

Panorama dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais e impressos por Modelagem por Deposição Fundida (MDF): Uma revisão sistemática

Panorama of polymer composites reinforced with plant fibers and printed by Fused Deposition Modeling (FDM): A systematic review

Panorama de los compósitos poliméricos reforzados con fibras vegetales e impresos mediante Modelado por Deposición Fundida (MDF): Una revisión sistemática

Recebido: 06/12/2025 | Revisado: 15/12/2025 | Aceitado: 15/12/2025 | Publicado: 18/12/2025

Felipe Nakamura Bassani¹

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

Universidade Cesumar, Brasil

E-mail: fnbassani@gmail.com

Leonardo Miguel Guzzoni¹

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

Universidade Cesumar, Brasil

E-mail: lguzzoni.acad@hotmail.com

Maira Vanessa da Rocha¹

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9184-0710>

Universidade Cesumar, Brasil

E-mail: mairarocho94@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, Brasil

Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação, Brasil

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

Resumo

A construção civil responde por parcela significativa das emissões de CO₂ e do consumo de recursos naturais, o que tem impulsionado a busca por materiais de menor impacto ambiental. Este estudo objetivou avaliar o desempenho e potencial de aplicação dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais na construção civil sustentável, por meio de uma revisão sistemática conduzida segundo as diretrizes PRISMA. Foram realizadas buscas nas bases *ScienceDirect*, *Web of Science* e *Dimensions*, considerando o período de 2018 a 2024, totalizando 15.482 artigos, destes, 50 atenderam os critérios de seleção. Os resultados mostram predomínio de matrizes à base de poliácido láctico (PLA) e de fibras lignocelulósicas como madeira, soja, cânhamo, linho, bambu, curauá, kenaf, juta e resíduos de óleo de palma. A incorporação de fibras vegetais contribui para o aumento do módulo de elasticidade e, em condições otimizadas do teor de fibra adicionado, tratamento superficial e parâmetros de impressão, também contribui para a resistência à tração e à flexão, além de possibilitar estruturas celulares leves com boa capacidade de absorção de energia e, em alguns casos, desempenho acústico relevante. Persistem, contudo, lacunas relacionadas ao comportamento físico-mecânico matéria prima, à padronização de métodos de ensaio, à comparação direta com materiais convencionais e à avaliação de ciclo de vida em condições reais de uso. A síntese realizada indica que os compósitos PLA-fibras vegetais impressos por FDM representam uma rota promissora para o desenvolvimento de painéis, núcleos sanduíche, revestimentos e elementos arquitetônicos personalizados, contribuindo para uma produção mais limpa no setor construtivo.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Fibras vegetais; Compósitos poliméricos; *Fused Deposition Modeling (FDM)*; Construção civil sustentável; Poliácido Láctico (PLA).

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-PR/BR, Brasil.

Abstract

Civil construction accounts for a significant share of CO₂ emissions and natural resource consumption, which has driven the search for lower-environmental-impact materials. This study aimed to evaluate the performance and application potential of polymer composites reinforced with plant fibers in sustainable construction, through a systematic review conducted according to PRISMA guidelines. Searches were carried out in the ScienceDirect, Web of Science, and Dimensions databases, covering the period from 2018 to 2024, totaling 15,482 articles, of which 50 met the selection criteria. The results show a predominance of polylactic acid (PLA)-based matrices and lignocellulosic fibers such as wood, soy, hemp, flax, bamboo, curauá, kenaf, jute, and palm oil residues. The incorporation of plant fibers contributes to increasing the elastic modulus and, under optimized conditions of added fiber content, surface treatment, and printing parameters, also contributes to tensile and flexural strength, while enabling lightweight cellular structures with good energy absorption capacity and, in some cases, relevant acoustic performance. However, gaps remain related to the physical-mechanical behavior of the raw material, the standardization of testing methods, direct comparison with conventional materials, and life cycle assessment under real-use conditions. The synthesis indicates that FDM-printed PLA–plant fiber composites represent a promising route for developing panels, sandwich cores, claddings, and customized architectural elements, contributing to cleaner production in the construction sector.

Keywords: Additive manufacturing; Plant fibers; Polymer composites; Fused Deposition Modeling (FDM); Sustainable construction; Polylactic Acid (PLA).

Resumen

La construcción civil representa una parte significativa de las emisiones de CO₂ y del consumo de recursos naturales, lo que ha impulsado la búsqueda de materiales con menor impacto ambiental. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño y el potencial de aplicación de compósitos poliméricos reforzados con fibras vegetales en la construcción sostenible, mediante una revisión sistemática realizada según las directrices PRISMA. Se efectuaron búsquedas en las bases de datos ScienceDirect, Web of Science y Dimensions, considerando el período de 2018 a 2024, totalizando 15.482 artículos, de los cuales 50 cumplieron los criterios de selección. Los resultados muestran un predominio de matrices a base de ácido poliláctico (PLA) y de fibras lignocelulósicas como madera, soja, cáñamo, lino, bambú, curauá, kenaf, yute y residuos de aceite de palma. La incorporación de fibras vegetales contribuye al aumento del módulo de elasticidad y, en condiciones optimizadas del contenido de fibra añadido, del tratamiento superficial y de los parámetros de impresión, también contribuye a la resistencia a tracción y a flexión, además de permitir estructuras celulares ligeras con buena capacidad de absorción de energía y, en algunos casos, un desempeño acústico relevante. Sin embargo, persisten vacíos relacionados con el comportamiento físico-mecánico de la materia prima, la estandarización de los métodos de ensayo, la comparación directa con materiales convencionales y la evaluación del ciclo de vida en condiciones reales de uso. La síntesis realizada indica que los compósitos PLA–fibras vegetales impresos por FDM representan una ruta prometedora para el desarrollo de paneles, núcleos sándwich, revestimientos y elementos arquitectónicos personalizados, contribuyendo a una producción más limpia en el sector de la construcción.

Palabras clave: Fabricación aditiva; Fibras vegetales; Compuestos poliméricos; Modelado por Deposición Fundida (FDM); Construcción sostenible; Ácido Poliláctico (PLA).

1. Introdução

A construção civil é um dos setores de maior impacto ambiental, respondendo por cerca de 40% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), pelo alto consumo de recursos naturais e pela expressiva geração de resíduos sólidos (Cucchiella et al., 2023; Figueiredo, 2018). Diante desse cenário, cresce a pressão para que o setor adote soluções que unem desempenho técnico, viabilidade econômica e redução de impactos ambientais, alinhados à Agenda 2030 e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial os ODS's 9, voltado à inovação e infraestrutura sustentável, e 12, focado em consumo e produção responsáveis (ONU, 2015). No cenário nacional, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e instrumentos de planejamento, como o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, reforçam a necessidade de minimizar a geração de resíduos da construção e demolição (RCD), e de ampliar sua reciclagem e reaproveitamento (ABRELPE, 2022; Brasil, 2022; Brasil, 2010).

As estratégias de Produção Mais Limpa (P+L) e de economia circular surgem de forma a reconfigurar os modelos produtivos, propondo a redução de resíduos na fonte, otimização do uso de insumos e prolongamento do ciclo de vida dos materiais (Germano et al., 2022; Santos et al., 2015; Rensi, 2006). A economia circular, em particular, rompe com o paradigma linear “extrair–produzir–descartar” e passa a valorizar fluxos fechados de matéria e energia, em que resíduos e subprodutos

retornam como insumos para novos ciclos produtivos (Cucchiella et al., 2023). Nesse contexto, resíduos agroindustriais e fibras vegetais tornam-se recursos estratégicos para o desenvolvimento de novos materiais construtivos, inseridos em cadeias produtivas mais limpas e de menor pegada de carbono.

Paralelamente, a indústria 4.0 tem promovido profundas transformações nos sistemas produtivos ao integrar automação, internet das coisas (IoT), inteligência artificial e manufatura aditiva, entre outras tecnologias digitais (Inácio et al., 2020; Pereira; Simonetto, 2018). No setor da construção civil, essas inovações possibilitam a digitalização de projetos, a otimização de processos, o monitoramento de desempenho em tempo real e a personalização de componentes, contribuindo para ganhos de produtividade e para a redução de desperdícios (Duarte & Rezende, 2023; Li et al., 2023; Pan et al., 2022;). A manufatura aditiva, em particular, destaca-se como uma tecnologia-chave por permitir a fabricação sob demanda, a partir de modelos digitais, com geometrias complexas e controle preciso do uso de material (Dilberoglu et al., 2017; Duigou et al., 2020; Rajeshkumar et al., 2021).

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão tridimensional (3D), compreende diferentes técnicas baseadas na deposição sucessiva de camadas de material (Dilberoglu et al., 2017). No âmbito da construção civil, essas técnicas vêm sendo utilizadas desde a prototipagem e fabricação de modelos físicos até a produção de componentes arquitetônicos, elementos estruturais, sistemas de vedação, materiais de isolamento e até edificações em escala real (Faleschini et al., 2023; Smita & Ilyas, 2023). Entre as principais tecnologias, destacam-se a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), a Estereolitografia (SLA), a Fusão Seletiva a Laser (SLM) e, sobretudo, a Modelagem por Deposição Fundida (do inglês *Fused Deposition Modeling* – FDM), que se consolidou como uma das rotas mais difundidas em pesquisas com compósitos sustentáveis (Duarte & Rezende, 2023; Salunkhe et al., 2023).

A FDM opera pela extrusão de filamentos termoplásticos, depositados camada a camada, sendo amplamente utilizada devido à sua relativa simplicidade operacional, ao custo reduzido dos equipamentos e à compatibilidade com polímeros biodegradáveis, como o polilático (PLA), e com compósitos reforçados com fibras naturais (Dilberoglu et al., 2017; Duigou et al., 2020; Rajeshkumar et al., 2021). Um diferencial dessa técnica é a possibilidade de ajuste fino dos parâmetros de impressão, como temperatura de extrusão, velocidade, altura de camada, densidade e padrão de preenchimento, e orientação das camadas, que influenciam diretamente a microestrutura e, consequentemente, as propriedades mecânicas, térmicas e até acústicas dos corpos de prova e elementos produzidos (Daminabo et al., 2020; Mazzanti, Malagutti & Mollica, 2019; Wang et al., 2022). Essa flexibilidade torna a FDM particularmente atrativa para o desenvolvimento de componentes customizados para a construção civil, como painéis decorativos, divisórias leves, elementos estruturais otimizados e sistemas de isolamento (Duigou et al., 2020; Ganguly et al., 2022; Smita & Ilyas, 2023).

Nessa direção, o PLA destaca-se como uma das matrizes poliméricas mais estudadas em compósitos para manufatura aditiva, por ser um polímero biodegradável, de origem renovável (derivado, em geral, do amido de milho) e com boa processabilidade em FDM (Arockiam et al., 2021; Fico et al., 2022; Rajeshkumar et al., 2021). Em comparação com polímeros de origem fóssil, o PLA apresenta menor pegada de carbono e potencial de compostagem em condições adequadas, o que contribui para a redução do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida (Cisneros-López et al., 2019; Figueroa-Velarde et al., 2021). Contudo, limitações como fragilidade relativa, baixa resistência ao impacto e à temperatura têm motivado o desenvolvimento de compósitos PLA-fibras vegetais, buscando melhorar o desempenho mecânico, ampliar a janela de aplicação e, simultaneamente, incorporar frações crescentes de matéria-prima de origem biogênica (Billings et al., 2023; Bhagia et al., 2020; Landes & Letcher, 2020).

Os compósitos reforçados com fibras vegetais vêm ganhando destaque como alternativa promissora aos materiais convencionais na construção civil, em função de sua menor densidade, boa resistência mecânica específica, menor energia incorporada e possibilidade de uso de resíduos agrícolas e florestais (Ganguly et al., 2022; Rajeshkumar et al., 2021; Faruk et

al., 2012). Essas fibras podem ser classificadas de acordo com sua origem na planta (caules, folhas, sementes, frutos ou cascas) e cada grupo apresenta propriedades típicas que condicionam seu desempenho em compósitos (BHAGIA et al., 2021). Fibras de caule, como bambu, cânhamo e linho, exibem elevado teor de celulose e boa resistência à tração; fibras de folhas, como sisal e abacá, oferecem rigidez e alta resistência ao desgaste; fibras de sementes, como o algodão, contribuem para melhoria de textura e acabamento; enquanto fibras de fruto e casca, como casca de coco e bagaço de cana, apresentam porosidade elevada e bom potencial de isolamento térmico e acústico (Arockiam et al., 2021; Deb & Jafferson, 2021; Le Guen et al., 2019; Tekinalp et al., 2019).

A incorporação de fibras naturais em matrizes poliméricas, particularmente em PLA, tem demonstrado ganhos relevantes em resistência à tração, flexão e impacto, além de melhorias em isolamento térmico e, em certos casos, em absorção sonora (Beskopylny et al., 2023; Jang, 2023; Wang et al., 2023; Kamal et al., 2021). Estudos recentes mostram o potencial de diferentes resíduos agroindustriais (casca de arroz, casca de amendoim, casca de soja, fibras de agave, fibras de madeira e fibras de palmeiras) na formulação de filamentos e compósitos voltados a aplicações construtivas, incluindo painéis, revestimentos, tijolos modulares, mobiliário urbano e elementos estruturais leves (Balla et al., 2020; Gauss et al., 2024; Jakab et al., 2024; Lekrine et al., 2024; Morales et al., 2021). Essa abordagem fortalece a bioeconomia ao transformar resíduos em insumos de maior valor agregado, reduzindo o volume de resíduos destinados a aterros e estabelecendo novas cadeias produtivas sustentáveis (Cucchiella et al., 2023; Ellessawy et al., 2024).

No campo específico da construção civil, a literatura aponta um espectro amplo de aplicações para compósitos com fibras vegetais fabricados por manufatura aditiva. Esses materiais vêm sendo empregados em painéis para paredes, divisórias, forros e telhados, com propriedades de isolamento térmico e acústico; em revestimentos de pisos e paredes com diferentes texturas e acabamentos; em tijolos modulares e elementos personalizados com canais internos para instalações; em componentes estruturais de baixa a média solicitação; e em mobiliário urbano e elementos decorativos (Asut et al., 2024; Duarte, 2023; Ganguly et al., 2022; Wang et al., 2022). A possibilidade de parametrizar geometrias, gradientes de densidade e estruturas internas complexas por meio da impressão 3D amplia ainda mais o potencial de otimização do desempenho e de adaptação às demandas projetuais específicas (Bierach et al., 2023; Billa et al., 2023).

Apesar desses avanços, a adoção em larga escala desses compósitos na construção civil ainda enfrenta desafios técnicos e econômicos. A variabilidade intrínseca das fibras naturais, relacionada à espécie, às condições de cultivo, ao manejo e aos processos de extração, repercute em inconsistências nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos compósitos, exigindo protocolos de caracterização e controle de qualidade mais robustos (Bhagia et al., 2021; Ganguly et al., 2022). Além disso, a diferença de polaridade entre fibras, em geral hidrofílicas, e matrizes poliméricas hidrofóbicas, como o próprio PLA, tende a prejudicar a adesão interfacial, demandando tratamentos de superfície (como alcalinização, silanização e acetilação) para melhorar a compatibilidade e o desempenho estrutural (Liao et al., 2020; Kariz et al., 2018; Le Duigou et al., 2016; Li, Tabil & Panigrahi, 2007). Questões de durabilidade, especialmente em ambientes externos sujeitos à umidade, radiação UV e ataque biológico, e os custos associados ao processamento, à modificação das fibras e à formulação dos filamentos também limitam a aplicação mais ampla desses materiais (Asut et al., 2024; Wang et al., 2022; Daminabo et al., 2020).

Outro ponto relevante é que, embora existam revisões abrangentes sobre biocompósitos à base de PLA e sobre o uso de fibras naturais em manufatura aditiva (Bhagia et al., 2021; Deb & Jafferson, 2021; Rajeshkumar et al., 2021; Fico et al., 2022; Ilyas et al., 2022; Le Duigou et al., 2020; Balla et al., 2019; Mazzanti, Malagutti, & Mollica, 2019), ainda são limitados os estudos que sintetizam, de forma quantitativa, o desempenho de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais especificamente voltados à construção civil. Em particular, há uma lacuna na consolidação sistemática de dados sobre propriedades mecânicas, térmicas e acústicas de compósitos processados por FDM e aplicados a elementos arquitetônicos, assim como na comparação estruturada desses compósitos com materiais convencionais e na avaliação integrada de seus

impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.

Diante desse contexto, torna-se necessário organizar e analisar criticamente a produção científica recente sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais processados por manufatura aditiva, com foco em aplicações na construção civil sustentável. A utilização de uma metodologia de revisão sistemática da literatura, seguindo as diretrizes PRISMA (2020), permite consolidar resultados dispersos, identificar padrões e parâmetros críticos de impressão, comparar o desempenho desses compósitos com materiais usuais da construção e evidenciar lacunas relacionadas a propriedades mecânicas, térmicas, acústicas e à durabilidade em serviço (Page et al., 2022; Santos, 2021). Ao fazê-lo, é possível fornecer uma base técnico-científica mais robusta para orientar a seleção de fibras, matrizes, tratamentos e parâmetros de processamento em futuras pesquisas e aplicações práticas.

Este estudo objetivou avaliar o desempenho e potencial de aplicação dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais na construção civil sustentável, por meio de uma revisão sistemática conduzida segundo as diretrizes PRISMA.

2. Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura, de natureza quantitativa em relação à quantidade de 50 artigos selecionados para compor o “*corpus*” da pesquisa (Pereira et al., 2018) bem como com uso de estatística descritiva simples com uso de Gráficos de barras ou colunas, Gráfico de linhas, classe de dados por ano e também conforme o tipo de fibras naturais empregadas e valores de frequência absoluta em quantidade de artigos (Shitsuka et al., 2014).

Esta pesquisa é caracterizada como um estudo aplicado, exploratório e descritivo, com abordagem quantitativa e qualitativa, voltado à consolidação de dados sobre o uso de fibras vegetais em compósitos poliméricos para manufatura aditiva no setor da construção civil sustentável. Adota-se um recorte temporal transversal, considerando publicações entre 2018 e 2024, de modo a oferecer uma visão abrangente e atualizada dos avanços no campo da manufatura aditiva com compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais.

Para organizar e sintetizar as evidências científicas disponíveis, emprega-se a metodologia de revisão sistemática de literatura, seguindo o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*, 2020), com foco na aplicação de fibras vegetais em matrizes poliméricas processadas pela tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM).

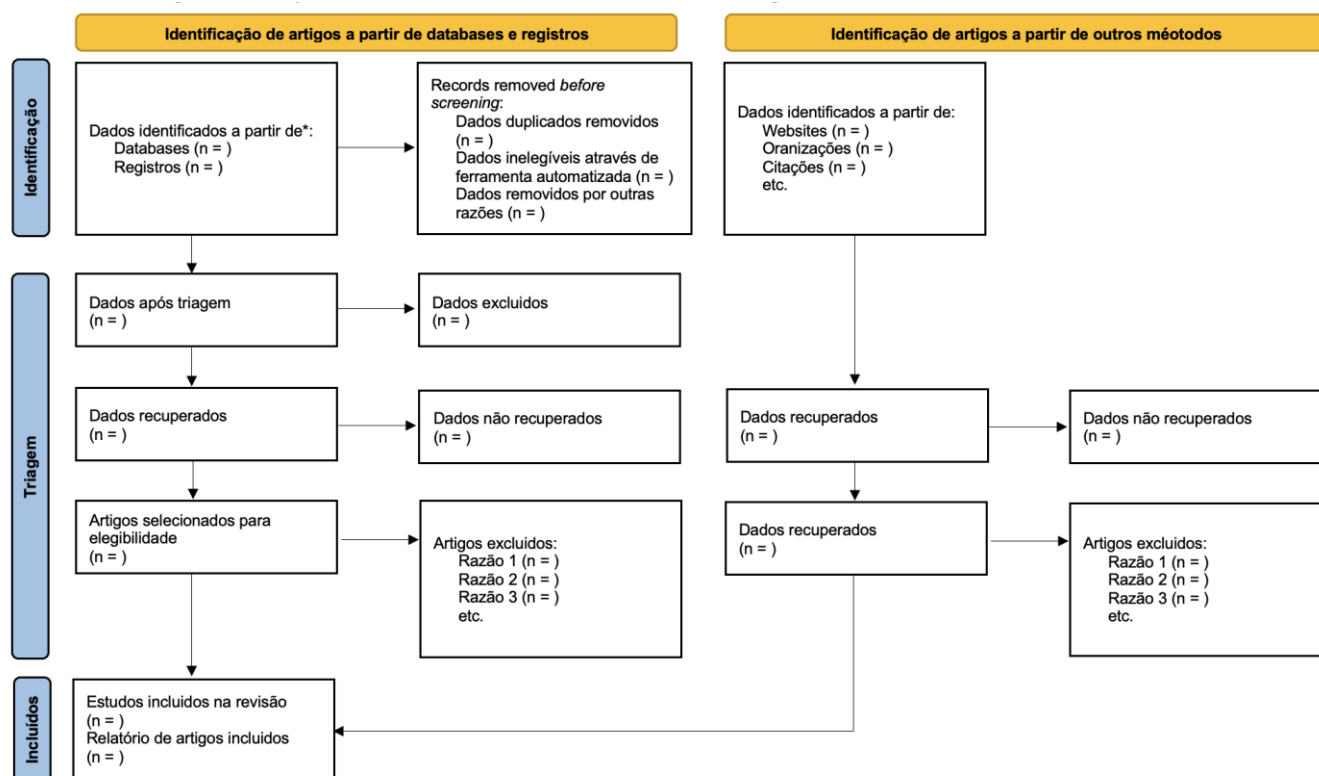
Para a coleta de dados, foram utilizadas as bases *ScienceDirect*, *Web of Science* e *Dimensions*. A fim de garantir a precisão e a pertinência dos estudos, foram aplicados descritores específicos que refletem o foco da pesquisa, utilizando combinações de termos e operadores booleanos: “*Additive Manufacturing OR 3D printing*” AND “*Plant fibers OR natural fibers*” AND “*construction materials*”, “*Biocomposites AND additive manufacturing*” e “*Fused deposition modeling (FDM) AND biobased materials*”. As buscas foram realizadas de forma independente em cada base, e os resultados obtidos foram exportados para posterior tratamento em planilhas do Microsoft Excel® (versão 16.91).

Os critérios de seleção seguiram parâmetros rigorosos para assegurar a relevância e a qualidade dos dados incluídos na análise. Foram considerados elegíveis artigos publicados entre 2018 e 2024 que abordassem diretamente a aplicação de fibras vegetais em matrizes poliméricas para a produção de compósitos via FDM, apresentando resultados experimentais sobre propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas de interesse para o setor da construção civil. Foram incluídos apenas artigos originais, revisados por pares e publicados no idioma inglês, com texto completo disponível. Foram excluídos artigos de revisão, livros, capítulos de livros, trabalhos apresentados em congressos, notas técnicas e publicações que não envolvessem diretamente o uso de fibras vegetais em compósitos poliméricos para FDM ou que não apresentassem dados quantitativos relevantes sobre as propriedades dos materiais. Estudos duplicados entre bases fora do escopo temático também foram

descartados.

O processo de seleção dos estudos seguiu o modelo PRISMA 2020 (Figura 1), contemplando as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão. Inicialmente, os estudos identificados nas buscas foram catalogados em planilha do Excel® (versão 16.91), com registro de título, autores, ano, periódico, DOI e base de origem. Em seguida, foi realizada uma triagem inicial dos títulos e resumos para exclusão dos trabalhos não aderentes ao tema. Os artigos restantes foram avaliados em texto completo, de forma a verificar a aderência aos critérios de inclusão, exclusão e alinhamento com os objetivos da pesquisa. Os estudos elegíveis foram organizados em uma segunda planilha, estruturada para reunir as principais informações, como tipo de fibra vegetal utilizada, propriedades dos compósitos, parâmetros de impressão e impactos ambientais quando disponíveis.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia PRISMA 2020, para novas revisões sistemáticas que incluíram pesquisas em bases de dados, registros e outras fontes.



Fonte: PRISMA (2020).

Os registros recuperados foram organizados e gerenciados com o auxílio do software Zotero®, o que facilitou a exclusão de duplicatas e a categorização das referências em grupos específicos, de acordo com tipo de fibra, matriz polimérica, técnica de manufatura e área de aplicação. Como suporte adicional à triagem, empregou-se a inteligência artificial por meio da ferramenta NotebookLM®, utilizada apenas para auxiliar na leitura e classificação preliminar dos resumos, sem substituir a avaliação crítica dos autores na decisão final de inclusão ou exclusão dos estudos.

A extração dos dados foi conduzida de forma sistemática a partir da leitura integral dos artigos selecionados. Para cada estudo, foram registradas informações sobre: fibras vegetais utilizadas (espécie, origem, forma de obtenção e eventuais tratamentos); matrizes poliméricas empregadas, com destaque para o uso de PLA e outros polímeros compatíveis com FDM; composição dos compósitos (teores de fibra, presença de compatibilizantes ou outras cargas, parâmetros de impressão e

processamento), propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas e aspectos de sustentabilidade avaliados. Também foram registradas a área de aplicação declarada ou sugerida para os materiais, com enfoque às aplicações na construção civil.

As informações quantitativas organizadas nas planilhas permitiram identificar a distribuição dos estudos por ano, país, periódico, tipo de fibra, matriz polimérica, técnica de manufatura e campo de aplicação, bem como a frequência com que determinadas propriedades são avaliadas. A análise qualitativa, por sua vez, permitiu interpretar criticamente os resultados apresentados nos artigos, destacando tendências de desempenho, vantagens e limitações dos compósitos estudados, bem como lacunas de pesquisa relacionadas à sua aplicação na construção civil e à avaliação de sustentabilidade, sendo gerados gráficos.

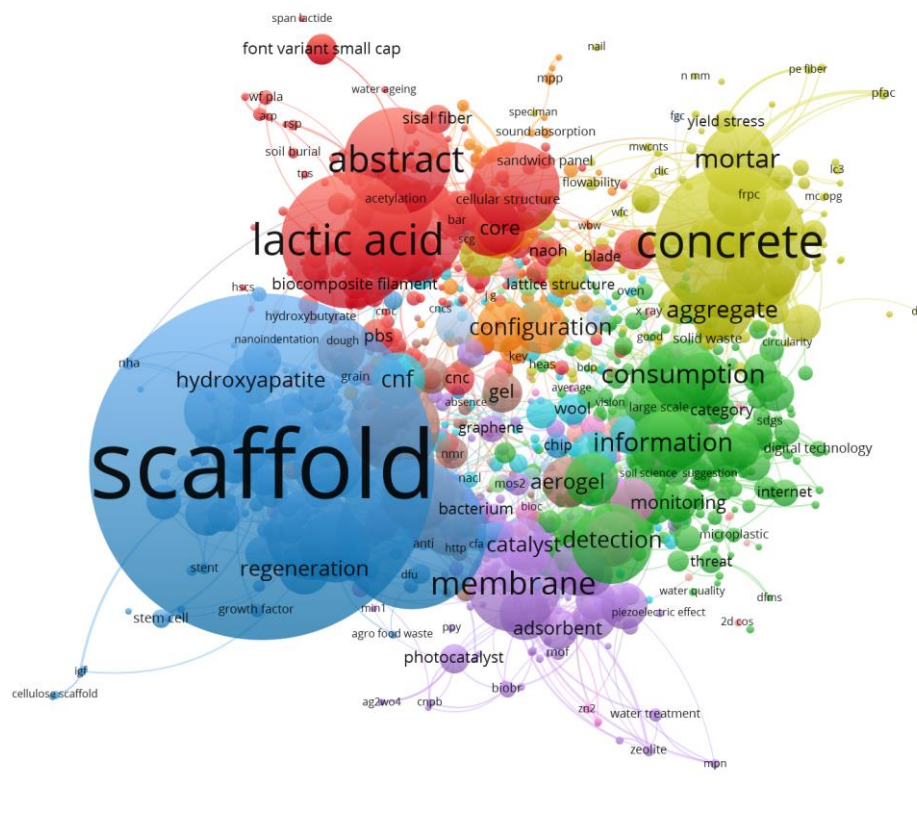
Na última etapa da metodologia, foi gerado o mapa de Cluster a partir dos dados coletados da base científica *Web of Science*, a fim de verificar a correlação entre as citações presentes nos artigos a partir do *software* VOSviewer®.

3. Resultados e Discussão

A aplicação do protocolo PRISMA (2020), permitiu organizar de forma transparente o processo de busca, triagem e seleção dos estudos incluídos nesta revisão sistemática. Inicialmente, a busca nas bases *Science Direct*, *Web of Science* e *Dimensions* resultou em 15.482 registros.

O mapa de coocorrência de termos, gerado no *software* VOSviewer (Figura 2), foi construído a partir da totalidade dos artigos recuperados na etapa inicial de busca bibliográfica e evidencia como o campo é tematicamente amplo e fragmentado. Observa-se um grande cluster azul centrado em termos como *scaffold*, *hydroxyapatite* e *regeneration*, associado a pesquisas em biomateriais e engenharia de tecidos com polímeros degradáveis; um cluster vermelho em torno de *lactic acid* e termos ligados a biopolímeros, que conecta diretamente o PLA e outros poliésteres de origem renovável a diferentes aplicações; e, em contraste, um cluster amarelo-esverdeado dominado por *concrete*, *mortar* e *aggregate*, que concentra os estudos de materiais cimentícios avançados, argamassas e concretos modificados. Outros agrupamentos, vinculados a palavras como *membrane*, *adsorbent*, *photocatalyst* e *water treatment*, apontam para uma frente robusta de pesquisas voltadas à remediação ambiental e tratamento de água, enquanto termos como *consumption*, *monitoring*, *information* e *digital technology* sugerem a interface com sustentabilidade, monitoramento e tecnologias digitais. Essa visualização reforça que, embora o universo inicial de publicações envolva uma variedade de aplicações (biomédicas, ambientais, cimentícias e de ciência de materiais em geral), o recorte adotado neste trabalho, focado em compósitos poliméricos com fibras vegetais processados por FDM para uso na construção civil sustentável, corresponde a um subconjunto específico desse panorama temático amplo, justificando a necessidade da filtragem sistemática realizada na sequência.

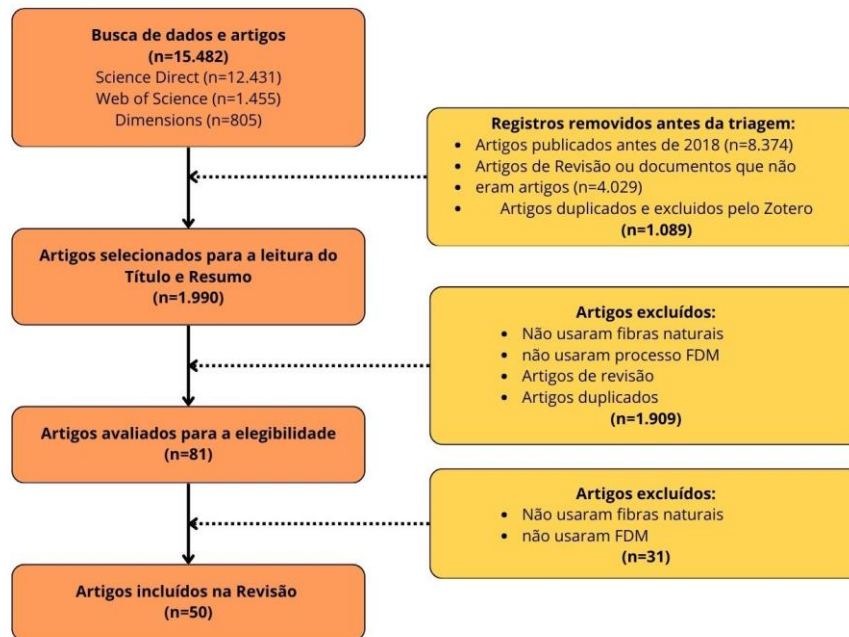
Figura 2 - Mapa de coocorrência de termos obtido a partir dos títulos e resumos dos mais de 15.482 registros recuperados na busca inicial, antes da aplicação do protocolo PRISMA.



Fonte: Autoria própria (2025).

Em seguida, a restrição temporal a publicações a partir de 2018 levou à exclusão de 8.374 documentos, enquanto 4.029 registros foram removidos por se tratarem de artigos de revisão, capítulos de livros ou outros tipos de publicação que não correspondiam a artigos científicos originais. Adicionalmente, 1.089 registros duplicados foram identificados e excluídos com auxílio do Zotero®. Após essas etapas, 1.990 estudos seguiram para leitura de título e resumo. A aplicação dos critérios de elegibilidade com foco no uso de fibras naturais ou resíduos lignocelulósicos em compósitos poliméricos para manufatura aditiva, resultou na exclusão de 1.909 artigos que não empregavam fibras vegetais, não utilizavam processos de extrusão ou FDM, ou permaneciam fora do escopo temático. Assim, 81 artigos foram avaliados em texto completo, culminando na inclusão de 50 estudos que atenderam integralmente aos critérios de elegibilidade definidos como ilustrado na Figura 3.

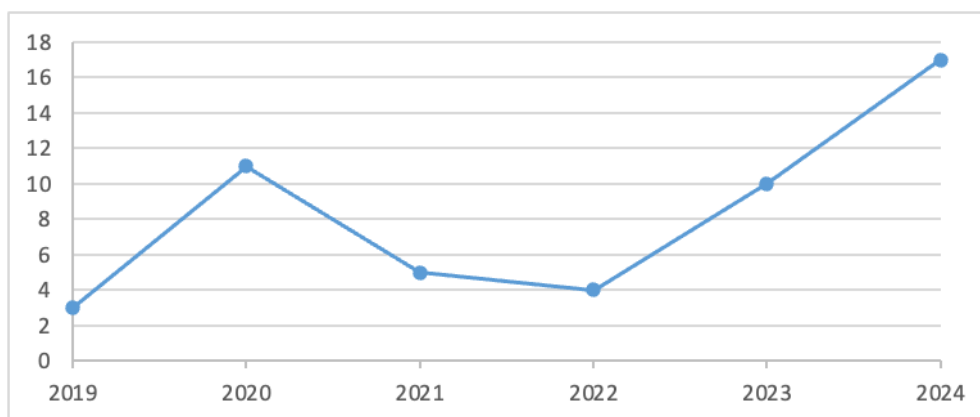
Figura 3 - Fluxograma de seleção dos estudos conforme as diretrizes PRISMA (2020).



Fonte: Autoria própria (2025).

A análise de coocorrência de termos nos títulos e resumos dos 50 artigos selecionados (Figura 4) evidencia que o núcleo temático da amostra está claramente estruturado em torno de PLA e *composite*, diretamente conectados a expressões como *additive manufacturing*, *filament* e *3D printing*. Esses termos formam um cluster central que articula o uso do políácido láctico como matriz predominante e a rota de processamento por modelagem por deposição fundida, reforçando o foco da literatura em biocompósitos impressos em 3D. A forte associação com palavras como *strength*, *mechanical property*, *tensile strength*, *performance* e *density* indica que a maior parte dos estudos está orientada para a otimização do desempenho mecânico dos compósitos, enquanto a presença de termos como *natural fiber*, *cellulose* e *natural fiber reinforcement* ressalta a preocupação com o uso de reforços lignocelulósicos. Observa-se ainda a conexão com *aerated concrete* e *composite material*, sugerindo interfaces diretas com materiais leves e sistemas construtivos, o que aproxima esses desenvolvimentos da realidade da construção civil. A escala temporal do mapa mostra que termos ligados a *performance*, *3D printing* e *natural fiber reinforcement* tendem a se intensificar nos anos mais recentes, indicando um direcionamento progressivo da pesquisa para a consolidação de compósitos PLA-fibras naturais como soluções de alto desempenho e potencialmente aplicáveis em componentes construtivos sustentáveis.

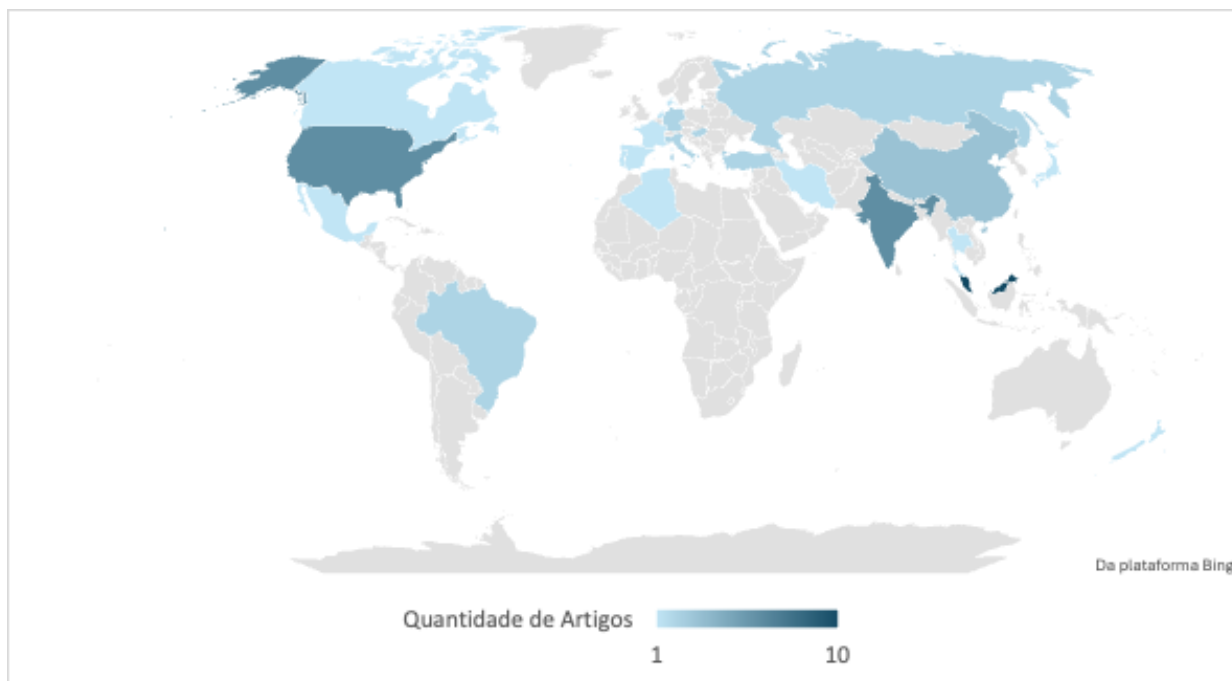
Figura 5 - Distribuição anual dos 50 artigos incluídos na revisão sistemática entre 2019 e 2024.



Fonte: Autoria própria (2025).

A distribuição dos artigos por país evidencia uma forte concentração em poucos centros de pesquisa: a Malásia lidera com 10 publicações, seguida por Índia e Estados Unidos (6 cada), enquanto China aparece com 3 trabalhos e países como Alemanha, Rússia, Turquia, Brasil, Itália e Hungria contribuem com 2 estudos cada, e os demais com apenas 1. Esse padrão sugere que o desenvolvimento de trabalhos no tema tem sido impulsionado, sobretudo, por nações com forte base agroindustrial e infraestrutura consolidada em pesquisa de materiais, ao mesmo tempo em que revela um campo em expansão, ainda pouco explorado em muitos contextos regionais com grande disponibilidade de resíduos vegetais.

Figura 6 - Distribuição dos 50 artigos de acordo com o país de origem dos principais autores.



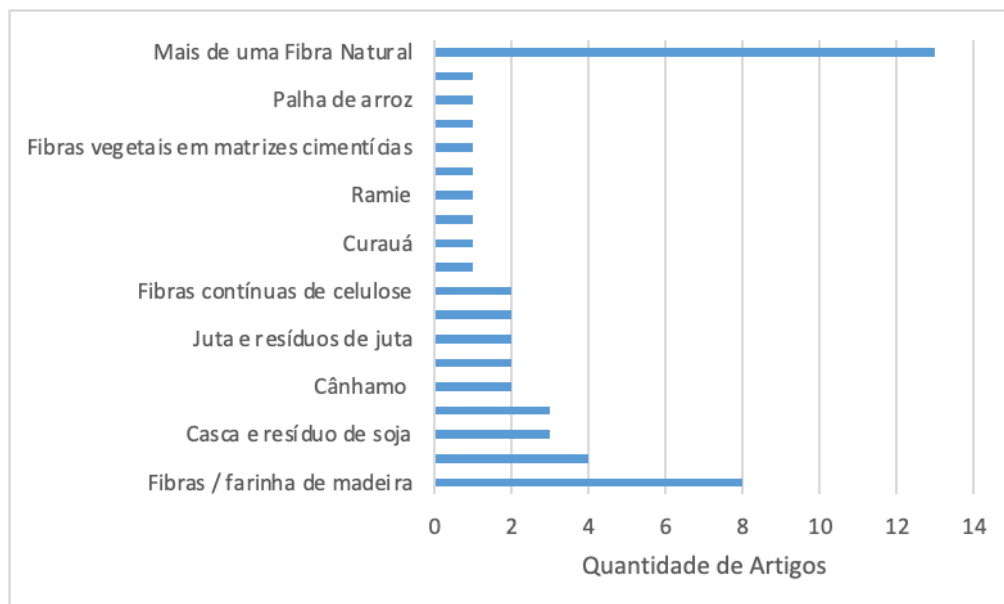
Fonte: Autoria própria (2025).

Em relação aos materiais de matriz, a maioria dos estudos utiliza o políácido láctico (PLA) (virgem, reciclado ou modificado) como polímero de base para os compósitos, seja na forma de filamentos extrudados para FDM, seja em corpos de prova moldados por compressão ou injeção que servem de referência para comparação (Cisneros-López et al., 2019; Balla et al., 2020; Dogru et al., 2022; Cavalcanti et al., 2022; Billings et al., 2023; Jamadi et al., 2023; Siddiqui et al., 2024; Liu, Lei &

Xing, 2019). Parte dos trabalhos explora ainda o uso de outros polímeros termoplásticos biodegradáveis, como o polibutileno succinato (PBS) reforçado com cânhamo (Dönitz et al., 2023), ou matrizes híbridas e poliésteres reforçados com fibras vegetais e resíduos minerais, como compósitos de poliéster, bambu e caulim (Santos et al., 2024). Outra vertente relevante é a de compósitos cimentícios e misturas à base de cal e solo, nos quais fibras vegetais e resíduos lignocelulósicos são incorporados como reforço em argamassas, concretos leves e misturas para impressão 3D de elementos em terra (Rech et al., 2022; Faleschini et al., 2023; Beskopylny et al., 2023; Lombardi et al., 2024). Por fim, há sistemas não poliméricos baseados em micélio e substratos lignocelulósicos, que se destacam como materiais de baixa densidade voltados a elementos de enchimento e aplicações experimentais (Soh et al., 2020).

No que se refere às fibras naturais e resíduos agroindustriais (Figura 7), os 50 artigos evidenciam uma forte predominância de fibras lignocelulósicas de caule (*bast fibers*), tais como cânhamo, linho, juta, kenaf, curauá e sisal, além de fibras lenhosas (farinha de madeira, bambu, fibras de palmeira) e resíduos particulados (farelo de linhaça, palha de colza, palha e casca de arroz, resíduos de soja e óleo de palma). Fibras de cânhamo são amplamente exploradas em estruturas tipo colmeia impressas por FDM e em compósitos de matriz PLA ou PBS de alto desempenho, com destaque para painéis sanduíche leves e elementos estruturais otimizados (Antony, Cherouat & Montay, 2020; Dönitz et al., 2023; Easwaramoorthi et al., 2024). Fibras de linho e outros reforços contínuos à base de celulose são usadas em núcleos tipo *honeycomb* e painéis com geometrias otimizadas, mostrando desempenho promissor em aplicações que requerem elevada rigidez específica (Easwaramoorthi et al., 2024; Muthe, Pickering & Gauss, 2024). Fibras de bambu aparecem tanto em compósitos PLA para FDM quanto em sistemas híbridos com poliéster e caulim, combinando reforço natural com cargas minerais para obter desempenho mecânico e estabilidade dimensional adequados (Landes & Letcher, 2020; Taborda-Ríos et al., 2020; Santos et al., 2024).

Figura 7 - Distribuição dos 50 artigos de acordo com o tipo de fibra natural empregada, destacando o predomínio de formulações com mais de uma fibra, seguido pelo uso de fibras/farinha de madeira, casca e resíduos de soja



Fonte: Autoria própria (2025).

Resíduos agroindustriais particulados também são amplamente estudados como cargas em matrizes poliméricas, incluindo farelo de linhaça e palha de colza (Jakab et al., 2024), casca e palha de arroz (Asheghi-Oskooee et al., 2024), casca de soja e fibras de soja (Balla et al., 2020; Balla et al., 2020; Vinod et al., 2024), resíduos de óleo de palma (Adriman, 2021; Sharum et al., 2024) e resíduos têxteis de juta (Özdemir et al., 2023). Esses estudos convergem ao mostrar que resíduos

lignocelulósicos finamente particulados tendem a aumentar a rigidez e a cristalinidade do PLA, embora, sem compatibilização adequada, possam reduzir a resistência à tração e o alongamento na ruptura devido a interfaces fracas e maior porosidade (Jakab et al., 2024; Asheghi-Oskooee et al., 2024). O uso de agentes compatibilizantes, como anidrido maleico enxertado em PLA, surge como estratégia eficiente para melhorar simultaneamente módulo, resistência e tenacidade em compósitos PLA e casca de arroz (Asheghi-Oskooee et al., 2024), reforçando a importância do projeto interfacial na formulação de biocompósitos impressos em 3D. Em paralelo, fibras têxteis naturais, como algodão e celulose regenerada, são avaliadas em compósitos têxteis PLA e em filamentos pré-impregnados de alto desempenho (Shoeb, Kumar & Haleem, 2023; Muthe, Pickering & Gauss, 2024), sugerindo potencial para têxteis arquitetônicos *bio-based* e elementos de membrana em escala de construção.

A análise das propriedades mecânicas reportadas nos estudos confirma que a incorporação de fibras vegetais em matrizes poliméricas compatíveis, especialmente PLA, é capaz de promover ganhos relevantes em rigidez e, em muitos casos, em resistência à tração e flexão, desde que o teor de fibra, o comprimento das fibras e o tratamento superficial sejam adequadamente controlados (Cisneros-López et al., 2019; Balla et al., 2020; Taborda-Ríos et al., 2020; Cavalcanti et al., 2022; Dönitz et al., 2023; Abdul Azam et al., 2024). Em compósitos com fibras de bambu, por exemplo, tanto ensaios em corpos de prova quanto em geometrias impressas indicam aumento de módulo e de capacidade de carga, com vantagem adicional quando as fibras são alcalinizadas ou tratadas, reduzindo defeitos interfaciais e porosidade (Landes & Letcher, 2020; Taborda-Ríos et al., 2020; Santos et al., 2024). Para fibras de curauá em PLA impresso por FDM, Cavalcanti et al. (2022) demonstram que compósitos curtos bem dispersos podem atingir desempenho superior ao PLA puro, especialmente em flexão, desde que parâmetros de impressão e fração de fibra sejam otimizados.

Compósitos com fibras contínuas ou quase contínuas representam uma fronteira importante dentro do conjunto analisado. Estudos com *honeycombs* de fibra de linho com PLA (Easwaramoorthi et al., 2024), estruturas finas reforçadas com fibras naturais (Wang et al., 2023) e filamentos com fios de celulose pré-impregnados (Muthe, Pickering & Gauss, 2024) mostram que compósitos naturais podem atingir níveis de resistência e rigidez comparáveis ou superiores a sistemas convencionais de PLA reforçado com fibras sintéticas, com densidades mais baixas.

A influência de parâmetros de impressão e da morfologia das fibras sobre o desempenho mecânico também é recorrente nos estudos. Trabalhos que avaliam diferentes tamanhos de fibra e granulometrias, demonstram que fibras mais finas e bem distribuídas tendem a favorecer o equilíbrio entre rigidez e resistência, enquanto partículas grosseiras ou fibras muito longas mal orientadas introduzem defeitos e comprometem a integridade do filamento (Jamadi et al., 2023). Em paralelo, estudos focados em parâmetros de FDM, como orientação de impressão, *infill*, espessura de camada e temperatura de extrusão, demonstram que a resposta mecânica dos compósitos é altamente anisotrópica e dependente do caminho de deposição (Mastura et al., 2021; Liu, Lei & Xing, 2019; Siddiqui et al., 2024). Em *honeycombs* e estruturas celulares, por exemplo, a combinação de topologias biomiméticas com fibras alinhadas permite obter elementos que conciliam rigidez específica elevada e boa capacidade de absorção de energia (Antony, Cherouat & Montay, 2020; Wang et al., 2023; Easwaramoorthi et al., 2024). Esses achados são particularmente relevantes para a construção civil, pois permitem pensar em núcleos de painéis, sistemas de absorção de impacto e componentes de fachada leves, desenhados a partir de geometrias complexo-otimizadas.

Além do desempenho mecânico, diversas pesquisas abordam propriedades funcionais diretamente ligadas ao conforto ambiental e à durabilidade, aspectos centrais para a construção sustentável. No campo do desempenho acústico, Sekar et al. (2021) apresenta uma série de trabalhos em que painéis microperfurados e painéis espessos impressos em 3D com PLA reforçado com fibras de madeira e outras fibras naturais alcançam coeficientes de absorção sonora elevados em faixas de média e alta frequência, com forte dependência de parâmetros como volume de perfuração, espessura de painel e densidade de preenchimento. Esses estudos indicam que geometrias projetadas especificamente para controle acústico, aliadas ao uso de biocompósitos, podem viabilizar elementos de revestimento internos com bom desempenho de absorção sonora, baixo peso e

menor impacto ambiental em comparação a materiais sintéticos convencionais.

Aspectos de durabilidade, biodegradação e comportamento em serviço também são explorados em parte dos estudos. Cisneros-López et al. (2019) avaliaram compósitos de PLA reciclado reforçado com fibras, e observaram que a adição de fibras vegetais pode recuperar parcialmente a resistência de PLA reciclado, ao mesmo tempo em que favorece uma rota de reutilização de resíduos plásticos. A resistência à fadiga de PLA reforçado com fibras naturais evidenciam que o reforço vegetal pode melhorar a resistência à nucleação e propagação de trincas sob carregamentos cíclicos, desde que a interface fibra–matriz ser adequadamente projetada (Bermudo Gamboa et al., 2024). No campo da durabilidade em ambientes agressivos, Abdul Azam et al. (2024) demonstram que compósitos de PLA reforçados com fibras de kenaf mantêm desempenho significativamente superior ao PLA puro após envelhecimento em diferentes condições, evidenciando maior estabilidade mecânica em situações de uso prolongado. Estudos de biodegradabilidade e comportamento em compostagem, como o de Jakab et al. (2024), mostram ainda que compósitos PLA preenchidos com resíduos agrícolas, como farelo de linhaça e palha de colza, podem apresentar degradação mais rápida que o PLA puro, reforçando o potencial desses materiais para aplicações em que o fim de vida controlado é desejável.

Quadro 1 - Síntese dos principais tipos de fibras naturais e resíduos utilizados nos estudos analisados, com indicação dos efeitos predominantes nas propriedades mecânicas dos compósitos, possíveis aplicações na construção civil e exemplos de estudos representativos.

Tipo de Fibra	Principais efeitos e propriedades mecânicas	Possíveis aplicações na construção civil	Estudos representativos
Casca e resíduos de soja	Aumento de rigidez (módulo) e, em teores otimizados, manutenção ou leve aumento da resistência à tração/flexão; maior absorção de água pela natureza hidrofílica das fibras.	Valorização de resíduos agroindustriais em biocompósitos 3D-printados, com potencial para painéis leves e elementos não estruturais em sistemas construtivos sustentáveis.	Balla et al., 2020a; Balla et al., 2020b; Vinod et al., 2024
Cânhamo	Aumento significativo de rigidez e capacidade de carga específica em honeycombs e sanduíches; melhoria de resistência mecânica em PBS com densidade reduzida.	Indicado para painéis leves, núcleos de lajes e divisórias de baixa espessura, com bom equilíbrio entre desempenho estrutural e conteúdo renovável.	Antony, Cherouat & Montay, 2020; Dönitz et al., 2023
Linho	Fibras contínuas geram grandes aumentos de resistência e módulo com redução de densidade; farelo de linhaça aumenta cristalinidade e módulo, com ligeira queda de resistência sem forte compatibilização.	Linho se apresenta como alternativa real a fibras sintéticas em estruturas leves impressas; resíduos de linhaça fortalecem a proposta de compósitos biodegradáveis para componentes não estruturais.	Easwaramoorthi et al., 2024; Jakab et al., 2024; Vinod et al., 2024
Ramie (rami)	Elevada capacidade de absorção de energia e grande aumento de resistência em relação a estruturas sem reforço contínuo.	Apto para componentes de proteção, zonas de amassamento e elementos de segurança em sistemas construtivos leves.	Wang et al., 2023
Bambu	Aumento de módulo e resistência à flexão; tratamentos alcalinos e controle de comprimento de fibra melhoram a interface e reduzem porosidade.	Permite compósitos híbridos com desempenho próximo a materiais estruturais convencionais, viáveis para perfis, reforços e elementos de fachada interna.	Landes & Letcher, 2020; Taborda-Ríos et al., 2020; Santos et al., 2024
Fibras / farinha de madeira	Ganho consistente de módulo de tração e flexão, com queda moderada de resistência máxima; híbridos wood/ceramic podem apresentar rigidez superior.	Comportamento ao fogo modificado, com potencial redução da taxa de liberação de calor em relação ao PLA puro; uso promissor em revestimentos internos, painéis e mobiliário.	Bhagia et al., 2020; Doğru et al., 2022; Billings et al., 2023; Siddiqui et al., 2024; Thirugnanasamabandam et al., 2024; Liu, Lei & Xing, 2019
Curauá	Aumento de resistência à flexão e do módulo em relação ao PLA puro, dependendo da fração de fibra e dos parâmetros de impressão.	Indicado para componentes leves sujeitos à flexão, como painéis curvos e revestimentos com forte identidade regional amazônica.	Cavalcanti et al., 2022
Kenaf	Grande aumento de módulo e resistência em relação ao PLA puro, com manutenção do desempenho após envelhecimento em diferentes ambientes.	Promissor para elementos de uso prolongado, como painéis internos e componentes semi-estruturais sujeitos a variações de temperatura e umidade.	Abdul Azam et al., 2024

Juta e resíduos de juta	Resíduos de juta aumentam rigidez, podendo reduzir resistência se mal dispersos; estruturas jute/glass apresentam alta capacidade de absorção de energia em esmagamento axial.	Adequadas tanto para filamentos mais sustentáveis quanto para elementos de dissipação de energia e proteção em sistemas construtivos	Özdemir et al., 2023; Samim et al., 2024
Fibras e resíduos de óleo de palma (EFB)	Aumento de rigidez e, dependendo do tratamento, melhoria de resistência; qualidade do filamento fortemente ligada à compatibilização e à granulometria.	Produzem painéis e absorvedores acústicos leves com bom desempenho, adequados a revestimentos internos sustentáveis.	Adriman, 2021; Sekar et al., 2021a; Sekar et al., 2021b; Sharum et al., 2024
Palmeira <i>W. filifera</i> + biochar	Aumento de rigidez e estabilidade térmica; resistência mantida em níveis adequados.	Viáveis para filamentos “verdes” para elementos internos, revestimentos técnicos e componentes com exigência moderada de carga.	Lekrine et al., 2024
Palha de arroz	Sem compatibilização, aumenta módulo mas reduz resistência; com PLA-g-MA, há simultâneo aumento de rigidez, resistência e tenacidade.	Resíduo amplamente disponível que pode dar origem a compósitos equilibrados para elementos leves e não estruturais, desde que a interface seja projetada.	Asheghi-Oskooee et al., 2024
Farelo de linhaça	Aumentam cristalinidade e módulo do PLA, com ligeira queda de resistência em altos teores por adesão limitada e porosidade.	Compósitos apresentam biodegradação mais rápida que o PLA puro, adequados a aplicações com fim de vida ambientalmente favorável.	Jakab et al., 2024
Algodão	Estrutura têxtil confere boa capacidade de carga na direção das fibras e comportamento pseudo-laminado.	Indica potencial de têxteis de algodão como reforços em membranas arquitetônicas e revestimentos flexíveis <i>bio-based</i> .	Shoeb, Kumar & Haleem, 2023
Fios de celulose regenerada / fibras pré-impregnadas	Alta resistência e módulo, comparáveis a compósitos com fibras sintéticas quando bem impregnadas; funcionalização mineral melhora adesão e propriedades específicas.	Abrem caminho para filamentos FDM de alta performance com fibras naturais, adequados a elementos esbeltos, núcleos de painéis e componentes com requisitos especiais.	Muthe, Pickering & Gauss, 2024; Wu et al., 2024
Micélio e compósitos miceliais	Baixa resistência mecânica e densidade extremamente reduzida; atuação como enchimento leve.	Indicados para painéis de baixa densidade, enchimentos e elementos efêmeros com apelo máximo em sustentabilidade e experimentação arquitetônica.	Soh et al., 2020

Fonte: Autoria própria (2025).

Por fim, os 50 artigos analisados convergem em três pilares centrais que sustentam o objetivo do presente trabalho. A utilização de fibras vegetais e resíduos agroindustriais em compósitos de matriz polimérica, especialmente PLA, é capaz de gerar materiais com rigidez específica elevada e, em diversas condições, resistência mecânica compatível com aplicações em componentes construtivos leves, desde que a interface fibra–matriz e os parâmetros de impressão sejam cuidadosamente projetados (Cisneros-López et al., 2019; Balla et al., 2020; Cavalcanti et al., 2022; Dönitz et al., 2023; Easwaramoorthi et al., 2024). As geometrias otimizadas e estruturas celulares impressas por FDM, combinadas com fibras de *bast*, fibras lenhosas ou têxteis naturais, permitem explorar ao máximo o potencial de absorção de energia e de rigidez específica desses biocompósitos, com aplicações diretas em painéis, núcleos sanduíche, elementos acústicos e componentes internos de edifícios (Antony, Cherouat & Montay, 2020; Wang et al., 2023; Billings et al., 2023; Sekar et al., 2021a; Sekar et al., 2021b; Sekar et al., 2022). A incorporação de resíduos agrícolas particulados e fibras em matrizes poliméricas está alinhada a estratégias de economia circular na construção civil, ao valorizar fluxos de resíduos, reduzir o consumo de matérias-primas virgens e, em muitos casos, favorecer rotas de biodegradabilidade ou degradação controlada (Rech et al., 2022; Faleschini et al., 2023; Jakab et al., 2024; Asheghi-Oskooee et al., 2024; Lombardi et al., 2024). Esses achados reforçam o potencial da manufatura aditiva baseada em FDM e compósitos vegetais como rota tecnológica promissora para o desenvolvimento de elementos arquitetônicos sustentáveis.

4. Conclusão

A revisão sistemática conduzida neste estudo permitiu organizar, de forma estruturada, a produção científica recente sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais processados por modelagem por deposição fundida, com foco em aplicações na construção civil sustentável. O mapeamento de 15.482 registros iniciais, filtrados até a seleção final de 50 artigos publicados entre 2019 e 2024, evidenciou que se trata de um campo em rápida expansão, articulado à agenda da economia circular, da redução de emissões de CO₂ e da valorização de resíduos agroindustriais como insumos para novos materiais construtivos.

Os resultados indicam um predomínio do poliácido láctico (PLA) como matriz polimérica e de fibras lignocelulósicas de caule, madeira e resíduos agrícolas, como cânhamo, linho e bambu. De maneira geral, a incorporação dessas fibras e partículas vegetais promove melhorias das propriedades mecânicas, e sugere aplicações para reforço de demais propriedades, como acústicas e térmicas, além de se consolidar como rota promissora para integrar desempenho mecânico, redução de massa, estética customizável e menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida.

A síntese das evidências mostra que há um conjunto consistente de aplicações potenciais para esses compósitos em elementos construtivos leves, incluindo núcleos sanduíche, painéis de vedação, revestimentos internos, componentes de absorção de impacto e elementos arquitetônicos personalizados produzidos sob demanda. Geometrias otimizadas e estruturas tipo *honeycomb* impressas em 3D, combinadas com fibras de cânhamo, linho, bambu, kenaf e outros reforços naturais, indicam que é possível atingir níveis de rigidez específica e capacidade de absorção de energia compatíveis com usos em sistemas de painéis e componentes modulares voltados à arquitetura sustentável.

Ainda há lacunas importantes relacionadas aos desafios da variabilidade intrínseca das fibras naturais, à ausência de padronização de métodos de ensaio, à forte heterogeneidade dos parâmetros de impressão reportados e à escassez de comparações diretas com materiais convencionais amplamente utilizados na construção civil. Aspectos de durabilidade em serviço, como comportamento em ciclos de umidade, temperatura, radiação UV, fadiga e degradação biológica, ainda são pouco explorados de forma sistemática, assim como avaliações de ciclo de vida em condições reais de uso e estudos de custo em função do benefício em escala pré-industrial.

Assim, os compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais processados por FDM representam uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente alinhada às demandas da construção civil sustentável, sobretudo para componentes leves e não estruturais. No entanto, a consolidação dessa tecnologia exige esforços futuros voltados à padronização de protocolos de caracterização, ao aprofundamento de estudos de durabilidade e de desempenho em escala de componente, à integração com ferramentas de análise de ciclo de vida e à validação em casos reais de aplicação arquitetônica. Avançar nessas direções poderá apoiar a inserção desses materiais em normas técnicas e em cadeias produtivas consolidadas, contribuindo para a transição da construção civil em direção a modelos mais circulares, eficientes e de menor pegada de carbono.

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

Abdul Azam, F. A., Tharazi, I., Sulong, A. B., Che Omar, R., & Muhamad, N. (2024). Mechanical durability and degradation characteristics of long kenaf-reinforced PLA composites fabricated using an eco-friendly method. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2024.101820>

- Anandkumar, R., Ramesh Babu, S., & Sathyamurthy, R. (2021). Investigations on the mechanical properties of natural fiber granulated composite using hybrid additive manufacturing: A novel approach. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2021/5536171>
- Antony, S., Cherouat, A., & Montay, G. (2020). Fabrication and characterization of hemp fibre based 3D printed honeycomb sandwich structure by FDM process. *Applied Composite Materials*. <https://doi.org/10.1007/s10443-020-09837-z>
- Asheghi-Oskooee, R., Morsali, P., Mohammadi-Roshandeh, J., & Hemmati, F. (2024). Tailoring interfacial adhesion and mechanical performance of biocomposites based on poly(lactic acid)/rice straw by using maleic anhydride through reactive extrusion process. *Journal of Applied Polymer Science*. <https://doi.org/10.1002/app.55153>
- Balla, V. K., Kate, K. H., Satyavolu, J., Singh, P., & Tadimetri, J. G. D. (2019). Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects. *Composites Part B: Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106956>
- Balla, V. K., Tadimetri, J. G. D., Sudan, K., Satyavolu, J., & Kate, K. H. (2020). First report on fabrication and characterization of soybean hull fiber: Polymer composite filaments for fused filament fabrication. *Progress in Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00138-2>
- Balla, V. K., Kate, K. H., Tadimetri, J. G. D., & Satyavolu, J. (2020). Influence of soybean hull fiber concentration on the water absorption and mechanical properties of 3D-printed thermoplastic copolyester/soybean hull fiber composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05021-3>
- Bermudo Gamboa, C., Martín-Béjar, S., Bañón García, F., & Sevilla Hurtado, L. (2024). Enhancing fatigue resistance of polylactic acid through natural reinforcement in material extrusion. *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym16172422>
- Beskopylny, A. N., Shcherban', E. M., Stel'makh, S. A., Mailyan, L. R., Meskhi, B., Evtushenko, A., El'shaeva, D., & Chernil'nik, A. (2023). Improving the physical and mechanical characteristics of modified aerated concrete by reinforcing with plant fibers. *Fibers*. <https://doi.org/10.3390/fib11040033>
- Bierach, C., Coelho, A. A., Turrin, M., Asut, S., & Knaack, U. (2023). Wood-based 3D printing: Potential and limitation to 3D print building elements with cellulose and lignin. *Construction Innovation*. <https://doi.org/10.1007/s44150-023-00088-7>
- Billings, C., Siddique, R., Sherwood, B., Hall, J., & Liu, Y. (2023). Additive manufacturing and characterization of sustainable wood fiber-reinforced green composites. *Journal of Composites Science*. <https://doi.org/10.3390/jcs7120489>
- Cavalcanti, D. K. K., Neto, J. S. S., de Queiroz, H. F. M., Wu, Y., Neto, V. F. S., & Banea, M. D. (2022). Development and mechanical characterization of short curauá fiber-reinforced PLA composites made via fused deposition modeling. *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym14225047>
- Cisneros-López, E. O., Pal, A. K., Rodriguez, A. U., Wu, F., Misra, M., Mielewski, D. F., Kiziltas, A., & Mohanty, A. K. (2019). Recycled poly(lactic acid)-based 3D printed sustainable biocomposites: A comparative study with injection molding. *Materials Today Sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100027>
- Doğru, A., Yılancıoğlu, S., Ülkü, G., Şentürk Turan, B., & Seydibeyoğlu, M. Ö. (2022). Comparison of wood fiber reinforced PLA matrix bio-composites produced by injection molding and fused filament fabrication (FFF) methods. *Hittite Journal of Science and Engineering*. <https://doi.org/10.15671/hjbc.1052654>
- Dönitz, A., Köllner, A., Richter, T., Löschke, O., Auhl, D., & Völlmecke, C. (2023). Additive manufacturing of biodegradable hemp-reinforced polybutylene succinate (PBS) and its mechanical characterization. *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym15102271>
- Easwaramoorthi, M., Giridharan, A., Nandhakumar, K., Pradeep, E., & Rangith, G. (2024). Mechanical characterization and predictive analysis of flax fiber/PLA honeycomb sandwich structures in FDM additive manufacturing. [Artigo científico; DOI não informado na sua tabela]
- Egorov, S., Tarasova, T., & Terekhina, S. (2020). Production technology for polymeric composite materials by additive manufacturing methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022006>
- Faidallah, R. F., Hanon, M. M., Salman, N. D., Ibrahim, Y., Noman Babu, M., Gaaz, T. S., Szakál, Z., & Oldal, I. (2024). Development of fiber-reinforced polymer composites for additive manufacturing and multi-material structures in sustainable applications. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr12102217>
- Faleschini, F., Trento, D., Masoomi, M., Pellegrino, C., & Zanini, M. A. (2023). Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132496>
- Jakab, S. K., Singh, T., Fekete, I., & Lendvai, L. (2024). Agricultural by-product filled poly(lactic acid) biocomposites with enhanced biodegradability: The effect of flax seed meal and rapeseed straw. *Journal of Composite Materials Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100464>
- Jamadi, A. H., Razali, N., Dhar Malingam, S., & Mohammad Taha, M. (2023). Effect of fibre size on mechanical properties and surface roughness of PLA composites by using fused deposition modelling (FDM). *Journal of Renewable Materials*. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.028280>
- Jiang, Y., Yarin, A. L., & Pan, Y. (2020). Printable highly transparent natural fiber composites. *Materials Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128290>
- Landes, S., & Letcher, T. (2020). Mechanical strength of bamboo filled PLA composite material in fused filament fabrication. *Journal of Composites Science*. <https://doi.org/10.3390/jcs4040159>
- Lekrine, A., Belaadi, A., Dembri, I., Jawaid, M., Ismail, A. S., Abdullah, M. M. S., Chai, B. X., Al-Khawlani, A., & Ghernaout, D. (2024). Thermomechanical and structural analysis of green hybrid composites based on polylactic acid/biochar/treated W. filifera palm fibers. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.033>
- Liu, Z., Lei, Q., & Xing, S. (2019). Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>

- Lombardi, R., Di Maio, L., Pepe, M., Paolillo, B., & Martinelli, E. (2024). Influence of PLA impregnation on the performances of vegetable fibers for lime-based composites. *Procedia Structural Integrity*. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.258>
- Mastura, M. T., Nadlene, R., Jumaidin, R., Abdul Kudus, S. I., Mansor, M. R., & Firdaus, H. M. S. (2021). Concurrent material selection of natural fibre filament for fused deposition modeling using integration of analytic hierarchy process/analytic network process. *Journal of Renewable Materials*. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.018082>
- Muthe, L. P., Pickering, K., & Gauss, C. (2024). Polylactide composites reinforced with pre-impregnated natural fibre and continuous cellulose yarns for 3D printing applications. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma17225554>
- Özdemir, H. N., Sözen, A., Demir, M., Doğru, A., & Seki, Y. (2023). Production of waste jute doped PLA (polylactic acid) filament for FFF: Effect of pulverization. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1213659>
- Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free ebook]. Santa Maria. Editora da UFSM.
- Rech, A., Chiuidea, R., Colmo, C., Rossi, G., Nicholas, P., Tamke, M., Ramsgaard Thomsen, M., & Daugaard, A. E. (2022). Waste-based biopolymer slurry for 3D printing targeting construction elements. *Materials Today Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104963>
- Samim, S., Mahdi, E., Mustapha, M., Rusli, A., & Shakoor, R. A. (2024). Quasi-static axial crushing investigation of filament-wound eco-friendly energy-absorbing glass fiber and jute fiber composite structures. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.040>
- Santos, A. J. G., Ribeiro, M. M., de C. Corrêa, A., Rodrigues, J. da S., Silva, D. S., Junio, R. F. P., & Monteiro, S. N. (2024). Morphological, chemical and mechanical properties of hybrid polyester composites reinforced with bamboo fibers and kaolin waste. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.003>
- Sekar, V., Zarrouq, M., & Namasivayam, S. N. (2021). Development and characterization of oil palm empty fruit bunch fibre reinforced polylactic acid filaments for fused deposition modeling. *Journal of Mechanical Engineering (JMEchE)*, 18(1), 151–167. (DOI informado como indisponível na sua tabela)
- Sekar, V., Eh Noum, S. Y., Sivanesan, S., Putra, A., Kassim, D. H., Wong, Y. S., & Chin, K. C. (2021). Effect of perforation volume on acoustic absorption of 3D-printed micro-perforated panels made of polylactic acid reinforced with wood fibers. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2120/1/012039>
- Sekar, V., Eh Noum, S. Y., Sivanesan, S., Putra, A., Chin Vui Sheng, D. D., & Kassim, D. H. (2021). Effect of thickness and infill density on acoustic performance of 3D printed panels made of natural fiber reinforced composites. *Journal of Natural Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1944426>
- Sekar, V., Eh Noum, S. Y., Putra, A., Sivanesan, S., & Chin Vui Sheng, D. D. (2022). Fabrication of light-weighted acoustic absorbers made of natural fiber composites via additive manufacturing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.06.007>
- Sharum, M. A., Rajendran, T. K., Maidin, S., & Ismail, S. (2024). Investigation of oil palm fiber reinforced polylactic acid composite extruded filament quality. *Journal of Physics: Materials*. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad582a>
- Shitsuka, R. et al. (2014). *Matemática fundamental para tecnologia*. (2ed). Editora Érica.
- Shoeb, M., Kumar, L., & Haleem, A. (2023). 3D-printed medical surgical cotton fabric–polylactic acid biocomposite: A feasibility study. *Sustainable Operations and Computers*. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2023.07.001>
- Siddiqui, V. U., Yusuf, J., Sapuan, S. M., Hasan, M. Z., Mudah Bistari, M. M., & Mohammadsalih, Z. G. (2024). Mechanical properties and flammability analysis of wood fiber filled polylactic acid (PLA) composites using additive manufacturing. *Journal of Natural Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2409868>
- Sippach, T., Dahy, H., Uhlig, K., Grisin, B., Carosella, S., & Middendorf, P. (2020). Structural optimization through biomimetic-inspired material-specific application of plant-based natural fiber-reinforced polymer composites (NFRP) for future sustainable lightweight architecture. *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym12123048>
- Soh, E., Chew, Z. Y., Saeidi, N., Javadian, A., Hebel, D., & Le Ferrand, H. (2020). Development of an extrudable paste to build mycelium-bound composites. *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109058>
- Subramani, R., Mustafa, M. A., Ghadir, G. K., Al-Tmimi, H. M., Alani, Z. K., Rusho, M. A., Rajeswari, N., Haridas, D., John Rajan, A., & Kumar, A. P. (2024). Exploring the use of biodegradable polymer materials in sustainable 3D printing. *Applied Computing and Engineering*. <https://doi.org/10.59429/ace.v7i2.3870>
- Taborda-Ríos, J. A., López-Botello, O., Zambrano-Robledo, P., Reyes-Osorio, L. A., & Garza, C. (2020). Mechanical characterisation of a bamboo fibre/polylactic acid composite produced by fused deposition modelling. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. <https://doi.org/10.1177/0731684420938434>
- Thirugnanasambandam, A., Prabhu, B., Mageswari, V., Murugan, M., Ramachandran, K., & Kadirgama, K. (2024). Wood flour/ceramic reinforced polylactic acid based 3D-printed functionally graded structural material for integrated engineering applications: A numerical and experimental characteristic investigation. [Artigo científico; DOI não informado na sua tabela]
- Vinod, A., Tengsuthiwat, J., Vijay, R., Sanjay, M. R., & Siengchin, S. (2024). Advancing additive manufacturing: 3D-printing of hybrid natural fiber sandwich (Nona/Soy–PLA) composites through filament extrusion and its effect on thermomechanical properties. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.28302>
- Wang, K., Lin, H., Le Duigou, A., Cai, R., Huang, Y., Cheng, P., Zhang, H., & Peng, Y. (2023). Geometric accuracy and energy absorption characteristics of 3D-printed continuous ramie fiber reinforced thin-walled composite structures. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00982-7>

Wu, Y., Yang, Z., Madiyar, F., Jiang, Y., & Namilae, S. (2024). Hydroxyapatite functionalized natural fiber-reinforced composites: Interfacial modification and additive manufacturing. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.28974>

Xing, D., Wang, H., Tao, Y., Zhang, J., Li, P., & Koubaa, A. (2024). 3D-printing continuous plant fiber/polylactic acid composites with lightweight and high strength. *Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.103606>

Yaguchi, Y., Takeuchi, K., Waragai, T., & Tateno, T. (2020). Durability evaluation of an additively manufactured biodegradable composite with continuous natural fiber in various conditions reproducing usage environment. *International Journal of Automation Technology*. <https://doi.org/10.20965/ijat.2020.p0959>