

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOPLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE *PINUS SPP.*

Ayla Marinho da Silva, Universidade do Estado do Pará, Mestranda em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia, aylamarinho.silva@gmail.com, 0000-0002-9570-2034. **Elielson Holanda Prado**, Universidade do Estado do Pará, Graduando de Bacharelado em Engenharia Florestal, elielsomholanda@gmail.com, 0009-0009-8430-4442. **João Rodrigo Coimbra Nobre**, Universidade do Estado do Pará, Departamento de Ciências Florestais, rodrigonobre@uepa.br, 0000-0001-6276-205X

DOI:

RESUMO

O uso excessivo de plásticos convencionais é um dos principais problemas ambientais atuais, devido aos impactos negativos aos ecossistemas decorrentes da poluição plástica, além disso, o descarte inadequado de resíduos florestais e agroindustriais também constituem desafios significativos ao meio ambiente, o que torna necessário a busca por alternativas sustentáveis. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver bioplásticos de amido de milho reforçados com fibras de madeira de *pinus spp. in natura*, buscando contribuir com a valorização dos resíduos e mitigação das pressões ambientais. Para tanto, os bioplásticos foram obtidos pelo método de *casting*, utilizando amido de milho, fibras de pinus, glicerol e água destilada, onde foram desenvolvidos quatro tratamentos nas concentrações de 5%, 10% e 15% em relação ao peso do amido, além do controle (0%). Os bioplásticos foram analisados quanto ao teor de umidade, densidade, espessura e absorção de água. Os dados obtidos foram submetidos à estatística descritiva, ANOVA, teste de Tukey (5%) e Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade. Os resultados demonstraram que a adição das fibras, independente da concentração, não influenciaram no teor de umidade e na espessura dos bioplásticos, contudo, apresentaram resultados significativos no parâmetro de densidade, principalmente entre os tratamentos com 10% (0,15 g/cm³) e controle (0,18 g/cm³). Quanto à absorção de água, as amostras analisadas apresentaram valores acima de 70%, não diferindo estatisticamente entre os tratamentos. Dessa forma, os resultados indicam que o aproveitamento das fibras de pinus *in natura*, possuem potencial como carga de reforço em matrizes poliméricas, além de contribuir para a valorização dos resíduos florestais e mitigação dos impactos ambientais. No entanto, novos experimentos são necessários para melhorar o desempenho final, assim como identificar a aplicação sustentável dos materiais desenvolvidos.

Palavras-chave: Biomateriais. Resíduos florestais. Fibras lignocelulósicas. Sustentabilidade.

1 Introdução

A produção e uso excessivo dos plásticos sintéticos tornou-se uma das principais problemáticas atuais, devido aos impactos associados ao uso dos recursos naturais não renováveis e à persistência dos materiais no meio ambiente após o fim da vida útil. Apesar da importância dos plásticos para diversos setores, a elevada produção, a qual ultrapassa 400 milhões de toneladas ao ano, contribui de forma significativa para a poluição ambiental e impactos nos ecossistemas devido a dispersão de macro e micro partículas que ocasionam poluição atmosférica quando incinerados de forma incorreta, acúmulos de resíduos em aterros sanitários e ambientes marinhos (Asrofi *et al.*, 2021; PlasticsEurope, 2024).

Diante da persistência dos materiais nos ecossistemas, estratégias estão sendo desenvolvidas visando a produção de bioplásticos a partir de matérias primas renováveis, para substituição parcial dos plásticos convencionais e mitigação dos problemas ambientais. Nesse contexto, compósitos poliméricos como os bioplásticos produzidos a partir da combinação entre uma matriz e um agente de reforço, tornaram-se promissores, visto que são produzidos a partir de biomassas disponíveis na natureza (Dahy, 2019; Ryder *et al.*, 2020).

Contudo, os materiais desenvolvidos tendo como matriz polimérica os polissacarídeos, apresentam algumas fragilidades quanto às propriedades térmicas, físicas e mecânicas, principalmente devido à característica hidrofílica, sendo necessária a adição de aditivos para reduzir essas falhas (Sobeih *et al.*, 2025). Neste cenário, as fibras naturais são exploradas como materiais de reforço, uma vez que possuem baixa densidade, potencial de reaproveitamento, elevada disponibilidade e baixa capacidade de abrasividade (Saha *et al.*, 2025).

Considerando a biodiversidade do Brasil, as fibras provenientes de espécies florestais como o *Pinus spp.*, o qual possui ampla relevância no setor econômico, com produção destinada para serrarias, indústria de celulose e papel, painéis e madeiras laminadas, tornam-se alternativas sustentáveis e ecológicas, uma vez que esses setores geram quantidades significativas de resíduos que impactam o meio ambiente devido o descarte e uso inadequado (Adhikari; Ozarska, 2018; Coelho, 2023).

Dessa forma, as fibras de *Pinus spp.* provenientes de serrarias e/ou movelarias, são consideradas matérias-primas promissoras para o desenvolvimento de biomateriais poliméricos no contexto da sustentabilidade e valorização dos resíduos lignocelulósicos, além de contribuir para a redução do uso de combustíveis fósseis e poluição ocasionada pelo descarte inadequado dos resíduos florestais e madeireiros (Kwaśniewska *et al.*, 2023; Dahmane *et al.*, 2024).

Portanto, diante desse contexto, o estudo teve como objetivo desenvolver bioplásticos de amido de milho reforçados com fibras de madeira de *pinus spp. in natura*, visando a valorização dos resíduos provenientes de serrarias, mitigação dos impactos ambientais ocasionados pelo uso excessivo de plástico e descarte inadequados das biomassas residuais. Neste experimento, as fibras utilizadas não sofreram nenhum tipo de tratamento químico, uma vez que o estudo buscou avaliar a influência do reforço *in natura* nas propriedades físicas (umidade, espessura, densidade e absorção de água).

2 Materiais e Métodos

A pesquisa experimental foi realizada no Laboratório Multiusuário de Biomateriais da Universidade do Estado do Pará (LMB/UEPA). As amostras de madeira de *pinus spp.* foram obtidas em uma serraria localizada na cidade de Santa Isabel do Pará, no estado do Pará. Após a obtenção, foram fragmentadas e submetidas ao processo de moagem em moinho de facas, seguida de peneiramento para obtenção da granulometria de 105 micrômetros (150 mesh).

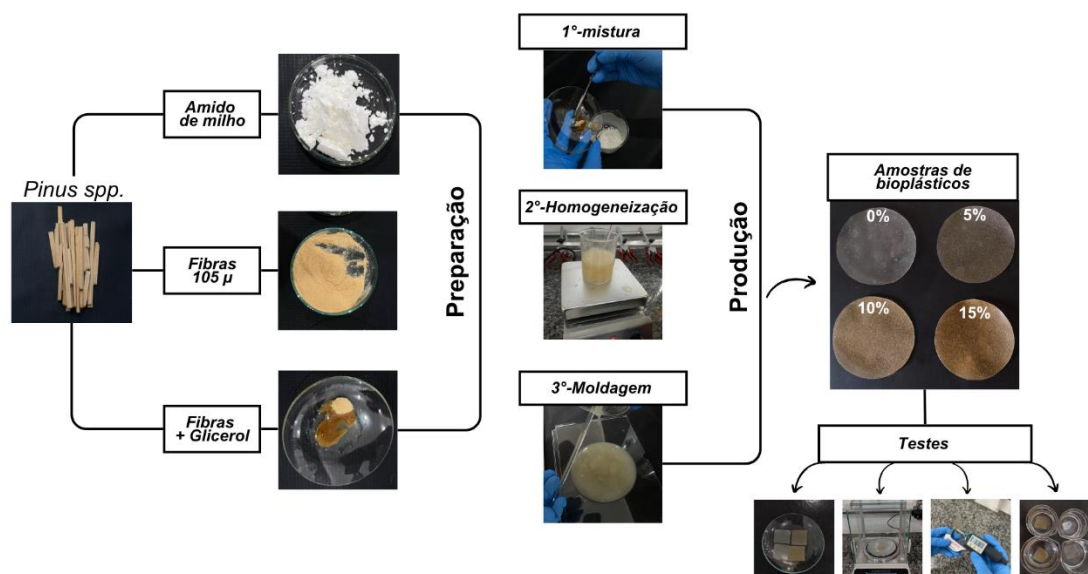
2.1 Produção dos bioplásticos

Os bioplásticos foram produzidos pelo método de *casting*, que permite a obtenção de amostras em escala laboratorial. O método consiste no aquecimento e hidrólise das moléculas do amido, juntamente com outros componentes, como plastificantes e agentes de reforço (Thanh *et al.*, 2025).

Para a produção dos bioplásticos utilizou-se como matriz polimérica amido de milho comercial, diferentes quantidades de fibras da madeira de *pinus* triturada na granulometria

de 105 μ , e glicerol como agente plastificante com a finalidade de tornar o material final mais flexível (Figura 1).

Figura 1- Etapas de produção dos bioplásticos reforçados com fibras de pinus.



Fonte: Autores, 2025.

A produção consistiu na adição de 10 g de amido de milho em um Becker de 250 ml, 3 g de glicerol e fibras nas proporções de 5%, 10% e 15% em relação ao peso do amido, as quais foram dispersas em 150 ml de água destilada. A solução foi preparada em chapa aquecedora, sob agitação constante por 20 min a 90 °C para homogeneização dos materiais. Posteriormente, as diferentes formulações foram moldadas em placas de acrílico (21 cm x 29,7 cm) e levadas para a estufa por 24 horas a 45 °C. Para fins de análise comparativa, foi produzida uma amostra controle, sem adição das fibras.

2.2 Caracterização dos bioplásticos

As amostras de bioplásticos produzidas foram caracterizadas quanto ao teor de umidade, espessura, densidade e absorção de água. Os ensaios para determinação do teor de umidade foram realizados de acordo com o método de Amaral *et al.* (2022), o qual consistiu na secagem dos materiais a 105 °C em estufa por 24 h, seguida de pesagem para obtenção do teor de umidade (%), conforme equação abaixo.

$$Umidade\% = \frac{massa\ inicial - massa\ final}{massa\ inicial} \times 100$$

Para a medição da espessura, foram cortadas amostras de 2x3 cm de cada bioplástico, e realizadas medidas em quatro pontos distintos com o auxílio de um micrômetro digital com precisão de 0,001 μ m (Modelo MTK-4284), seguindo o padrão ASTM D6988-08 (2008). A partir da espessura foi determinada a densidade dos bioplásticos considerando a relação entre massa e volume, conforme metodologia adotada por Ferreira; Molina; Pelissari (2020). Para essa finalidade, as amostras foram secas a 50 °C por 24 horas e pesadas em balança de precisão 0,001 g para obtenção dos dados.

$$Densidade = \frac{Massa}{Area. espessura}$$

Para determinação da absorção de água foram utilizadas amostras de 2x2 cm, as quais foram secas em estufas a 60 °C por 24 horas para determinação do peso seco, e posteriormente foram imersas em 50 ml de água destilada por 24 horas (Kharb; Saharan, 2025). Após esse período as amostras foram removidas da água, e pesadas para determinação do teor de água absorvido. A porcentagem absorvida foi determinada de acordo com cálculo abaixo.

$$\text{Absorção de água\%} = \frac{\text{massa final} - \text{massa inicial}}{\text{massa inicial}} \times 100$$

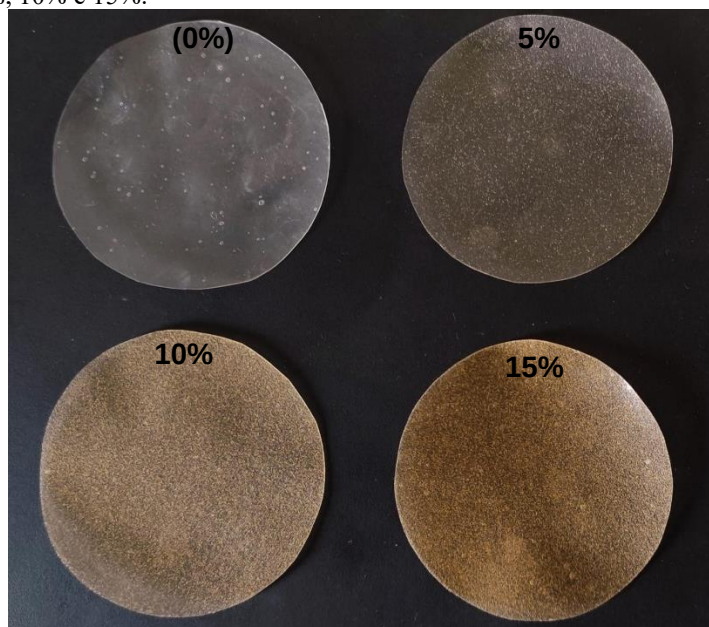
Análise estatística

Os dados foram obtidos em triplicata, com exceção da variável umidade devido a perda de amostras, e submetidos à análise estatística descritiva para obtenção da média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação, assim como a realização dos testes de normalidade e homoscedasticidade. Os resultados que atenderam ao pressuposto da distribuição normal foram avaliados quanto a análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey (5%). Os que não atendiam foram submetidos ao teste de Kruskal-Wallis e Post-Hoc de Dunn para comparação quando significativo a $p < 0.05$. Todos os dados foram processados no *Software* estatístico R (versão 2025.09.0+387).

3 Resultados

Como mostrado na Figura 2, os bioplásticos produzidos com amido de milho e reforçados com diferentes concentrações de fibras de pinus na granulometria de 105 μ apresentaram superfícies com textura irregular e aspecto granular, já a amostra controle (0%) apresentou superfície lisa, porém com presença de pequenas bolhas de ar, as quais foram formadas durante a produção do bioplástico.

Figura 2- Amostras de bioplásticos produzidos com amido de milho e reforçados com fibras de pinus nas concentrações de 0%, 5%, 10% e 15%.



Fonte; Autores, 2025.

As amostras produzidas foram analisadas quanto às propriedades físicas (umidade, espessura, densidade e absorção), e os resultados encontrados para o bioplástico controle e reforçados com fibras de pinus são demonstrados na Tabela 1.

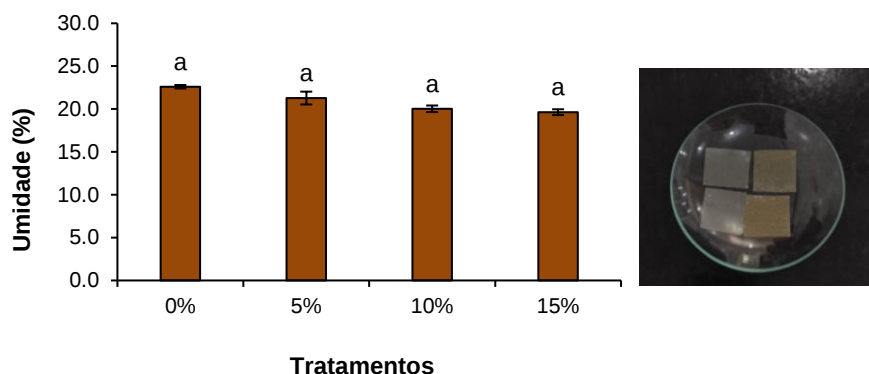
Tabela 1- Caracterização dos bioplásticos a base de milho reforçados com fibras de pinus, quanto ao teor de umidade (%), espessura (mm), densidade (g/cm³) e absorção de água (%).

Tratamentos	Umidade (%)	Espessura (mm)	Densidade (g/cm ³)	Absorção de água (%)
0%	22,60±0,20 a 0,91*	0,27±0,06 a 23,47*	0,18±0,01 a 2,41*	88,62±2,78 a 3,14*
5%	21,28±0,75 a 3,52*	0,35±0,01 a 2,15*	0,17±0,01 ab 2,60*	89,36±4,31 a 4,82*
10%	20,03±0,38 a 1,91*	0,34±0,05 a 14,68*	0,15±0,01 b 2,31*	77,22±17,10 a 22,14*
15%	19,63±0,34 a 1,73*	0,34±0,02 a 6,36*	0,16±0,01 ab 3,32*	84,51±1,75 a 2,06*

Média ± Desvio Padrão. *Coeficiente de Variação. Letras iguais não diferem significativamente ao nível de p <0,05. Fonte: Autores, 2025.

Dentre as propriedades analisadas, a umidade é um parâmetro fundamental em teste com biomateriais poliméricos, pois determina as futuras aplicações dos materiais obtidos. Conforme observado na Figura 3, os bioplásticos desenvolvidos com amido de milho e reforçados com fibras de pinus não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos.

Figura 3- Teor de umidade das amostras de bioplásticos controle (0%) e reforçadas com fibras de pinus nas concentrações de 5%, 10% e 15%.

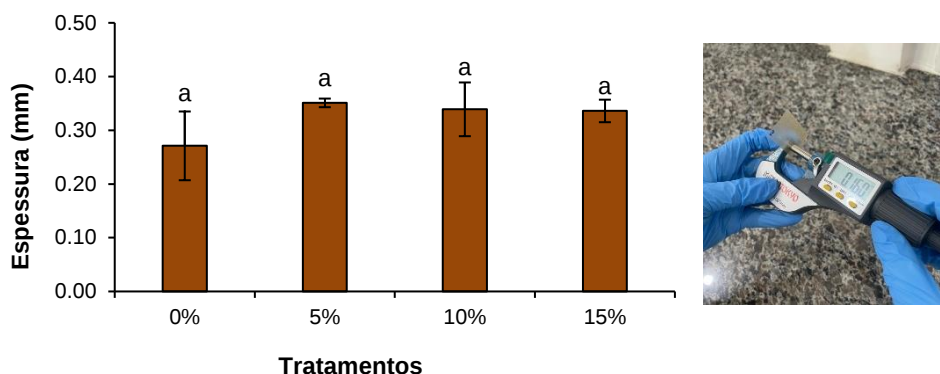


Fonte: Autores, 2025.

O resultado observado pode estar relacionado a perda de amostras durante o experimento, o qual possivelmente influenciou no resultado final, uma vez que procedimentos realizados em duplicata não apresentam, em alguns casos, boa precisão e confiabilidade.

O efeito das fibras, na espessura dos bioplásticos desenvolvidos, apesar de apresentarem médias acima do tratamento controle, não apresentaram diferenças significativas quando submetidos ao teste de Tukey (5%), de acordo com a Figura 4, evidenciando que as fibras utilizadas independente da concentração não influenciaram na espessura das amostras. Contudo, é importante destacar também que o resultado pode estar associado a alta variabilidade dos dados obtidos em relação as médias, em especial nas amostras controle (23,47) e reforçadas com 10% (14,68).

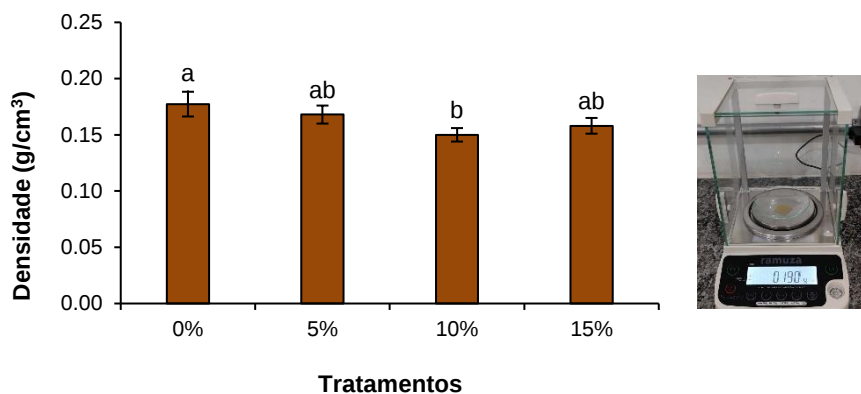
Figura 4- Espessura das amostras de bioplásticos controle (0%) e reforçadas com fibras de pinus nas concentrações de 5%, 10% e 15%.



Fonte: Autores, 2025.

A Figura 5 mostra que a densidade dos bioplásticos é inferior a $0,20 \text{ g/cm}^3$, com valores menores nas amostras reforçadas com fibras de pinus. Quando comparados os tratamentos, os resultados indicam que a adição das fibras influenciou positivamente na densidade, em especial para amostras com 10% ($0,15 \text{ g/cm}^3$), as quais apresentaram diferença significativa com o controle ($0,18 \text{ g/cm}^3$), já os demais tratamentos não apresentaram diferenças entre si.

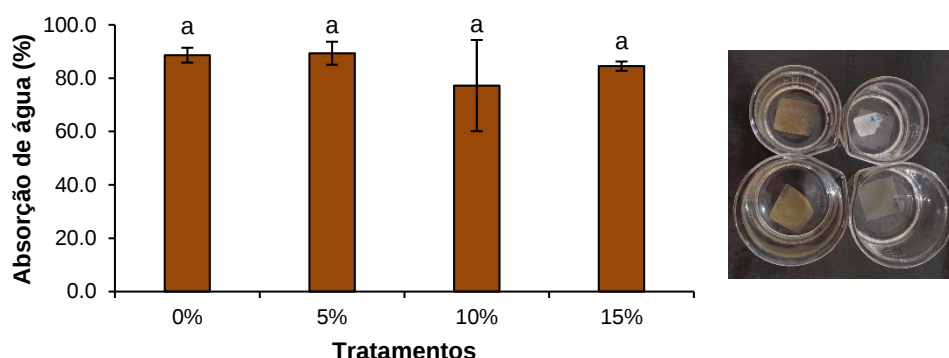
Figura 5- Densidade dos bioplásticos controle (0%) e reforçados com 5%, 10% e 15% de fibras de pinus.



Fonte: Autores, 2025.

No que corresponde a absorção de água, os resultados demonstram que os bioplásticos produzidos com amido de milho e incorporados com fibras de madeira de pinus são suscetíveis a moléculas de água. Para esta propriedade, esperava-se uma redução na taxa de absorção dos bioplásticos à medida que a concentração de fibras aumentasse, no entanto, conforme observado na Figura 6, os tratamentos não diferiram estatisticamente, indicando que as fibras não influenciaram na absorção.

Figura 6- Absorção de água nas amostras controle (0%) e reforçadas com 5%, 10% e 15% de fibras após 24 horas.



Fonte: Autores, 2025.

4 Análise e Discussão

Diante das preocupações ambientais referente ao acúmulo de resíduos lignocelulósicos e plásticos, a produção de biomateriais desempenham um papel relevante na mitigação dos impactos ambientais (Ramful, 2024). Os resultados encontrados no estudo demonstram que as fibras de pinus apresentam potencial como reforço na matriz polimérica de amido de milho, sendo, portanto, uma alternativa viável para a produção de biomateriais sustentáveis.

Entretanto, ressalta-se que os bioplásticos desenvolvidos possuem características hidrofílicas, comuns a biomateriais produzidos com polímeros naturais como o amido. Associado a esse fator, a hidrofiliabilidade inerente das fibras naturais constitui uma desvantagem na produção de biomateriais, pois o elevado teor de umidade pode provocar baixa adesão e dispersão das fibras na matriz, provocando fissuras e deterioração, que impactam na resistência do material final, sendo considerada um fator limitante para a inserção dos materiais reforçados no mercado (Nurazzi *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2023).

A presença dos grupos hidroxilas as tornam suscetíveis à umidade elevada, e devido a essa característica, os bioplásticos poliméricos a base de amido reforçados com pó de madeira geralmente são menos resistentes à água (Dahmane *et al.*, 2024; Pansuwan, Ito, Miyata, 2025; Shafqat *et al.*, 2021).

Apesar dessa característica, em geral as fibras apresentam capacidade de barreira contra a umidade, no entanto, esse potencial depende de fatores bióticos e abióticos, como clima e maturidade (Nyerere *et al.*, 2024; Ramful, 2025). Dessa forma, os resultados demonstram que o teor de umidade nos bioplásticos reforçados com a fibra de pinus está abaixo de 20%, indicando que as fibras podem influenciar de forma positiva nesse parâmetro e sendo um resultado desejável, principalmente para aplicações em embalagens (Marichelvam *et al.*, 2023).

Ao serem analisados quanto a espessura, observou-se que não houve influência das fibras, corroborando com resultados encontrados na literatura, conforme evidenciado no estudo de Ferreira; Molina; Pelissari, (2020) que ao desenvolverem bandejas biodegradáveis identificaram uma tendência semelhante, onde as diferentes concentrações de resíduos agroindustriais não afetaram a espessura dos materiais. Em contrapartida, Daudt *et al.* (2017) observaram no desenvolvimento de filmes comestíveis reforçados com diferentes concentrações da casca da semente de pinhão-brasileiro, que a espessura das amostras aumentou conforme a adição de maiores concentrações.

Essa tendência observada em filmes poliméricos reforçados com cargas naturais está relacionada à adição de materiais sólidos na matriz polimérica que proporciona aumento da

espessura em relação aos filmes sem aditivos, e aos procedimentos de moldagem utilizados na produção dos biomateriais (De Carvalho *et al.*, 2021; Thakkar *et al.*, 2025).

Dessa forma, a espessura é considerada um parâmetro importante pois influencia nas propriedades mecânicas, ópticas e de barreira dos bioplásticos, o qual está relacionado diretamente com a capacidade de resistência a tração, transparência, umidade e absorção (Iñiguez-Moreno *et al.*, 2025; Oluwasina *et al.*, 2021).

Com relação a densidade, a literatura destaca que há uma relação direta com a espessura, e conseqüentemente com as propriedades físicas e mecânicas (Thakkar *et al.*, 2025). O comportamento observado para o bioplástico reforçado pode estar relacionado a dispersão inadequada das fibras na matriz que resulta na presença de vazios, além disso a baixa densidade das fibras de pinus também pode ter influenciado no resultado.

No desenvolvimento de compósitos poliméricos, a densidade é influenciada pela forte interligação entre a matriz e carga de reforço. A compatibilidade entre matriz/fibras proporciona a redução de vazios e porosidade dentro dos materiais poliméricos, tornando-os mais compactos e aumentando a densidade (Ilyas *et al.*, 2019). Logo pode-se inferir que houve melhor compatibilidade entre matriz/fibras nos tratamentos com 5% e 15%, quando comparado a adição de 10% de fibras.

Em geral, bioplásticos com maior densidade apresentam melhor resistência à tração, sendo destinados para aplicações estruturais (Tan *et al.*, 2022). Em contraste, a baixa densidade além de reduzir o custo de produção é ideal para o desenvolvimento de materiais leves, como bandejas biodegradáveis e embalagens de alimentos (Ferreira; Molina; Pelissari, 2020; Cheng *et al.*, 2025).

No que corresponde a absorção de água, o experimento revelou que o índice de absorção foi maior que 70% para todos os tratamentos, independente da adição de fibras na matriz de amido. Essa tendência observada possui relação direta com a concentração de amido utilizada, pois devido a afinidade com água, mesmo após a incorporação das fibras possivelmente a quantidade de grupos hidroxilas (OH) não foi alterada, mantendo a estrutura dos bioplásticos reforçados iguais às do controle (Kwaśniewska *et al.*, 2023).

Os resultados encontrados corroboram com o estudo de Hamid *et al.* (2025) onde observaram que a adição acima de 5% de fibras de celulose derivadas de serragem influenciam na absorção de água devido a hidrofiliidade do amido e glicerol, resultando em teores maiores que 81,52%. De forma semelhante, Yang *et al.* (2023), observaram que bioplástico produzidos com amido e reforçado com fibras de cachos vazios de dendê não diferiram significativamente, apresentando absorção de água entre 23% a 24%, para tratamentos com e sem reforço, respectivamente. Segundo os autores, esse fenômeno ocorreu devido a característica hidrofílica das fibras incorporadas na matriz, assim como a concentração utilizada.

De maneira geral, considerando os parâmetros analisados nesta pesquisa, os resultados demonstraram que a adição das fibras de pinus *in natura* nas concentrações de 5%, 10% e 15% não influenciaram no teor de umidade, espessura e absorção de água, sendo estatisticamente iguais ao bioplástico controle.

A composição lignocelulósica (celulose, hemiceluloses e lignina), presença de substâncias pécicas e cerosas, e hidrofiliidade característica das fibras é um fator que influencia na biocompatibilidade com a matriz polimérica, pois a elevada interação dos grupos -OH e carboxila com moléculas de água, afetam as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos, proporcionando maior teor de umidade, absorção de água e baixa resistência dos compósitos (Adeyanju *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2025).

Nesse contexto, para melhorar a qualidade das fibras utilizadas como reforço e promover maior compatibilidade com a matriz, torna-se necessária a realização de modificações químicas nas superfícies das fibras (Gautam *et al.*, 2025). As modificações

superficiais por meio de tratamentos químicos alteram a estrutura das fibras, promovendo maior qualidade e aumento da resistência, de forma que promovem a melhor adesão interfacial com a matriz devido a remoção de alguns componentes não celulósicos e aumento do teor de celulose (Saha *et al.*, 2025).

5 Conclusões

Fibras provenientes de resíduos da indústria madeireira são consideradas tendências futuras para o desenvolvimento de biocompósitos. No presente estudo, as fibras de *pinus spp.* oriundas de serrarias apresentaram resultados promissores ao serem utilizadas como cargas de reforço na produção de bioplásticos a base de amido de milho.

A caracterização dos bioplásticos produzidos revelou que a incorporação de fibras nas proporções de 5%, 10% e 15% podem ser utilizadas para produção de materiais leves, com possibilidade de aplicações em embalagens alimentícias. Contudo, novos experimentos são necessários para avaliar a influência das fibras naturais nas propriedades de umidade, e absorção de água, uma vez que as concentrações utilizadas não influenciaram nessas propriedades.

Além disso, ressalta-se a importância de realizar tratamentos químicos visando a modificação da estrutura superficial das fibras para promover melhor adesão interfacial entre matriz/fibras, além de testes para avaliar a resistência mecânica desses materiais.

6 Agradecimentos

Agradecemos a Universidade do Estado do Pará, ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia (PPGTEC), ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais (LMB) pelo espaço destinado a realização da pesquisa experimental e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo fomento a pesquisa.

Referências

1. ADEYANJU, C. A.; OGUNNIYI, S.; IGHALO, J. O.; ABDULKAREEM, S.; AKINMOLADUN, O. O. A review on Luffa fibres and their polymer composites. **Journal of Materials Science**, v. 56, p. 2797–2813, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05432-6>
2. ADHIKARI, S.; OZARSKA, B. Minimizing environmental impacts of timber products through the production process “From Sawmill to Final Products”. **Environmental Systems Research**, v. 7, n. 1, p. 6, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1186/s40068-018-0109-x>
3. AMARAL, L.; RODRIGUES, F.; SILVA, A.; COSTA, P.; DELERUE-MATOS, C.; VIEIRA, E. F. Reinforcement of starch film with Castanea sativa shells polysaccharides: Optimized formulation and characterization. **Food Chemistry**, v. 396, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133609>.
4. ASROFI, M.; SAPUAN, S. M.; ILYAS, R. A.; RAMESH, M. Characteristic of composite bioplastics from tapioca starch and sugarcane bagasse fiber: effect of time duration of ultrasonication (bath-type). **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 1626–1630, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.254>.
5. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6988-08: Standard Guide for Determination of Thickness of Plastic Film Test Specimens**. West Conshohocken: ASTM, 2008.
6. CHENG, Z.; NING, M.; MAO, K.; NONG, X.; LI, J.; XIAO, N.; ZHANG, X.; DING, Q.; WANG, H.; LIU, M. Bamboo powder lignocellulose/polybutylene adipate

terephthalate biodegradable bioplastic composite film for food packaging materials. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 144781, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144781>

7. COELHO, M. H. Aspectos Econômicos. In: RESENDE, R. T.; BORÉM, A.; LEITE, H. G. **Pinus: Do plantio a colheita**. São Paulo: Oficina de textos, 2023. p. 10-28. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=J4bPEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=Pinus+spp+origem&ots=tTV8QtnHhG&sig=1UbeArhH5QsrPFNcn55BSqz48g#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 05 nov. 2025.

8. DAHMANE, A.; DRIOUCH, A.; CHOUAIIH, A.; AGUEDAL, H.; ZIAT, S. A. Development of a starch-based biocomposite reinforced by natural fibers extracted from sawdust: biodegradability study. **Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry**, v. 25, p. 1–18, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21743/pjaec/2024.12.04>.

9. DAHY, H. Efficient fabrication of sustainable building products from annually generated non-wood cellulosic fibres and bioplastics with improved flammability resistance. **Waste Biomass Valor**, v. 10, p. 1167–1175, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0135-3>.

10. DAUDT, R. M.; SINROD, A. J. G.; AVENA-BUSTILLOS, R. J.; KÜLKAMP-GUERREIRO, I. C.; MARCZAK, L. D. F.; MCHUGH, T. H. Development of edible films based on Brazilian pine seed (*Araucaria angustifolia*) flour reinforced with husk powder. **Food Hydrocolloids**, v. 71, p. 60–67, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.04.033>.

11. DE CARVALHO, G. R.; MARQUES, G. S.; JORGE, L. M. DE M.; JORGE, R. M. M. Effect of the addition of cassava fibers on the properties of cassava starch composite films. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, n. 38, p. 341–349, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1007/s43153-021-00093-7>

12. FERREIRA, D. C. M.; MOLINA, G.; PELISSARI, F. M. Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial residues. *Composites Part B: Engineering*, v. 183, p. 107682, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107682>

13. GAUTAM, P.; RAI, N.; SHRESTHA, M. M.; GROBMANN, L.; NASE, M.; ADHIKARI, R. Adding value to natural fibers by surface modification and their uses in polymer biocomposites. **Surfaces and Interfaces**, p. 106197, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106197>.

14. HAMID, E. M. A.; MOHAMED, A. E.; MOHAMED, A. A.; GALAL, A. A.; MEKHEMR, A. A.; SALEH, E. S.; HASSAN, M. I.; AHMED, M. H.; ELGENDY, S. K. Optimization of corn starch/glycerol, acetic acid, and cellulose fibers ratio on biodegradable plastic synthesis by Box–Behnken design (BBD). **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 27, p. 4433–4455, 2025. Doi: <https://doi.org/ez182.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10098-025-03135-7>

15. IÑIGUEZ-MORENO, I. M.; HERNÁNDEZ-VARELA, J. D.; BURELO, M.; ELIZONDO-LUEVANO, J. H.; ARAÚJO, R. G.; TREVIÑO-QUINTANILLA, C. D.; MEDINA, D. I. Progress in chitosan-based materials: Enhancing edible coatings and films through modifications and functionalization for food preservation. **Process Biochemistry**, v. 156, p. 175-190, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2025.06.001>

16. ILYAS, R. A.; SAPUAN, S. M.; IBRAHIM, R.; ABRAL, H.; ISHAK, M. R.; ZAINUDIN, E. S.; ATIKAH, M. S. N.; NURAZZI, N. M.; ATIQA, A.; ANSARI, M. N. M.; SYAFRI, E.; ASROF, M.; SARI, N. H.; JUMAIDIN, R. Effect of sugar palm nanofibrillated cellulose concentrations on morphological, mechanical and physical properties of biodegradable films based on agro-waste sugar palm (*Arenga pinnata*

- (Wurmb.) Merr) starch. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 5, p. 4819–4830, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.028>
17. KHARB, J.; SAHARAN, R. Development of biodegradable and eco-friendly fruit peel derived bioplastic film with antibacterial potential for food packaging application. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, n. 7, p. 10839-10854, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05834-5>
 18. KUMAR, S. D.; ARAVINDH, M.; MANOJ, V. K.; MADHUMITHRA, C.; KAVIYA, P.; YASWANTH, S. Fracture toughness of bio-fiber reinforced polymer composites-a review. **Materials Today: Proceedings**, 2023. Doi: <https://doi.org.ez182.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.matpr.2023.01.334>
 19. KWAŚNIEWSKA, A.; ŚWIETLIICKI, M.; KOWALSKA, B.; GŁADYSZEWSKI, G. Polysaccharide composite films utilising wood waste. **Materials**, v. 16, n. 17, p. 6031, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/ma16176031>
 20. MARICHELVAM, M. K.; MANIMARAN, P.; KHAN, A.; GEETHA, M.; KANDAKODEESWARAN, K.; ABDULJABBAR, H. A.; SYAFRI, E.; WAZZAN, M. A.; WAZZAN, H.; KHAN, W. Development and characterization of sustainable bioplastic films using cellulose extracted from *Prosopis Juliflora*. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, n. 2, 2023. Doi: [10.1080/15440478.2023.2231271](https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2231271)
 21. NURAZZI, N. M.; ASYRAF, M. R. M.; ATHIYAH, S. F.; SHAZLEEN, S. S.; RAFIQAH, S. A.; HARUSSANI, M. M.; KAMARUDIN, S. H.; RAZMAN, SR.; RAHMAH, M.; ZAINUDIN, E. S.; ILYAS, R. A.; AISYAH, H. A.; NORRRAHIM, M. N. F.; ABDULLAH, N.; SAPUAN, S. M.; KHALINA, A. A review on mechanical performance of hybrid natural fiber polymer composites for structural applications. **Polymers**, v. 13, n. 13, p. 2170, 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/polym13132170>
 22. NYERERE, G.; KYOKUSIIMA, S.; NABATEREGA, R.; TUMUSIIME, G.; KAVUMA, C. The synergy of maize straw cellulose and sugarcane bagasse fibre on the characteristics of bioplastic packaging film. **Bioresource Technology Reports**, v. 28, p. 102007, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.102007>
 23. OLUWASINA, O. O.; AKINYELE, B. P.; OLUSEGUN, S. J.; OLUWASINA, O. O.; MOHALLEM, N. D. Evaluation of the effects of additives on the properties of starch-based bioplastic film. **SN applied sciences**, v. 3, n. 4, p. 421, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04433-7>
 24. PANSUWAN, T.; ITO, H.; MIYATA, K. Reinforcement of starch-based composite properties via a two-step blending process with citric acid-cured epoxidized soybean oil oligomer. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 33, p. 3733–3748, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10924-025-03613-5>
 25. PLASTICS EUROPE. **Plastics – the fast Facts 2024**. 2024. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fatst-facts-2024/>. Acesso em: 13 out. 2024.
 26. RAMFUL, R. Mechanical performance and durability attributes of biodegradable natural fibre-reinforced composites—a review. **Journal of Materials Science: Materials in Engineering**, v. 19, n. 1, p. 50, 2024. Doi: <https://doi.org.ez182.periodicos.capes.gov.br/10.1186/s40712-024-00198-0>
 27. RYDER, K.; ALI, M. A.; BILLAKANTI, J.; CARNE, A. Evaluation of dairy co-product containing composite solutions for the formation of bioplastic films. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, p. 725–736, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01635-4>
 28. SAHA, M.; SINGH, H.; SINGH, M. K.; RANGAPPA, S. M.; SIENGCHIN, S. Advancements in natural fiber composites: market insights, surface modifications, advanced

- fabrication techniques and applications. **Sustainable Chemistry for Climate Action**, v. 6, 100081, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100081>
29. SHAFQAT, A.; AL-ZAQRI, N.; TAHIR, A.; ALSALME, A. Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 28, n. 3, p. 1739-1749, 2021. Doi: <https://doi-org.ez182.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.sjbs.2020.12.015>
30. SILVA, B. C.; CANELAS, C. A. A.; MATOS, A. T.; REZENDE, R. A.; QUIRINO, L. E.; TEIXEIRA, L. H. C. Revolutionizing sustainable materials: Amazonian fibers as raw material for generating of nanocellulose. **Cellulose**, v. 32, p. 5361–5387, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10570-025-06550-7>
31. SOBEIH, M. O.; SAWALHA, S.; HAMED, R.; ALI, F.; KIM, M. P. Starch-Derived Bioplastics: Pioneering Sustainable Solutions for Industrial Use. **Materials**, v. 18, n. 8, p. 1762, 2025. Doi: <https://doi.org/10.3390/ma18081762>
32. TAN, S. X.; ANDRIYANA, A.; ONG, H. C.; LIM, S.; PANG, Y. L.; NGOH, G. C. A Comprehensive Review on the Emerging Roles of Nanofillers and Plasticizers towards Sustainable Starch-Based Bioplastic Fabrication. **Polymers**, v. 14, n. 4, p. 664, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/polym14040664>
33. THAKKAR, A.; PATEL, B.; SAHU, S. K.; YADAV, V. K.; PATEL, R.; SAHOO, D. K.; JOSHI, M.; PATEL, A. Potato starch bioplastic films reinforced with organic and inorganic fillers: A sustainable packaging alternative. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 306, p. 141630, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141630>
34. THANH, N. C.; DUY, N. B. A.; DONG, B. P.; LE, T. H.; NGUYEN, V. H.; TRAN, P. Q. Formulation of bioplastic films based on natural polymers from avocado seeds and corn cobs agricultural wastes. **Polymer Bulletin**, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05984-0>
35. YANG, J.; XU, S.; CHEE, C. Y.; CHING, K. Y.; CHUAH, C. H. Effects of empty fruit bunch on the structures and properties of starch-based bioplastics. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 44, n. 7-8, p. 386–397, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1177/07316844231221656>