

Biodegradabilidade de materiais reforçados com fibra de bananeira (*Musa sp.*) em matriz polimérica

Biodegradability of materials reinforced with banana fiber (*Musa sp.*) in a polymeric matrix

Biodegradabilidad de materiales reforzados con fibra de banano (*Musa sp.*) en matriz polimérica

Recebido: 01/12/2025 | Revisado: 07/12/2025 | Aceitado: 07/12/2025 | Publicado: 08/12/2025

Eduarda Bertoletti Duarte¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9173-7056>

Universidade Cesumar, Maringá, Brasil

E-mail: eduardabertoletti@gmail.com

Felipe Nakamura Bassani¹

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7242-2986>

Universidade Cesumar, Maringá, Brasil

E-mail: fnbassani@gmail.com

Leonardo Miguel Guzzoni¹

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8783-1437>

Universidade Cesumar, Maringá, Brasil

E-mail: lguzzoni.acad@hotmail.com

Dênis Martins de Oliveira¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7225-577X>

Universidade Cesumar, Maringá, Brasil

E-mail: deniismartins@gmail.com

Flávia Aparecida Reitz Cardoso²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0432-9191>

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil

E-mail: flaviareitz@gmail.com

Luciana Cristina Soto Herek³

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9677-4139>

Universidade Cesumar, Maringá, Brasil

Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação, Brasil

E-mail: luciana.herek@unicesumar.edu.br

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a biodegradabilidade de biocompósitos de PLA reforçados com fibras de bananeira em diferentes condições, visando incentivar a redução de matéria-prima sintética através da valorização de resíduos agroindustriais. A produção industrial em larga escala tem como um dos principais impactos ambientais a geração de resíduos sintéticos de difícil degradação. Nesse contexto, o desenvolvimento de novos materiais obtidos a partir de matérias-primas de origem natural tem ganhado destaque nas últimas décadas, visando reduzir os efeitos negativos associados aos processos produtivos convencionais e promover práticas mais sustentáveis na indústria. De forma a apresentar um material sustentável e biodegradável, este estudo desenvolveu um compósito polimérico reforçado com fibra de bananeira, um resíduo agroindustrial. A fibra de bananeira, tratada e in natura, foi incorporada em matriz polimérica de PLA nas composições de 5% e 10% por meio do processo de extrusão, obtendo os biocompósitos. O ensaio de biodegradabilidade foi realizado seguindo as normas ASTM 71 D6003 e ASTM G160, em solo orgânico preparado, onde os biocompósitos foram soterrados durante 30, 60 e 90 dias. A análise de degradação foi realizada por avaliação macroscópica e, a perda de massa, por pesagem. O compósito que apresentou a maior taxa de degradação foi o compósito reforçado com 10% de fibra tratada à 1,5h. Os resultados demonstram que a inserção de fibras de bananeira, aumenta a perda de massa no compósito, indicando a influência na aceleração da degradação do compósito em solo controlado.

Palavras-chave: Reforço lignocelulósico; Políácido láctico; Fibras naturais; Ensaio de soterramento; Degradação hidrolítica.

¹ Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas, Universidade Cesumar, Maringá, Paraná, Brasil.

² Professora do Programa de Pós-Graduação em Inovações Tecnológicas. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil.

³ Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas, Universidade Cesumar, Maringá, Paraná, Brasil. Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação- ICETI Maringá-Paraná, Brasil.

Abstract

The objective of this study is to evaluate the biodegradability of PLA biocomposites reinforced with banana fibers under different conditions, aiming to encourage the reduction of synthetic raw materials through the valorization of agro-industrial waste. One of the main environmental impacts of large-scale industrial production is the generation of synthetic waste that is difficult to degrade. In this context, the development of new materials obtained from natural raw materials has gained prominence in recent decades, seeking to reduce the negative effects associated with conventional production processes and promote more sustainable practices in the industry. In order to present a sustainable and biodegradable material, this study developed a polymeric composite reinforced with banana fiber, an agro-industrial residue. Banana fibers, both treated and untreated (*in natura*), were incorporated into a PLA polymeric matrix at 5% and 10% compositions via the extrusion process to obtain the biocomposites. The biodegradability test was performed following ASTM 71 D6003 and ASTM G160 standards in prepared organic soil, where the biocomposites were buried for 30, 60, and 90 days. Degradation analysis was performed by macroscopic evaluation, and mass loss by weighing. The composite that presented the highest degradation rate was the one reinforced with 10% fiber treated for 1.5 h. The results demonstrate that the incorporation of banana fibers increases mass loss in the composite, indicating an influence on accelerating the degradation of the composite in controlled soil.

Keywords: Lignocellulosic reinforcement; Polylactic acid; Natural fibers; Soil burial test; Hydrolytic degradation.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la biodegradabilidad de biocompuestos de PLA reforzados con fibras de banano en diferentes condiciones, con el fin de incentivar la reducción de materia prima sintética a través de la valorización de residuos agroindustriales. La producción industrial a gran escala tiene como uno de sus principales impactos ambientales la generación de residuos sintéticos de difícil degradación. En este contexto, el desarrollo de nuevos materiales obtenidos a partir de materias primas de origen natural ha ganado protagonismo en las últimas décadas, buscando reducir los efectos negativos asociados a los procesos productivos convencionales y promover prácticas más sostenibles en la industria. Con el fin de presentar un material sostenible y biodegradable, este estudio desarrolló un compuesto polimérico reforzado con fibra de banano, un residuo agroindustrial. La fibra de banano, tratada e *in natura*, fue incorporada en una matriz polimérica de PLA en composiciones del 5% y 10% mediante el proceso de extrusión, obteniendo así los biocompuestos. El ensayo de biodegradabilidad se realizó siguiendo las normas ASTM 71 D6003 y ASTM G160, en suelo orgánico preparado, donde los biocompuestos fueron enterrados durante 30, 60 y 90 días. El análisis de degradación se llevó a cabo mediante evaluación macroscópica, y la pérdida de masa, por pesaje. El compuesto que presentó la mayor tasa de degradación fue el reforzado con un 10% de fibra tratada durante 1,5 h. Los resultados demuestran que la inserción de fibras de banano aumenta la pérdida de masa en el compuesto, indicando su influencia en la aceleración de la degradación del compuesto en suelo controlado.

Palabras clave: Refuerzo lignocelulósico; Políácido láctico; Fibras naturales; Ensayo de enterramiento; Degradación hidrolítica.

1. Introdução

A gestão de resíduos poliméricos sintéticos representa um dos maiores desafios ambientais contemporâneos. A produção industrial em larga escala e o acúmulo de resíduos de difícil degradação têm impulsionado a transição para práticas mais sustentáveis, onde o desenvolvimento de materiais biodegradáveis emerge como uma estratégia mandatória para mitigar os impactos nos ecossistemas (Ernest & Peter, 2022; Nogueira et al., 2023). Tradicionalmente, a indústria recorre a polímeros reforçados com fibras sintéticas, como a fibra de vidro, para obter alto desempenho mecânico. No entanto, essa prática enfrenta desafios críticos relacionados ao elevado consumo energético de produção e à origem fóssil dos materiais (Kumar Singh et al., 2021; Subash & Muthiah, 2021; Yadav et al., 2023).

Neste cenário, os biocompósitos oferecem uma alternativa viável técnica e economicamente. Diferentemente dos compósitos de matriz termofixa, que apresentam dificuldades de reprocessamento, o uso de matrizes termoplásticas favorece a reciclabilidade e reduz o impacto no final do ciclo de vida (Islam et al., 2025; Prem Chand et al., 2021). A incorporação de fibras vegetais nestas matrizes agrega vantagens como ampla disponibilidade, atoxicidade, renovabilidade e biodegradabilidade (Ilyas et al., 2021; Moura, 2019). Dentre as diversas fontes, a fibra de bananeira (*Musa sp*) destaca-se não apenas pelas propriedades mecânicas favoráveis ao reforço estrutural, mas por valorizar um resíduo agroindustrial abundante, evitando o descarte inadequado e promovendo a economia circular (Hendges et al., 2024; Komal et al., 2020; Rao et al., 2024).

Como matriz para estes reforços, o Poli(ácido láctico) (PLA) consolidou-se como o termoplástico biodegradável de

referência, produzido a partir de fontes renováveis, biocompatível e não tóxico (Arockiam, 2022; Rajeshkumar, 2021). No entanto, sua aplicação isolada enfrenta limitações, como baixa tenacidade, baixa temperatura de transição vítrea e fragilidade ao impacto (Cano-Vicent, 2021; Gowman et al., 2019). A incorporação de fibras naturais visa superar essas barreiras e, devido à natureza hidrofílica das cargas vegetais, potencializar a absorção de água e acelerar a degradação hidrolítica da matriz (Momeni et al., 2023; Rajeshkumar et al., 2021). Apesar dos avanços na caracterização mecânica, a compreensão da influência do tratamento das fibras e da taxa de incorporação na cinética de biodegradação ainda requer aprofundamento. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a biodegradabilidade de biocompósitos de PLA reforçados com fibras de bananeira em diferentes condições, visando incentivar a redução de matéria-prima sintética através da valorização de resíduos agroindustriais.

2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa parte em campo, parte laboratorial, num estudo de natureza qualitativa no estudo da morfologia e, quantitativa no uso de fórmulas matemáticas de cálculo, valores e porcentagens (Pereira et al., 2018). A coleta dos pseudocaules, extração das fibras e a fabricação dos corpos de prova foi realizada conforme Duarte et al. (2025), representada pela Figura 1.

Figura 1. Fluxograma da metodologia de fabricação dos biocompósitos.



Fonte: Autoria própria (2025).

2.1 Obtenção e Tratamento das Fibras

As fibras utilizadas como reforço foram extraídas de pseudocaules de bananeira da espécie *Musa cavendish* (Nanica), coletadas em Jacupiranga, SP. O beneficiamento seguiu o protocolo descrito por Duarte et al. (2025). Inicialmente, as bainhas foram higienizadas por imersão em solução de hipoclorito de sódio (2,0%) na proporção de 20 mL/L de água por 7 dias, visando a inibição da proliferação fúngica. A extração das fibras foi realizada mecanicamente com auxílio de escova de aço, seguida de secagem ao ar livre por 72 horas.

Para a modificação superficial, as fibras seccionadas em 5 mm foram submetidas a um tratamento hidrotérmico em autoclave de aço inoxidável revestida com politetrafluoretileno (PTFE). O processo ocorreu a 180° C, utilizando uma proporção de 3 g de fibra para 80 mL de água deionizada, variando-se o tempo de exposição em 1,5 h e 2,5 h. Após o tratamento, as fibras foram secas em estufa a 100° C por 24 horas para remoção da umidade residual.

2.2 Preparação dos Biocompósitos

Como matriz polimérica, utilizou-se o Ácido Polilático (PLA) em duas apresentações: filamento para impressão 3D

reaproveitado (densidade de 1,24 g/cm³) e grânulos virgens. A manufatura dos corpos de prova foi realizada em uma injetora *Thermo Scientific HAAKE MiniJet II*, conforme parâmetros estabelecidos por Duarte et al. (2025): temperatura de injeção de 220° C, temperatura do molde de 50° C, pressão de injeção de 20 MPa por 15 segundos e pressão de recalque de 25 MPa por 30 segundos.

As dimensões dos corpos de prova seguiram a norma ASTM D256 para ensaios de impacto, resultando em barras retangulares de aproximadamente 63,5 x 12,7 x 3,2 mm. A Tabela 1 detalha a composição dos grupos experimentais.

Tabela 1. Identificação e composição dos biocompósitos e amostras de controle.

Código	Matriz Polimérica	Tratamento da Fibra	Teor de Fibra (%)
PLAf	PLA Filamento	-	0 (Controle)
PLAv	PLA Virgem	-	0 (Controle)
CPB1	PLA Filamento	Hidrotérmico (1,5 h)	5
CPB2	PLA Filamento	Hidrotérmico (1,5 h)	10
CPB3	PLA Filamento	Hidrotérmico (2,5 h)	5
CPB4	PLA Filamento	Hidrotérmico (2,5 h)	10
CPB5	PLA Filamento	<i>In natura</i>	10
CPVB	PLA Virgem	Hidrotérmico (2,5 h)	10

Fonte: Autoria própria (2025).

2.3 Ensaio de Biodegradação em Solo

A avaliação da biodegradabilidade foi conduzida através de ensaios de soterramento (*soil burial test*), em conformidade com as normas ASTM D6003 e ASTM G160, adotando as adaptações metodológicas propostas por Casarin et al. (2013) e do Bem et al. (2021).

O substrato utilizado foi solo orgânico comercial fertilizado (Riga Snikers®), caracterizado por pH próximo à neutralidade (6,0 - 7,0). O solo foi acondicionado em recipientes plásticos perfurados na base (50 x 18 x 16 cm), contendo 5,0 kg de solo cada. O experimento foi realizado em ambiente externo, sujeito às intempéries naturais. Os dados climáticos (temperatura e precipitação) foram monitorados quinzenalmente através da estação do Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (Simepar).

Figura 2. Ensaio de biodegradação.



Fonte: Autoria própria (2025).

Para manutenção da atividade microbiana, realizou-se o controle da umidade do solo quinzenalmente pelo método gravimétrico descrito por do Bem et al. (2021), adicionando-se água para restabelecer a massa inicial do sistema (capacidade de campo). O pH do solo foi monitorado quinzenalmente através do método de diluição (10 g de solo em 200 mL de água

destilada).

Os corpos de prova (n=5 por grupo) foram identificados, pesados e soterrados verticalmente. As exumações ocorreram após períodos de exposição de 30, 60 e 90 dias.

2.4 Caracterização da Degradação

Após cada período de exumação, as amostras foram submetidas a limpeza manual cuidadosa com água corrente para remoção de resíduos de solo e biofilme, conforme procedimento descrito por Casarin et al. (2013). Para a determinação da massa final (M_f), as amostras foram secas em estufa com circulação de ar a 50 °C por 72 horas, até obtenção de massa constante, evitando deformações térmicas no PLA.

A degradação foi quantificada através da análise macroscópica com a inspeção visual da superfície para identificação de rugosidade, fraturas, biofilme e alterações de cor e também pela perda de massa (%MP): Calculada segundo a Equação 1, onde M_i é a massa inicial seca e M_f é a massa final seca:

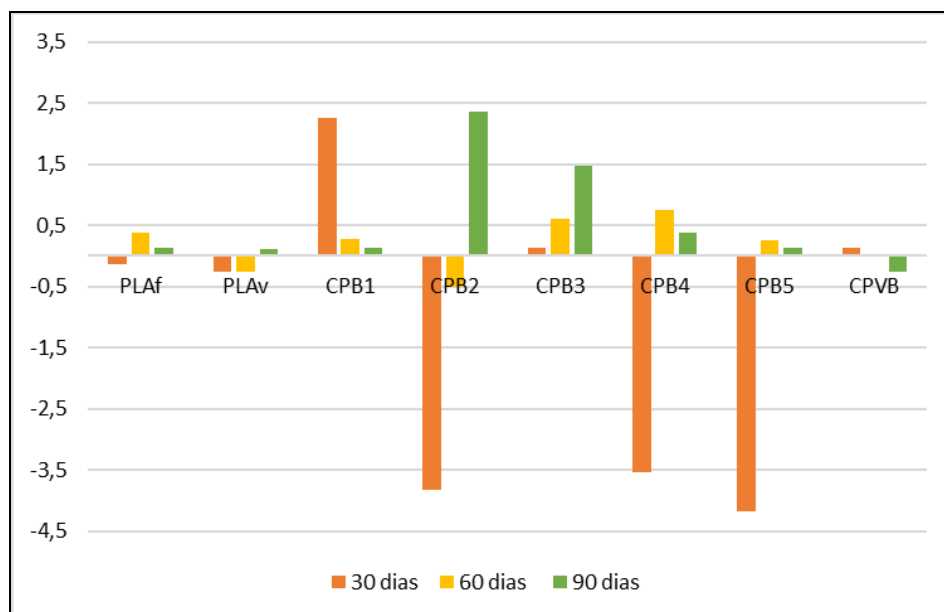
$$\%MP = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \text{ (Equação 1)}$$

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise de Absorção e Variação de Massa Inicial

O comportamento inicial dos biocompósitos, nos primeiros 30 dias de soterramento, revelou um fenômeno de ganho de massa em detrimento da perda por degradação (Figura 3). Este aumento pode ser atribuído à natureza hidrofílica das fibras lignocelulósicas, que favorecem a absorção de umidade do solo, exacerbada pelas condições de precipitação no local do experimento durante o período entre outubro e novembro. Este comportamento corrobora os achados de Bonelli (2020) e Jesus (2019), que relataram um incremento de massa nos estágios iniciais de biodegradação devido ao inchamento das fibras e difusão de água na matriz, precedendo a perda de massa efetiva a partir do quarto mês.

Figura 3. Análise da biodegradabilidade.



Fonte: Autoria própria (2025).

A matriz de PLA, sendo um poliéster alifático, sofre degradação primariamente por hidrólise. A inserção de fibras vegetais hidrofílicas atua como canal para a difusão de água na interface fibra/matriz, acelerando o processo hidrolítico interno e facilitando o ataque microbiano.

3.2 Cinética de Biodegradação e Perda de Massa

Após o período de estabilização da absorção de umidade, observou-se que a incorporação das fibras de bananeira acelerou significativamente a taxa de degradação em comparação ao polímero puro. Enquanto o PLA virgem (PLAv) e o filamento puro (PLAf) apresentaram perdas de massa modestas (0,11% e 0,13%, respectivamente), os compósitos reforçados exibiram taxas superiores (Tabela 2). O PLA em filamento demonstrou uma biodegradabilidade ligeiramente superior ao virgem, possivelmente devido às alterações térmicas sofridas durante o processo de extrusão do filamento, que podem ter iniciado a cisão das cadeias poliméricas.

Tabela 2. Percentual de massa perdida (%) por amostra.

Amostra	Especificação	Percentual de massa perdida (%)
PLAf	Filamento Puro	0,13
PLAv	Virgem puro	0,11
CPB1	Filamento + 5% 1,5h	0,12
CPB2	Filamento + 10% 1,5h	2,35
CPB3	Filamento + 5% 2,5h	1,48
CPB4	Filamento + 10% 2,5h	0,39
CPB5	Filamento + In natura	0,12
CPVB	Virgem + 10% 2,5h	-0,25

Fonte: Autoria própria (2025).

Dentre as formulações testadas, o compósito CPB2 apresentou a maior taxa de degradação final (2,35%). Este resultado indica que o tratamento de 1,5h foi eficaz em remover impurezas superficiais, melhorando a exposição da celulose sem eliminar completamente a capacidade da fibra de absorver água, o que é crucial para a hidrólise da matriz adjacente. Em contraste, CPB5 resultou em menor perda de massa 0,12%, sugerindo que a presença excessiva de ceras e impurezas pode ter retardado a interação da fibra com os microrganismos do solo ou a absorção de água necessária para a hidrólise.





















Nota-se que o compósito CPB1 apresentou uma perda de massa anômala na Figura 3. Tal fato deve-se à fragmentação estrutural de uma das amostras durante o processo de lavagem, evidenciando a fragilização mecânica do material decorrente do processo degradativo, embora o dado quantitativo deva ser interpretado como um outlier experimental.

A aceleração da biodegradação pela inserção de fibras naturais, observada neste estudo, alinha-se com a literatura vigente. Siakeng et al. (2020) e Mei e Oliveira (2017) reportaram comportamentos similares em compósitos de PLA com fibras de abacaxi e PCL com borra de café, respectivamente. A presença da fibra cria pontos de descontinuidade na matriz, aumentando a área superficial disponível para a ação enzimática dos microrganismos do solo.

3.3 Análise Morfológica e Visual

A inspeção visual dos corpos de prova (Figura 4) confirmou o avanço do processo degradativo. Observou-se o aumento progressivo da rugosidade superficial, opacidade e esbranquiçamento das amostras ao longo dos 90 dias. O fenômeno de esbranquiçamento (*whitening*) é característico da hidrólise do PLA, associado a mudanças no índice de refração devido à erosão superficial e alterações na cristalinidade do polímero.

Figura 4. Evolução da biodegradação dos biocompósitos.

	30 dias	60 dias	90 dias
CPPf			
CPPv			
CPB1			
CPB2			
CPB3			
CPB4			
CPB5			
CPVB			

Fonte: Autoria própria (2025).

A formação de microfissuras e o aumento da porosidade, especialmente nos compósitos reforçados, indicam a degradação preferencial na interface fibra e matriz. Conforme discutido por Silva (2023), essa porosidade facilita a colonização por microrganismos, criando um ciclo de retroalimentação positiva para a biodegradação. Mesmo com a presença de lignina, componente classicamente recalcitrante, a degradação ocorreu de forma efetiva, demonstrando que a matriz de PLA e a celulose acessível governaram a cinética de decomposição neste período de ensaio.

4. Conclusão

O presente trabalho demonstrou a viabilidade técnica e ambiental do desenvolvimento de biocompósitos de matriz de PLA reforçados com fibras de bananeira (*Musa sp.*), confirmando a hipótese de que a incorporação desta fase dispersa atua como um catalisador para a biodegradação do polímero em condições de solo.

Os ensaios de soterramento revelaram que a cinética de degradação é diretamente dependente do teor de fibra e do tratamento superficial aplicado. O compósito reforçado com 10% de fibra tratada hidrotermicamente por 1,5h (CPB2) apresentou a maior taxa de perda de massa. Este resultado sugere um ponto ótimo de equilíbrio onde o tratamento remove impurezas superficiais excessivas, facilitando a interação fibra-matriz, mas mantém a hidrofilicidade necessária para promover a difusão de água e acelerar a hidrólise da matriz de PLA adjacente.

Conclui-se que a inserção das fibras vegetais altera o perfil de degradação do material não apenas por ser biodegradável *per se*, mas por criar canais preferenciais para a permeação de umidade e colonização microbiana, superando as limitações de degradação lenta frequentemente observadas no PLA puro em condições ambientais não industriais.

Desta forma, estes biocompósitos posicionam-se como uma alternativa promissora para a indústria de materiais, alinhando-se aos princípios da economia circular. Ao valorizar um resíduo agroindustrial abundante e permitir a modulação da vida útil do produto final, esta abordagem contribui efetivamente para a mitigação do passivo ambiental gerado por polímeros sintéticos persistentes, oferecendo soluções com fim de vida programado e sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação (ICETI) e à Universidade Cesumar (UniCesumar) pelo suporte financeiro, pela infraestrutura laboratorial e pelo fomento à pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)

Referências

- American Society for Testing and Materials. (2004). ASTM G160-03: Standard practice for evaluating microbial susceptibility of nonmetallic materials by laboratory soil burial. ASTM International.
- Appolloni, T., Centi, G., & Yang, D. (2022). Natural fibers and biopolymers based materials: Environmental impacts and perspectives. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 35, Article 100599. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100599>
- Borges, P. R. P., Ribeiro, S. A., & Souza, V. F. (2024). Compósitos poliméricos reforçados por fibras naturais: Uma revisão. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 18(4), 779–798. <https://doi.org/10.19146/rem.p.v18i4.9390>
- Brito, Y. C., Medeiros, M. K., Soweck, A. B., & Soweck, A. B. (2022). Biodegradação em solo simulado de polietileno de alta densidade verde com farelo de soja. *Brazilian Journal of Development*, 8(7), 50458–50474. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n7-117>
- Canevarolo Júnior, S. V. (2002). *Ciência dos polímeros: Um texto didático para tecnólogos e engenheiros*. Artliber.
- Cano-Vicent, P. (2021). *Análisis de la influencia de aditivos y fibras naturales en las propiedades de matrices de PLA obtenidas por FDM* [Tese de Doutorado, Universitat Politècnica de València].
- Casarin, S. A., Agnelli, J. A. M., Malmonge, S. M., & Rosário, F. (2013). Blendas PHB/copolíesteres biodegradáveis: Biodegradação em solo. *Polímeros*, 23(1), 115–122. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282013005000003>

- da Luz, F. S., Losekann, M. A., dos Santos, A., & Monteiro, S. N. (2019). Hydrothermal treatment of sisal fiber for composite preparation. *Journal of Composite Materials*, 53(17), 2337–2347. <https://doi.org/10.1177/0021998319826384>
- do Bem, N. A., Reitz Cardoso, F. A., de Souza Paccola, E. A., & Soto Herek Rezende, L. C. (2022). 3D-printed polylactic acid biopolymer and textile fibers: Comparing the degradation process. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 57(2), 302–319. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781192>
- Duarte, E. B., Cardoso, F. A. R., Fornazaro, G., Arantes, E. J., Costas, G. B., Favaro, S. L., & Herek, L. C. S. (2026). Enhancing impact resistance of polylactic acid biocomposites through hydrothermal treatment of banana fiber: A preliminary study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 38(2), Article 04025529. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-20860>
- Ernest, E. M., & Peter, A. C. (2022). Application of selected chemical modification agents on banana fibre for enhanced composite production. *Cleaner Materials*, 5, Article 100131. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100131>
- Farahmand, H. D., et al. (2025). A comprehensive review on the potential and challenges of natural fiber reinforced polymer composites. *Journal of Composites Science*. <https://doi.org/10.1111/jfr3.70037>
- Gadioli, R., Morais, J. A., Waldman, W. R., & De Paoli, M. A. (2014). The role of lignin in polypropylene composites with semi-bleached cellulose fibers: Mechanical properties and its activity as antioxidant. *Polymer Degradation and Stability*, 108, 23–34.
- Godinho, G. K. S. (2021). Desenvolvimento de embalagem biodegradável à base de PLA e casca de cenoura [Dissertação de Mestrado, Instituto Federal do Rio de Janeiro].
- Gowman, J. G., Picard, M. C., Lim, L. T., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2019). Review of the effect of natural fibers on the properties of poly(lactic acid) (PLA) and poly(hydroxyalkanoate) (PHA) bioplastics. *Polymer Reviews*, 59(4), 759–799. <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1636294>
- Hendges, E. M. C., Silva, Q. L., & Bezerra, I. Q. M. (2024). Análise comparativa da influência na resistência à compressão do concreto com adição de fibra do pseudocaule da bananeira em Araguaína, Tocantins. *JNT Facit Business and Technology Journal*, 2(56), 167–184.
- Ilyas, R. A., Sapuan, S. M., Harussani, M. M., Hakimi, M. Y. A. Y., Haziq, M. Z. M., Atikah, M. S. N., ... & Nurazzi, N. M. (2021). Natural fiber-reinforced polylactic acid, polylactic acid blends and their composites for advanced applications. *Polymers*, 13(20), Article 3607. <https://doi.org/10.3390/polym13203607>
- Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S., Norizan, M. N., ... & Abdullah, L. C. (2022). A review on natural fiber reinforced polymer composites (NFRPC) for sustainable industrial applications. *Polymers*, 14(17), Article 3698. <https://doi.org/10.3390/polym14173698>
- Komal, U. K., Lila, M. K., & Singh, I. (2020). PLA/banana fiber based sustainable biocomposites: A manufacturing perspective. *Composites Part B: Engineering*, 180, Article 107535. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107535>
- Kumar, V., Chakraborty, P., Janghu, P., Umesh, M., Sarojini, S., Pasrija, R., ... & Sivalingam, A. M. (2023). Potential of banana based cellulose materials for advanced applications: A review on properties and technical challenges. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 6, Article 100366. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100366>
- Mei, L. H., & Oliveira, N. (2017). Caracterização de um compósito polimérico biodegradável utilizando Poli (ϵ -caprolactona) e borra de café. *Polímeros*, 27(Supl.), 99–109. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2139>
- Moura, C. R. (2019). Aplicações e tratamentos da fibra de bambu e similares: Uma revisão. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 5(5), 0484–0490. <https://doi.org/10.18540/jcecv15iss5pp0484-0490>
- Nogueira, T. S., et al. (2023). Desenvolvimento de biofilmes a partir de amido: Uma revisão. *Revista Brasileira de Engenharia*, 10(2), 45–52.
- Pereira, A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free ebook]. Santa Maria. Editora da UFSM.
- Prem Chand, R., Ravitej, Y. P., Chandrasekhar, K. M., Adarsha, H., Shivamani Kanta, J. V., Veerachari, M., Ravi Kumar, R., & Abhinandan. (2021). Characterization of banana and E-glass fiber reinforced hybrid epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 9119–9125. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.402>
- Rajesh, G., Prasad, A. V. R., & Gupta, A. V. S. K. S. (2019). Soil degradation characteristics of short sisal/PLA composites. *Materials Today: Proceedings*, 18(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.270>
- Rao, H. R., et al. (2021). Influence of fibre loading and surface modification on mechanical and thermal properties of agro-waste sugar palm fibre reinforced polyurethane composites. *Polymers*, 13(16), Article 2686. <https://doi.org/10.3390/polym13162686>
- Rao, V. V., et al. (2024). A comprehensive review of natural fibers: Bio-based constituents for advancing sustainable materials technology. *Journal of Renewable Materials*, 13(2), 1–10. <https://doi.org/10.32604/jrm.2024.056275>
- Siakeng, R., Jawaid, M., Ariffin, H., Sapuan, S. M., Asim, M., & Saba, N. (2020). Alkali treated coir/pineapple leaf fibres reinforced PLA hybrid composites: Evaluation of mechanical, morphological, thermal and physical properties. *Express Polymer Letters*, 14(8), 717–730. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2020.59>
- Subash, M. C., & Muthiah, P. (2021). Eco-friendly degumming of natural fibers for textile applications: A comprehensive review. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, Article 100304. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100304>
- Xu, H., Shi, X., Chung, C., Lei, Z., Zhang, W., & Yu, K. (2021). A sustainable manufacturing method of thermoset composites based on covalent adaptable network polymers. *Composites Part B: Engineering*, 221, Article 109004. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109004>
- Yadav, V., Singh, S., Chaudhary, N., Garg, M. P., Sharma, S., Kumar, A., Li, C., & Tag Eldin, E. M. (2023). Dry sliding wear characteristics of natural fibre reinforced poly-lactic acid composites for engineering applications: Fabrication, properties and characterizations. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 1189–1203. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.006>