

**EFEITO DO TEOR DE FIBRA NO DESEMPENHO MECÂNICO DE
COMPÓSITOS DE PLA E PP REFORÇADOS COM MICROFIBRAS DE
BAMBU**

LAURA DE CASTRO SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

**EFEITO DO TEOR DE FIBRA NO DESEMPENHO
MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE PLA E PP REFORÇADOS
COM MICROFIBRAS DE BAMBU**

LAURA DE CASTRO SILVA

ORIENTADOR:

Prof. Dr. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

Brasília, maio de 2026.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, LAURA DE CASTRO

EFEITO DO TEOR DE FIBRA NO DESEMPENHO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE PLA E PP REFORÇADOS COM MICROFIBRAS DE BAMBU.

62 p., 210 x 297mm (EFL/FT/UnB, Mestre, Ciências Florestais, 2026)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal.

1. Fibras vegetais

2. Biocompósitos

3. Bambu

4. PLA

5. PP

6. Teor de Fibra

I. EFL/FT/UnB

REFERÊNCIA

SILVA, L.d.C. (2026). Efeito do Teor de Fibra no Desempenho Mecânico de Compósitos de PLA e PP Reforçados com Microfibras de Bambu.

Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 62 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: LAURA DE CASTRO SILVA

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO:

EFEITO DO TEOR DE FIBRA NO DESEMPENHO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE PLA E PP REFORÇADOS COM MICROFIBRAS DE BAMBU.

GRAU / ANO: Mestre / 2026

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir a dissertação de mestrado e para emprestar ou vender somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Laura de Castro Silva

lauracastros@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Nesses pouco mais de dois anos de dedicação, foram imensamente importantes as pessoas que estiveram ao meu lado nessa caminhada. Assim, deixo meus mais sinceros agradecimentos à minha mãe, à minha avó e à minha irmã, minha família, sem a qual nada disso seria possível. Espero poder retribuir sempre, por todo o esforço e dedicação. Amo muito vocês.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi, pelos ensinamentos, pela confiança e por todo o apoio do início ao fim. Este trabalho só foi possível graças à sua ótima orientação.

Às minhas colegas de curso Evelyn Bianca Almeida Vaz e Julia de Oliveira Carneiro, que foram fundamentais neste percurso, desde o início da graduação até o fim do mestrado e, se tudo der certo, daqui em diante também, obrigada pela parceria, por toda a ajuda e incentivo.

Ao meu namorado Lucas Rabelo Andrade, por todo o apoio e companheirismo, obrigada por tornar tudo melhor.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, à Engenharia Florestal, ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília (UnB) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), agradeço pelas oportunidades de aprendizado, pela formação proporcionada e, em especial, à FINEP, pelo apoio à aquisição dos equipamentos utilizados nesta pesquisa, fundamentais para a sua execução.

A todos vocês, meu muito obrigada!

RESUMO

O presente estudo investigou o efeito do teor de microfibras de bambu (FB) no desempenho mecânico e físico de compósitos produzidos com ácido polilático (PLA) e polipropileno (PP). Inicialmente, as fibras de bambu foram avaliadas em quatro tamanhos de partícula (300, 200, 90 e 50 μm) por meio de análise dinâmico-mecânica (DMA), a fim de identificar o tamanho de partícula mais adequado quanto ao comportamento viscoelástico. Observou-se que a granulometria da microfibras com menor tamanho médio de partícula (50 μm) apresentou desempenho mais favorável. Posteriormente, as fibras de 50 μm foram combinadas com os polímeros PLA e PP em diferentes proporções polímero/fibra, correspondentes a 85%/15%, 70%/30% e 55%/45% em massa. Os compósitos resultantes foram preparados por meio de processos de extrusão e moldagem por injeção e avaliados por DMA, ensaios de flexão, dureza e absorção de água. A análise estatística foi realizada por meio de ANOVA, seguida do teste de Tukey (5%) para comparação entre os teores de fibra. Adicionalmente, foi aplicado um delineamento fatorial 2×4 , considerando a matriz e o teor de microfibras como fatores, a fim de avaliar seus efeitos e interações. Os resultados mostraram que a incorporação de microfibras promoveu um aumento no módulo de armazenamento em ambas as matrizes. Observou-se um aumento estatisticamente significativo no módulo de flexão com teores de fibra de 30% e 45% para ambas as matrizes. Com 45% de fibra, o módulo de flexão do PLA aumentou aproximadamente 43% (atingindo ~ 5900 MPa), enquanto o do PP praticamente dobrou (atingindo ~ 2658 MPa). Por outro lado, a resistência à flexão manteve-se estável no PLA, mas diminuiu significativamente no PP (caindo para ~ 45 MPa) com 45% de fibra. Quanto à dureza superficial, ambos os compósitos apresentaram uma tendência de aumento não significativa com a adição de fibras, atingindo valores médios máximos de ~ 4481 N/mm para o PLA e ~ 2334 N/mm para o PP. A absorção de água em 24 horas manteve-se baixa e estável no PP, mas aumentou acentuadamente no PLA com 45% de reforço. Os compósitos apresentaram comportamento semelhante com o aumento do teor de fibra, independentemente do tipo de matriz, no que diz respeito ao módulo de flexão e à dureza, ao passo que foram observadas diferenças estatisticamente significativas na resistência à flexão.

Palavras-chave: fibras vegetais, biocompósito, bambu, PLA, PP, teor de fibra.

ABSTRACT

The present study investigated the effect of bamboo microfiber (BF) content on the mechanical and physical performance of composites produced with polylactic acid (PLA) and polypropylene (PP). Initially, the bamboo fibers were evaluated in four particle sizes (300, 200, 90, and 50 μm) through dynamic mechanical analysis (DMA) in order to identify the most suitable particle size regarding viscoelastic behavior. It was observed that the microfiber granulometry with the smallest average particle size (50 μm) presented a more favorable performance. Subsequently, the 50 μm fibers were combined with the PLA and PP polymers in different polymer/fiber proportions, corresponding to 85%/15%, 70%/30%, and 55%/45% by mass. The resulting composites were prepared through extrusion and injection molding processes and evaluated by DMA, flexural tests, hardness, and water absorption. Statistical analysis was performed using ANOVA, followed by Tukey's test (5%) for comparison among fiber contents. Additionally, a 2×4 factorial design was applied, considering the matrix and microfiber content as factors, in order to evaluate their effects and interactions. The results showed that the incorporation of microfibers promoted an increase in the storage modulus in both matrices. A statistically significant increase in the flexural modulus was observed with fiber contents of 30% and 45% for both matrices. With 45% fiber, the flexural modulus of PLA increased by approximately 43% (reaching ~ 5900 MPa), while that of PP practically doubled (reaching ~ 2658 MPa). On the other hand, flexural strength remained stable in PLA but decreased significantly in PP (dropping to ~ 45 MPa) with 45% fiber. Regarding surface hardness, both composites showed a non-significant increasing trend with the addition of fibers, reaching maximum average values of ~ 4481 N/mm for PLA and ~ 2334 N/mm for PP. The 24-hour water absorption remained low and stable in PP but increased sharply in PLA with 45% reinforcement. The composites exhibited similar behavior with increasing fiber content, regardless of the matrix type, with respect to flexural modulus and hardness, whereas statistically significant differences were observed in flexural strength.

Keywords: vegetable fibers, biocomposites, bamboo, PLA, PP, fiber content.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REFERÊNCIAL TEÓRICO	14
2.1. Características e Propriedades das Fibras de Bambu.....	14
2.2. Vantagens do Uso da Fibra de Bambu.....	16
2.3. Compósitos Reforçados com Fibras Vegetais.....	17
2.4. Matrizes Termoplásticas	18
2.4.1. Ácido polilático (PLA).....	18
2.4.2. Polipropileno (PP).....	19
2.5. Influência do Tamanho da Partícula e da Proporção de Fibra nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Reforçados com Fibra de Bambu.....	20
2.6. Métodos de Processamento	22
2.6.1. Extrusão e injeção	22
2.7. Desempenho Mecânico dos Compósitos Reforçados com Fibras Vegetais	24
2.7.1. Resistência a flexão.....	24
2.7.2. Dureza	25
2.7.3. Análise Mecânica Dinâmica	25
2.7.4. Fatores que Influenciam o Desempenho Mecânico dos Compósitos de Fibras Vegetais.....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1. Materiais.....	27
3.2. Preparação dos Compósitos	28
3.3. Caracterização dos Compósitos	31
3.3.1. Análise Mecânica Dinâmica – DMA	31
3.3.2. Ensaio de Flexão	32
3.3.3. Dureza	33
3.3.4. Absorção de Água.....	33
3.4. Análise.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. Efeito do Tamanho da Partícula de Microfibra de Bambu	34
4.2. Efeito do Teor de Microfibra de Bambu	39
4.3. Propriedades Mecânicas e Físicas dos Compósitos	42
4.4. Taxa de Absorção de Água	46
4.5. Análise Fatorial das Propriedades Mecânicas dos Compósitos	47
5. CONCLUSÕES	51
6. REFERÊNCIAS	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relação entre a resistência à flexão do compósito PP e a fração de volume e o tamanho de partícula de SBT e SBH. Fonte: Martijanti et al., 2021.....	21
Figura 2. Propriedades de flexão de biocompósitos PLA/Bambu com diferentes distribuições de tamanho de partícula. Fonte: Zhang <i>et al.</i> (2020).	22
Figura 3. Extrusão e moldagem por injeção para produzir peças baseadas em compósitos. Fonte: Pacheco (2023).	24
Figura 4. Extrusora de dupla rosca co-rotante.....	29
Figura 5. Corpos de prova com diferentes proporções de polímero e microfibras de bambu (FB) confeccionados para a segunda fase: (a) compósitos de matriz ácido polilático (PLA) reforçados com FB e (b) compósitos de matriz polipropileno (PP) reforçados com FB.	31
Figura 6. Corpo de prova na Análise Mecânica Dinâmica (DMA) no modo <i>3-point bending</i> .	32
Figura 7. Módulo de armazenamento (E') dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com 15% de microfibras de bambu, em diferentes granulometrias de fibra (μm): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).....	36
Figura 8. Módulo de Perda (E'') dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com 15% de microfibras de bambu, em diferentes granulometrias de fibra (μm): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).....	37
Figura 9. Tan delta ($\tan \delta$) dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com 15% de microfibras de bambu, em diferentes granulometrias de fibra (μm): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).....	38
Figura 10. Módulo de armazenamento (E') dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com diferentes teores de microfibras de bambu (FB): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).	40
Figura 11. Módulo de perda (E'') dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com diferentes teores de microfibras de bambu (FB): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).	41

Figura 12. Tan delta ($\tan \delta$) dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com diferentes teores de microfibra de bambu (FB): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).42

Figura 13. Módulo de flexão a elasticidade (E_f) de compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com microfibra de bambu (FB) em função do teor de microfibra: (a) compósitos com matriz de ácido polilático (PLA); (b) compósitos com matriz de polipropileno (PP). Médias seguidas de letras iguais para a mesma matriz não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).43

Figura 14. Resistência a flexão (σ_f) de compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com microfibra de bambu (FB) em função do teor de microfibra: (a) compósitos com matriz de ácido polilático (PLA); (b) compósitos com matriz de polipropileno (PP). Médias seguidas de letras iguais para a mesma matriz não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).45

Figura 15. Dureza (N/mm) de compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com microfibra de bambu (FB) em função do teor de microfibra: (a) compósitos com matriz de ácido polilático (PLA); (b) compósitos com matriz de polipropileno (PP). Médias seguidas de letras iguais para a mesma matriz não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).46

Figura 16. Taxa de absorção de água (%) de compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com microfibra de bambu (FB) em função do teor de microfibra: (a) compósitos com matriz de ácido polilático (PLA) e (b) compósitos com matriz de polipropileno (PP). Médias seguidas de letras iguais para a mesma matriz não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).47

Figura 17. Comparação das propriedades de flexão dos compósitos de PLA e PP em função do teor de fibra de bambu (FB): (a) Módulo de flexão a elasticidade; (b) Resistência à flexão.50

Figura 18. Comparação da dureza dos compósitos de PLA e PP em função do teor de fibra de bambu (FB): (a) Módulo de flexão a elasticidade; (b) Resistência à flexão.51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades químicas, físicas e mecânicas das fibras celulósicas naturais ou de origem vegetal. Fonte: Zhang <i>et al.</i> , 2018; Shahani <i>et al.</i> , 2021	15
Tabela 2. Propriedades físicas do ácido polilático. Fonte: Tsuji, 2016 citado por Ranakoti <i>et al.</i> , 2022.....	19
Tabela 3. Propriedades físico-químicas das fibras de bambu em diferentes faixas granulométricas.	28
Tabela 4. Parâmetros de extrusão dos compósitos utilizando PLA e PP.	29
Tabela 5. Parâmetros de extrusão dos compósitos utilizando PLA e PP.	30
Tabela 6. Formulações dos compósitos poliméricos avaliados na primeira fase.	30
Tabela 7. Diferentes composições (polímero/fibra) para produção dos compósitos.	30
Tabela 8. Resumo da Análise de Variância (ANOVA) fatorial para as Propriedades de Flexão e Dureza dos Compósitos.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Taxa de Absorção de Água

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – American Society for Testing and Materials

DMA – Análise Mecânica Dinâmica

E' – Módulo de Armazenamento

E'' – Módulo de Perda

E_f – Módulo de Elasticidade à Flexão

FB – Fibra de Bambu

Hm – Módulo de Dureza

PLA – Ácido Polilático

PP – Polipropileno

Tan δ – Fator de Amortecimento (Tan delta)

Tg – Temperatura de Transição Vítrea

σ_f – Resistência à Flexão

1. INTRODUÇÃO

Em um cenário que demanda cada vez mais avanços socioeconômicos e tecnológicos para reduzir o uso de recursos não renováveis, as fibras vegetais têm se destacado como uma alternativa versátil. De origem renovável e biodegradáveis esse tipo de material têm adquirido relevância industrial, possibilitando a geração de diversos bioprodutos com menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida, além de representar uma alternativa em substituição a materiais sintéticos derivados do petróleo (Zuffo, Aguilera e Marques, 2024a).

Além da fabricação de artefatos como objetos domésticos e vestuário, a indústria tem reconhecido o potencial das fibras vegetais em setores como o automotivo, a construção civil e a nanotecnologia. Esse potencial é evidenciado pelo aumento significativo do uso de fibras vegetais em biopolímeros, biofilmes e, especialmente, por meio do desenvolvimento de compósitos poliméricos (Bledzki, Reihmane e Gassan, 1996; Zárate, Aranguren e Reboredo, 2000; Gavrilesco *et al.*, 2009; Le Guen *et al.*, 2016; Da Costa, Ratti e Del Curto, 2014; Zuffo, Aguilera e Marques, 2024b)

Nesse contexto, destaca-se a ampla variedade de fibras vegetais existentes e a possibilidade de associá-las a diferentes polímeros, resultando em compósitos com propriedades e aplicações diversas. Os compósitos de fibras vegetais têm possibilitado a criação de materiais que combinam as propriedades dos termoplásticos com a sustentabilidade das fibras vegetais, essa tecnologia contribui para a redução do uso de plástico na fabricação de compósitos, substitui fibras sintéticas de origem fóssil, diminui o consumo de energia no processo produtivo, melhora a biodegradabilidade do material final e compensa, ao menos parcialmente, as emissões de CO₂ associadas à produção. Além disso, auxilia na redução da dependência de recursos não renováveis, em direção ao desenvolvimento sustentável, ao ampliar o uso de matérias-primas de origem vegetal (Neto e Pardini, 2021a).

Os compósitos são formados pela combinação de dois ou mais diferentes que reúnem características desejáveis que seus constituintes não possuem isoladamente. Em geral, os compósitos de fibras vegetais consistem em uma matriz polimérica termoplástica e um reforço de fibra de origem vegetal. Assim, o material apresenta a aparência e a rigidez das fibras vegetais combinadas com a tenacidade e a processabilidade do plástico (Jiang *et al.*, 2018). Por meio dessa combinação, esses compósitos oferecem benefícios como bom isolamento térmico e acústico, biodegradabilidade, resistência à deformação ou fissuração, aparência natural esteticamente agradável e a possibilidade de fabricação com custos iniciais baixos em

comparação materiais estruturais tradicionais, além de menor consumo de energia (Jiang *et al.*, 2018; Mital'ová, Mital' e Berladir, 2024).

O desempenho dos compósitos de fibras vegetais depende do tipo de conteúdo vegetal e da matriz polimérica utilizada, considerando as características específicas dessas matérias-primas. Algumas desvantagens e limitações incluem a incompatibilidade entre a matriz polimérica e o reforço vegetal, a significativa variabilidade nas propriedades mecânicas, baixas temperaturas de processamento, baixa estabilidade dimensional e propriedades mecânicas moderadas quando comparadas a materiais estruturais tradicionais (Neto e Pardini, 2021a).

Diante das possibilidades tecnológicas e das vantagens desses materiais, é essencial estudar os aspectos que impactam seu desempenho, como aqueles relacionados à compatibilidade matriz-fibra, ao aprimoramento da estabilidade dimensional e das propriedades mecânicas, bem como à otimização dos processos industriais voltados à preservação das características e ao aumento da interação entre as matérias-primas, a fim melhorar e expandir as aplicações desses compósitos.

Dentre a grande variedade de fibras vegetais utilizadas em compósitos, o bambu reúne algumas das características mais notáveis em relação a esse tipo de material. Produtos derivados do bambu podem armazenar carbono por longos períodos e manter uma baixa, ou até neutra, impacto de carbono ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, uma mesma área de floresta de bambu pode liberar cerca de 35% mais oxigênios do que uma floresta convencional. Essa capacidade de crescimento rápido, associada à alta eficiência de sequestro de carbono, torna o bambu uma matéria-prima promissora. Assim, a fibra de bambu se mostra um material versátil, capaz de reduzir emissões de gases de efeito estufa ao substituir plásticos, concreto e aço, que consomem muita energia e emitem grandes quantidades de poluentes (Xu, D. *et al.*, 2023a).

No que se refere aos polímeros mais promissores para compósitos reforçados com fibra de bambu, destacam-se o ácido polilático (PLA) e o polipropileno (PP) (Doak, 1986; Fornari Junior, 2017). O PP, um termoplástico de origem fóssil, é amplamente valorizado por sua leveza, resistência química e excelente processabilidade por métodos industriais como moldagem por injeção e extrusão. Suas aplicações vão desde embalagens até componentes estruturais complexos. Quando reforçado com fibras naturais como o bambu, o PP apresenta melhorias significativas nas propriedades do compósito, ampliando seu uso nos setores de construção civil e automotivo (Fornari Junior, 2017; Jr e Rethwisch, 2020a; Mohanty, Misra e Drzal, 2002). Do ponto de vista da sustentabilidade e da removibilidade ao final da vida útil, a incorporação de fibras de bambu para substituir parte de polímeros sintéticos como o PP por

um reforço lignocelulósico renovável reduz a dependência de fontes fósseis e o volume total de plástico consumido.

Em contrapartida, o PLA é um polímero de base biológica produzido a partir da fermentação bacteriana de carboidratos (presentes em milho, cana-de-açúcar, beterraba, mandioca etc.), sendo, portanto, obtido de recursos renováveis e utilizado em diversas aplicações industriais. Caracteriza-se por bom comportamento mecânico, processabilidade, biodegradabilidade e biocompatibilidade. Nesse cenário, o reforço com fibras de bambu surge como uma solução sinérgica, tornando o compósito resultante inteiramente derivado de fontes renováveis, com desempenho mecânico aprimorado e custo reduzido, o que viabiliza sua aplicação em larga escala e fortalece seu perfil de sustentabilidade (Jiang *et al.*, 2018; Qian *et al.*, 2018; Wang, Yang e Yang, 2015; He *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021; Wu, Wu e Wang, 2022).

Embora o comportamento geral de compósitos à base de PLA e PP reforçados com fibras naturais tenha sido amplamente investigado na literatura, ainda existem lacunas quanto à resposta de microfibras em matrizes de naturezas químicas distintas, especialmente quando submetidas a teores críticos de reforço (Boey, Lee e Tay, 2022). O aumento da fração de fibras pode comprometer a homogeneidade microestrutural, a eficiência da transferência de tensão e a resistência à umidade, tornando o comportamento mecânico dos compósitos mais complexo e, em muitos casos, menos previsível devido à interação desse fator com parâmetros como dispersão das fibras, adesão interfacial e condições de processamento (Boey, Lee e Tay, 2022).

Nesse contexto, o presente estudo destaca-se por avaliar comparativamente, sob condições equivalentes, compósitos reforçados com microfibras de bambu e baseados em matrizes quimicamente distintas (PLA e PP), combinando uma análise granulométrica preliminar com a investigação do efeito do teor de fibras nas propriedades mecânicas e físicas dos compósitos. Assim, este trabalho teve como objetivo geral avaliar o desempenho de compósitos de matrizes de PLA e PP reforçados com fibras de bambu, apresentando como objetivos específicos: (i) realizar uma triagem preliminar para a seleção da granulometria da fibra, baseada em ensaios de DMA; e (ii) a investigar e comparar a influência do teor de reforço (utilizando a granulometria previamente selecionada) sobre as propriedades mecânicas e físicas do material, por meio de ensaios de DMA, flexão, dureza e absorção de água.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1. Características e Propriedades das Fibras de Bambu

As células do bambu possuem uma estrutura diferenciada em comparação à maioria

dos vegetais. Elas são compostas por pares alternados de camadas espessas e delgadas, com um número relativamente elevado de camadas, que pode ultrapassar dez. A primeira camada da parede celular apresenta um ângulo helicoidal das nanofibras de aproximadamente 50°. Nas camadas subsequentes, as regiões mais espessas exibem um ângulo próximo a 80°, enquanto as camadas mais finas possuem ângulos menores, em torno de 10°. Essa alternância entre camadas finas e grossas, com diferentes orientações das nanofibras, contribui significativamente para as distintas propriedades mecânicas do bambu (Fornari Junior, 2017; Gao *et al.*, 2022).

Comparadas às fibras de madeira, as fibras de bambu apresentam um teor de celulose relativamente menor, enquanto o teor de lignina e hemicelulose é consideravelmente maior do que em outras fibras, como rami e linho. Suas fibras são fortemente emaranhadas e entrelaçadas, o que confere uma maior ligação entre elas e, conseqüentemente, maior resistência. Em relação à estabilidade térmica de seus constituintes, as fibras de bambu iniciam sua degradação em torno de 250 °C. Quando utilizada como material de reforço, pode efetivamente melhorar a resistência à tração e a resistência ao impacto. Características como maciez, leveza, respirabilidade e capacidade de drenagem da umidade têm tornado a fibra de bambu cada vez mais popular nas indústrias têxteis e de compósitos (Sinha, Narang e Bhattacharya, 2017; Xu, D. *et al.*, 2023b).

A resistência à tração das fibras de bambu é geralmente mais de 2 vezes a da madeira, e a resistência à tração específica é cerca de 3–4 vezes a do aço. A deformação até a falha da fibra de bambu está na faixa de 4–10%, sendo maior do que a das fibras de vidro e carbono, e semelhante à da fibra de PVA (álcool polivinílico). O desempenho mecânico da fibra de bambu depende em grande parte de sua origem e condição (Yu *et al.*, 2011). A Tabela 1 apresenta o comparativo entre as características químicas, físicas e mecânicas do bambu em relação a outras fibras vegetais.

Tabela 1. Propriedades químicas, físicas e mecânicas das fibras celulósicas naturais ou de origem vegetal. Fonte: Zhang *et al.*, 2018; Shahani *et al.*, 2021

Fibras	Composição química			Propriedades físicas			Propriedades mecânicas		
	Celulose (% em peso)	Hemicelulose (% em peso)	Lignina (% em peso)	Teor de umidade (% em peso)	Densidade (g/cm ³)	Diâmetro (µm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (Gpa)	Alongamento na ruptura (%)
Bambu	26–43	30	21–31	11–17	0,9	10–30	250–850	9.8	5,6–8,6
Abacá	56–63	20–25	7–9	5–10	1.5	150–180	430–980	12	3–10

Bagaço	55,2	16.8	25.3	20–28	1.2	320–400	20–290	19,7–27,1	1.1
Banana	63–64	17–19	3–5	8–10	1,35	160–200	355	33,8	53
Fibra de coco	36–43	0,15–0,25	40–45	8	1,15–1,46	100–460	131–220	4–6	15–40
Algodão	82–90	5.7	-	7,85–8,5	1,5–1,6	12–38	287–800	5,5–12,5	7–8
Linho	71	18,6–20,6	2.2	8–12	1.5	40–600	88–1500	27,6	2,7–3,2
Cânhamo	70,4–74,4	17,9–22,4	3,7–5,7	6.2–12	1,47	25–500	550–900	70	1.6
Henequén	58–60	28–30	7–8	10–12	1.4	160–180	430–580	15–20	3–4,7
Juta	61–71,5	13,6–20,4	12–13	12,5–13,7	1,3–1,49	25–200	393–800	13–26,5	1,16–1,8
Sumaúma	35,5	22–45	21,5	9,86	0,29	30–36	50–90	2–5	1,8–4,3
Quenafe	35–57	21,5	15–19	6.2–12	1.2	30–50	295–930	53	1,6–6,9
Óleo de palma	45–48	32–35	16–18	12–15	0,7–1,55	150–500	248	3.2	25
Abacaxi	70–82	-	5–12	14	1.5	105–300	170–1672	82	1–3
Sisal	67–78	10–14,2	8–11	10–22	1,45	50–200	468–700	9,4–22	3–7
Rami	68,6–76,2	13,1–16,7	0,6–0,7	7,5–17	1,55	35–60	400–938	61,4–128	1,2–3,8
Arroz	41–57	33	8–19	14	0,9–1,5	15–25	100–160	0,3–2,6	5,4–10,6
Trigo	39–45	15–31	13–20	18–20	1.1–1.3	20–40	90–150	0,2–2,2	3,5–6,6

2.2. Vantagens do Uso da Fibra de Bambu

Segundo Xu et al. (2023), a abundância é um dos atributos mais relevantes do bambu, isso se deve ao seu rápido ciclo de crescimento. Além disso, enquanto a maioria das florestas do mundo está diminuindo drasticamente, as áreas de florestas de bambu estão crescendo a uma taxa de 3% ao ano, com uma produção anual que pode chegar a 40 milhões de toneladas.

Os produtos de bambu podem armazenar carbono por longos períodos e manter um impacto de carbono baixo ou até zero ao longo de seu ciclo de vida. Ademais, a mesma área de floresta de bambu pode liberar 35% mais oxigênio do que uma floresta convencional. Essa

capacidade de crescimento rápido, aliada à alta eficiência no sequestro de carbono, torna o bambu uma matéria-prima capaz de minimizar as emissões de gases de efeito estufa. Portanto, conclui-se que a indústria do bambu não apenas apresenta um perfil de baixo carbono, mas também se configura como uma indústria de carbono negativo.

Outras características importantes das fibras de bambu são suas excelentes propriedades mecânicas, como alto módulo de tração e baixo alongamento na ruptura. Além disso, sua boa elasticidade, baixa densidade e baixo custo tornam a fibra de bambu um material de grande potencial. Dessa forma, a fibra de bambu demonstra sua versatilidade como matéria-prima, capaz de reduzir as emissões de gases de efeito estufa ao substituir plásticos, concreto e aço, materiais que consomem muita energia e emitem grandes quantidades de poluentes. (Nurul Fazita *et al.*, [s.d.]; Xu, D. *et al.*, 2023a; Li et al., 2004)

2.3. Compósitos Reforçados com Fibras Vegetais

Os compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais componentes ou fases distintas, chamados de matriz e reforço e podem ser divididos em naturais ou sintéticos. Juntos, esses componentes oferecem características desejáveis que seus constituintes, isoladamente, não possuem. Para que um material seja considerado um compósito, alguns critérios devem ser atendidos: os componentes precisam estar presentes em proporções significativas, geralmente acima de 5%; as fases constituintes devem ter propriedades distintas; e as propriedades do compósito devem diferir significativamente das propriedades dos seus componentes individuais. Além disso, o compósito podem ser produzido pela mistura dos componentes por diversos meios distintos (Matthews e Rawlings, 1999; Lopes, 2017)

Grande parte dos compósitos é desenvolvida com o objetivo de melhorar propriedades mecânicas, como rigidez, resistência e tenacidade e além dessas, também são exploradas outras propriedades de interesse, como resistência a condições ambientais adversas e a altas temperaturas. Dessa forma, a análise de compósitos geralmente se concentra nas propriedades mecânicas (Lopes, 2017).

A fase de reforço dos compósitos é composta, em geral, por filamentos resistentes, rígidos e leves, enquanto a matriz atua como aglutinante, protegendo o compósito e conferindo estabilidade geométrica. Juntos, esses materiais agem de forma sinérgica, apresentando propriedades únicas (Neto e Pardini, 2021b).

As matrizes em compósitos podem ser poliméricas, cerâmicas ou metálicas; entretanto, as poliméricas são as mais utilizadas, sendo classificadas em termorrígidas e termoplásticas. Isoladamente, as matrizes poliméricas possuem resistência inferior, mas seu

desempenho é significativamente aprimorado quando combinadas com materiais de reforço. Além disso, seu processamento não exige altas pressões nem altas temperaturas, o que facilita a produção (Neto e Pardini, 2021; Lopes, 2017).

A modificação dessas matrizes traz diversos benefícios, incluindo maior resistência ao calor, redução de custo, aumento da rigidez, menor contração, alteração das propriedades elétricas, redução da inflamabilidade, modificação do peso específico, maior resistência à compressão, maior capacidade de lubrificação, menor permeabilidade, maior resistência ao impacto e melhor estabilidade dimensional (Lopes, 2017).

As fibras naturais são classificadas em vegetais, animais e minerais. Em especial o uso de fibras vegetais tem aumentado nos últimos anos como reforço de materiais poliméricos utilizados em diferentes setores da indústria como o automobilístico e a construção civil, apresentando vantagens como disponibilidade contínua biodegradabilidade, propriedades mecânicas interessantes, baixo custo, baixa massa específica, baixo consumo de energia na produção, bem como o fato de ser um material renovável (Neto e Pardini, 2021b; Beg e Pickering, 2008; Malkapuram, Kumar e Negi, 2009; Lopes, 2017)

Dentre as matrizes mais utilizadas em compósitos de fibras naturais estão os termoplásticos. Suas características mais atrativas incluem a possibilidade de reprocessamento e reciclagem, a dispensabilidade de armazenamento em baixa temperatura e uma maior resistência a ataques químicos em comparação com os termorrígidos, o que contribui para a redução de custos. Ademais, os polímeros termoplásticos têm sido uma alternativa de aplicação em estruturas devido à maior tenacidade à fratura, resistência ao impacto e tolerância a danos em relação aos polímeros termorrígidos (Bunsell e Renard, 2005; Lopes, 2017)

Um fator determinante para produção de um compósito de matriz polimérica e fibras vegetais é a compatibilidade entre estes dois constituintes, fator que interfere diretamente nas propriedades finais do compósito. Quando há uma má interação entre a fibra e a matriz, a interface torna-se a região mais fraca do material, tornando-se o ponto onde ocorre a falha, isso compromete o reforço do compósito, pois a transferência de esforços entre a fibra e a matriz se torna ineficiente. Outro ponto relevante é a temperatura de processamento do polímero, pois é necessário a escolha de uma matriz polimérica e de um tipo de fibra vegetal que não degrade em seu processamento (Van de Velde e Kiekens, 2001; Li *et al.*, 2008) Lopes, 2017).

2.4. Matrizes Termoplásticas

2.4.1. Ácido polilático (PLA)

Em relação aos polímeros utilizados em compósitos reforçados com fibras vegetais, destaca-se o ácido-polilático (PLA), um polímero de base biológica (composto por hidrocarbonetos), produzido através de recursos renováveis, utilizado em diversas aplicações industriais e caracterizado por bom comportamento mecânico, boa processabilidade, biodegradabilidade e biocompatibilidade (Zhang *et al.*, 2021; Wu, Wu e Wang, 2022).

A resina polilática pode ser obtida a partir de materiais naturais e renováveis, como a dextrose, que, ao ser fermentada, gera o ácido lático com propriedades totalmente biodegradáveis. Dessa forma, sua decomposição pode ocorrer em poucos dias quando acondicionada em solo apropriado, com umidade relativa de 100% e temperatura de 40 °C (Fornari Junior, 2017).

Segundo Ranakoti et al. (2022), a comparação das propriedades do PLA com polímeros típicos revela que o PLA possui um módulo de tração maior do que o PVC (policloreto de vinila), o PP (polipropileno) e o náilon, além de apresentar resistência à flexão superior ao PP. Isso indica o potencial do PLA, que pode ser explorado de várias maneiras, especialmente devido à boa compatibilidade com fibras vegetais. Outras características de interesse do PLA incluem a facilidade de seu processamento por métodos convencionais simples, sem a necessidade de grandes quantidades de energia ou tempo. Além disso, o PLA pode ser moldado e remodelado em uma grande variedade de formas por meio de processos como extrusão e moldagem por injeção. (Bajpai, Singh e Madaan, 2014; Kühnert *et al.*, 2018; Ranakoti, Gupta e Rakesh, 2019; Ranakoti e Rakesh, 2020; Ranakoti *et al.*, 2022).

Tabela 2. Propriedades físicas do ácido polilático. Fonte: Tsuji, 2016 citado por Ranakoti *et al.*, 2022.

Propriedade	Valores
Gravidade Específica	1–1,5
Energia de superfície (dinas)	36–40
Temperatura de fusão (°C)	140–210
Peso molecular (Daltons)	Aprox. $1,6 \times 10^5$
Índice de fluxo de fusão (g/10 min)	4–22
Cristalinidade (%)	5–35
Temperatura de transição vítrea (°C)	50–75
Parâmetros de solubilidade ($J^{0.5}/cm^{1.5}$)	21

2.4.2. Polipropileno (PP)

O polipropileno é formado pela união de monômeros alifáticos que possuem uma

ligação dupla (olefina) e é amplamente utilizado em aplicações como tanques, sacos para grãos (rafia), embalagens, fibras, seringas, cadeiras, eletrodomésticos, entre outros. Possui densidade de aproximadamente $0,9 \text{ g/cm}^3$, sendo caracterizado como um termoplástico leve, com temperatura de fusão entre 160 e 170 °C. Quando utilizado em compósitos, o PP apresenta aumento significativo na rigidez e na resistência à tração, especialmente quando reforçado com fibras de vidro, carbono ou naturais. Quanto à processabilidade, o PP pode ser moldado por diferentes processos industriais, como injeção, extrusão e sopro, sendo aplicado desde filmes flexíveis até componentes rígidos (Fornari Junior, 2017; Jr e Rethwisch, 2020a; Mohanty, Misra e Drzal, 2002).

2.5. Influência do Tamanho da Partícula e da Proporção de Fibra nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Reforçados com Fibra de Bambu

A granulometria das partículas de fibras vegetais pode exercer influência no desempenho mecânico de compósitos de matriz termoplástica, a utilização do tamanho adequado de partículas de fibra vegetal pode resultar em melhor desempenho mecânico, especialmente quando associada a proporções apropriadas de fibra na mistura. Martijanti et al. (2021) estudaram dois tipos de bambu, Tali Bamboo (SBT) e Haur Hejo Bamboo (SBH), para a fabricação de compósitos. O processo utilizou fibras com três diferentes tamanhos de partícula: 50 mesh (aproximadamente $297 \mu\text{m}$), 100 mesh ($\sim 149 \mu\text{m}$) e 250 mesh ($\sim 63 \mu\text{m}$) e para cada tamanho, foram testadas frações volumétricas de 10%, 20% e 30%, utilizando polipropileno (PP) como matriz (Martijanti, Sutarno e Juwono, 2021). Os valores obtidos para o modo de elasticidade dos compósitos para cada combinação de volume e tamanho de partícula estão presentes na Figura 1 a seguir:

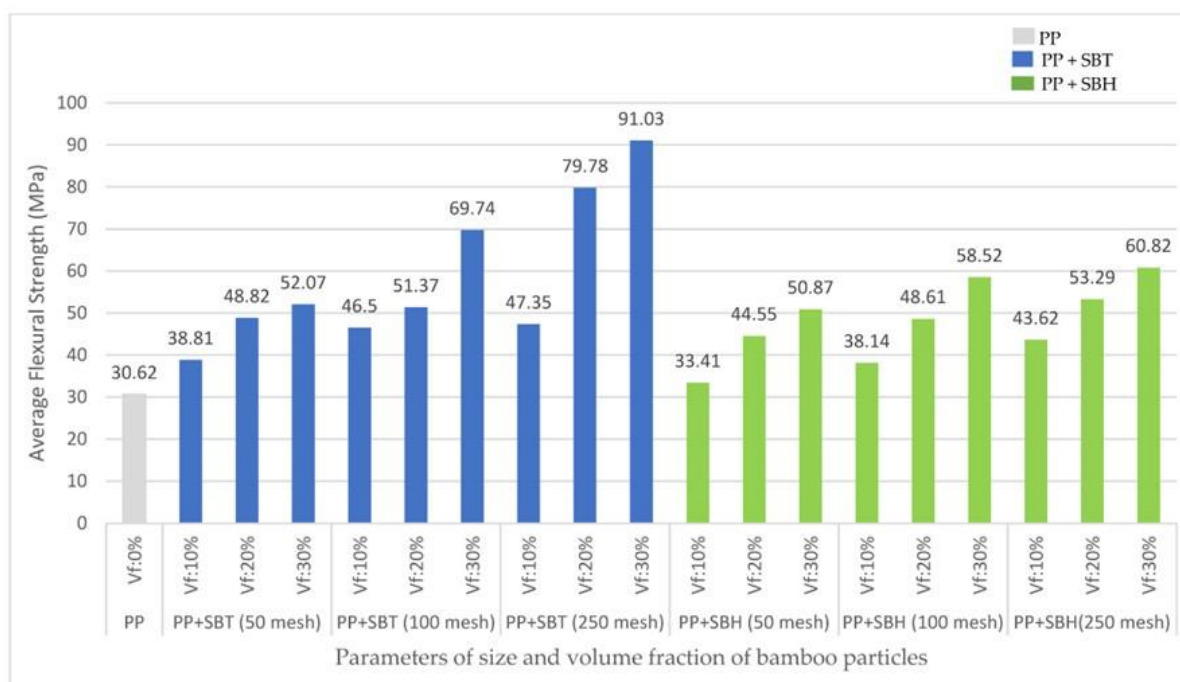


Figura 1. Relação entre a resistência à flexão do compósito PP e a fração de volume e o tamanho de partícula de SBT e SBH. Fonte: Martijanti *et al.*, 2021.

Os resultados do autor indicam que valores máximos de resistência à flexão e tração, pertencem a compósitos de polímero reforçados com tamanho de partícula de bambu Tali de 250 mesh e fração de volume de 30%, ou seja, o melhor desempenho mecânico foi observado nos compósitos com menor tamanho de partícula e maior volume de fibra de bambu em proporções mais altas.

Zhang et al. (2020), estudaram o efeito da distribuição e do tamanho de partículas, 60 mesh (~250 μm), 100 mesh (~149 μm), 200 mesh (~74 μm) e 300 mesh (~48 μm), para melhorar as propriedades de biocompósitos de PLA reforçados com fibra de bambu. O tamanho de partícula de 200 mesh (16,6–84,5 μm) foi identificado como o mais eficaz para melhorar a resistência à tração e o módulo de flexão dos biocompósitos PLA/Bambu. O módulo e a resistência à flexão atingiram os melhores valores com o tamanho de 200 mesh, mas diminuiram para partículas menores (300 mesh), conforme a Figura 2 a seguir:

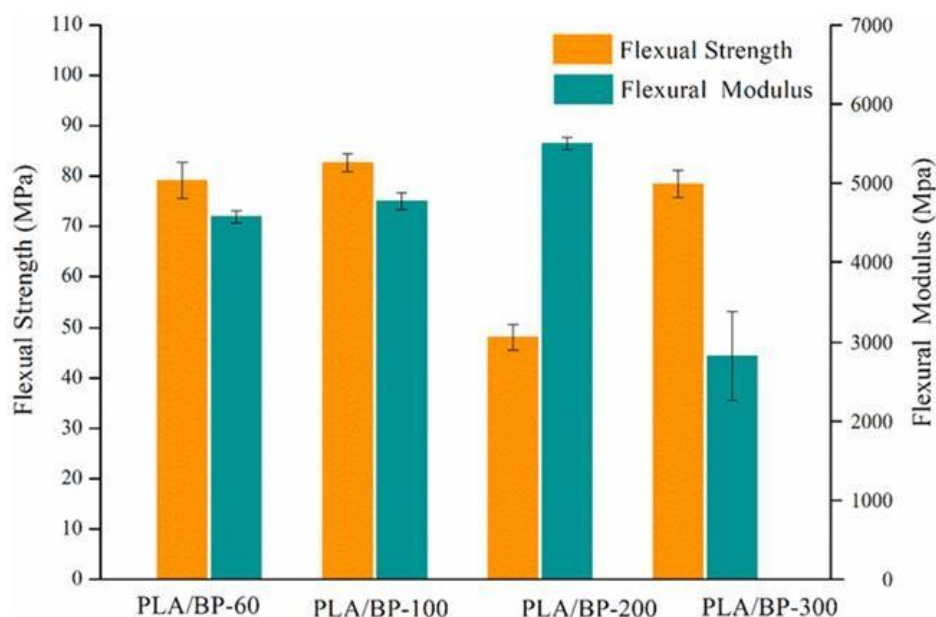


Figura 2. Propriedades de flexão de biocompósitos PLA/Bambu com diferentes distribuições de tamanho de partícula. Fonte: Zhang *et al.* (2020).

Entre as conclusões do autor destaca-se que partículas menores que 200 mesh melhoram a uniformidade e a estabilidade térmica, mas comprometem a resistência mecânica devido à menor resistência à fratura e menor capacidade de transferência de tensões, por outro lado, partículas maiores comprometem a homogeneidade e interface fibra/matriz, mas apresentam maior resistência ao impacto.

2.6. Métodos de Processamento

2.6.1. Extrusão e injeção

O método de extrusão e injeção é frequentemente utilizado na fabricação de compósitos polímeros reforçados com fibras vegetais. O processo de extrusão ocorre em um equipamento específico, denominado extrusora, onde é adicionada uma pré-mistura à câmara de mistura. Primeiramente, o termoplástico é adicionado junto às fibras vegetais. Essa pré mistura passa por um processo de homogeneização durante sua passagem pelo extrusor, onde as fibras são dispersas e aderidas à matriz polimérica. A resultante é uma massa fundida que passa pelo bocal da máquina e é cortada em pellets (grânulos) e resfriada acelerando seu processo de solidificação (Lopes, 2017; Pacheco *et al.*, 2023).

Segundo este processo o cilindro aquecido da máquina de extrusão pode ser dividido basicamente em três zonas: zona de alimentação onde o material é aquecido e começa a ser

fundido, zona de compressão onde o material parcialmente fundido começa a compactar e zona de dosagem onde a massa está completamente fundida e pronta para injeção (Crawford, 1998).

As máquinas extrusoras podem ser de parafuso único ou duplo, as extrusoras de parafuso duplo fornecem melhores resultados reduzindo o tempo de fusão da mistura. Os aspectos mais importantes relacionados ao processo de extrusão são a fusão do polímero, o transporte de sólidos e o fluxo de fusão. A tecnologia de extrusão é geralmente utilizada como etapa preliminar á moldagem por injeção (Pacheco *et al.*, 2023).

O processo de injeção inicia-se com a inserção dos pallets gerados pela extrusora em uma máquina de injeção onde são aquecidos até o ponto de fusão, esse material fundido será injetado em um molde conforme a forma final da peça. A alta pressão exercida na moldagem contribuirá para a orientar as fibras, posteriormente o molde resfriará até a solidificação da peça. Esse processo possui quatro fases relevantes: plastificação, injeção, resfriamento e ejeção (Crawford, 1998; Finkeldey *et al.*, 2020; Pacheco *et al.*, 2023).

Na primeira etapa do processo de injeção o material (pallets) é inserido na máquina de injeção e é derretido. Depois de derretido o material é injetado no molde em uma velocidade e parâmetros de pressão pré-definidos, posteriormente a peça moldada vai para a fase de resfriamento onde a pressão e a temperatura diminuem. A fase é concluída quando o material se solidifica e na fase de ejeção é finalmente retirada do molde (Fu *et al.*, 2020; Khosravani e Nasiri, 2020; Pacheco *et al.*, 2023).

Segundo Agassant e Mackley, (2016) a moldagem de polímeros termoplásticos é um processo termomecânico que pode ser resumida em três etapas: Fusão, ou seja, a passagem do estado sólido, pó ou grânulos, para o estado fundido, a fim de garantir fluidez e homogeneidade; Passagem do fluxo do polímero fundido sob pressão através de uma matriz ou para dentro de um molde, resfriamento de moldagem; Solidificação no formato e forma final do componente (Agassant e Mackley, 2016).

A Figura 3 ilustra o processo de extrusão e moldagem por injeção para produzir peças baseadas em compósitos.

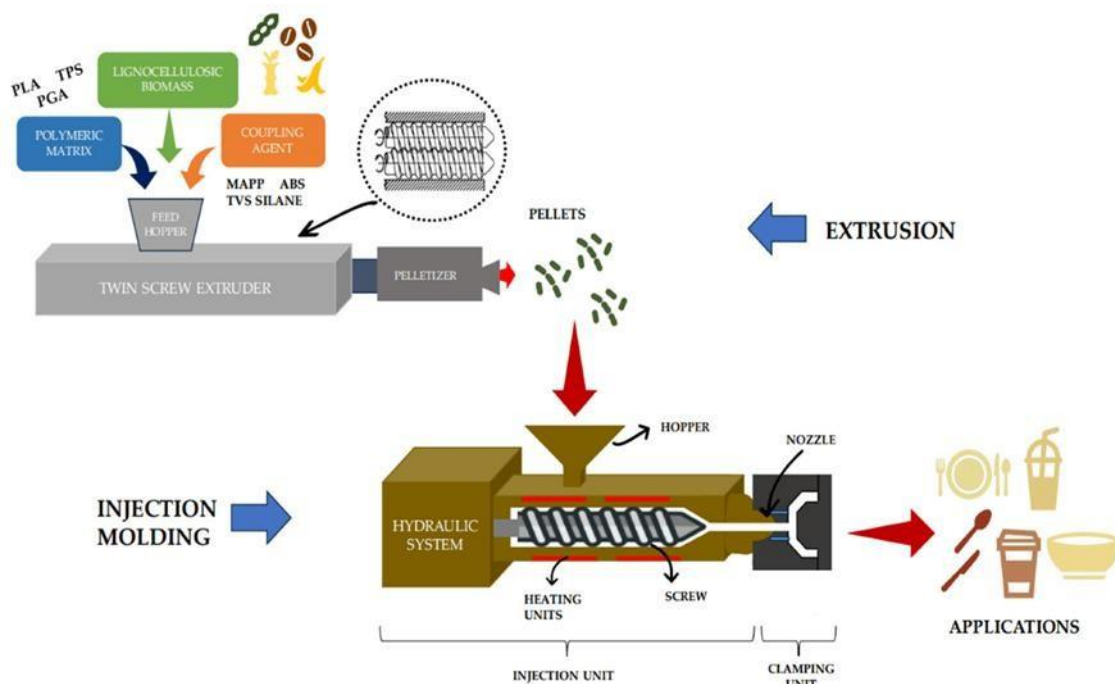


Figura 3. Extrusão e moldagem por injeção para produzir peças baseadas em compósitos. Fonte: Pacheco (2023).

2.7. Desempenho Mecânico dos Compósitos Reforçados com Fibras Vegetais

2.7.1. Resistência a flexão

O ensaio de flexão avalia a força necessária para causar ruptura ou uma flexão específica no material. Para isso, o corpo de prova deve ser apoiado e sofrer uma carga pontual no sentido contrário aos apoios. Nesse tipo de ensaio, dois modos de força são simultaneamente aplicados ao material: compressão e tração. Essas forças atuam em áreas iguais, dividindo o corpo de prova em duas seções distintas por meio de uma linha imaginária que passa pelo ponto central. Durante a aplicação da carga, a metade superior do material é submetida à compressão, enquanto a metade inferior sofre tração, resultando no somatório das resistências à tração e compressão atuando simultaneamente (Fornari Junior, 2017).

A velocidade de aplicação da carga é um fator crítico nesse ensaio, pois influencia diretamente a avaliação das propriedades do material, afetando sua resistência. Após a aplicação da carga, o material polimérico sofre um reposicionamento interno, em uma tentativa de retornar à condição inicial. Esse processo de reorganização é lento e depende de características como a plasticidade e a elasticidade específicas do material (Fornari Junior, 2017).

Além disso, a quantidade de partículas adicionadas à matriz polimérica exerce grande influência sobre o comportamento do compósito frente aos esforços mecânicos. Um aumento na quantidade de partículas tende a elevar a densidade do compósito, entretanto, essa maior

densidade também leva ao aumento da porosidade (presença de espaços vazios no compósito), a porosidade excessiva reduz a resistência à fadiga do compósito, impactando negativamente sua resistência à flexão, especialmente sob cargas repetitivas (Kerni *et al.*, 2019)

2.7.2. Dureza

O ensaio de dureza fornece informações fundamentais sobre a resistência de um material à deformação plástica localizada ou penetração superficial. Além de determinar a rigidez da superfície, esse método permite a avaliação e a quantificação de variações de propriedades em pequenas distâncias, possibilitando a análise da heterogeneidade microestrutural e da distribuição de fases em materiais reforçados com fibras vegetais (ASTM International, 2022).

O método baseia-se na aplicação de uma carga controlada por meio da pressão de um indentador de geometria padronizada sobre a superfície do material. O valor de dureza é obtido a partir da relação entre a carga aplicada e a geometria da impressão residual ou a profundidade de penetração alcançada. Diferentes sistemas de ensaio empregam indentadores específicos, como esferas, cones ou pirâmides, selecionados de acordo com o material ensaiado (Gontarski, Casali e Mikowski, 2021).

Dessa forma, esse tipo de ensaio tem se mostrado muito útil para avaliação de matérias, uma vez que seus resultados podem ser correlacionados com propriedades mecânicas como resistência à tração, usinabilidade, resistência ao desgaste, tenacidade e ductilidade. Em sistemas poliméricos reforçados, o incremento na dureza pode ser um indicador da eficiência da incorporação das fibras vegetais na matriz polimérica (Souza, 1982; Gontarski, Casali e Mikowski, 2021; Jr e Rethwisch, 2020a).

2.7.3. Análise Mecânica Dinâmica

A Análise Dinâmico-mecânica (DMA) é uma técnica de caracterização amplamente utilizada para avaliar a adequação de compósitos a diferentes condições de uso. Por meio dessa técnica, é possível determinar parâmetros como resistência a variações de temperatura e comportamento em ambientes sujeitos a cargas dinâmicas. A DMA é uma ferramenta de grande precisão para o estudo de materiais compósitos, pois envolve a adição simultânea de uma determinada força mecânica e oscilatória, ajudando a prever o comportamento do material sob condições reais de uso, através de variáveis como temperatura, frequência e deformação (Fornari Junior, 2017; Menard e Menard, 2020)

Na DMA, a força é transmitida à amostra por meio da aplicação de uma deformação sinusoidal (força que varia de forma ondulatória e regular), utilizando um analisador mecânico dinâmico. Esse equipamento mede as propriedades viscoelásticas do material, traduzindo as

respostas das partes elástica (capacidade de retornar à forma original) e viscosa (capacidade de dissipar energia) do compósito (Fornari Junior, 2017; Menard e Menard, 2020)

Esse tipo de análise permite informar ao sistema tipos diferentes de solicitações, sendo as mais comuns a flexão a três pontos, tração-compressão, torção e cisalhamento. O DMA avalia a dependência das propriedades viscoelásticas em relação a diversas condições, como frequências de oscilação, temperaturas e taxas de deformação. Essa análise inclui a determinação do valor de damping (ou amortecimento), que mede a capacidade do material de dissipar energia em forma de calor, e o módulo de elasticidade, calculado pela aplicação de uma força oscilatória sobre a amostra (Fornari Junior, 2017; Menard e Menard, 2020)

De modo prático, o equipamento DMA submete a amostra a uma carga cíclica, aplicando uma força periódica ao mesmo tempo que controla variáveis como a temperatura e a frequência de oscilação. Dessa forma, são obtidos três parâmetros: módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e amortecimento ($\tan \delta$) (Fornari Junior, 2017).

O módulo de armazenamento traduz a capacidade do material em assimilar e distribuir entre si a energia adicional imposta a ele, representando dessa forma, a parte elástica do material que irá oferecer mais condições de armazenamento de energia conforme sua capacidade de deformação elástica. O módulo de perda por sua vez, define a dissipação de energia consumida pelo trabalho de deslocamento do material, e está relacionado com a quantidade de energia necessária para permitir a viscosidade (permanente) deste. Por último, o amortecimento representa a razão entre E'' e E' , indicando a eficiência com que o material dissipa energia (Fornari Junior, 2017).

Os parâmetros utilizados na análise também estão relacionados a outras propriedades observadas nos materiais testados. O módulo de armazenamento está associado a rigidez e determina quão rígida ou frágil é a amostra, enquanto o módulo de perda é indicativo de comportamento amortecedor ou atrito interno, sensível a diferentes tipos de movimentos moleculares, transições, processos de relaxamento, morfologia interna e outras heterogeneidades estruturais. Já em relação ao módulo de amortecimento, quando possui um alto valor, é indicativo de um material com alto componente de deformação não elástico, enquanto um baixo valor indica alta elasticidade, dessa forma, o aumento na ligação da interface fibra/matriz resulta na redução do fator de amortecimento, uma vez que a mobilidade das cadeias moleculares na interface fibra/matriz diminui (Zhang, Wang e Wu, 2012)

2.7.4. Fatores que influenciam o Desempenho Mecânico dos Compósitos de Fibras Vegetais

Segundo Nurazzi (2021), três fatores principais determinam as propriedades finais dos compósitos. O primeiro está relacionado à escolha dos materiais usados nos compósitos, incluindo matriz e reforço. As propriedades finais do compósito dependem de fatores como o tipo de fibra, tamanho, orientação e quantidade, além das características do polímero, como grau de cristalinidade e viscosidade (Faruk *et al.*, 2012; Nurazzi *et al.*, 2021).

O segundo fator está associado ao método de processamento e preparo do compósito, como moldagem por compressão, extrusão, injeção, entre outros. A temperatura de cura também é fator relevante pois influenciam as propriedades dos componentes das fibras, a adesão da fibra e a formação de ligações químicas entre as fases. Além disso outros fatores devem ser considerados, tendo em vista a viabilidade e uso do compósito, como as propriedades relacionadas ao peso, resistência mecânica, densidade, reciclabilidade, descartabilidade, absorção de água, matéria-prima e custo de fabricação e compatibilidade com o sistema de reciclagem atual (Mochane *et al.*, 2019; Nurazzi *et al.*, 2021).

Por fim, o terceiro parâmetro crucial refere-se às propriedades de interação entre o reforço de fibras vegetais e a matriz polimérica. Isso inclui a melhoria da dispersão das fibras na matriz, garantindo uma ligação interfacial apropriada e reduzindo a formação de vazios. O objetivo é otimizar a interação e a aderência entre fibras e matriz, o que resulta em um material mais eficiente (Mochane *et al.*, 2019; Nurazzi *et al.*, 2021).

Outro fator a ser considerado é o efeito da absorção de água, que pode limitar o uso bem-sucedido de fibras vegetais em compósitos. A estabilidade dimensional dos compósitos e seu desempenho mecânico são fortemente influenciados pelas condições higrotérmicas e hidrotérmicas, que estão associadas à umidade relativa e às condições de imersão, respectivamente. Fibras vegetais possuem uma capacidade variável de absorver umidade, devido à sua natureza hidrofílica, que está associada às características de seus constituintes. Essa propriedade pode levar ao inchaço das fibras, impactando negativamente o desempenho do material, especialmente devido à falta de uma adesão eficiente entre a matriz e a fibra. (Mochane *et al.*, 2019; Garat *et al.*, 2020; Nurazzi *et al.*, 2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Para a elaboração do estudo e confecção dos compósitos, foram utilizados como reforço lignocelulósico fibras de bambu fornecidas pela empresa Nutrassim Food Ingredientes Ltda. As fibras foram selecionadas em quatro diferentes granulometrias para análise preliminar,

classificadas como: 300 μm (50 mesh), 200 μm (70 mesh), 90 μm (170 mesh) e 50 μm (270 mesh). Segundo as especificações técnicas do fornecedor, as fibras apresentam teor de celulose de aproximadamente 99,6% e baixos índices de resíduos inorgânicos (cinzas $\leq 0,3\%$). O pH das fibras está na faixa da neutralidade (7,0 a 7,3), e o teor de umidade variou entre 1,8% e 5,0% conforme a granulometria. A Tabela 3 apresenta as propriedades físico-químicas, das fibras de bambu de acordo com o certificado de análise do fornecedor.

Como matrizes poliméricas, foram utilizados dois termoplásticos de naturezas distintas, o polipropileno (PP), de origem fóssil, e o Ácido Polilático (PLA), polímero biodegradável de fonte renovável obtidos, respectivamente, das marcas Petrocuyo do Sul Ltda e 3D Lab Indústria Ltda.

Tabela 3. Propriedades físico-químicas das fibras de bambu em diferentes faixas granulométricas.

Propriedade	300 μm	200 μm	90 μm	50 μm
Conteúdo de Celulose (%)	99,6	99,6	99,6	—
Umidade (%)	4,3	3,0	1,8	5,0
Cinzas (%)	0,1	0,2	0,3	0,1
Densidade Aparente (g/L)	—	85	177	238

3.2 Preparação dos Compósitos

A fabricação dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Compósitos Lignocelulósicos do Departamento de Engenharia Florestal (EFL) da Universidade de Brasília (UnB) através do processo de extrusão e injeção. Inicialmente as matrizes termoplásticas (PP ou PLA) foram adicionadas junto as fibras de bambu à câmara de mistura da extrusora de dupla rosca co-rotante (Thermo Scientific™ Process 11 Parallel Twin-Screw Extruder), conforme apresentado na Figura 4. O equipamento promove a homogeneização, dispersão e adesão do reforço lignocelulósico à matriz polimérica, resultando na mistura fundida entre polímero e microfibras que foi posteriormente cortada em pellets (grânulos).



Figura 4. Extrusora de dupla rosca co-rotante.

Os parâmetros de extrusão dos diferentes compósitos estão listados na Tabela 4. As temperaturas de processamento (por exemplo, 180–200 °C) foram mantidas dentro da faixa térmica segura estabelecida para evitar a degradação das microfibras de bambu durante a extrusão e a moldagem por injeção. Além disso, como os perfis de degradação térmica do PLA e do PP já são bem documentados na literatura, uma análise termogravimétrica específica não foi incluída no escopo deste estudo.

Tabela 4. Parâmetros de extrusão dos compósitos utilizando PLA e PP.

Polímero	Zonas de Aquecimento (°C)								Rotação do Parafuso (rpm)
	Z8	Z7	Z6	Z5	Z4	Z3	Z2	Z1	
PLA	200	200	195	195	195	195	190	190	95
PP	195	195	195	185	175	175	175	165	40

Na etapa subsequente, os pellets obtidos foram processados em um sistema de moldagem por pistão de injeção (HAAKE™ MiniJet Pro). Durante esta etapa, os pellets foram submetidos ao aquecimento até atingirem o ponto de fusão, sendo então injetados sob pressão em moldes com geometrias específicas para os ensaios propostos. Após o preenchimento do molde, o sistema passou por um resfriamento até a solidificação da peça gerando os corpos de prova. A Tabela 5 mostra os parâmetros utilizados na injeção das amostras de compósito.

Tabela 5. Parâmetros de extrusão dos compósitos utilizando PLA e PP.

Polímero	Tc (°C)	Pi (bar)	ti (s)	Tm (°C)	Pr (bar)	tr (s)
PLA	200	450	6	75	400	16
PP	210	450	6	60	400	8

Onde Tc: temperatura do cilindro; Pi: pressão de injeção; ti: tempo de injeção; Tm: temperatura do molde; Pr: pressão de recalque; tr: tempo de recalque.

O delineamento da pesquisa foi estruturado em duas etapas distintas para otimizar a seleção dos materiais e avaliar o desempenho mecânico dos compósitos. Na primeira fase, conduziu-se uma análise preliminar de triagem para identificar a granulometria da fibra de bambu que proporcionaria a melhor interação com cada matriz. Desse modo, foram produzidos compósitos com uma proporção fixa de 15% de fibras e 85% de polímero em massa conforme a Tabela 6. A definição da granulometria ideal para a continuidade do estudo foi fundamentada nos resultados obtidos por meio de ensaios de Análise Mecânica Dinâmica (DMA).

Tabela 6. Formulações dos compósitos poliméricos avaliados na primeira fase.

Polímero	Tamanho da fibra / Teor de fibra (%)	Polímero	Tamanho da fibra / Teor de fibra (%)
PP (85%)	300 µm (15%)	PLA (85%)	300 µm (15%)
	200 µm (15%)		200 µm (15%)
	90 µm (15%)		90 µm (15%)
	50 µm (15%)		50 µm (15%)

A segunda fase consistiu na preparação dos compósitos utilizando a granulometria selecionada na etapa anterior. Nesta fase, os compósitos foram produzidos com diferentes proporções de microfibras para investigar a influência da fração de reforço nas propriedades finais do material, utilizando-se as concentrações de 15%, 30% e 45% em massa conforme a Figura 5. Adicionalmente, foram produzidos grupos controle compostos por 100% de polímero puro (PP e PLA). No total, oito formulações de compósitos foram produzidas, variando conforme a proporção de fibra e matriz, de acordo com o detalhado na Tabela 7.

Tabela 7. Diferentes composições (polímero/fibra) para produção dos compósitos.

Composição	Polímero (%)	Fibra de Bambu (%)
Ácido Polilático (PLA)	100	0
Melhor tamanho de partícula	85	15
Melhor tamanho de partícula	70	30

Melhor tamanho de partícula	55	45
Polipropileno (PP)	100	0
Melhor tamanho de partícula	85	15
Melhor tamanho de partícula	70	30
Melhor tamanho de partícula	55	45

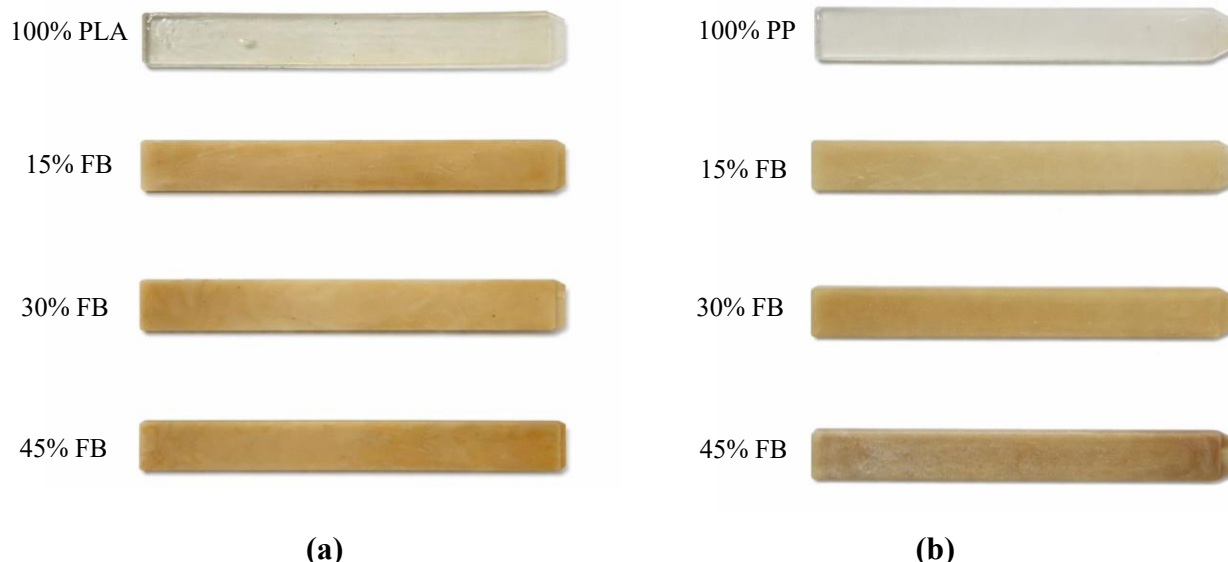


Figura 5. Corpos de prova com diferentes proporções de polímero e microfibras de bambu (FB) confeccionados para a segunda fase: (a) compósitos de matriz ácido polilático (PLA) reforçados com FB e (b) compósitos de matriz polipropileno (PP) reforçados com FB.

Para avaliação das propriedades mecânicas e físicas dos compósitos foram utilizando diferentes números de réplicas, dependendo do ensaio. As propriedades de flexão foram determinadas utilizando três corpos de prova por tratamento e dois para os grupos de controle, enquanto a dureza foi avaliada utilizando quatro corpos de prova por tratamento e dois para os controles. A absorção de água foi avaliada utilizando cinco corpos de prova por condição.

3.3. Caracterização dos Compósitos

3.3.1. Análise Mecânica Dinâmica – DMA

A Análise Mecânica Dinâmica foi realizada utilizando o Dynamic Mechanical Analyzer (DMA-342E NETZSCH Co Ltd) no modo *3-point bending* que conforme a norma ASTM D4065, submete a amostra a uma carga cíclica, aplicando uma força periódica ao mesmo tempo que controla variáveis como a temperatura e a frequência de oscilação. Assim, foram obtidos três parâmetros: módulo de armazenamento (E'), módulo de

perda (E'') e amortecimento ($\tan \delta$). Preliminarmente foram submetidas à análise um corpo de prova de cada granulometria de fibra para os compósitos confeccionadas com PLA e PP. Posteriormente, foi ensaiado um corpo de prova de cada compósito com proporções variadas de fibra/polímero. A Figura 6 a seguir representa o corpo de prova no equipamento de análise.

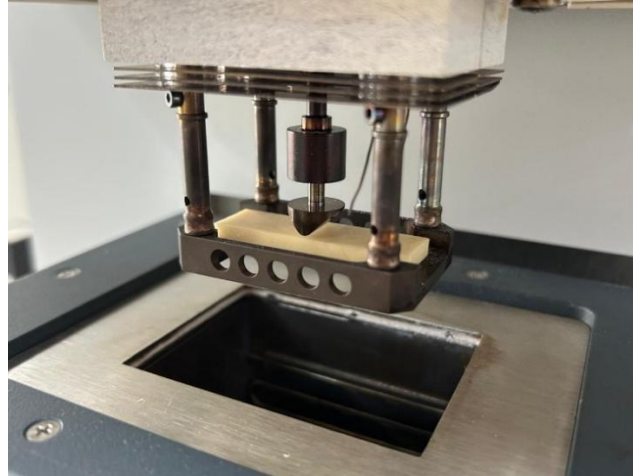


Figura 6. Corpo de prova na Análise Mecânica Dinâmica (DMA) no modo *3-point bending*

3.3.2. Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão de três pontos avaliou a força necessária para uma flexão ou rupturas nos compósitos à base de PP e PLA com diferentes proporções de fibra, utilizando a Máquina Universal de Ensaio EMIC. Os testes foram realizados no Laboratório de Propriedades Físico-Mecânicas da Madeira da Universidade de Brasília (UnB) e seguiram a norma ASTM D790, utilizando 3 corpos de prova para cada proporção fibra/polímero a uma velocidade de 1,5 mm/min.

Desse modo, foram fornecidos dados para obtenção das informações de resistência à flexão e módulo de elasticidade à flexão conforme a Equação 1 e Equação 2 a seguir:

a) Módulo de Elasticidade à Flexão (E_f):

$$E_f = \frac{L^3}{4bd^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta D} \quad (1)$$

L representa a distância entre os apoios, enquanto b e d correspondem, respectivamente, à largura e à espessura da seção transversal do corpo de prova. O termo $\Delta F/\Delta D$ define a inclinação da curva carga-deslocamento na região elástica, onde ΔF é a variação da carga aplicada e ΔD é a deflexão resultante.

b) Resistência à Flexão (σ_f):

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (2)$$

Na expressão, F representa a carga máxima registrada durante o ensaio, enquanto L denota a distância fixa entre os apoios. As dimensões da seção transversal são dadas por b (largura) e d (espessura).

3.3.3. Dureza

A caracterização da dureza dos compósitos foi realizada em uma Máquina Universal de Ensaio (EMIC), seguindo os procedimentos adaptados da norma ASTM D1037. O ensaio consistiu na penetração de um dispositivo esférico na superfície das amostras a uma velocidade constante de 1,3 mm/min. O teste foi conduzido até que a profundidade de penetração atingisse 1,3 mm da superfície da amostra, sendo o módulo de dureza determinado pela inclinação da curva carga em relação ao deslocamento ($\Delta F/\Delta D$) na região linear do ensaio conforme a Equação 3, esse parâmetro representa a rigidez do material à penetração.

$$H_m = \frac{\Delta F}{\Delta D} \quad (3)$$

Na expressão, ΔF correspondente a variação da carga aplicada (força) dentro do intervalo linear da curva e ΔD variação da profundidade de penetração (deformação).

3.3.4 Absorção de Água

A avaliação da taxa de absorção de água dos compósitos foi conduzida em conformidade com a norma ASTM D570. O procedimento consistiu na imersão total dos corpos de prova em água destilada mantida à temperatura ambiente. Previamente à imersão, as amostras foram pesadas em balança analítica. Para monitorar o ganho de massa associado a taxa de absorção de água, foram realizadas pesagens nos intervalos de 2 e 24 horas após o início do ensaio. A taxa de absorção de água (AA) foi calculada conforme a Equação 4.

$$AA(\%) = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (4)$$

M_1 corresponde a massa das amostras (g) em determinado tempo (t) e M_0 corresponde a massa inicial da amostra (g).

3.4. Análise

A influência da granulometria das microfibras de bambu foi avaliada preliminarmente de forma qualitativa por meio da análise mecânica dinâmica (DMA), utilizando-se uma amostra de cada granulometria estudada. Em seguida, os corpos de prova produzidos com diferentes teores de microfibra com base na granulometria previamente selecionada foram igualmente analisados por DMA, visando à avaliação qualitativa do efeito do teor de fibras sobre o comportamento do compósito.

Para avaliar o efeito da variação do teor de fibras no desempenho mecânico de compósitos PP e PLA reforçados com diferentes proporções de fibras de bambu foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com o propósito de determinar se existem diferenças gerais estatisticamente significativas entre os grupos avaliados (diferentes proporções de fibra) sob as diferentes condições. Empregando o teste de Tukey a 5% de significância foi possível determinar quais os grupos apresentam diferenças estatísticas relevantes para cada matriz com diferentes teores de fibras bambu. Desse modo, foram avaliados resultados de módulo de elasticidade a flexão (E_f), resistência a flexão (σ_f) e dureza, além da taxa de absorção de água (AA).

Complementarmente, os dados foram analisados sob um delineamento experimental em arranjo fatorial 2 x 4, considerando como fatores independentes o tipo de matriz polimérica (PP e PLA) e o teor de microfibra de bambu (0%, 15%, 30% e 45%). Esta análise permitiu avaliar tanto os efeitos principais de cada fator isoladamente, como também a interação entre a matriz e a carga de reforço sobre as propriedades dos compósitos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Efeito do Tamanho da Partícula de Microfibra de Bambu

Os resultados da análise preliminar de caracterização dinâmico-mecânica (DMA) dos compósitos, considerando diferentes granulometrias de fibra de bambu em uma proporção fixa de 15% em massa, indicaram que a granulometria de 200 μm apresentou o maior Módulo de Armazenamento (E') ao longo da maior parte inicial do intervalo de temperatura avaliado para os compósitos de PLA. Esse comportamento evidencia uma maior capacidade de armazenamento de energia elástica, refletindo em um incremento superior na rigidez do material. As granulometrias subsequentes com os maiores valores de E' foram, respectivamente, 90 μm , 300 μm e, por último, 50 μm . Observa-se que todas as variações granulométricas resultaram em

um aumento de E' em comparação ao PLA puro, o que demonstra o papel das fibras como reforço estrutural, conforme apresentado na Figura 7. ■

A menor rigidez observada nos compósitos de PLA reforçados com fibras de menor granulometria (50 μm) pode ser atribuída à perda de continuidade estrutural em razão do tamanho da fibra, quando comparada as demais granulometrias, resultando na diminuição da eficiência na transferência de tensões da matriz para o reforço. Nessa condição, fibras com dimensões reduzidas podem apresentar menor capacidade de atuar como elementos de reforço, exercendo predominantemente a função de material de preenchimento (Ren *et al.*, 2014; Xu, H. *et al.*, 2023a; Mi *et al.*, 1999) ■

Para os compósitos de PP, os resultados também indicam aumento de E' em relação ao polímero puro, evidenciando o efeito de reforço. Contudo, diferentemente do PLA, a granulometria de 50 μm apresentou os maiores valores de E' , seguida pelas granulometrias de 300, 90 e 200 μm (Figura 7). Esse contraste com os resultados para os compósitos com PLA sugere que, no caso do PP, o menor diâmetro da fibra pode ter resultado em uma maior área de superfície específica e consequentemente maior área interfacial favorecendo o efeito do reforço (Ren *et al.*, 2014). Ressalta-se que a capacidade de reforço é um reflexo das propriedades intrínsecas da fibra, da adesão interfacial e do comprimento crítico da fibra, o que justifica comportamentos distintos para matrizes com naturezas químicas diferentes (Ren *et al.*, 2014; Xu, H. *et al.*, 2023a; Jr e Rethwisch, 2020).

Cabe destacar que a diferença entre as curvas dos compósitos à base de PLA e PP é explicada pelo comportamento térmico distinto desses polímeros na faixa de temperatura analisada. O PLA apresenta uma temperatura de transição vítrea (T_g) em torno dos 60°, dentro da janela de ensaio, enquanto PP possui T_g bem abaixo da faixa de temperatura avaliada.

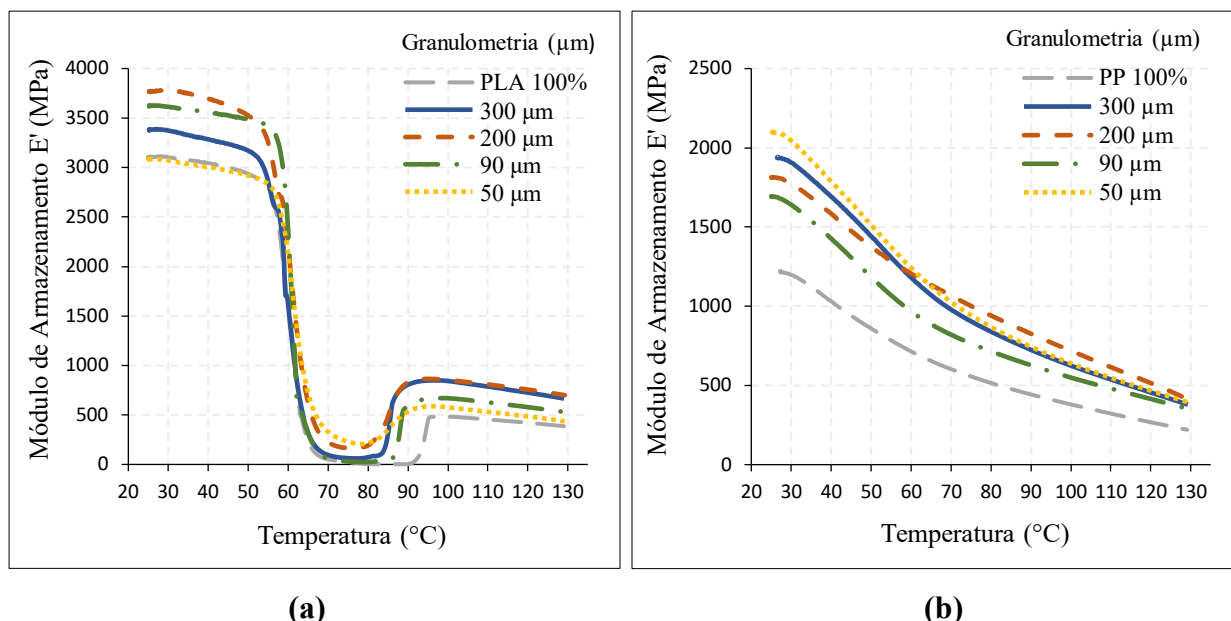


Figura 7. Módulo de armazenamento (E') dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com 15% de microfibras de bambu, em diferentes granulometrias de fibra (μm): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).

Em relação ao Módulo de Perda (E''), apresentado na Figura 8, que quantifica a energia dissipada pelo material e está associado à sua viscosidade, observou-se que para os compósitos à base de PLA, os maiores picos de E'' foram registrados para as granulometrias de 300, 90 e 200 μm . Em contrapartida, o compósito reforçado com fibras de 50 μm apresentou o menor pico de dissipação. Esse comportamento, está associado a uma maior capacidade de restrição da mobilidade das cadeias polimérica o que indica a uma adesão fibra-matriz mais eficiente (Xia *et al.*, 2017).

Para os compósitos à base de PP, os resultados de E'' indicaram que a granulometria 90 μm apresentou os menores valores de E'' , sugerindo menor atrito interfacial interno e indicando que as partículas podem estar mais bem distribuídas. As granulometrias 200 e 300 μm exibiram comportamento intermediário, enquanto a granulometria 50 μm apresentou valores mais altos de E'' . Este comportamento corrobora com os resultados observados para E' , uma vez que uma alta área superficial das fibras de menor granulometria pode implicar em um alto atrito interno fibra-matriz. Além disso, os valores mais elevados de E'' podem indicar uma possível redução da compatibilidade química interfacial em comparação com as outras granulometrias, pois um maior atrito interfacial pode representar menor adesão fibra-matriz (Ren *et al.*, 2014), conforme os resultados observados na Figura 8.

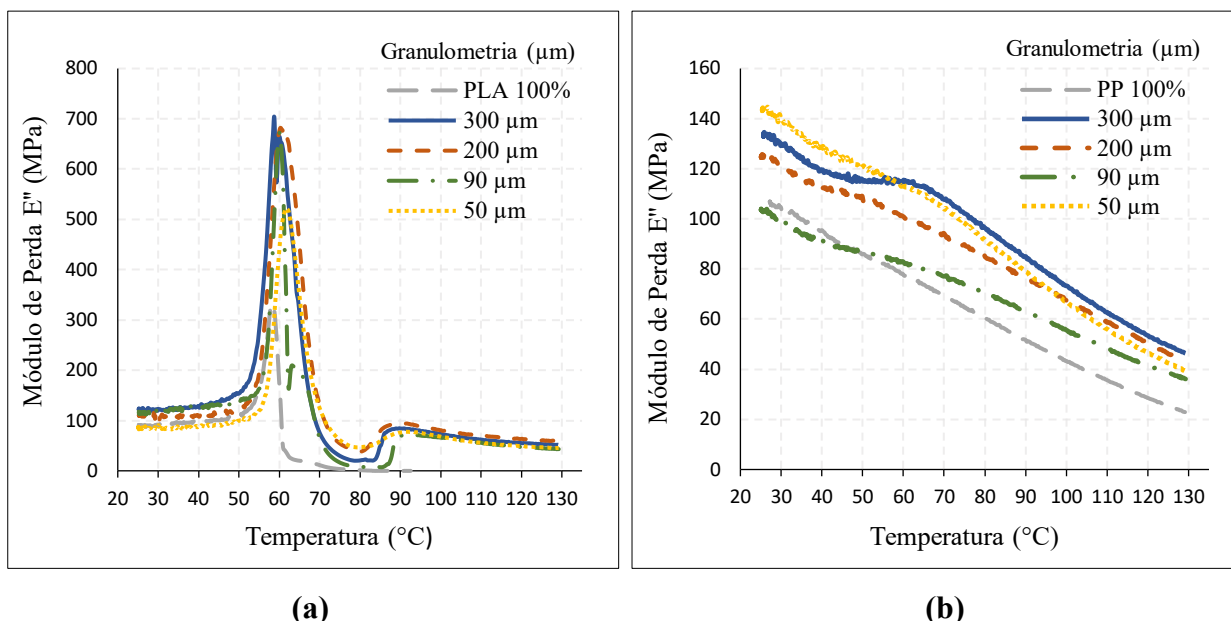


Figura 8. Módulo de Perda (E'') dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com 15% de microfibras de bambu, em diferentes granulometrias de fibra (μm): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).

Os valores de $\tan \delta$, que correspondem ao fator de amortecimento (razão entre o Módulo de Perda, E'' , e o Módulo de Armazenamento, E'), refletem a razão entre os componentes viscosos e elásticos do material. Para os compósitos de base de PLA (Figura 9), os maiores picos de $\tan \delta$ foram observados para a granulometria de 90 μm , seguida, em ordem decrescente, pelas de 300, 200 e 50 μm .

Esses resultados evidenciam variações significativas no grau de interação interfacial fibra–matriz, uma vez que valores mais elevados de $\tan \delta$ estão associados a uma maior dissipação de energia, sugerindo que as cadeias poliméricas possuem maior liberdade de movimento na interface. Por outro lado, o compósito com fibras de 50 μm apresentou o menor pico de $\tan \delta$, o que reforça o papel de restrição eficiente da mobilidade molecular (Loganathan *et al.*, 2024).

Para os compósitos à base de PP, a granulometria 90 μm apresentou os menores valores iniciais para $\tan \delta$, indicando menor dissipação interna de energia e predominância de comportamento elástico e menor dissipação interna. Em seguida, observaram-se as granulometrias de 300, 200 μm e 50 μm . Esse comportamento sugere que, embora haja contribuição das fibras para o aumento da rigidez do material, as características viscoelásticas do sistema continuam atuando. Assim, os resultados indicam uma interação fibra–matriz que

altera a resposta mecânica do compósito, mantendo os componentes elástico e viscoso, conforme ilustrado na Figura 9.

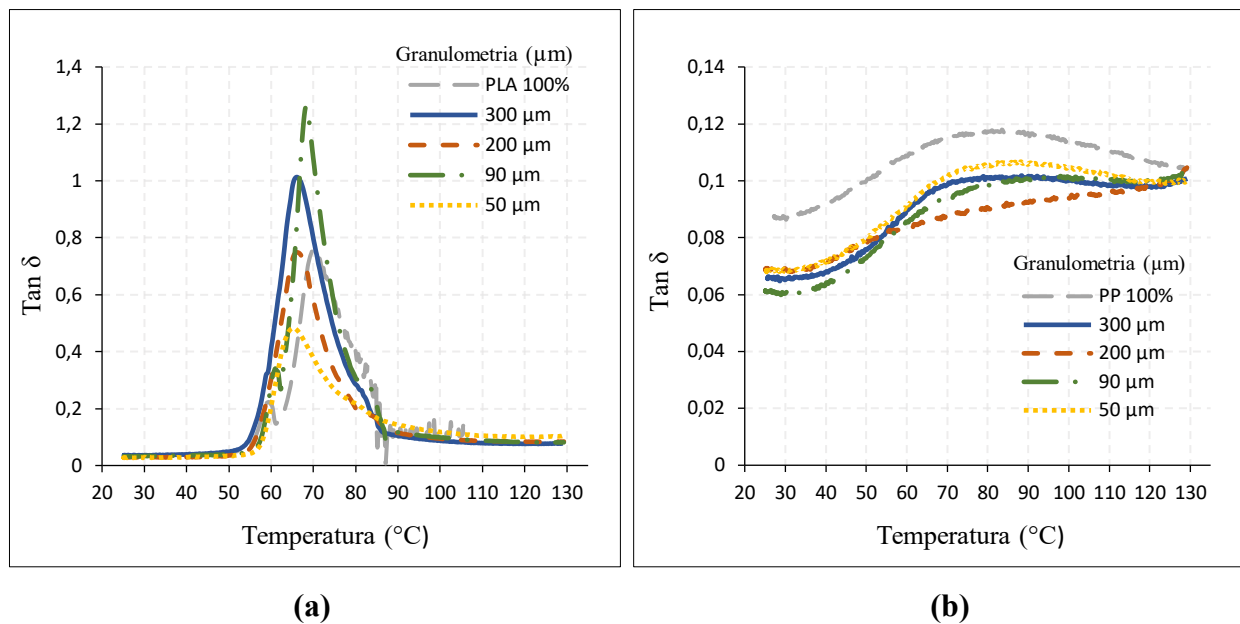


Figura 9. Tan delta ($\tan \delta$) dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com 15% de microfibras de bambu, em diferentes granulometrias de fibra (μm): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).

Com base nos resultados preliminares para as diferentes granulometrias de fibras, foram observados padrões distintos para cada um dos três parâmetros analisados. Para o sistema PLA/Bambu, embora as fibras 200 μm tenham conferido valores maiores para Módulo de Armazenamento (E'), componente associado a rigidez, a análise de $\tan \delta$ demonstrou que a granulometria 50 μm proporcionou maior restrição à mobilidade das cadeias poliméricas, essa característica demonstra uma boa interação entre a interface e a matriz.

Para o sistema PP/Bambu, as fibras de granulometria 50 μm apresentaram o melhor desempenho mecânico em termos de Módulo de Armazenamento (E'). No entanto, também foram observados indícios de menor eficiência em adesão interfacial, refletidos no ligeiro aumento do atrito interno do material. Em matrizes poliméricas apolares como o PP, que possuem menor afinidade química com as fibras a maximização da área de contato com material de reforço, através de partículas menores, é um mecanismo propício para compensar a menor adesão interfacial (Ashraf *et al.*, 2018).

Além dos fatores citados, a escolha pelas fibras 50 μm justifica-se pela busca por maior homogeneidade microestrutural. Partículas menores facilitam a dispersão durante o processamento por extrusão e injeção, reduzindo a probabilidade de aglomeração de fibras e

formação de vazios, garantindo que as variações nas propriedades mecânicas sejam decorrentes da proporção de fibra e não de defeitos de processamento (Xu, H. *et al.*, 2023b).

Desse modo, para as etapas subsequentes, que envolverão a variação das proporções de microfibras de bambu em ambas as matrizes (PP e PLA), adotou-se a granulometria correspondente a 50 µm, como reforço padrão.

4.2 Efeito do Teor de Microfibras de Bambu

A análise do Módulo de Armazenamento (E') para compósitos com diferentes teores de microfibras de bambu/polímero (85%/15%, 70%/30% e 55%/45%) demonstrou que a incorporação de fibras promove um incremento a rigidez de ambos os sistemas (PLA/Fibra de Bambu e PP/Fibra de Bambu) conforme demonstra a Figura 10.

Em ambos os sistemas, o aumento da proporção de fibra de bambu resultou em um aumento progressivo de E' , evidenciando a eficiência das fibras como agentes de reforço rígido que ampliam a capacidade do material de armazenar energia elástica sob carga. Para os compósitos a base de PLA, observa-se que teores baixos de fibra podem não alterar de forma considerável a rigidez do material, uma vez que as curvas de E' para o PLA puro e para com 15% de microfibras estão relativamente próximas. Em contrapartida, teores de 30% e 45% promoveram um aumento considerável de E' , representando acréscimos de aproximadamente 33% e 55%, respectivamente, em relação ao PLA puro.

Observa-se ainda uma queda acentuada em E' com o aumento da temperatura, especificamente na região de transição vítrea (T_g), situada entre 55 °C e 65 °C, que decorre do aumento da mobilidade das cadeias de PLA nessa faixa. Subsequentemente, ocorre uma recuperação da rigidez, fenômeno caracterizado como cristalização a frio, documentado em compósitos de PLA reforçados com fibras vegetais (Xia *et al.*, 2024). Nota-se que os compósitos PLA/Bambu cristalizam em temperaturas inferiores à do polímero puro, o que corrobora a atuação das fibras como agentes nucleantes heterogêneos (Takayama *et al.*, 2014). A redução da temperatura de cristalização a frio com o aumento do teor de fibra, aliada ao fato de a curva de 45% de situar-se significativamente acima das demais após os 90 °C, sugere que o aumento do teor não apenas reforça a matriz, mas altera a cinética de cristalização, o que tem influência sobre as propriedades térmicas e mecânicas finais do material (Xia *et al.*, 2017).

O ganho relativo à rigidez para os compósitos à base de PP é ainda mais expressivo com o incremento das fibras de bambu. Para o teor de 45% de FB, os valores de E' representaram um aumento de quase três vezes em relação ao polímero puro em temperaturas iniciais, evidenciando uma correlação entre o aumento do teor de microfibras e o módulo de armazenamento.

Durante o ensaio, observou-se uma redução gradual e contínua de E' em toda a faixa térmica avaliada (25 °C a 130 °C). Esse perfil é característico de matrizes que operam acima de sua temperatura de transição vítrea (T_g), como mencionado, condição na qual o polímero apresenta maior mobilidade molecular.

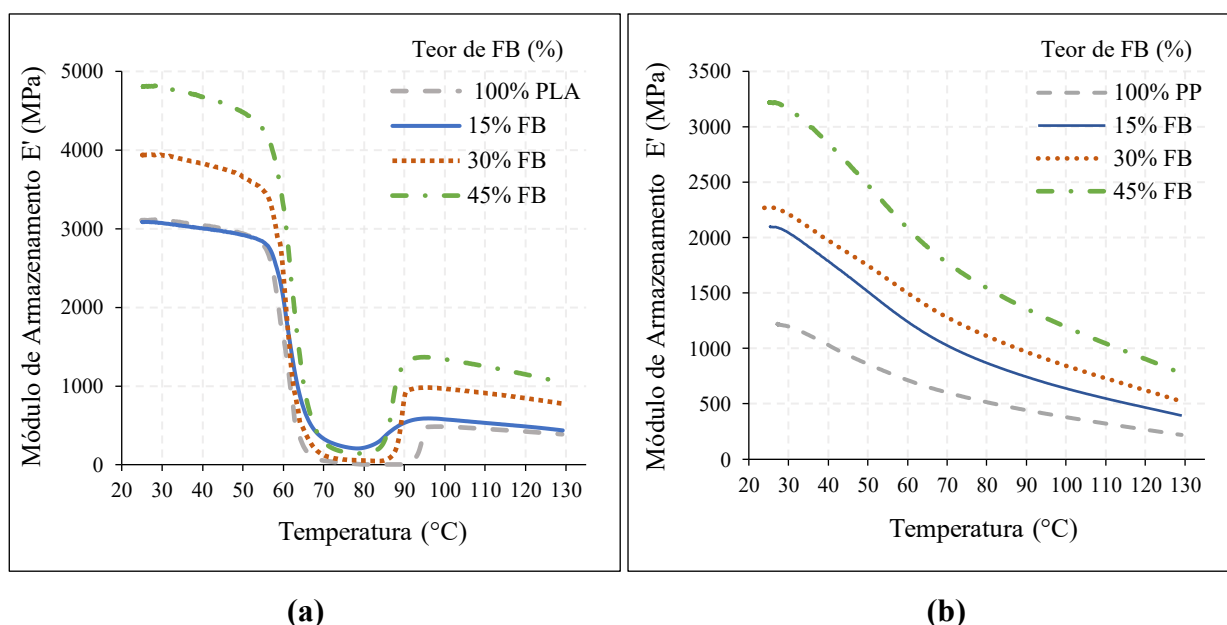


Figura 10. Módulo de armazenamento (E') dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com diferentes teores de microfibras de bambu (FB): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).

Em relação ao Módulo de Perda (E'') indicado na Figura 11, observa-se que o pico de dissipação para os compósitos de matriz PLA intensifica-se significativamente com o incremento do teor de reforço (45% FB > 30% FB > 15% FB > PLA puro). A mesma tendência é verificada para os compósitos de matriz PP, nos quais os valores de E'' elevam-se conforme o aumento do teor de microfibras de bambu. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento do atrito interno na interface fibra-matriz, pois a maior concentração de fibras amplia as áreas superficiais de contato e, consequentemente, a dissipação de energia. Esse resultado confirma que, embora a microfibras reforce o material (aumentando a rigidez) em ambas as matrizes, ela também eleva a dissipação de energia, o que favorece o componente viscoso do material.

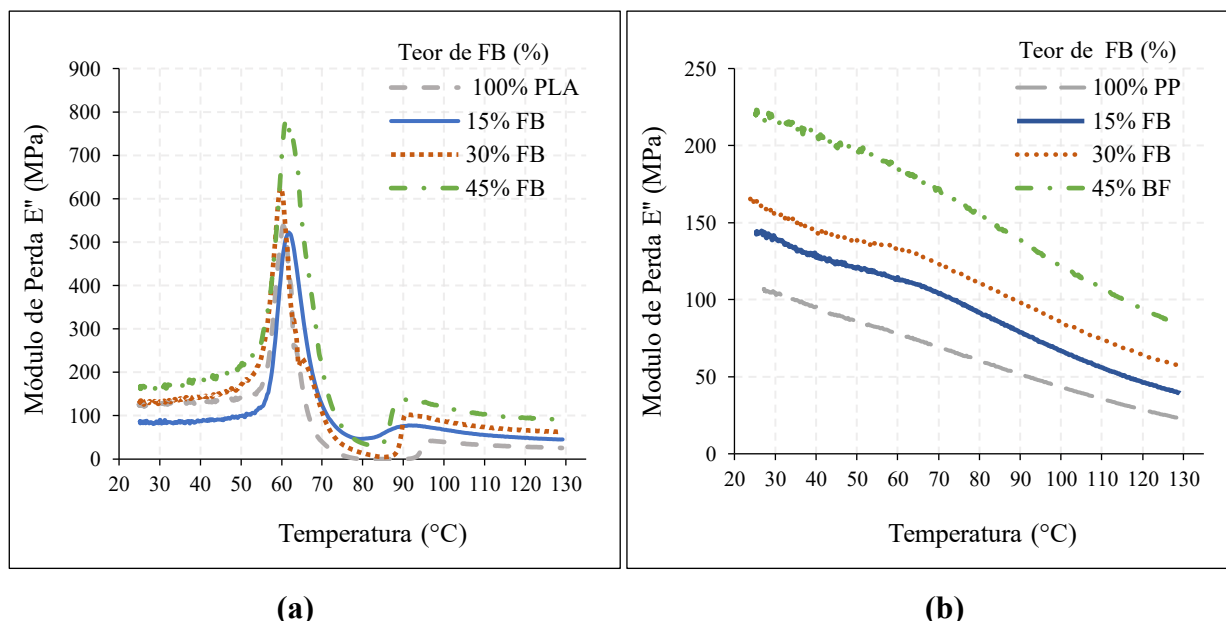


Figura 11. Módulo de perda (E'') dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com diferentes teores de microfibras de bambu (FB): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).

Para $\tan \delta$ (fator de amortecimento) dos compósitos com matriz PLA, conforme observado na Figura 12, os resultados demonstram que o compósito com 30% de microfibras de bambu apresenta o maior pico de $\tan \delta$, superando o PLA puro, isso sugere que nesta concentração houve uma dissipação de energia consideravelmente alta, característico de um atrito interfacial expressivo não compensado pelo caráter elástico (E') ou restrição à mobilidade das cadeias de PLA. Esse resultado para esse teor de microfibras em específico pode ser consequência de uma má dispersão das fibras à matriz durante o processamento e confecção do material, gerando áreas de aglomeração de fibras e consequentemente de maior atrito interno (Ren *et al.*, 2014).

Os compósitos com 15% de microfibras apresentam o menor pico. Indício de uma forte restrição à mobilidade das cadeias de PLA nesta proporção sugerindo também uma interação fibra-matriz eficiente de modo que o caráter elástico (E') predomina consideravelmente sobre o viscoso (E'') durante o pico de transição vítrea. Isso demonstra que a interação matriz-carga é mais forte no material compósito com menor percentual volumétrico de carga adicionada pois a dissipação de energia nos materiais compósitos aumenta devido ao maior contato entre a matriz promovido pelo aumento do teor de fibra (George, Bhagawan e Thomas, 2005; Khalil *et al.*, 2006; Loganathan *et al.*, 2024).

O compósito PLA com 45% microfibras de bambu obteve os valores intermediários para fator de amortecimento, mas ainda inferiores ao PLA puro, o que indica uma maior influência de E' e a ação do reforço na restrição das cadeias de PLA.

Para os compósitos a base de PP (Figura 12), a adição de fibras de bambu diminuiu os valores de $\tan \delta$ de forma progressiva ao aumento do teor de fibra quando comparados ao PP puro. Essa redução indica ação como reforço rígido (predomínio do fator E'), sugerindo que a interface fibra-matriz é eficiente em melhorar a capacidade de suportar e transferir as tensões limitando a mobilidade molecular (Xia *et al.*, 2017).

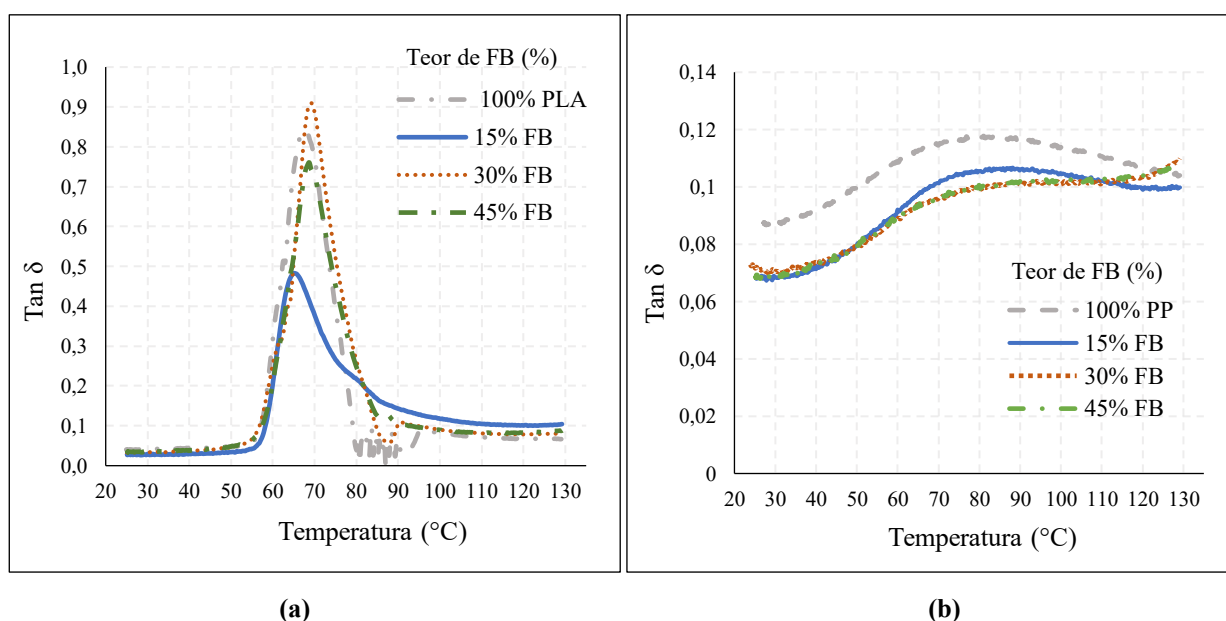


Figura 12. Tan delta ($\tan \delta$) dos compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com diferentes teores de microfibras de bambu (FB): (a) Compósitos de matriz de ácido polilático (PLA); (b) Compósitos de matriz de polipropileno (PP).

4.3 Propriedades Mecânicas e Físicas dos Compósitos

Em relação aos resultados obtidos com ensaio de flexão de três pontos demonstrados na Figura 13, para os compósitos PLA, observa-se que o Módulo de Elasticidade à Flexão (E_f) aumentou gradualmente com o incremento de carga de microfibras de bambu. O teste de Tukey a 5% de significância revelou que a adição de 15% de microfibras não resultou em um ganho relativo ao módulo de elasticidade a flexão, estatisticamente significativo quando comparado ao PLA puro (ambos classificados com a letra a), o que demonstra que, nessas concentrações, o volume de fibra não alterou de forma considerável o desempenho da matriz.

Contudo, a partir de 30% de microfibras ocorre um aumento significativo do módulo de elasticidade, atingindo aproximadamente 5100 MPa (indicado pela letra 'b'). O valor máximo é

observado no teor de 45% (indicado pela letra 'c'), aproximando-se de 6000 MPa. Esse comportamento demonstra que a microfibrilha de bambu atuou efetivamente como um agente de reforço, e que o aumento da fração de microfibrilha tem efeito expressivo nas propriedades de rigidez dos compósitos.

Os compósitos com matriz PP, apresentam tendência análoga aos resultados observados para a matriz PLA. O PP puro e o compósito com 15% de microfibrilha são estatisticamente semelhantes (indicado pela letra 'a'), a partir de 30% de microfibrilha o incremento de microfibrilha passa a ser estatisticamente diferente aos resultados para o PP puro, para o conteúdo de 45% de microfibrilha os valores médios do módulo chegam próximos ao dobro em relação à matriz pura (de 1372 MPa para 2658 MPa).

Apesar do maior incremento absoluto para os compósitos de matriz PLA, por se tratar de uma matriz naturalmente mais rígida, o incremento percentual em relação a matriz PP pura é notável, indício de que a microfibrilha de bambu exerce influência mecânica considerável sobre a matriz de PP.

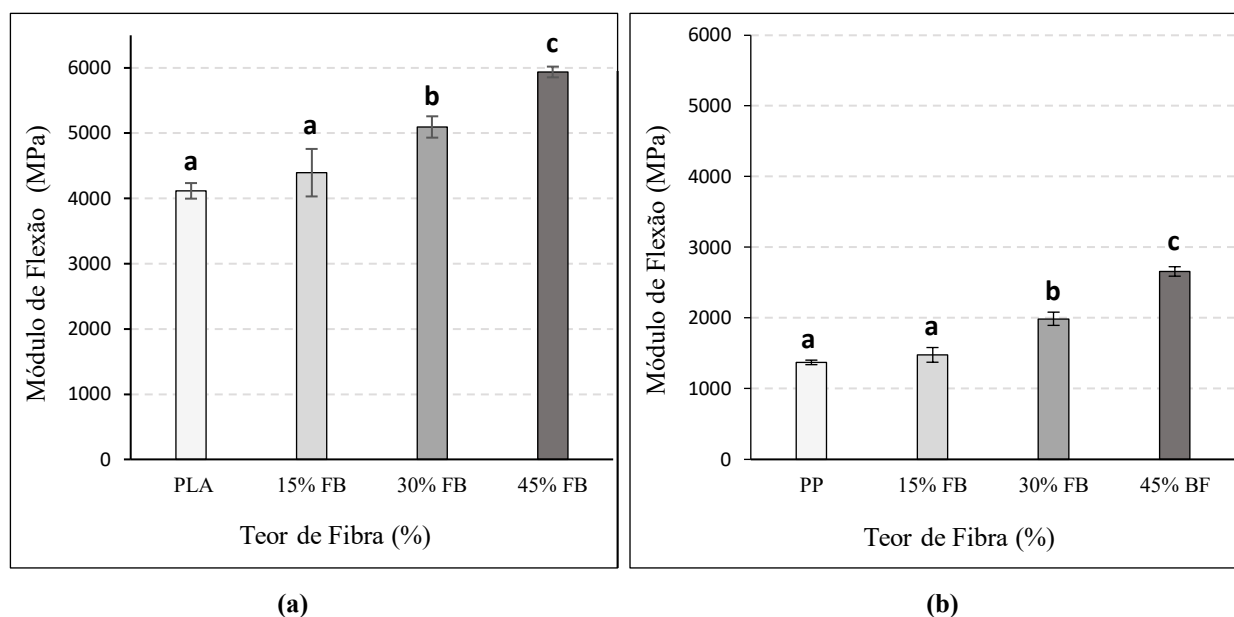


Figura 13. Módulo de flexão a elasticidade (E_f) de compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com microfibrilha de bambu (FB) em função do teor de microfibrilha: (a) compósitos com matriz de ácido polilático (PLA); (b) compósitos com matriz de polipropileno (PP). Médias seguidas de letras iguais para a mesma matriz não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Os resultados de resistência à flexão dos compósitos de matriz PLA (Figura 14) não apresentaram variações estatisticamente significativas com a incorporação das fibras de bambu. De acordo com o teste de Tukey, todas as amostras foram classificadas no mesmo grupo estatístico. Embora tenha sido observada uma tendência de incremento na resistência para o teor de 45%, a elevada variabilidade (desvio padrão) verificada especialmente no PLA puro e a baixa oscilação entre as proporções impossibilitam a afirmação de um ganho estatístico. Esse cenário indica que, embora as fibras confirmem rigidez ao sistema, a transferência de tensões na interface fibra-matriz não foi eficiente o suficiente para elevar a resistência. Entretanto, o fato de não haver queda na resistência mesmo com 45% de carga é um resultado positivo, tendo em vista a tendência de redução da tensão máxima devido à formação de vazios e aglomeração de fibras com acréscimos de fibras. Desse modo a manutenção da resistência sugere que o processamento foi eficiente para garantir homogeneidade do compósito, fator que confere maior molhabilidade as partículas de fibra, ou seja, melhora o envolvimento da matriz às fibras (Khan *et al.*, 2024; Nurul Fazita *et al.*, [s.d.]; Ochi, 2015)

Para os compósitos de base PP, o comportamento foi distinto. Observa-se manutenção estatística na resistência para teores de até 30% de microfibras (representados pela letra 'a'). Contudo, ao atingir o teor de 45%, ocorre uma redução significativa na resistência à flexão (indicado pela letra 'b'), caindo de aproximadamente 53 MPa (matriz pura) para cerca de 45 MPa. Esse comportamento é um indicativo de que a dispersão das fibras de bambu foi prejudicada pelo aumento de sua fração (o que favorece a aglomeração), de modo que parte das fibras pode não ser completamente encapsulada pela matriz de PP o que resulta em defeitos internos e leva a redução da eficiência de transferência de tensões da matriz de PP para as fibras de bambu (Xu *et al.*, 2021).

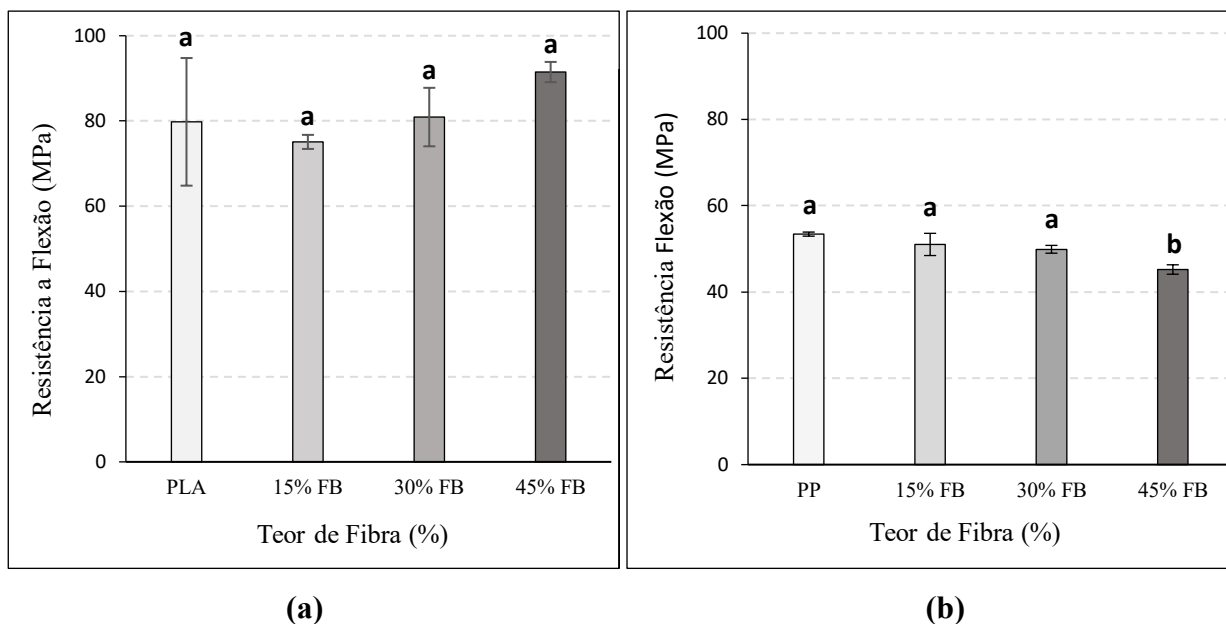


Figura 14. Resistência a flexão (σ_f) de compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com microfibras de bambu (FB) em função do teor de microfibra: (a) compósitos com matriz de ácido polilático (PLA); (b) compósitos com matriz de polipropileno (PP). Médias seguidas de letras iguais para a mesma matriz não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Os resultados do teste de Tukey para o módulo de dureza, observados na Figura 15, demonstram que a incorporação de fibras de bambu não alterou significativamente a dureza de ambas as matrizes poliméricas. Tanto para o sistema de matriz PLA quanto para o de matriz PP, todas as frações de microfibra foram classificadas no mesmo grupo estatístico (indicado pela letra 'a').

Observa-se, entretanto, uma tendência de aumento da dureza conforme o incremento de fibra. Para os compósitos com PLA, os valores médios subiram de aproximadamente 3946 N/mm para 4481 N/mm, enquanto no PP os valores mantiveram-se mais estáveis na faixa de 2157–2334 N/mm. Contudo, essa variação não possui relevância estatística (5% de significância).

Essa proximidade entre os valores médios de dureza para as diferentes cargas de reforço e o polímero puro é esperado, uma vez que o teste avalia principalmente a superfície do compósito onde a matriz é fase dominante. Contudo, o leve aumento observado indica uma contribuição das fibras para a resistência à penetração, o que também pode representar menor propensão ao desgaste por atrito e à absorção de água (Boey, Lee e Tay, 2022; Quintero *et al.*, 2025).

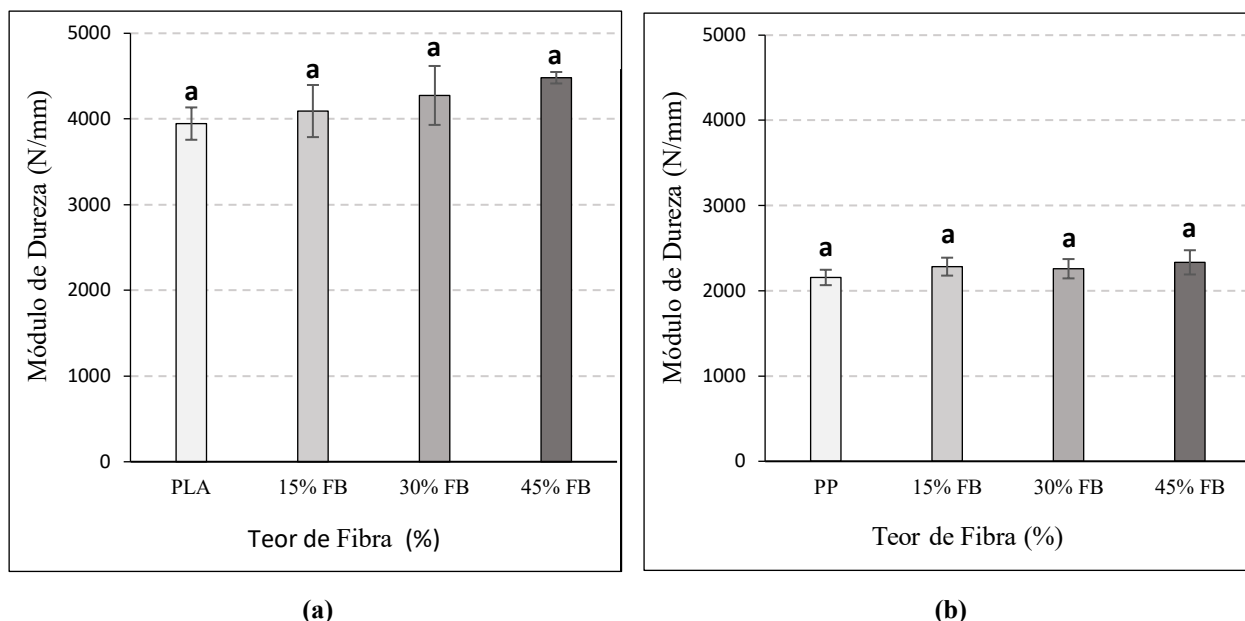


Figura 15. Dureza (N/mm) de compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com microfibras de bambu (FB) em função do teor de microfibras: (a) compósitos com matriz de ácido polilático (PLA); (b) compósitos com matriz de polipropileno (PP). Médias seguidas de letras iguais para a mesma matriz não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

4.4 Taxa de Absorção de Água

Os resultados da análise da taxa de absorção de água para os compósitos de matriz PLA (Figura 16), indicaram uma estabilidade na absorção de água em teores de até 30% microfibras de bambu. Segundo o teste de Tukey, não houve diferença estatística significativa entre o PLA puro, 15% e 30% de microfibras de bambu (todos classificados no grupo 'b'). Nessas frações de fibra, a matriz polimérica parece ser capaz de encapsular eficientemente as fibras vegetais, limitando o acesso da umidade aos grupos de hidrofílicos das fibras.

Entretanto, ocorre um aumento significativo na absorção ao atingir o teor de 45% de microfibras (indicado pela letra 'a'). Esse salto indica que, com carga elevada, o volume de matriz não é mais suficiente para recobrir totalmente o reforço.

Esse comportamento está associado a natureza hidrofílica inerente a fibra de bambu, desse modo, com o aumento do teor de carga, maior é a área superficial do reforço exposta na matriz uma vez que em frações maiores de fibra o volume de matriz pode ser insuficiente para envolver adequadamente as fibras de forma a atuar como barreira física para absorção de água, resultando, portanto, em maior absorção pelo compósito (Azka *et al.*, 2024; Bukar *et al.*, 2025).

Diferente do PLA, os compósitos base polipropileno não apresentaram variações estatisticamente significativas entre nenhum dos grupos testados após 24 horas de imersão. Todas as amostras, do polímero, foram agrupadas sob a letra 'a'.

Esse comportamento pode ser atribuído à natureza extremamente hidrofóbica do polipropileno uma vez que o PLA não é composto apenas por ligações carbono-carbono e carbono-hidrogênio como PP, pois seu principal grupo funcional é o grupo éster ($-\text{COOR}$), a presença desses grupos produz um ligeiro aumento na polaridade da matriz devido aos oxigênios na cadeia o que contribui para a melhor compatibilidade entre fibra e matriz mas também favorece a interação com a água (Oliver-Ortega *et al.*, 2020). Dessa forma, em um período de 24 horas, a barreira imposta pela matriz de PP dificulta a penetração da água. A alta variabilidade observada em alguns grupos (especialmente 30% FB) sugere novamente uma heterogeneidade na dispersão das fibras, mas que não foi suficiente para alterar o perfil de absorção do material de forma estatisticamente significativo.

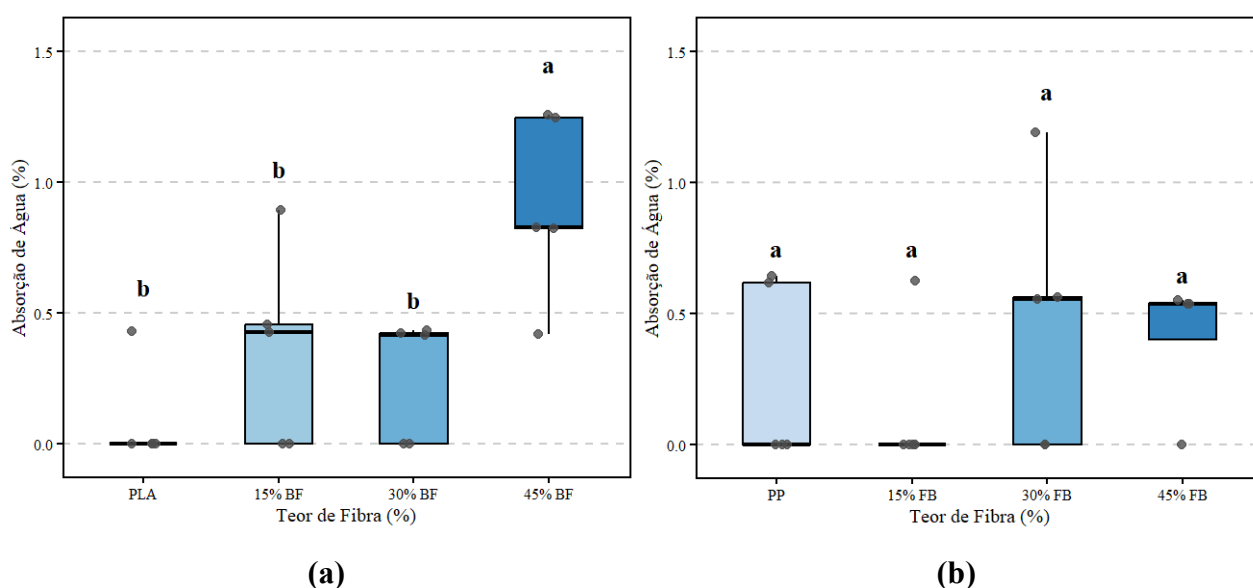


Figura 16. Taxa de absorção de água (%) de compósitos de matriz de PLA e PP reforçados com microfibras de bambu (FB) em função do teor de microfibras: (a) compósitos com matriz de ácido polilático (PLA) e (b) compósitos com matriz de polipropileno (PP). Médias seguidas de letras iguais para a mesma matriz não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

4.5 Análise Fatorial das Propriedades Mecânicas dos Compósitos

Para avaliar a significância estatística dos resultados e quantificar a influência isolada e combinada da natureza da matriz e do teor de reforço sobre o desempenho mecânico dos

compósitos, os dados experimentais foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) em delineamento fatorial 2×4 . Esta abordagem estatística foi utilizada para investigar se as variações observadas nas propriedades de flexão e dureza decorrem de efeitos principais independentes ou de interações na interface matriz-fibra. A Tabela 8 resume os parâmetros estatísticos obtidos para ambos os sistemas poliméricos.

Tabela 8. Resumo da Análise de Variância (ANOVA) fatorial para as Propriedades de Flexão e Dureza dos Compósitos.

Propriedade	Fonte de Variação	gl^a	Soma de Quadrados (SQ)	Valor F	p -valor
Módulo de Flexão	Matriz (M)	1	50.670.154	1793,0277	<0,001***
	Teor de Microfibra de Bambu (FB)	3	7.940.822	93.6653	<0,001***
	Interação ($M \times FB$)	3	202.784	2.3919	0,112 ^{ns}
Resistência à Flexão	Matriz (M)	1	5.784,6	228,67	< 0,001***
	Teor de Microfibra de Bambu (FB)	3	87,08	1,16	0,361 ^{ns}
	Interação ($M \times FB$)	3	432,02	5,70	0,009**
Dureza	Matriz (M)	1	26.934.410	655,89	< 0,001***
	Teor de Microfibra de Bambu (FB)	3	389.353	3,16	0,047*
	Interação ($M \times FB$)	3	151.154	1,23	0,326 ^{ns}

Nota: ^aGraus de liberdade; ^{ns}Não significativo ($p > 0,05$); * Significativo ($p < 0,05$); ** Altamente significativo ($p < 0,01$); *** Extremamente significativo ($p < 0,001$).

À análise de variância fatorial foi realizada sob a perspectiva de que as matrizes PLA e PP possuem naturezas reológicas sabidamente distintas, tornando a comparação direta de suas escalas, menos relevante do que a avaliação da eficiência de reforço em cada sistema. Desse modo, visou-se salientar o efeito da incorporação da microfibra de bambu sobre as propriedades mecânicas em relação às matrizes puras e de forma relativa entre as matrizes.

Os resultados para módulo de elasticidade demonstraram que independentemente da matriz utilizada, a incorporação da microfibra de bambu demonstrou ser um método de reforço eficaz e estatisticamente significativo ($p < 0,001$). Este resultado confirma o papel da fibra de bambu como um agente de reforço eficiente, capaz de elevar a rigidez estrutural dos polímeros estudados. O aumento progressivo do teor de fibras resultou em um ganho mecânico contínuo, indicando que as fibras atuam como restritores de mobilidade das cadeias poliméricas em ambos os sistemas, corroborado pelos resultados para o Módulo de armazenamento (E') já observados (Mofokeng *et al.*, 2012).

Os resultados também revelaram uma interação não significativa entre o tipo de matriz e o teor de fibras ($p = 0,112$). Essa interação indica que a melhoria de desempenho proporcionada pelo reforço com fibras é semelhante para ambos os polímeros estudados, independentemente da matriz, para essa propriedade. Ao avaliar o incremento absoluto de rigidez (Figura 17), observa-se que a matriz de PLA apresentou maior eficiência em relação à adição de reforço, incorporando um ganho de aproximadamente 1,822 MPa em seu módulo de elasticidade com 45% de fibras. Em contraste, a matriz de PP, embora apresente um salto relativo maior devido à sua menor rigidez intrínseca, obteve um ganho absoluto menor (1,287 MPa).

Os resultados da análise fatorial para a resistência a flexão, demonstram um padrão contrastante entre as matrizes para o fator isolado correspondente ao teor de fibra. Observou-se que não houve significância estatística ($p = 0,361$), indicando que a adição de microfibras de bambu não gera um ganho de resistência geral.

Constatou-se ainda a existência de uma interação significativa ($p = 0,009$) revelando que as matrizes de PLA e PP respondem de maneiras distintas à incorporação do reforço para esse parâmetro. No sistema PLA/Bambu, conforme o observado há uma recuperação da resistência em teores elevados (45%), onde o material supera a resistência da matriz pura enquanto para o PP houve uma queda de resistência.

Os resultados estatisticamente significativos para a interação entre o tipo de matriz e o teor de microfibras na resistência indicam que o efeito da carga de microfibras depende da compatibilidade química com o polímero (matriz). Assim, a afinidade entre os grupos polares do PLA e a natureza hidrofílica da fibra de bambu podem proporcionar maior adesão interfacial e, conseqüentemente, melhor transferência de tensão entre a matriz e a fibra, conforme o observado. Resultados semelhantes, demonstrando superioridade mecânica para compósitos de PLA, foram observados por Oksman et al., 2003 ao comparar a resistência de matrizes PLA e PP em compósitos de fibra vegetal (Oksman, Skrifvars e Selin, 2003; Wahit, Akos e Laftah, 2012).

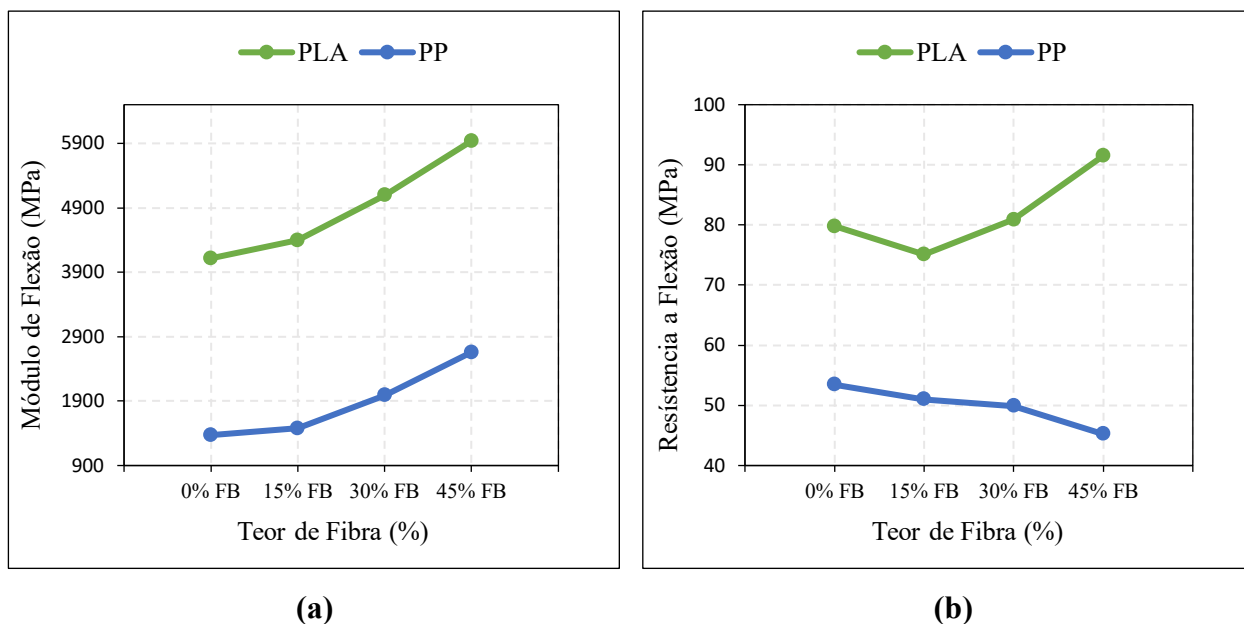


Figura 17. Comparação das propriedades de flexão dos compósitos de PLA e PP em função do teor de fibra de bambu (FB): (a) Módulo de flexão a elasticidade; (b) Resistência à flexão.

Para a dureza, o teor de microfibras de bambu apresentou uma influência estatisticamente significativa ($p = 0,047$), indicando que a incorporação do reforço de fibras promove um aumento na dureza superficial de ambos os sistemas. Diferente das propriedades de resistência à flexão discutidas anteriormente, a interação entre a matriz e o teor de fibras não foi estatisticamente significativa ($p = 0,326$). Sob essa perspectiva, a ausência de interação sugere que o mecanismo de reforço superficial atua de forma independente e paralela em ambos os sistemas, ou seja, a microfibras de bambu exerce um efeito em intensidade semelhante tanto na matriz de PLA quanto na de PP.

Graupner e Müssig (2017), ao compararem compósitos contendo 30% de fibras de liocel em matrizes de PLA e PP, observaram melhor adesão fibra/matriz no sistema à base de PLA em relação ao de PP. No entanto, em termos de dureza, a incorporação das fibras não promoveu alterações significativas no PLA, enquanto, para o PP, foi observado um incremento de apenas 6%. Esse comportamento indica que, para a dureza, a eficiência do reforço não é afetada pelas diferenças de compatibilidade interfacial entre a fibra e os polímeros, resultando em um benefício comum. Assim, para esta propriedade específica, o ganho de performance responde ao aumento da carga de fibra, sem que a escolha da matriz altere o padrão de endurecimento do compósito (Graupner e Müssig, 2017), conforme visualizado na Figura 18.

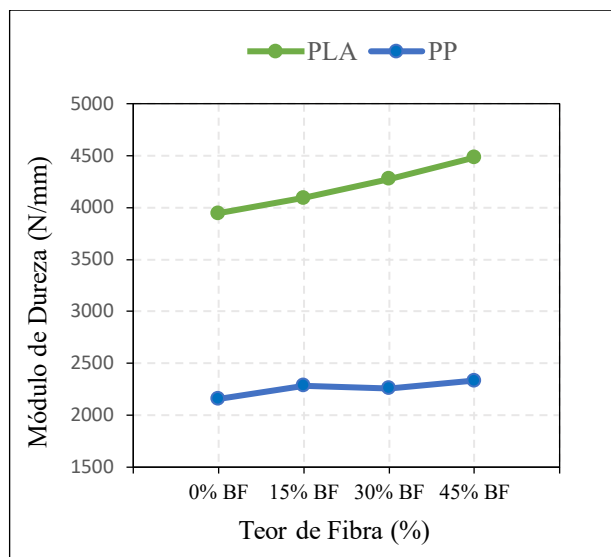


Figura 18. Comparação da dureza dos compósitos de PLA e PP em função do teor de fibra de bambu (FB): (a) Módulo de flexão a elasticidade; (b) Resistência à flexão.

5. CONCLUSÕES

A triagem preliminar realizada por meio de análise mecânica dinâmica (DMA) permitiu identificar que a granulometria de 50 μm apresentou o desempenho mais satisfatório para os sistemas. Esse tamanho de partícula proporcionou superior homogeneidade microestrutural e maior incremento no módulo de armazenamento (E'), sendo a granulometria selecionada para continuidade do estudo.

Em relação a influência do teor de reforço, os resultados indicaram um aumento progressivo na rigidez dos compósitos. No ensaio de flexão, o módulo do sistema PLA/bambu aumentou cerca de 43% em relação à matriz pura, enquanto o sistema PP/bambu apresentou valores que quase dobraram no teor de 45% de fibra. Contudo, observou-se que as matrizes responderam de forma distinta quanto à resistência à flexão: enquanto o PLA manteve estabilidade estatística, o PP apresentou redução significativa no teor mais elevado (45%). Essa divergência, confirmada pela análise fatorial, sugere uma maior afinidade química entre os grupos polares do PLA e as fibras hidrofílicas, contrastando com a natureza apolar do PP, que resultou em falhas de encapsulação e aglomeração em altas concentrações.

Quanto às demais propriedades, a adição de fibras não resultou em aumentos estatisticamente significativos na dureza superficial para nenhum dos sistemas, sugerindo que o mecanismo de endurecimento atua independentemente da compatibilidade interfacial. Em relação as propriedades físicas, a absorção de água evidenciou que o sistema PP permaneceu

estável estatisticamente em todas as condições, enquanto a matriz PLA no teor de 45% de fibra, apresentou um aumento significativo para absorção de água.

6. REFERÊNCIAS

AGASSANT, J.-F.; MACKLEY, M. R. Principles of polymer processing modelling. **MATEC Web of Conferences**, v. 80, p. 11002, 2016.

ASHRAF, M. A.; PENG, W.; ZARE, Y.; RHEE, K. Y. Effects of Size and Aggregation/Agglomeration of Nanoparticles on the Interfacial/Interphase Properties and Tensile Strength of Polymer Nanocomposites. **Nanoscale Research Letters**, v. 13, n. 1, p. 214, 17 jul. 2018.

AZKA, M. A.; SAPUAN, S. M.; ABRAL, H.; ZAINUDIN, E. S.; AZIZ, F. A. An examination of recent research of water absorption behavior of natural fiber reinforced polylactic acid (PLA) composites: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 268, p. 131845, 1 maio 2024.

BAJPAL, P. K.; SINGH, I.; MADAAN, J. Development and characterization of PLA-based green composites: A review. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 27, n. 1, p. 52–81, 1 jan. 2014.

BLEDZKI, A. K.; REIHMANN, S.; GASSAN, J. Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 59, n. 8, p. 1329–1336, 1996.

BOEY, J. Y.; LEE, C. K.; TAY, G. S. Factors Affecting Mechanical Properties of Reinforced Bioplastics: A Review. **Polymers**, v. 14, n. 18, p. 3737, jan. 2022.

BUKAR, M.; AJI, I. S.; MSHELIA, Z. A.; HAMMAJAM, A. A. Effects of Fibre Length and Fibre Loading on Tensile and Flexural Properties of Luffa Cylindrica Reinforced Polylactic Acid Composite. **ARID ZONE JOURNAL OF ENGINEERING, TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT**, v. 21, n. 1, p. 309–317, 4 mar. 2025.

BUNSELL, A. R.; RENARD, J. **Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials**. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2005.

CRAWFORD, R. J. **Plastics Engineering**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 1998..

DA COSTA, C. R.; RATTI, A.; DEL CURTO, B. Product development using vegetable fibers. **International Journal of Design & Nature and Ecodynamics**, v. 9, n. 3, p. 237–244, 30 set. 2014.

Doak, KW (1986) Polietileno de baixa densidade (alta pressão). Em Mark, HF, Ed., **Enciclopédia de Ciência e Engenharia de Polímeros**, John Wiley & Sons, Nova York, 6, 386-429. - Referências - Publicações de Pesquisa Científica. Disponível em: <<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1252436>>. Acesso em: 6 maio. 2026.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.-P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, Topical Issue on Polymeric Biomaterials. v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 1 nov. 2012.

FINKELDEY, F.; VOLKE, J.; ZARGES, J.-C.; HEIM, H.-P.; WIEDERKEHR, P. Learning quality characteristics for plastic injection molding processes using a combination of simulated and measured data. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 60, p. 134–143, 1 dez. 2020.

FORNARI JUNIOR, C. C. M. **Fibras vegetais para compósitos poliméricos**. Editus, 2017.

FU, H.; XU, H.; LIU, Y.; YANG, Z.; KORMAKOV, S.; WU, D.; SUN, J. Overview of Injection Molding Technology for Processing Polymers and Their Composites. **ES Materials and Manufacturing**, v. Volume 8 (June 2020), n. 20, p. 3–23, 22 maio 2020.

GAO, X.; ZHU, D.; FAN, S.; RAHMAN, M. Z.; GUO, S.; CHEN, F. Structural and mechanical properties of bamboo fiber bundle and fiber/bundle reinforced composites: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 19, p. 1162–1190, 1 jul. 2022.

GARAT, W.; LE MOIGNE, N.; CORN, S.; BEAUGRAND, J.; BERGERET, A. Swelling of natural fibre bundles under hygro- and hydrothermal conditions: Determination of hydric expansion coefficients by automated laser scanning. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 131, p. 105803, 1 abr. 2020.

GAVRILESCU, D.; TOFANICA, B. M.; PUITEL, A. C.; PETREA, P. SUSTAINABLE USE OF VEGETAL FIBERS IN COMPOSITE MATERIALS. SOURCES OF VEGETAL FIBERS. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 8, n. 3, p. 429–438, 2009.

GEORGE, J.; BHAGAWAN, S. S.; THOMAS, S. Thermogravimetric and dynamic mechanical thermal analysis of pineapple fibre reinforced polyethylene composites. 2 ago. 2005.

GONTARSKI, T. DE L.; CASALI, R. M.; MIKOWSKI, A. Dureza vickers – definição, normatização e perspectivas de pesquisa: uma revisão / Vickers hardness – definition, standardization and research perspectives: a review. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 15736–15754, 15 fev. 2021.

GRAUPNER, N.; MÜSSIG, J. Cellulose Fiber-Reinforced PLA versus PP. **International Journal of Polymer Science**, v. 2017, n. 1, p. 6059183, 2017.

HE, L.; SONG, F.; LI, D.-F.; ZHAO, X.; WANG, X.-L.; WANG, Y.-Z. Strong and Tough Polylactic Acid Based Composites Enabled by Simultaneous Reinforcement and Interfacial Compatibilization of Microfibrillated Cellulose. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1573–1582, 27 jan. 2020.

JIANG, L.; LI, Y.; MA, B.; DING, H.; SU, S.; XIONG, C. Effect of Bamboo Fiber Length on Mechanical Properties, Crystallization Behavior, and in Vitro Degradation of Bamboo Fiber/Nanohydroxyapatite/Poly(lactic-co-glycolic) Composite. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 57, n. 13, p. 4585–4591, 4 abr. 2018.

JR, W. D. C.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. John Wiley & Sons, 2020. 994 p.

KERNI, L.; SINGH, S.; PATNAIK, A.; KUMAR, N. A review on natural fiber reinforced composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 28, 31 dez. 2019.

KHALIL, H. P. S. A.; SHAHNAZ, S. B. S.; RATNAM, M. M.; AHMAD, F.; FUAAD, N. A. N. Recycle Polypropylene (RPP) - Wood Saw Dust (WSD) Composites - Part 1: The Effect of Different Filler Size and Filler Loading on Mechanical and Water Absorption Properties. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 25, n. 12, p. 1291–1303, 1 ago. 2006.

KHAN, A.; SAPUAN, S. M.; ZAINUDIN, E. S.; ZUHRI, M. Y. M. Physical, mechanical and thermal properties of novel bamboo/kenaf fiber-reinforced polylactic acid (PLA) hybrid composites. **Composites Communications**, v. 51, p. 102103, 1 nov. 2024.

KHOSRAVANI, M. R.; NASIRI, S. Injection molding manufacturing process: review of case-based reasoning applications. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 4, p. 847–864, 1 abr. 2020.

KÜHNERT, I.; SPÖRER, Y.; BRÜNIG, H.; TRAN, N. H. A.; RUDOLPH, N. Processing of Poly(lactic Acid). *Em: DI LORENZO, M. L.; ANDROSCH, R. (Eds.). . Industrial Applications of Poly(lactic acid)*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 1–33.

LE GUEN, M.-J.; NEWMAN, R. H.; FERNYHOUGH, A.; HILL, S. J.; STAIGER, M. P. **Correlations Between the Physiochemical Characteristics of Plant Fibres and Their Mechanical Properties** (R. Figueiro & S. Rana, Eds.) *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*. **Anais...**Dordrecht: Springer Netherlands, 2016

LI, Y.; HU, Y. P.; HU, C. J.; YU, Y. H. Microstructures and Mechanical Properties of Natural Fibers. **Advanced Materials Research**, v. 33–37, p. 553–558, 2008.

LOGANATHAN, K.; GIRI, R.; SRINIVASAN, S. P.; VIMALANATHAN, P. Experimental investigation on mechanical, thermal, DMA, and dielectric analysis of Cordia dichotoma with PLA composites. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 24, p. 31789–31804, 1 dez. 2024.

LOPES, B. L. S. **Polímeros reforçados por fibras vegetais: um resumo sobre esses compósitos**. Blucher Acadêmico, 2017.

MALKAPURAM, R.; KUMAR, V.; NEGI, Y. S. Recent Development in Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 28, n. 10, p. 1169–1189, 1 maio 2009.

MARTIJANTI, M.; SUTARNO, S.; JUWONO, A. L. Polymer Composite Fabrication Reinforced with Bamboo Fiber for Particle Board Product Raw Material Application. **Polymers**, v. 13, n. 24, p. 4377, jan. 2021.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite Materials: Engineering and Science**. Woodhead Publishing, 1999.

Mechanical performance of Kraft fibre reinforced polypropylene composites: Influence of fibre length, fibre beating and hygrothermal ageing. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 11, p. 1748–1755, 1 nov. 2008.

MENARD, K. P.; MENARD, N. **Dynamic Mechanical Analysis**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2020.

MI, Y.; CHEN, X.; CUO, Q.; CHAN, C.-M. **Bamboo fiber reinforced polypropylene composites**, 16 mar. 1999. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US5882745A/en>>. Acesso em: 29 mar. 2026

MITALOVÁ, Z.; MITAL, D.; BERLADIR, K. A Concise Review of the Components and Properties of Wood–Plastic Composites. **Polymers**, v. 16, n. 11, p. 1556, jan. 2024.

MOCHANE, M. J.; MOKHENA, T. C.; MOKHOTHU, T. H.; MTIBE, A.; SADIKU, E. R.; RAY, S. S.; IBRAHIM, I. D.; DARAMOLA, O. O. Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review. **Express Polymer Letters**, v. 13, n. 2, p. 159–198, 2019.

MOFOKENG, J. P.; LUYT, A. S.; TÁBI, T.; KOVÁCS, J. Comparison of injection moulded, natural fibre-reinforced composites with PP and PLA as matrices. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 25, n. 8, p. 927–948, 1 dez. 2012.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 10, n. 1, p. 19–26, 1 abr. 2002.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora Blucher, 2021. 419 p

NURAZZI, N. M. *et al.* A Review on Mechanical Performance of Hybrid Natural Fiber Polymer Composites for Structural Applications. **Polymers**, v. 13, n. 13, p. 2170, jan. 2021.

NURUL FAZITA, M. R.; JOHARY, N.; ABDUL KHALIL, H. P. S.; NORAZLI, N.; AZNIWATI, A. A.; MOHAMAD HAAFIZ, M. K. Parameter optimization via the Taguchi method to improve

the mechanical properties of bamboo particle reinforced polylactic acid composites. *BioResources*. 2021;16(1):1914–39.

OCHI, S. Flexural Properties of Long Bamboo Fiber/ PLA Composites. **Open Journal of Composite Materials**, v. 5, n. 3, p. 70–78, 3 jul. 2015.

OKSMAN, K.; SKRIFVARS, M.; SELIN, J.-F. Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. **Composites Science and Technology**, Eco-Composites. v. 63, n. 9, p. 1317–1324, 1 jul. 2003.

OLIVER-ORTEGA, H.; TARRÉS, Q.; MUTJÉ, P.; DELGADO-AGUILAR, M.; MÉNDEZ, J. A.; ESPINACH, F. X. Impact Strength and Water Uptake Behavior of Bleached Kraft Softwood-Reinforced PLA Composites as Alternative to PP-Based Materials. **Polymers**, v. 12, n. 9, p. 2144, 20 set. 2020.

PACHECO, A.; EVANGELISTA-OSORIO, A.; MUCHAYPIÑA-FLORES, K. G.; MARZANO-BARRERA, L. A.; PAREDES-CONCEPCIÓN, P.; PALACIN-BALDEÓN, H.; DOS SANTOS, M. S. N.; TRES, M. V.; ZABOT, G. L.; OLIVERA-MONTENEGRO, L. Polymeric Materials Obtained by Extrusion and Injection Molding from Lignocellulosic Agroindustrial Biomass. **Polymers**, v. 15, n. 20, p. 4046, jan. 2023.

Physical, Chemical, And Mechanical Properties of Bamboo and Its Utilization Potential for Fiberboard Manufacturing - ProQuest. Disponível em: <<https://www.proquest.com/openview/ddface4f432d2e0036fec86af25188f7>>. Acesso em: 4 maio. 2026.

QIAN, S.; SHENG, K.; YU, K.; XU, L.; FONTANILLO LOPEZ, C. A. Improved properties of PLA biocomposites toughened with bamboo cellulose nanowhiskers through silane modification. **Journal of Materials Science**, v. 53, n. 15, p. 10920–10932, 1 ago. 2018.

QUINTERO, L.; GARCÍA, A.; ALCARAZ, A.; FAJARDO, J.; CRUZ, L. Efecto de variables de proceso en el comportamiento mecánico y térmico de un composite de polipropileno reforzado con fibras cortas de bambú por compresión en caliente. **Ingenius**, n. 34, p. 20–30, 1 jul. 2025.

RANAKOTI, L.; GANGIL, B.; MISHRA, S. K.; SINGH, T.; SHARMA, S.; ILYAS, R. A.; EL-KHATIB, S. Critical Review on Polylactic Acid: Properties, Structure, Processing, Biocomposites, and Nanocomposites. **Materials**, v. 15, n. 12, p. 4312, jan. 2022.

RANAKOTI, L.; GUPTA, M. K.; RAKESH, P. K. Analysis of mechanical and tribological behavior of wood flour filled glass fiber reinforced epoxy composite. **Materials Research Express**, v. 6, n. 8, p. 085327, maio 2019.

RANAKOTI, L.; RAKESH, P. K. Physio-mechanical characterization of tasar silk waste/jute fiber hybrid composite. **Composites Communications**, v. 22, p. 100526, 1 dez. 2020.

REN, W.; ZHANG, D.; WANG, G.; CHENG, H. Mechanical and Thermal Properties of Bamboo Pulp Fiber Reinforced Polyethylene Composites. **BioResources**, v. 9, n. 3, p. 4117–4127, 19 maio 2014.

SHAHANI, S.; GAO, Z.; QAISRANI, M. A.; AHMED, N.; YAQOOB, H.; KHOSHNAW, F.; SHER, F. Preparation and Characterisation of Sustainable Wood Plastic Composites Extracted from Municipal Solid Waste. **Polymers**, v. 13, n. 21, p. 3670, jan. 2021.

SINHA, A. K.; NARANG, H. K.; BHATTACHARYA, S. Mechanical properties of natural fibre polymer composites. **Journal of Polymer Engineering**, v. 37, n. 9, p. 879–895, 1 nov. 2017.

SOUZA, S. A. DE. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. Editora Blucher, 1982.

TAKAYAMA, T.; DAIGAKU, Y.; ITO, H.; TAKAMORI, H. Mechanical properties of bio-absorbable PLA/PGA fiber-reinforced composites. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 28, n. 10, p. 4151–4154, 1 out. 2014.

TSUJI, H. Poly(lactic acid) stereocomplexes: A decade of progress. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 107, p. 97–135, 15 dez. 2016.

VAN DE VELDE, K.; KIEKENS, P. Thermoplastic polymers: overview of several properties and their consequences in flax fibre reinforced composites. **Polymer Testing**, v. 20, n. 8, p. 885–893, 1 jan. 2001.

WAHIT, M. U.; AKOS, N. I.; LAFTAH, W. A. Influence of natural fibers on the mechanical properties and biodegradation of poly(lactic acid) and poly(ϵ -caprolactone) composites: A review. **Polymer Composites**, v. 33, n. 7, p. 1045–1053, 2012.

WANG, R.; YANG, R.; YANG, F. Production of bamboo fiber reinforced fibrillated poly(lactic acid) (PLA) material obtained by a papermaking process. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 30, n. 2, p. 429–432, 1 abr. 2015.

WU, C.-S.; WU, D.-Y.; WANG, S.-S. Preparation and Characterization of Polylactic Acid/Bamboo Fiber Composites. **ACS Applied Bio Materials**, v. 5, n. 3, p. 1038–1046, 21 mar. 2022.

XIA, L.; WU, J.; WANG, H.; HUANG, Z.; YANG, R.; ZHANG, X.; GUO, F.; LI, J.; YU, Y. Enhanced mechanical performance of bamboo fiber/polypropylene composites via micro-nano reinforcing strategy. **Composites Part B: Engineering**, v. 280, p. 111488, 1 jul. 2024.

XIA, X.; SHI, X.; LIU, W.; ZHAO, H.; LI, H.; ZHANG, Y. Effect of flax fiber content on polylactic acid (PLA) crystallization in PLA/flax fiber composites. **Iranian Polymer Journal**, v. 26, n. 9, p. 693–702, 1 set. 2017.

XU, D.; HE, S.; LENG, W.; CHEN, Y.; WU, Z. Replacing Plastic with Bamboo: A Review of the Properties and Green Applications of Bamboo-Fiber-Reinforced Polymer Composites. **Polymers**, v. 15, n. 21, p. 4276, jan. 2023a.

XU, H.; YANG, Y.; LI, L.; LIU, B.; FU, X.; YANG, X.; CAO, Y. Mechanical Properties Variation in Wood—Plastic Composites with a Mixed Wood Fiber Size. **Materials**, v. 16, n. 17, p. 5801, jan. 2023a.

XU, J.; HAO, X.; TANG, W.; ZHOU, H.; CHEN, L.; GUO, C.; WANG, Q.; OU, R. Mechanical properties, morphology, and creep resistance of ultra-highly filled bamboo fiber/polypropylene composites: Effects of filler content and melt flow index of polypropylene. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125289, 6 dez. 2021.

YU, Y.; TIAN, G.; WANG, H.; FEI, B.; WANG, G. Mechanical characterization of single bamboo fibers with nanoindentation and microtensile technique. **Holzforschung**, v. 65, n. 1, p. 113–119, 1 jan. 2011.

ZÁRATE, C. N.; ARANGUREN, M. I.; REBOREDO, M. M. Resol–vegetable fibers composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 77, n. 8, p. 1832–1840, 2000.

ZHANG, W.; LIU, P.; YANG, G.; LEI, H. Single Polylactic Acid Nanowire for Highly Sensitive and Multifunctional Optical Biosensing. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 13, n. 24, p. 27983–27990, 23 jun. 2021.

ZHANG, W. P.; LU, Y. H.; KHANAL, S.; XU, S. A. EFFECTS OF COMPATIBILIZERS ON SELECTED PROPERTIES OF HDPE COMPOSITES HIGHLY FILLED WITH BAMBOO FLOUR. **Wood and Fiber Science**, v. 50, n. 3, p. 254–264, 20 jul. 2018.

ZHANG, Z.; WANG, P.; WU, J. Dynamic Mechanical Properties of EVA Polymer-Modified Cement Paste at Early Age. **Physics Procedia**, International Conference on Solid State Devices and Materials Science, April 1-2, 2012, Macao. v. 25, p. 305–310, 1 jan. 2012.

ZUFFO, A. M.; AGUILERA, J. G.; MARQUES, L. F. Inovações em pesquisas agrárias e ambientais. **Pantanal Editora**, p. 1–130, 2024a.

APÊNDICE A

Resultados das Análises de Variância

Tabela A.1 - Análise de Variância - Módulo de Elasticidade dos compósitos com matriz em PLA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5306736	3	1768912	35,7425	0,0001294	4,346831
Dentro dos grupos	346433,1	7	49490,44			
Total	5653169	10				

CV = 4,55%

Tabela A.2 - Análise de Variância - Módulo de Elasticidade dos compósitos com matriz em PP

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2836868	3	945622,7	134,5394	1,496E-06	4,346831
Dentro dos grupos	49200,15	7	7028,592			
Total	2886068	10				

CV = 4,47%

Tabela A.3 - Análise de Variância - Resistência à Flexão dos compósitos com matriz em PLA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	426,667	3	142,2223	2,969485	0,10653	4,346831
Dentro dos grupos	335,2623	7	47,89461			
Total	761,9292	10				

CV = 8,46%

Tabela A.4 - Análise de Variância - Resistência à Flexão dos compósitos com matriz em PP

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	93,29186	3	31,09729	11,511358	0,004265	4,346831
Dentro dos grupos	18,91011	7	2,701444			
Total	112,202	10				

CV = 3,29%

Tabela A.5 - Análise de Variância - Dureza dos compósitos com matriz em PLA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	497344	3	165781,3	2,434615	0,125276	3,708265
Dentro dos grupos	680934,4	10	68093,44			
Total	1178278	13				

CV = 6,22%

Tabela A.6 - Análise de Variância - Dureza dos compósitos com matriz em PP

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	43162,28	3	14387,43	1,024932	0,422386	3,708265
Dentro dos grupos	140374,5	10	14037,45			
Total	183536,7	13				

CV = 5,25%

Tabela A.7 - Análise de Variância - Absorção de Água (24h) para PLA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,927538	3	0,642513	7,30116	0,002659	3,238872
Dentro dos grupos	1,408023	16	0,088001			
Total	3,335562	19				

CV = 104,18%

Tabela A.8 - Análise de Variância - Absorção de Água (24h) para PP

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,26673	3	0,08891	0,663723	0,586371	3,238872
Dentro dos grupos	2,143304	16	0,133956			
Total	2,410034	19				

CV = 122,18%

APÊNDICE B

Resultado do Teste de Tukey

Tabela B.1 - Resultados do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para o módulo de elasticidade dos compósitos de matriz PLA.

Comparações (Grupos)	Diferença das Médias	Limite Inferior (IC 95%)	Limite Superior (IC 95%)	Valor-p ajustado
15% Fibra vs 0% Controle	278,6893	-393,543	950,9217	0,5518
30% Fibra vs 0% Controle	979,1443	306,912	1651,3767	0,008
45% Fibra vs 0% Controle	1821,8767	1149,6443	2494,109	0,0002
30% Fibra vs 15% Fibra	700,455	99,1921	1301,7179	0,025
45% Fibra vs 15% Fibra	1543,1873	941,9245	2144,4502	0,0003
45% Fibra vs 30% Fibra	842,7323	241,4695	1443,9952	0,0098

Tabela B.2 - Resultados do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para o módulo de elasticidade dos compósitos de matriz PP.

Comparações (Grupos)	Diferença das Médias	Limite Inferior (IC 95%)	Limite Superior (IC 95%)	Valor-p ajustado
15% Fibra vs 0% Controle	106,5405	-146,793	359,874	0,5412
30% Fibra vs 0% Controle	617,4282	364,0947	870,7616	0,0004
45% Fibra vs 0% Controle	1286,7246	1033,3911	1540,058	< 0,0001
30% Fibra vs 15% Fibra	510,8877	284,2993	737,476	0,0006
45% Fibra vs 15% Fibra	1180,1841	953,5957	1406,7724	< 0,0001
45% Fibra vs 30% Fibra	669,2964	442,7081	895,8847	0,0001

Tabela B.3 - Resultados do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para a resistência à flexão dos compósitos de matriz PP.

Comparações (Grupos)	Diferença das Médias	Limite Inferior (IC 95%)	Limite Superior (IC 95%)	Valor-p ajustado
15% Fibra vs 0% Controle	-2,4001	-7,3664	2,5663	0,4363
30% Fibra vs 0% Controle	-3,5208	-8,4872	1,4455	0,1761
45% Fibra vs 0% Controle	-8,2093	-13,1757	-3,243	0,004
30% Fibra vs 15% Fibra	-1,1208	-5,5628	3,3213	0,8365
45% Fibra vs 15% Fibra	-5,8093	-10,2513	-1,3672	0,0141
45% Fibra vs 30% Fibra	-4,6885	-9,1305	-0,2465	0,0395

Tabela B.4 - Resultados do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para a absorção de água (24h) dos compósitos de matriz PLA.

Comparações (Grupos)	Diferença das Médias	Limite Inferior (IC 95%)	Limite Superior (IC 95%)	Valor-p ajustado
15% Fibra vs 0% Controle	0,2684	-0,2684	0,8052	0,4996
30% Fibra vs 0% Controle	0,1681	-0,3687	0,7049	0,807
45% Fibra vs 0% Controle	0,8274	0,2906	1,3642	0,0022
30% Fibra vs 15% Fibra	-0,1003	-0,6371	0,4365	0,9494
45% Fibra vs 15% Fibra	0,559	0,0222	1,0958	0,0398
15% Fibra vs 0% Controle	0,2684	-0,2684	0,8052	0,4996