composta por resíduos de diferentes plásticos, a matriz polimérica apresentou redução significativa de MOE (~40%), devido a absorção de água em defeitos como porosidade e regiões amorfas presentes em polímeros reciclados. Não houve fungos visíveis, portanto a perda de rigidez está associada à ação da umidade, especialmente pela natureza heterogênea da matriz. O WPC de maravalha apresentou MOE inicial menor (1,54 GPa), o que é esperado pela redução de fase polimérica contínua e presença de fibras finas e distribuídas. A queda de ~38% foi similar à da matriz, sugerindo que a maravalha distribuída por toda a superfície externa, facilitou a entrada de umidade por criar canais, o que explica a maior queda na rigidez. Embora os pellets tenham apresentado estufamento localizado e colonização fúngica visível na seção transversal, sua localização interna e espaçada no interior da matriz polimérica limitou a absorção de água e, conseqüentemente, seu impacto nos valores medidos do MOE.

5. CONCLUSÕES

A madeira cipreste amarelo do Alasca (*Cupressus nootkatensis*) apresentou menor absorção de umidade e susceptibilidade a ataques fúngicos em comparação ao *Pinus taeda*.

A matriz polimérica e os WPCs com reforço apresentaram resistência à água muito superior às madeiras maciças e apenas o WPC com pellets foi suscetível a fungos nas superfícies de corte.

A redução do módulo de elasticidade (MOE) do cipreste amarelo do Alasca foi 78%, para o pinus de alta e baixa densidade 95% e 69%, respectivamente.

A matriz reciclada e o WPC com maravalha tiveram queda de aproximadamente 40%, e em contrapartida, o WPC com pellets, mesmo apresentando sinais de colonização fúngica localizada, teve comportamento mecânico estável, o que destaca o papel da morfologia dos reforços na proteção da matriz e na retenção das propriedades mecânicas.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que é viável recomendar o uso de WPCs como substitutos parciais da madeira maciça em aplicações não estruturais, especialmente em ambientes sujeitos à umidade, como rodapés, batentes, revestimentos e mobiliário externo protegido.

O WPC com pellets demonstrou integridade mecânica após imersão prolongada e apesar da colonização fúngica superficial, teve desempenho superior às madeiras maciças testadas, inclusive ao cipreste do Alasca.

No desenvolvimento deste trabalho ficou evidenciada a necessidade de permanência durante mais tempo das amostras ao ambiente úmido bem como um número maior de amostras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHORI, A.; NOURBAKHS, A. Characteristics of wood-fiber plastic composites made of recycled materials. **Waste Management**, v. 29, p. 1291–1295, 2009.

ASTM International. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration; **ASTM E 1876**. 2007.

BAHRAMIAN, M.; YETILMEZSOY, K. Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). **Energy and Buildings**, n. 219, p. 109917, 2020.

BOLIN, C. A.; SMITH, S. Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6–7, p. 620–629, 2011.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. Informativo Técnico – **ATCP Engenharia Física**, 2010.

HOSSEINIHASHEMI, S. K.; ARWINFAR, F.; NAJAFI, A.; NEMLI, G.; AYRILMIS, N. Long-term water absorption behavior of thermoplastic composites produced with thermally treated wood. **Measurement**, v. 86, p. 202–208, 2016.

JONES, D.; BRISCHKE, C. (Ed.). Wood as bio-based building material. In: Performance of Bio-based Building Materials. Cambridge: **Woodhead Publishing**, pp. 21–96, 2017.

LI, A.; VAN D. B. J.; DE W. I.; DEFOIRDT, N.; DHAENE, J.; DIERICK, M.; SOL, H.; VAN A, J. Relating MOE decrease and mass loss due to fungal decay in plywood and MDF using resonalyser and X-ray CT scanning. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 110, p. 113-120, 2016.

LI, H.; ZHANG, H.; FENG, Z.; ZHAO, J.; CHEN, H.; GUO, X.; WANG, T.; LIU, Yang. Climate change influences on vegetation photosynthesis in the Northern Hemisphere. **Journal of Environmental Management**, v. 380, p. 124976, 2025.

LOCK, P.; LEGG, P.; WHITTLE, L.; BLACK, S. Global Outlook for Wood Markets to 2030: Projections of future production, consumption and trade balance. **Canberra**: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences, 2021.

MEYER, L.; BRISCHKE, C. Fungal decay at different moisture levels of selected European-grown wood species. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 103, p. 23–29, set. 2015.

OKINO, E. Y. A.; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. da Silva; MELO, J. E.; CORADIN, V. T. R.; SOUZA, Mário Rabelo de; TEIXEIRA, Divino Eterno; SOUSA, Maria Eliete de. Technological characterization of Cupressus spp. wood. **Floresta e Ambiente**, v. 17, n. 1, p. 1–11, 2010.

SCHILLING, M.; FARINE, S.; PÉROS, J-P.; BERTSCH, C.; GELHAYE, E. Wood degradation in grapevine diseases. In: MOREL-ROUHIER, Mélanie; SORMANI, Rodnay (ed.). **Advances in Botanical Research**. London: Academic Press, V. 99, cap. 6, pp. 175–207, 2021.

SONELASTIC. **Determinação dos módulos elásticos de madeiras e derivados empregando a Técnica de Excitação por Impulso**. Disponível em: <https://www.sonelastic.com/pt/fundamentos/bases/ensaio-modulos-elasticos-madeiras.html>. Acesso em: 27 abr. 2025.

SVATOŠ-RAŽNJEVIĆ, H.; OROZCO, L.; MENGES, A. Advanced timber construction industry: a review of 350 multi-storey timber projects from 2000–2021. **Buildings**, v. 12, n. 4, p. 404, 2022.

TOGHYANI, A.; MATTHEWS, S.; VARIS, J. Forming challenges of extruded wood plastic composite products in a post-production process. **Procedia CIRP**, v. 93, p. 502–507, 2020.

VOULPIOTIS, K.; KÖHLER, J.; JOCKWER, R.; FRANGI, A. A holistic framework for designing for structural robustness in tall timber buildings. **Engineering Structures**, v. 227, p. 111432, 2021.

ZHOU, H.; LI, W.; HAO, X.; ZONG, G.; YI, X.; XU, J.; OU, R.; WANG, Q. Recycling end-of-life WPC products into ultra-high-filled, high-performance wood fiber/polyethylene composites: a sustainable strategy for clean and cyclic processing in the WPC industry. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 1–14, 2022.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Millpar S.A. e à empresa Replastic, pela doação de amostras e empréstimo de equipamentos que viabilizaram o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecemos também ao apoio institucional no fornecimento da infraestrutura e apoio no desenvolvimento desta pesquisa.