



RENATA COSTA TERRA

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS E MADEIRA NA
PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS SUSTENTÁVEIS**

**LAVRAS – MG
2026**

RENATA COSTA TERRA

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS E MADEIRA NA PRODUÇÃO DE
COMPÓSITOS SUSTENTÁVEIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais – PPGBIOMAT, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes
Orientador

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Júnior
Coorientador

**LAVRAS – MG
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Terra, Renata Costa.

Valorização de resíduos têxteis e madeira na produção de compósitos sustentáveis
/ Renata Costa Terra. - 2026.
63 p.

Orientador: Lourival Marin Mendes

Coorientador: José Benedito Guimarães Júnior

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Retalhos de tecido triturado. 2. Partículas de pinus. 3. Construção civil. 4.
Sustentabilidade. I. Mendes, Lourival Marin. II. Guimarães Júnior, José Benedito. III.
Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

RENATA COSTA TERRA

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS E MADEIRA NA PRODUÇÃO DE
COMPÓSITOS SUSTENTÁVEIS**

**VALORIZATION OF TEXTILE WASTE AND WOOD IN THE PRODUCTION OF
SUSTAINABLE COMPOSITES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais - PPGBIOMAT, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 27 de maio de 2026.

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes	UFLA
Prof. Dr. José Benedito Guimarães Júnior	UFLA
Dra. Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira	UFLA
Dra. Cínthia Aparecida Silva	UFG

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes
Orientador

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Júnior
Coorientador

**LAVRAS – MG
2026**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Lavras (UFLA), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

RESUMO

A crescente demanda por materiais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de compósitos com menor impacto ambiental, priorizando o uso eficiente de recursos e a redução de resíduos. Nesse contexto, fibras vegetais e materiais lignocelulósicos destacam-se como alternativas promissoras aos reforços sintéticos, devido à sua ampla disponibilidade, baixo custo, biodegradabilidade e propriedades mecânicas satisfatórias. Paralelamente, o aumento expressivo da geração de resíduos têxteis e sua destinação inadequada têm intensificado os impactos ambientais, evidenciando a necessidade de estratégias que promovam seu reaproveitamento. Diante desse cenário, o estudo propõe a produção de compósitos sustentáveis (painéis aglomerados) a partir da incorporação de resíduos têxteis triturados (RTT) e partículas de madeira (pinus), utilizando resina poliuretana de origem vegetal. O delineamento experimental foi estruturado com diferentes proporções de RTT (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), permitindo avaliar a influência do teor de resíduo nas propriedades dos materiais. Os resultados indicam que o aumento da fração de RTT promove alterações na microestrutura dos compósitos, com incremento da porosidade e da presença de vazios. Embora a densidade tenha se mantido estável, observou-se aumento na absorção de água e no inchamento em espessura, além da redução das propriedades mecânicas com maiores teores de resíduos. A condutividade térmica não apresentou variações significativas entre os tratamentos, mantendo o caráter isolante dos compósitos. Por outro lado, a maior porosidade contribuiu para o aprimoramento do desempenho acústico, evidenciando o potencial desses materiais para aplicações não estruturais, especialmente como isolantes térmicos e acústicos. Dessa forma, o estudo demonstra a viabilidade do reaproveitamento de resíduos têxteis na produção de materiais sustentáveis, alinhados aos princípios da economia circular.

Palavras-chave: retalhos de tecido triturado (RTT); partículas de pinus; construção civil; sustentabilidade;

ABSTRACT

The growing demand for sustainable materials has driven the development of composites with lower environmental impact, prioritizing the efficient use of resources and waste reduction. In this context, plant fibers and lignocellulosic materials stand out as promising alternatives to synthetic reinforcements due to their wide availability, low cost, biodegradability, and satisfactory mechanical properties. At the same time, the significant increase in textile waste generation and its inadequate disposal have intensified environmental impacts, highlighting the need for strategies that promote its reuse. In this scenario, the present study proposes the production of sustainable composites (particleboards) through the incorporation of shredded textile waste (STW) and wood particles (Pine), using a bio-based polyurethane resin. The experimental design was structured with different proportions of STW (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%), allowing the evaluation of the influence of waste content on the material properties. The results indicated that increasing the STW fraction promoted changes in the composite microstructure, with increased porosity and void content. Although density remained stable, higher water absorption and thickness swelling were observed, along with a reduction in mechanical properties at higher waste contents. Thermal conductivity did not show significant variations among treatments, maintaining the insulating characteristics of the composites. On the other hand, the increased porosity contributed to improved acoustic performance, highlighting the potential of these materials for non-structural applications, especially as thermal and acoustic insulating materials. Therefore, the study demonstrates the feasibility of reusing textile waste in the production of sustainable materials aligned with the principles of the circular economy.

Keywords: shredded fabric scraps (RTT); pine particles; civil construction; sustainability;

INDICADORES DE IMPACTO

A presente pesquisa apresenta impactos relevantes nas dimensões científica, tecnológica, ambiental, econômica e social, estando alinhada aos princípios da sustentabilidade e da economia circular. O desenvolvimento de um painel compósito utilizando resíduos têxteis de algodão (RTT), partículas de madeira de *Pinus* e resina poliuretana à base de óleo de mamona representa uma alternativa inovadora para a valorização de resíduos industriais, contribuindo para o desenvolvimento de biomateriais destinados ao setor da construção civil. Sob a perspectiva científica, o estudo amplia o conhecimento acerca da utilização de resíduos lignocelulósicos em matrizes poliméricas de origem renovável, fornecendo informações sobre o comportamento físico, mecânico, morfológico e acústico dos compostos produzidos. Os resultados obtidos constituem uma base para pesquisas futuras voltadas à otimização da composição do material, tratamentos das fibras, desenvolvimento de novos compostos sustentáveis e ampliação de suas aplicações tecnológicas. No âmbito tecnológico, a pesquisa demonstra a viabilidade da produção de painéis compostos com potencial aplicação como materiais absorvedores acústicos em edificações. A incorporação de resíduos têxteis possibilita o desenvolvimento de um produto inovador, com potencial para utilização em revestimentos internos, painéis acústicos, divisórias e demais elementos construtivos destinados ao conforto ambiental de ambientes residenciais, comerciais e institucionais. Do ponto de vista ambiental, o trabalho contribui para a redução dos impactos associados ao descarte inadequado de resíduos têxteis, promovendo sua reinserção na cadeia produtiva por meio da valorização de um resíduo de difícil destinação. Além disso, incentiva a utilização de matérias-primas renováveis e o desenvolvimento de materiais com menor impacto ambiental, em consonância com os princípios da economia circular e da construção sustentável. Sob o aspecto econômico, a pesquisa demonstra o potencial de agregação de valor aos resíduos da indústria têxtil, possibilitando sua transformação em um produto com aplicação tecnológica e potencial de inserção no mercado de materiais para construção civil. Essa estratégia pode contribuir para reduzir custos relacionados ao gerenciamento de resíduos e estimular novas oportunidades de inovação e empreendedorismo no setor de biomateriais. Quanto aos impactos sociais, o desenvolvimento de materiais sustentáveis para controle acústico pode contribuir para a melhoria da qualidade dos ambientes construídos, proporcionando maior conforto aos usuários em espaços como escolas, hospitais, escritórios, auditórios, restaurantes e edificações residenciais. Além disso, a pesquisa fortalece iniciativas voltadas ao desenvolvimento sustentável, incentivando práticas de produção e consumo mais responsáveis.

IMPACT INDICATORS

This study presents significant impacts across the scientific, technological, environmental, economic, and social dimensions, being aligned with the principles of sustainability and the circular economy. The development of a composite panel using cotton textile waste (CTW), *Pinus* wood particles, and castor oil-based polyurethane resin represents an innovative alternative for the valorization of industrial waste, contributing to the development of bio-based materials for the construction industry. From a scientific perspective, the study expands current knowledge on the use of lignocellulosic residues in renewable polymeric matrices by providing comprehensive information on the physical, mechanical, morphological, and acoustic performance of the developed composites. The findings establish a foundation for future investigations aimed at optimizing material composition, fiber treatments, the development of novel sustainable composites, and the expansion of their technological applications. From a technological perspective, the research demonstrates the feasibility of manufacturing composite panels with potential applications as sound-absorbing materials in buildings. The incorporation of textile waste enables the development of an innovative product suitable for use in interior cladding, acoustic panels, partition systems, and other construction components designed to improve the acoustic comfort of residential, commercial, and institutional environments. From an environmental perspective, this work contributes to reducing the impacts associated with the improper disposal of textile waste by promoting its reintegration into the production chain through the valorization of a residue that is difficult to manage. Furthermore, the study encourages the use of renewable raw materials and the development of materials with reduced environmental impacts, in accordance with the principles of the circular economy and sustainable construction. From an economic perspective, the research demonstrates the potential to add value to textile industry waste by transforming it into a technologically relevant product with promising applications in the construction materials market. This strategy may contribute to reducing waste management costs while fostering innovation and creating new business opportunities within the bio-based materials sector. Regarding social impacts, the development of sustainable acoustic control materials can contribute to improving the quality of built environments by enhancing user comfort in schools, hospitals, offices, auditoriums, restaurants, and residential buildings. Moreover, this research supports sustainable development initiatives by encouraging more responsible production and consumption practices.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1	Características dos resíduos têxteis	14
3.2	Resíduos da indústria têxtil e meio ambiente	17
3.3	Impactos e Desafios da Reciclagem de Resíduos Têxteis no Contexto da Sustentabilidade.....	18
3.4	Sustentabilidade na construção civil.....	20
3.5	Economia circular e o Reaproveitamento de Resíduos Têxteis	21
3.6	Fast Fashion: A indústria da moda	23
3.7	Materiais compósitos na construção civil	24
3.8	Compósitos com resíduos têxteis, madeira	26
3.9	Características dos adesivos.....	28
	REFERÊNCIAS	29
	ARTIGO 1 - VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA AGLOMERADA UTILIZANDO RESINA DE ORIGEM VEGETAL	35
1	INTRODUÇÃO	37
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
2.1	Obtenção e transformação das matérias-primas	39
2.2	Delineamento experimental	40
2.3	Processo de fabricação dos painéis aglomerados	40
2.4	Propriedades avaliadas.....	41
2.4.1	Caracterização morfológica	41
2.4.2	Avaliação das propriedades físicas	42
2.4.3	Avaliação das propriedades mecânicas	42
2.4.4	Avaliação da propriedade térmica.....	42
2.4.5	Avaliação do desempenho acústico	42
2.4.6	Análise estatística dos dados	42
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
3.1	Caracterização morfológica dos painéis	43
3.2	Caracterização Física dos painéis	44

3.2.1 Densidade Aparente	44
3.2.2 Absorção de água e inchamento em espessura	47
3.3 Caracterização mecânica dos painéis	50
3.3.1 Flexão Estática.....	50
3.3.2 Resistência a compressão	52
3.3.3 Dureza Janka.....	54
3.4 Caracterização térmica e acústica dos painéis.....	55
3.4.1 Condutividade térmica	55
3.4.2 Propriedade acústica	57
4 CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Existem três necessidades fundamentais para os seres humanos, a saber: alimentação, abrigo e vestuário. A indústria têxtil desempenha um papel crucial em atender à demanda essencial por vestuário. No entanto, devido à globalização, a indústria têxtil e de vestuário tem aumentado a produção de roupas a custos mais baixos. Embora satisfaça a crescente demanda por vestuário, ela tornou-se um dos principais contribuintes para a poluição ambiental. O crescimento e a síntese de fibras têxteis, juntamente com sua transformação em produtos têxteis e de moda, resultam em um consumo massivo de água e energia, além da geração de resíduos (Khan *et al.*, 2022).

Os resíduos têxteis depositados em aterros provocam extensos impactos nos ecossistemas terrestres e aquáticos, resultantes da decomposição gradual dos têxteis poliméricos em microfibras que contaminam o solo e os corpos d'água. Nesse sentido, a reciclagem de resíduos têxteis destinada a aplicações na construção emerge como uma possível solução para abordar essas questões (Tran *et al.*, 2023).

A indústria do vestuário exerce significativa pressão sobre os recursos hídricos globais. Um relatório recente da Levi Strauss & Co. revelou que a produção de um único par de jeans do modelo Levi's 501 demanda aproximadamente 3.781 litros de água, considerando todas as etapas do ciclo de vida do produto, desde o cultivo do algodão até o acabamento final. Esse dado evidencia o elevado impacto ambiental associado à fabricação de roupas, especialmente no que se refere ao consumo de água, um recurso natural finito e cada vez mais escasso em diversas regiões do planeta (Wang *et al.*, 2023).

Nas últimas décadas, a indústria da moda tem sido marcada por um modelo de produção e consumo acelerado, caracterizado pelo crescimento do fast fashion e pela consequente intensificação do descarte de peças têxteis. Esse padrão tem contribuído significativamente para o agravamento de problemas ambientais, entre os quais se destacam o consumo excessivo de recursos naturais — como água e energia — e a poluição de ecossistemas, especialmente de mananciais e corpos hídricos, impactados pelo descarte inadequado de resíduos e pela liberação de substâncias químicas utilizadas no processamento têxtil (Niinimäki *et al.*, 2020).

Historicamente, resíduos foram compreendidos como produtos, materiais ou substâncias sem utilidade ou valor, descartados por não atenderem mais a uma função específica. Contudo, essa concepção vem sendo progressivamente transformada com o avanço do paradigma da Economia Circular (EC), que propõe uma reinterpretação dos resíduos não

como elementos finais do ciclo produtivo, mas como potenciais recursos a serem reintegrados aos sistemas produtivos por meio de reuso, reciclagem e revalorização (Schmutz; Som, 2022).

Neste contexto, torna-se urgente a busca por alternativas que promovam a sustentabilidade e a economia circular, por meio da valorização de resíduos e do desenvolvimento de novos materiais com menor impacto ambiental. Inserida nesse cenário, a presente pesquisa propõe o desenvolvimento de um material compósito a partir de resíduos têxteis, com potencial de aplicação em setores estratégicos, como a construção civil e a indústria moveleira. Especificamente, objetiva-se produzir compósitos destinados à utilização em sistemas de vedação e revestimento na construção civil, bem como na fabricação de mobiliário e design de peças.

Ao propor o reaproveitamento de resíduos têxteis em cadeias produtivas distintas daquelas em que foram originalmente gerados, este estudo busca não apenas mitigar os impactos ambientais associados à indústria do vestuário, mas também fomentar práticas alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da inovação tecnológica. Nesse sentido, a valorização desses resíduos por meio de sua incorporação em compósitos lignocelulósicos configura-se como uma estratégia promissora, contribuindo tanto para a redução de impactos ambientais quanto para o desenvolvimento de materiais sustentáveis. Assim, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar compósitos produzidos a partir de retalhos de tecido triturado (RTT) e partículas de *Pinus oocarpa*, visando promover uma destinação mais eficiente e ambientalmente adequada a esses resíduos, além de agregar valor e ampliar suas possibilidades de aplicação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e avaliar compósitos sustentáveis do tipo painel aglomerado produzidos a partir da incorporação de resíduos têxteis triturados e partículas de *Pinus oocarpa*, utilizando resina poliuretana de origem vegetal, visando a valorização de resíduos e a obtenção de materiais com potencial para aplicações tecnológicas não estruturais.

2.2 Objetivos específicos

- Produzir painéis com diferentes proporções de RTT e *Pinus oocarpa*;
- Avaliar alterações morfológicas causadas pela substituição da madeira pelo resíduo têxtil;

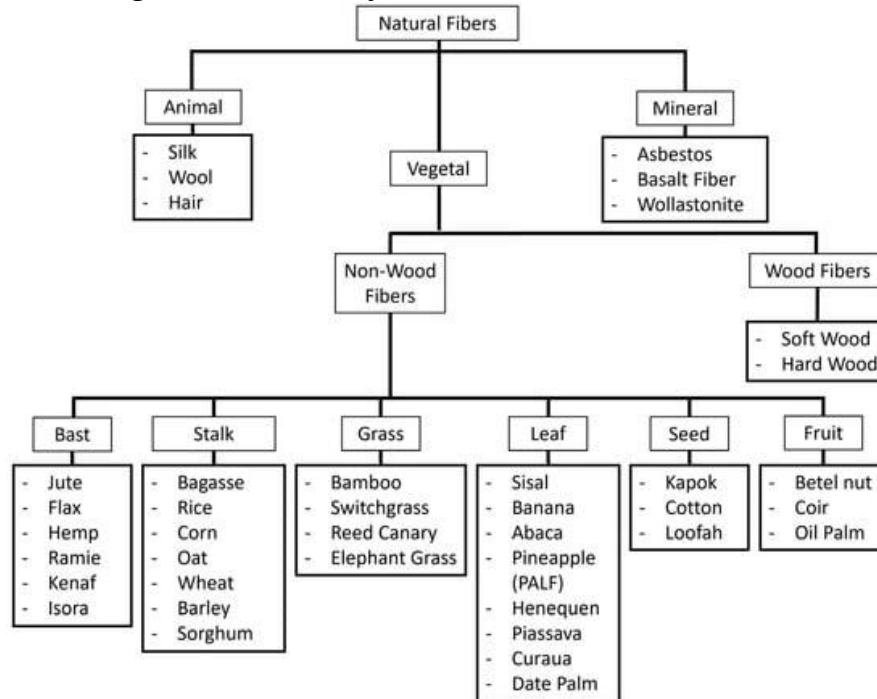
- Determinar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis;
- Avaliar o comportamento térmico e acústico dos compósitos;
- Identificar o potencial de uso dos painéis produzidos em aplicações não estruturais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Características dos resíduos têxteis

A fibra celulósica é um material compósito natural constituído principalmente por celulose, hemicelulose, lignina, cera e pectina, além de pequenas quantidades variáveis de açúcares, proteínas e amido. Dentre esses componentes, a celulose destaca-se como o principal elemento orgânico responsável pela rigidez, resistência e estabilidade da fibra. Estruturalmente, a celulose é formada por unidades repetitivas de glicose, organizadas em longas cadeias alinhadas em feixes denominados microfibrilas. O algodão (*Gossypium*), proveniente das sementes do algodoeiro, é a fibra celulósica mais amplamente utilizada na engenharia têxtil globalmente, apresentando propriedades como elevada absorção de umidade, secagem rápida, lavabilidade e adequação para limpeza a seco. Embora sua produção não seja a mais sustentável do ponto de vista ecológico, destaca-se por sua viabilidade econômica. Outras fibras naturais, como linho, cânhamo e juta, compartilham estrutura semelhante. O linho (*Linum usitatissimum*), obtido a partir do caule da planta, é reconhecido como uma das fibras celulósicas mais antigas e resistentes, apresentando características como suavidade, elevada capacidade de absorção e rápida secagem (Yan; Kasal; Huang, 2016). A classificação das fibras naturais, conforme sua origem botânica, está ilustrada na Figura 1.

Figura 1 - Classificação de fibras naturais e sintéticas.



Fonte: Eleutério *et al.* (2025)

Diversos estudos têm analisado o comportamento mecânico de resíduos têxteis, destacando que têxteis de denim apresentam alta rigidez, resistência significativa à tração e propriedades aprimoradas de rasgo, sendo a fabricação de compósitos uma das aplicações mais promissoras para esses resíduos (Tonk *et al.*, 2022).

Além disso, a incorporação de resíduos como fibras de carpete de polipropileno e cinzas de óleo de palma em concretos sustentáveis tem mostrado aumento da resistência do material, sobretudo em ambientes adversos (Mohammadhosseini *et al.*, 2018).

Compósitos à base de cimento podem ser fortalecidos por fibras curtas dispersas aleatoriamente, com destaque para fibras vegetais como bambu e cânhamo. Estas fibras naturais apresentam, em muitos casos, resistência e características ambientais superiores às fibras sintéticas, como polipropileno e PVA, contribuindo para maior tenacidade das argamassas (Fantilli; Sicardi; Dotti, 2017).

Por sua vez, painéis de fibra produzidos a partir de denim reciclado, utilizando resinas como melamina ureia formaldeído (MUF) e diisocianato polimérico de metileno difenil (PMDI), demonstraram melhoras significativas na resistência interna com maior teor de (PMDI) (Shi *et al.*, 2023).

A fibra de linho destacou-se em comparações com mais de 20 fibras naturais, por sua combinação de baixa densidade, custo reduzido, alta resistência e rigidez, evidenciando seu potencial para aplicações estruturais (Dittenber; Gangarao, 2012).

Do ponto de vista térmico, mecânico e físico, o conhecimento detalhado das características dos resíduos têxteis é fundamental para aprimorar os compósitos destinados à construção civil. Um dos efeitos mais relevantes é o aumento da porosidade proporcionado pelas fibras, que melhora as propriedades térmicas e acústicas dos materiais. A microestrutura porosa auxilia na absorção sonora e no isolamento térmico, devido à complexa rede de bolsas de ar (Ghermezgoli *et al.*, 2021).

Materiais isolantes ecológicos, como fibras naturais de lã e celulose, oferecem vantagens significativas na absorção sonora, reduzindo ruídos e reverberações e melhorando o conforto acústico ambiental, por apresentarem altos valores de coeficiente de redução sonora (Ajabli *et al.*, 2023).

Há crescente interesse no uso de materiais reciclados e absorventes de som para a construção civil. O denim reciclado, unido por resinas fenólicas, tem se mostrado promissor como alternativa aos absorvedores sintéticos, apresentando desempenho competitivo frente a lã de vidro, além de ser ecologicamente correto e economicamente viável (Hassani *et al.*, 2021).

No contexto dos resíduos urbanos, fibras têxteis industriais são consideradas recursos secundários importantes, em razão da sua capacidade de aumentar a porosidade e, conseqüentemente, melhorar as propriedades térmicas e acústicas dos materiais de construção. A finura, comprimento e seção transversal das fibras influenciam significativamente o desempenho acústico do produto final (Rubino *et al.*, 2023).

Em relação à sustentabilidade, o impacto ambiental dos isolantes tradicionais, como lã de rocha e poliestireno, é elevado. A substituição por materiais à base de fibras vegetais e palha pode reduzir consideravelmente a energia incorporada nas construções, uma vez que fibras como as de abacaxi, palha de arroz e posidônia oceânica apresentam condutividade térmica comparável à lã de rocha (Ajabli *et al.*, 2023).

Estudos demonstram que as propriedades de isolamento térmico dos tecidos estão associadas às características estruturais dos seus componentes, como a estrutura capilar, características superficiais dos fios e distribuição do volume de ar nos tecidos. Experimentos realizados com resíduos têxteis (WFW e WFS) inseridos em paredes duplas verificaram aumentos no desempenho térmico de até 56% e condutividade similar a materiais convencionais, como EPS, XPS, lã mineral, argila, vermiculita e perlita expandida (Briga-Sá *et al.*, 2013).

O vestuário, por sua vez, cumpre função protetora ao manter o conforto térmico humano, controlando a transferência de calor entre o corpo e o ambiente externo. Estudos investigam como as características dos tecidos influenciam esse isolamento (Briga-Sá *et al.*, 2013).

Diante disso, torna-se essencial não apenas a reciclagem de resíduos industriais e pós-consumo, mas também o desenvolvimento de materiais isolantes térmicos eficientes, contribuindo para a redução do consumo energético nas edificações (Corinaldesi *et al.*, 2016).

3.2 Resíduos da indústria têxtil e meio ambiente

A indústria têxtil mundial desempenha papel econômico significativo, movimentando cerca de 3 bilhões de dólares anuais, equivalendo a aproximadamente 3% do Produto Interno Bruto Global (Hole; Hole, 2019).

Entretanto, apesar de sua importância econômica, esse setor é um dos principais responsáveis pela crescente geração de resíduos, que acarretam graves impactos ambientais. A transformação desses resíduos em recursos constitui uma estratégia fundamental para agregar valor e promover a sustentabilidade, conciliando desenvolvimento econômico e preservação ambiental (Junco *et al.*, 2018).

O aumento acelerado da produção têxtil tem levado ao consumo intensivo de recursos naturais como água, energia e produtos químicos, aumentando o impacto ambiental do setor (Zamani, 2011).

Além disso, a maioria dos resíduos têxteis pós-consumo é descartada em aterros sanitários ou incinerada, processos que geram poluição do solo, contaminação hídrica por meio da liberação de lixiviados tóxicos e emissões de gases de efeito estufa, como o metano (Schmutz; Som, 2022; Serra *et al.*, 2019).

Os resíduos têxteis são caracterizados por uma composição complexa, incluindo fibras naturais como lã, algodão e linho, bem como fibras sintéticas como poliéster, elastano e poliamida. Essa heterogeneidade dificulta a reciclagem e o reaproveitamento, e projeta-se um aumento no consumo per capita mundial para 17,5 kg até 2030, o que eleva ainda mais os desafios ambientais (Rubino *et al.*, 2023).

Adicionalmente, as fibras sintéticas demandam décadas para se decompor, potencializando seu impacto ambiental (Völtz *et al.*, 2023).

A produção do algodão, matéria-prima de tecidos naturais, é especialmente intensiva em água e energia, além de contribuir para a poluição ambiental devido à utilização de corantes químicos no processo de fiação (Sandin; Peters, 2018).

No setor da moda, a indústria do jeans destaca-se pela alta demanda hídrica, com um único par consumindo cerca de 2.900 galões de água, o que resulta em significativa geração de águas residuais (Tonk *et al.*, 2022).

Outro fator preocupante é a liberação de microplásticos oriundos da lavagem de tecidos sintéticos, que contaminam ecossistemas aquáticos e a cadeia alimentar humana, representando uma ameaça ambiental e à saúde pública (Hamada *et al.*, 2023).

A situação é agravada pelo volume crescente de resíduos pós-industriais em países em desenvolvimento, onde a maioria das fábricas está instalada, representando aproximadamente 10% das emissões globais de dióxido de carbono (Khan *et al.*, 2023).

A baixa taxa de reciclagem contribui para o descarte massivo de peças, como exemplificado pelo envio semanal de cerca de 15 milhões de roupas para Gana, das quais 40% terminam em aterros (Völtz *et al.*, 2023).

Nos Estados Unidos, os resíduos têxteis correspondem a 5,8% do total de resíduos sólidos urbanos, gerando custos anuais de 0,6 bilhões de dólares para sua disposição adequada. A elevação populacional e o aumento do consumo têxtil explicam a crescente geração desses resíduos (Vera *et al.*, 2022).

Além disso, setores como lavanderias industriais demandam soluções adequadas para o tratamento de resíduos, visto que a disposição em aterros é a opção menos sustentável dentro da hierarquia de gestão de resíduos sólidos (Delaqua *et al.*, 2022).

Diante do exposto, torna-se evidente que a indústria têxtil enfrenta desafios ambientais significativos relacionados à geração e gestão de resíduos. O elevado consumo de recursos naturais e a complexidade dos materiais utilizados agravam o impacto ambiental, principalmente devido à inadequada destinação final desses resíduos. Assim, a adoção de práticas sustentáveis, incluindo a reciclagem eficiente e a inovação tecnológica, é imprescindível para mitigar os impactos socioambientais do setor. Promover a circularidade dos resíduos têxteis não só contribui para a redução da poluição e da emissão de gases de efeito estufa, como também representa uma oportunidade para desenvolvimento econômico sustentável e conservação dos recursos naturais.

3.3 Impactos e Desafios da Reciclagem de Resíduos Têxteis no Contexto da Sustentabilidade

O crescimento exponencial da população mundial tem implicações diretas nos padrões de consumo e na geração de resíduos. Em 1800, a população global era de aproximadamente um bilhão de pessoas; atualmente, esse número ultrapassa os sete bilhões e, segundo projeções, poderá atingir 11 bilhões no próximo século. Esse aumento populacional tem impulsionado significativamente a produção de resíduos, especialmente na indústria têxtil e de vestuário. No

Brasil, por exemplo, apenas 20% desses resíduos são reciclados, refletindo uma lacuna preocupante entre geração e reaproveitamento de materiais (De Oliveira, 2021).

Grande parte dos resíduos têxteis descartados em aterros gera impactos severos nos ecossistemas terrestres e aquáticos. A decomposição dos têxteis poliméricos em microfibras contamina o solo e corpos d'água, agravando a poluição ambiental. Nesse contexto, a reciclagem de resíduos têxteis aplicados à construção civil surge como uma alternativa viável para mitigar esses efeitos (Tran *et al.*, 2023).

Estima-se que os têxteis representem cerca de 3% do peso total dos resíduos domésticos. Apesar de mais da metade desses materiais possuírem potencial reciclável, apenas 25% são efetivamente reutilizados ou reciclados anualmente. Os resíduos podem ter origem tanto no pós-consumo (uso doméstico) quanto no pré-consumo, como nas etapas de produção de fios, tecidos e confecção de vestuário. Esses dois fluxos distintos impõem desafios específicos para o gerenciamento e a reutilização eficaz desses materiais (Serra *et al.*, 2019).

No caso dos resíduos têxteis pré-consumo, observa-se que cerca de 35% de todos os materiais utilizados na cadeia de suprimento de vestuário são descartados antes mesmo de chegarem ao consumidor final. Países como China e Austrália apresentam percentuais de reciclagem particularmente baixos: cerca de 15% e 7%, respectivamente (Tran *et al.*, 2023).

Dentre as fibras utilizadas na produção têxtil, o algodão ocupa a segunda posição, atrás apenas das fibras sintéticas. Os resíduos de algodão representam cerca de 25% do total dos resíduos têxteis globais. Nesse cenário, a hidrólise enzimática se destaca como a técnica mais promissora para o reaproveitamento desses materiais, apresentando níveis avançados de prontidão tecnológica, variando entre os níveis 7 e 8, já em fases pré-comerciais e comerciais (Vera *et al.*, 2022).

No Brasil, a geração anual de resíduos têxteis durante a fase de fabricação atinge 175 mil toneladas. No entanto, apenas 36 mil toneladas — equivalentes a 20% do total — são reaproveitadas na produção de novos produtos como mantas, cordões e fios. Esse número revela o grande potencial inexplorado no reaproveitamento de materiais têxteis em escala industrial (Ferreira *et al.*, 2015).

Globalmente, o cenário é igualmente preocupante. Estima-se que, na União Europeia, 5,8 milhões de toneladas de resíduos têxteis sejam descartadas anualmente. Dessas, apenas 25% são reciclados. Nos Estados Unidos, a taxa é ainda menor: cerca de 16,2%. Além disso, aproximadamente 70% das peças de vestuário descartadas acabam em aterros sanitários, agravando os problemas de gestão de resíduos e poluição (Hole; Hole, 2019).

Além das baixas taxas de reciclagem, a diversidade dos resíduos têxteis que variam em forma, tamanho e composição dificulta seu reaproveitamento. A mistura de materiais em uma única peça de roupa, como algodão e poliéster, compromete o processamento em tecnologias convencionais de reciclagem, exigindo soluções específicas e mais sofisticadas (Briga-Sá *et al.*, 2013).

A ausência de um mercado consolidado e de recicladores especializados representa um dos principais obstáculos à viabilização da cadeia da reciclagem têxtil. Isso se deve, em grande parte, à complexidade dos materiais utilizados e ao fato de que muitas tecnologias ainda não estão plenamente desenvolvidas. Caso essas barreiras fossem superadas, estima-se que 546 toneladas de resíduos têxteis poderiam ser reaproveitadas como matéria-prima para a fabricação de mais de 1,7 milhão de camisetas, demonstrando o potencial transformador de práticas mais sustentáveis no setor (Schmutz; Som, 2022).

3.4 Sustentabilidade na construção civil

A construção civil tem se destacado como um dos setores de maior impacto ambiental no cenário global. Estima-se que represente aproximadamente 40% do consumo total de energia final na União Europeia, além de ser responsável por cerca de 36% das emissões totais de CO₂. Considerando esse cenário, torna-se imprescindível a adoção de práticas sustentáveis em todas as fases do ciclo de vida das edificações. Isso inclui desde a fase operacional — que responde por mais de 80% das emissões — até etapas como fabricação, transporte de materiais, construção, manutenção e demolição, as quais são responsáveis por 10% a 20% do consumo energético (Claramunt *et al.*, 2016).

Frente a esses desafios, iniciativas internacionais têm buscado promover diretrizes para a construção sustentável. Um marco importante foi a publicação da Agenda 21 para Construção Sustentável pelo Conselho Internacional de Investigação e Inovação na Construção (CIB), em 1999. Esse relatório (CIB 237) destacou a relevância do reaproveitamento de resíduos agrícolas e industriais como componentes alternativos nos processos construtivos, sinalizando uma mudança de paradigma nas práticas convencionais do setor (Firouzsalar *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o setor têxtil também passa a integrar o debate sobre sustentabilidade. A crescente conscientização acerca dos impactos ambientais provocados pela indústria da moda tem impulsionado a busca por soluções sustentáveis no ciclo produtivo têxtil, especialmente no que se refere à reciclagem de resíduos. Uma das estratégias mais promissoras é a incorporação desses resíduos na produção de materiais destinados à construção civil, promovendo a economia circular e reduzindo a pressão sobre os recursos naturais.

As fibras naturais, amplamente disponíveis em diversos países, apresentam características técnicas que favorecem sua aplicação como materiais de construção. Sua utilização se alinha com as exigências ambientais contemporâneas e com políticas públicas voltadas à promoção de fontes renováveis. Um exemplo disso são as metas estabelecidas pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), que visam garantir que, até 2020, ao menos 10% dos componentes químicos básicos utilizados na indústria provenham de fontes vegetais e renováveis, com projeção de aumento para 50% até 2050 (Firouzsalar *et al.*, 2020).

Além dos benefícios ambientais, a reciclagem de fibras têxteis para uso na construção civil também apresenta vantagens econômicas. No contexto australiano, por exemplo, o custo médio de destinação de resíduos em aterros sanitários pode chegar a 105 dólares por tonelada ao ano. Em contrapartida, os custos relacionados à trituração e preparação desses resíduos para reciclagem giram entre 5 e 10 dólares por tonelada, demonstrando não apenas viabilidade técnica, mas também um ganho econômico significativo (Tran *et al.*, 2023).

Dessa forma, a adoção de práticas sustentáveis na construção civil, por meio da incorporação de resíduos têxteis e fibras naturais, revela-se não apenas uma estratégia viável, mas também necessária frente aos desafios ambientais contemporâneos. Além de contribuir para a redução de resíduos sólidos e emissões de carbono, essas práticas promovem uma economia mais circular, eficiente e responsável. Conforme destaca Elkington (1998), a sustentabilidade deve ser entendida como uma abordagem integrada que concilie simultaneamente os aspectos econômicos, ambientais e sociais, promovendo equilíbrio entre o desempenho das empresas, a preservação do meio ambiente e o bem-estar social.

3.5 Economia circular e o Reaproveitamento de Resíduos Têxteis

Historicamente, os resíduos eram considerados produtos, materiais ou substâncias sem valor, descartados por não serem mais desejados ou utilizáveis. No entanto, essa visão tem sofrido uma transformação significativa com o avanço da Economia Circular (EC), que redefine resíduos como recursos valiosos a serem reaproveitados. O modelo da EC tem como objetivo principal reduzir a pressão sobre recursos não renováveis, diminuir o desperdício e mitigar os impactos ambientais decorrentes da produção e consumo (Schmutz; Som, 2022).

Essa transição do modelo econômico linear — baseado no ciclo extrair-produzir-descartar — para um modelo circular é fundamental para alcançar a neutralidade climática até 2050. No âmbito do Pacto Ecológico Europeu, a adoção da economia circular torna-se ainda mais urgente para reduzir o uso intensivo de matérias-primas na construção e na indústria

associada. Esse novo modelo visa maximizar o uso de matérias-primas secundárias na construção de edifícios novos e na renovação dos já existentes (Antolinc; Filipič, 2021).

A indústria têxtil e de vestuário exemplifica as limitações do modelo linear, revelando a necessidade de mudanças drásticas nos padrões de produção e consumo para viabilizar a economia circular. Essas transformações envolvem a implementação de estratégias que fomentem a reciclagem e o reaproveitamento dos materiais, com impactos positivos tanto ambientais quanto econômicos (Koszewska, 2018).

A Figura 2 ilustra o conceito e funcionamento do modelo de economia circular, mostrando o ciclo de reaproveitamento de materiais e redução de desperdícios.

Figura 2 – Economia Circular



Fonte: Estevão; Tx (2024)

Além disso, a decomposição inadequada de resíduos têxteis gera problemas ambientais severos. Durante esse processo, há a liberação de substâncias químicas nocivas por lixiviação, além de emissões de gases como dióxido de carbono e metano, que contribuem para as mudanças climáticas, a poluição hídrica, a destruição de habitats naturais e a perda da biodiversidade. Esses impactos ameaçam diretamente a saúde e o bem-estar humanos (Sonnenberg *et al.*, 2022).

Diante disso, muitos países desenvolvidos têm investido em pesquisas e tecnologias para implementar modelos de reciclagem em circuito fechado e aberto, além de promover práticas de consumo colaborativo e de segunda mão que prolonguem a vida útil dos produtos têxteis. Tais iniciativas são cruciais para reduzir a geração de resíduos e minimizar os impactos ambientais associados (Sonnenberg *et al.*, 2022).

No entanto, a efetividade dessa transformação está fortemente vinculada às escolhas dos consumidores. A quantidade de produtos adquiridos, a aceitação do consumo de peças de segunda mão e a abertura para novos modelos de negócios, como mercados de revenda e economia compartilhada, são determinantes para o sucesso do modelo circular no setor têxtil.

3.6 Fast Fashion: A indústria da moda

A indústria da moda tem sido crescentemente alvo de críticas em razão das suas práticas poluentes ao longo de toda a cadeia de suprimentos. Apesar da ampla divulgação sobre seus impactos ambientais e sociais, o setor continua em expansão, sendo impulsionado, principalmente, pelo modelo de negócios conhecido como fast fashion. Este modelo baseia-se na produção de baixo custo, no consumo acelerado e na utilização efêmera das peças, promovendo um ciclo contínuo de fabricação e descarte. Como reflexo desse padrão, atualmente, as marcas de moda produzem quase o dobro de roupas em comparação com o que era fabricado antes do ano 2000 (Niinimäki *et al.*, 2020).

A pandemia de Covid-19 aprofundou as discussões sobre os impactos da indústria da moda, ao destacar com ainda mais clareza as desigualdades e injustiças ambientais e sociais presentes na cadeia de valor do setor. No entanto, mesmo antes desse evento global, especialistas já apontavam para a insustentabilidade estrutural da indústria. A trajetória de crescimento acelerado, baseada na superprodução, resultava não apenas em excedentes de estoque e perdas financeiras significativas, mas também em prejuízos severos ao meio ambiente (Sonnenberg *et al.*, 2022).

Entre os efeitos mais alarmantes desse modelo, destaca-se o crescente volume de resíduos têxteis gerados. O aumento do desperdício é impulsionado tanto pelo barateamento e perda de qualidade das roupas oferecidas quanto por fatores demográficos, como o crescimento populacional e a ampliação da classe média, que consome mais e com maior frequência. Esse comportamento está diretamente relacionado ao ciclo de vida cada vez mais curto das peças de vestuário, o que compromete os esforços de sustentabilidade no setor (Schmutz; Som, 2022).

Além disso, projeta-se que a produção de fibras têxteis ultrapasse a marca de 100 milhões de toneladas nos próximos anos, cenário impulsionado por demandas crescentes do mercado e pelo avanço econômico de regiões em desenvolvimento. Em paralelo, a durabilidade dos produtos diminui progressivamente, o que reforça o modelo de obsolescência acelerada. Esse contexto configura uma situação de pressão ambiental crescente, agravada pela ausência de mudanças significativas nos padrões de consumo da sociedade. Conforme destaca Piribauer; Bartl, (2019), a transformação desse panorama exige modificações estruturais nos hábitos e

atitudes dos consumidores, cuja inércia tende a aprofundar os impactos socioambientais negativos da indústria da moda.

Diante do panorama apresentado, torna-se evidente que a indústria da moda precisa urgentemente repensar seu modelo de produção e consumo para mitigar seus impactos socioambientais. A transformação requer não apenas inovações tecnológicas e regulatórias, mas, sobretudo, uma mudança de mentalidade dos consumidores e das empresas, voltada para a redução do consumo excessivo e o prolongamento da vida útil das peças. Como destaca Fletcher (2014), "a sustentabilidade na moda não pode ser alcançada apenas por meio de materiais ecológicos, mas por uma redefinição cultural do valor, do uso e do ritmo com que consumimos vestuário". Assim, é imprescindível adotar estratégias de economia circular, fortalecer práticas de reutilização e reciclagem e promover a educação ambiental como pilares para uma transição justa e responsável no setor da moda.

3.7 Materiais compósitos na construção civil

A busca por alternativas sustentáveis e por processos produtivos mais limpos tem impulsionado o desenvolvimento de novos materiais na indústria da construção civil. Dentre essas inovações, os materiais compósitos se destacam por permitirem o uso de matérias-primas alternativas, incluindo subprodutos industriais e materiais reciclados. Essa abordagem visa reduzir o consumo energético e os impactos ambientais associados à cadeia produtiva tradicional.

Nesse contexto, o Departamento de Agricultura e o Departamento de Energia dos Estados Unidos estabeleceram, em 2020, metas ambiciosas para a substituição de componentes químicos por fontes renováveis. Espera-se que ao menos 10% desses componentes sejam derivados de fontes vegetais, com a projeção de alcançar 50% até 2050 (Firouzsalar *et al.*, 2020).

Os compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais componentes com propriedades distintas: uma matriz (geralmente polimérica) e um elemento de reforço, como fibras ou partículas. Essa combinação resulta em materiais com propriedades superiores às dos componentes individuais (Zaghloul *et al.*, 2021). A fase de reforço confere resistência e rigidez, enquanto a matriz distribui tensões e protege o reforço.

Estudos demonstram a viabilidade de utilizar resíduos agrícolas, como espigas de milho, como reforço em matrizes epóxi, criando materiais isolantes com elevado potencial comercial (Binici *et al.*, 2010). A sinergia entre os componentes desses compósitos permite o

desenvolvimento de materiais leves, resistentes e duráveis, superando as limitações dos materiais convencionais (Todor, *et al.*, 2021).

A construção civil é uma das indústrias mais poluentes do mundo. Em resposta, muitos países europeus, guiados pela bioeconomia, têm adotado políticas de compras públicas sustentáveis, voltadas ao uso de materiais renováveis, de baixo consumo energético e reduzido impacto ambiental (Salah *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, os bionanocompósitos surgem como alternativas promissoras aos materiais petroquímicos, utilizando fibras naturais como reforço — como celulose, linho, sisal e cânhamo — com vantagens significativas em termos ambientais, econômicos e de desempenho (Chirayil *et al.*, 2014; Dittenber; Gangarao, 2012; Yan; Kasal; Huang, 2016). As fibras naturais, por serem mais leves, biodegradáveis e menos agressivas à saúde dos trabalhadores, têm despertado o interesse de pesquisadores e indústrias (Zaghloul *et al.*, 2021).

Além dos benefícios ambientais, o uso de fibras vegetais recicladas pode amenizar problemas urbanos, como as ilhas de calor e a poluição sonora, melhorando o conforto térmico e acústico em edifícios. A inserção dessas fibras nos compósitos pode reduzir a contração plástica, melhorar a absorção sonora e contribuir para a eficiência energética dos ambientes construídos (Rubino, 2023).

A indústria da moda, por sua vez, é responsável por um volume expressivo de resíduos têxteis — estima-se que entre 10% a 20% dos têxteis produzidos sejam descartados antes mesmo do uso. Paralelamente, a construção civil é responsável por cerca de 50% dos resíduos sólidos urbanos, 30% das emissões de CO₂ e consome cerca de 40% da energia produzida (Todor *et al.*, 2021). Nesse cenário, a integração dos resíduos têxteis em materiais compósitos representa uma solução sinérgica para duas problemáticas ambientais relevantes.

Experimentos conduzidos por Vasconcelos *et al.* (2015) demonstraram a viabilidade de compósitos formados por gesso (FGD), cortiça granulada e fibras têxteis recicladas. O resultado foi a produção de blocos leves, aplicáveis como divisórias não estruturais. Outras pesquisas mostram que o uso de têxteis reciclados em concreto poroso pode ser eficaz para a produção de pavimentos e calçadas, promovendo maior eficiência térmica e energética (Tran *et al.*, 2023).

A reciclabilidade, aliada à baixa emissão de carbono, é fator crucial na avaliação da sustentabilidade de argamassas reforçadas com fibras. No entanto, os resíduos têxteis apresentam heterogeneidade quanto à textura, composição e propriedades, o que torna o processo de reciclagem e reaproveitamento tecnicamente desafiador (Briga-Sá *et al.*, 2013; Roos *et al.*, 2019).

Do ponto de vista técnico, a principal limitação dos compósitos com fibras vegetais está na interface fibra-matriz. A celulose, por exemplo, apresenta natureza hidrofílica e componentes orgânicos que dificultam sua adesão a matrizes poliméricas, comprometendo a transferência de tensão (Sangthong *et al.*, 2009). Além disso, a variabilidade das propriedades físicas e mecânicas das fibras recicladas pode influenciar negativamente o desempenho final dos compósitos (Kamble; Behera, 2021).

Ainda assim, os benefícios superam os desafios. Os materiais compósitos oriundos de fibras recicladas oferecem vantagens econômicas, promovem a redução da extração de recursos naturais e melhoram o conforto ambiental nas construções. Além disso, o seu uso pode proporcionar características funcionais adicionais, como leveza, resistência e propriedades acústicas superiores (Cintra; Paiva; Baldo, 2014; Islam; Bhat, 2019).

A indústria de transformação atual busca maximizar a incorporação de resíduos como insumo, minimizando a extração de matérias-primas virgens (Chauhan *et al.*, 2023). Os compósitos híbridos, utilizados tanto na construção quanto no setor automotivo, destacam-se por suas propriedades versáteis: leveza, alta resistência, baixo custo e adaptabilidade estrutural (Wondmagegnehu *et al.*, 2021).

Avanços recentes na engenharia de fibras naturais, como os tratamentos de superfície, métodos de extração e controle da interface, têm expandido as aplicações desses compósitos para setores antes restritos a materiais sintéticos, incluindo pisos automotivos, equipamentos esportivos e estruturas náuticas (Pickering *et al.*, 2016).

Embora existam desafios técnicos associados à variabilidade e à interface entre os componentes, os avanços na engenharia de materiais têm permitido superar tais barreiras. A adoção desses compósitos no setor da construção civil não apenas contribui para a mitigação dos impactos ambientais, mas também viabiliza a criação de soluções construtivas mais inteligentes, funcionais e ambientalmente responsáveis.

Dessa forma, os materiais compósitos sustentáveis consolidam-se como uma tendência irreversível no cenário da construção civil contemporânea, demonstrando o potencial de aliar inovação, desempenho e respeito ao meio ambiente.

3.8 Compósitos com resíduos têxteis, madeira

O desenvolvimento de materiais compósitos a partir de resíduos têxteis, amido, madeira tem se destacado como uma abordagem promissora para a fabricação de produtos sustentáveis e funcionais. Além disso, resíduos provenientes de compósitos de amido têxtil surgem como

alternativas econômicas e ecologicamente sustentáveis em substituição a materiais sintéticos e naturais convencionais na produção de mobiliário (Wang *et al.*, 2023).

Complementarmente, a fabricação de não-tecidos a partir de resíduos têxteis mostrou-se viável para substituir barreiras de vapor e telas de chuva, tradicionalmente produzidas a partir da indústria petroquímica, em construções de madeira. As propriedades mecânicas e de vedação desses compósitos demonstraram equivalência aos produtos comerciais, ao mesmo tempo que evitam o consumo de derivados fósseis e mitigam a problemática dos resíduos têxteis negligenciados pela indústria e pelo poder público (Salah *et al.*, 2022).

Compósitos de matriz polimérica reforçados com resíduos têxteis utilizam fibras, faixas, tecidos, estopas e não-tecidos, podendo combinar diferentes materiais para compor estruturas em sanduíche multilaminadas, conferindo propriedades mecânicas aprimoradas (Todor *et al.*, 2021).

No que tange às fibras naturais, a celulose destaca-se como polímero natural abundante, cujas microfibrilas constituem a unidade estrutural básica das plantas. Na forma nanocristalina, a celulose apresenta elevada resistência à tração, alto módulo de Young e atua como reforço eficaz em diversos compósitos, graças à sua alta cristalinidade, pureza, área superficial e propriedades ópticas e mecânicas (Chirayil *et al.*, 2014).

Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais têm recebido atenção crescente devido às vantagens ambientais e econômicas, como menor consumo energético, leveza, renovabilidade e alta resistência específica, quando comparados a fibras sintéticas convencionais (Jabbar *et al.*, 2017).

No âmbito industrial, processos para fabricação de compósitos termoplásticos reciclados a partir de têxteis pós-consumo foram desenvolvidos. Por exemplo, tecidos de denim, liso e seda foram fragmentados e combinados com polipropileno por extrusão, gerando compósitos com aumento significativo nas propriedades mecânicas em relação ao polímero puro (Völtz *et al.*, 2023).

Componentes compostos de bio-poliéster preenchidos com fibras de algodão reciclado demonstraram maior rigidez e resistência térmica, configurando soluções sustentáveis para embalagens rígidas com menor pegada de carbono (Montava-Jordà *et al.*, 2019).

Estudos também evidenciaram que fibras de algodão residual apresentam comportamento distinto das fibras de seda residual, com estas últimas proporcionando propriedades mecânicas superiores aos compósitos (Tasdemir *et al.*, 2010).

O emprego de fibras naturais como sisal e juta em compósitos poliméricos, mediante tratamentos específicos, tem resultado em melhorias significativas nas propriedades mecânicas e na adesão interfacial (Sangthong *et al.*, 2009; Jabbar *et al.*, 2017).

A incorporação de fibras de algodão em compósitos geopoliméricos reforça suas propriedades mecânicas, embora o aumento do teor de fibra possa reduzir a densidade devido à maior porosidade (Alomayri; Low, 2013).

Adicionalmente, compósitos sustentáveis à base de gesso reforçados com fibras têxteis de polipropileno e malhas foram desenvolvidos, proporcionando redução da densidade e propriedades mecânicas compatíveis com normas internacionais, o que evidencia seu potencial para aplicações em construção civil (Alyousef *et al.*, 2023).

A fabricação de compósitos a partir de têxteis pós-consumo apresenta desafios econômicos e ambientais, sobretudo nos métodos de pré-tratamento para conversão enzimática em glicose e outros produtos biológicos (Vera *et al.*, 2022).

Entretanto, novos compósitos híbridos reforçados com fibras de algodão e vidro demonstraram melhorias significativas na resistência à tração, flexão e impacto, com potencial substituição de madeiras convencionais em aplicações arquitetônicas e de mobiliário (Kamble; Behera, 2021).

Por fim, o desenvolvimento contínuo de nanocompósitos utilizando nanofibrilas de celulose, assim como a avaliação de propriedades acústicas e térmicas de compósitos reforçados com resíduos têxteis, reforça o potencial destes materiais para aplicações sustentáveis e tecnológicas diversificadas, alinhadas com as metas da economia circular e desenvolvimento sustentável (Chirayil *et al.*, 2014; Mahapatra *et al.*, 2022; Antolinc; Filipič, 2021; Völtz, *et al.*, 2023).

3.9 Características dos adesivos

Os adesivos para madeira podem ser classificados como sintéticos ou naturais. Os adesivos sintéticos podem ser classificados como termofixos, termoplásticos e elastoméricos. Já os adesivos naturais ou de base biológica podem ser derivados de quatro fontes principais: lignina, proteína, amido e taninos (Kumar; Leggate, 2022).

Atualmente, os adesivos mais usados nas indústrias de painéis de madeiras são adesivos termofixos à base de formaldeído derivados de petróleo, como a uréia-formaldeído, fenol-formaldeído, melamina-ureia-formaldeído e resorcionol formaldeído, devido à sua excelente força de adesão e aplicabilidade tecnológica (Liu *et al.*, 2018; Boussetta *et al.*, 2022).

Embora estes adesivos à base de formaldeído tenham muitas vantagens sobre os adesivos de base natural, eles podem gerar compostos orgânicos voláteis, tais como a emissão de formaldeído, que é cancerígeno, resultando em potenciais danos ao homem e ao meio ambiente (Radabutra *et al.*, 2022).

Adesivos sustentáveis utilizados para colagem de madeira incluem produtos baseados em compostos renováveis como a lignina, os taninos, proteínas, óleos e amidos vegetais (Islam *et al.*, 2022).

As principais vantagens em se utilizar adesivos naturais estão ligadas a baixa pegada de carbono, baixa toxicidade, maior biodegradabilidade e possibilidades de se criar produtos com design sustentável (Heinrich, 2019).

Um adesivo que tem demonstrado excelente desempenho em painéis de madeira reconstituída é o poliuretano à base de óleo de mamona. O poliuretano é resistente à água e o óleo da mamona é renovável e abundante no Brasil. É energeticamente eficiente e não requer temperatura de prensagem, enquanto os adesivos à base de formaldeído requerem cerca de 160 °C, são atóxicos e não emitem gases. No entanto, o custo ainda é mais elevado do que o de outros adesivos. A possibilidade de reduzir a temperatura de prensagem do adesivo de PU contribui positivamente para diversos critérios de análise de impacto e reduz os custos de produção (Farias *et al.*, 2024).

Portanto, a utilização de adesivos sustentáveis, derivado de recursos renováveis, biodegradáveis e livre de vapores tóxicos como o a base de óleo de mamona (Inperveg) são representa uma das estratégias mais promissoras para o desenvolvimento de painéis ecológicos, não apenas por substituir insumos petroquímicos, mas também por possibilitar a integração de novos materiais funcionais, como os PCM's.

REFERÊNCIAS

AJABLI, H. *et al.* Review on Eco-friendly insulation material used for indoor comfort in building. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 185, p. 113609, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113609>.

ALOMAYRI, T.; LOW, It Meng. Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 1, n. 1, p. 30-34, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2013.01.002>.

ALYOUSEF, R. *et al.* Potential of waste woven polypropylene fiber and textile mesh for production of gypsum-based composite. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, p. e02099, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02099>.

ANTOLINC, D; FILIPIČ, K. E. Recycling of nonwoven polyethylene terephthalate textile into thermal and acoustic insulation for more sustainable buildings. **Polymers**, v. 13, n. 18, p. 3090, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13183090>.

BINICI, H. *et al.* Insulation properties of bricks made with cotton and textile ash wastes. **International Journal of Materials Research**, v. 101, n. 7, p. 894-899, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3139/146.110348>.

BOUSSETTA, A. *et al.* Shrimp waste protein for bio-composite manufacturing: Formulation of protein-cornstarch-mimosa-tannin wood adhesives. *Ind. Crops Prod.*, v. 187, p.115323. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115323>.

BRIGA-SÁ, A. *et al.* Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 155-160, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.037>.

CHAUHAN, Vinay Kumar *et al.* Recent efforts and advances towards sustainable ceramics made from textile wastes – A review. **Open Ceramics**, v. 16, p. 100500, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100500>.

CHIRAYIL, C. J. *et al.* Nanofibril reinforced unsaturated polyester nanocomposites: Morphology, mechanical and barrier properties, viscoelastic behavior and polymer chain confinement. **Industrial Crops and Products**, v. 56, p. 246-254, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.03.005>.

CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B. Masonry mortars containing expanded vermiculite and rubber aggregates from recycled tires-Relevant properties. **Cerâmica**, v. 60, p. 69-76, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000100010>.

CLARAMUNT, J. *et al.* Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 230-239, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.044>.

CORINALDESI, V; MAZZOLI, A; SIDDIQUE, R Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 281-289, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.011>.

DELAQUA, G. C. G. *et al.* Incorporation of sludge from effluent treatment plant of an industrial laundry into heavy clay ceramics. **Journal of Building Engineering**, v. 47, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103451>.

DE OLIVEIRA, E. M. *et al.* Study of the incorporation of fabric shavings from the clothing industry in coating mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123730, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123730>

DITTENBER, D. B.; GANGARAO, Hota VS. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 43, n. 8, p. 1419-1429, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>.

ELEUTÉRIO, T. *et al.* Review of Natural Fibers: Classification, Composition, Extraction, Treatments, and Applications. **Fibers**, v. 13, n.119, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.3390/fib13090119>

ELKINGTON, J. *Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business*. **Gabriola Island: New Society Publishers**, 1998.

ESTEVAO, I. M.; TX, I. **Projeto reúne 150 marcas de moda para lucrar sem produzir novas peças**. Metrôpoles, Brasília, 8 ago. 2024. Atualizado em: 13 ago. 2024. Disponível em: <https://www.metropoles.com/colunas/ilca-maria-estevao/projeto-reune-150-marcas-de-moda-para-lucrar-sem-produzir-novas-pecas>. Acesso em: 10 abril 2026.

FANTILLI, A. P. *et al.* Mechanical characterization of bio-based composites reinforced with natural fibers for construction applications. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 153–162, 2017.

FANTILLI, A.P.; SICARDI, S; DOTTI, F. The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 562-569, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.096>.

FARIAS, L. B. S. *et al.* Sustainable use of *Erythrina poeppigiana* in formaldehyde-free plywood: environmental and energy analysis. **Ambiente Construído**, v. 24, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212024000100753>.

FERREIRA, M. L. D, *et al.* Redução de resíduos têxteis por meio de projeto de produto de moda. **Design e Tecnologia**, v. 5, n. 10, p. 38-44, 2015.

FIROUZSALARI, Saeed Eyvazinejad *et al.* Flax fabric-reinforced epoxy pipes subjected to lateral compression. **Composite Structures**, v. 244, p. 112307, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112307>.

FLETCHER, K. *Sustainable Fashion and Textiles: Design Journeys*. 2. ed. London: Routledge, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781849772778>.

GHERMEZGOLI, Z. *et al.* Sound absorption and thermal insulation characteristics of fabrics made of pure and crossbred sheep waste wool. **Journal of Building Engineering**, v. 35, p. 102060, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102060>.

HAMADA, H. M. *et al.* Recycling solid waste to produce eco-friendly foamed concrete: A comprehensive review of approaches. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 6, p. 111353, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111353>.

HASSANI, P. *et al.* Porous resin-bonded recycled denim composite as an efficient sound-absorbing material. **Applied Acoustics**, v. 173, p. 107710, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107710>.

HEINRICH, L. A. Future opportunities for bio-based adhesives—advantages beyond renewability. In: **Green chemistry**, v. 21, n. 8, p. 1866-1888, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1039/c8gc03746a>.

HOLE, G.; HOLE, A. S. Recycling as the way to greener production: A mini review. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 910-915, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.080>.

ISLAM, S; BHAT, G. Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. **Journal of environmental management**, v. 251, p. 109536, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109536>.

ISLAM, M. N. *et al.* An overview of different types and potential of bio-based adhesives used for wood products. **In: International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 112, p. 102992, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102992>.

JABBAR, A. *et al.* Nanocellulose coated woven jute/green epoxy composites: Characterization of mechanical and dynamic mechanical behavior. **Composite Structures**, v. 161, p. 340-349, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.062>.

JUNCO, C. *et al.* Fatigue durability test of mortars incorporating polyurethane foam wastes. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 373-381, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.161>.

KAMBLE, Z; BEHERA, B. K. Sustainable hybrid composites reinforced with textile waste for construction and building applications. **Construction and Building Materials**, v. 284, p. 122800, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122800>.

KHAN, A. *et al.* Low temperature synthesis of carbon fibres from post-consumer textile waste and their application to composites: An ecofriendly approach. **Diamond and Related Materials**, v. 130, p. 109504, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109504>.

KHAN, M. I. *et al.* Textile waste management in Australia: A review. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, p. 200154, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200154>.

KUMAR, C.; LEGGATE, W. An overview of bio-adhesives for engineered wood products. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, p.103187, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103187>.

KOSZEWSKA, M. Circular economy—Challenges for the textile and clothing industry. **Autex Research Journal**, v. 18, n. 4, p. 337-347, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1515/aut-2018-0023>.

LIU, M. *et al.* “Greener” adhesives composed of urea-formaldehyde resin and cottonseed meal for wood-based composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 361–371, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.239>.

MAHAPATRA, T. K. *et al.* Thermal and acoustic properties evaluation of waste tire and textile reinforced epoxy composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 5982-5986, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.962>.

MOHAMMADHOSSEINI, H. *et al.* Enhanced performance for aggressive environments of green concrete composites reinforced with waste carpet fibers and palm oil fuel ash. **Journal of cleaner production**, v. 185, p. 252-265, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.051>.

MONTAVA-JORDÀ, S. *et al.* Development of sustainable and cost-competitive injection-molded pieces of partially bio-based polyethylene terephthalate through the valorization of cotton textile waste. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 6, p. 1378, 2019.

DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20061378>.

NIINIMÄKI, K. *et al.* The environmental price of fast fashion. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 189-200, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>.

PICKERING, K. L. *et al.* A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 83, p. 98-112, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>.

PIRIBAUER, B; BARTL, A. Textile recycling processes, state of the art and current developments: a mini review. **Waste Management & Research**, v. 37, n. 2, p. 112-119, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X18819277>.

ROOS, S. *et al.* White paper on textile recycling. **Mistra Future Fashion: Stockholm, Sweden**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31018.77766>

RADABUTRA, S. *et al.* Preparation and characterization of wood-to-wood bonding adhesive by glycidyl methacrylate grafting natural rubber. **International Journal of Adhesion and Adhesives.**, v.114, p.103093, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103093>.

RUBINO, C. *et al.* Characterization of sustainable building materials obtained from textile waste: From laboratory prototypes to real-world manufacturing processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 390, p. 136098, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136098>.

SALAH, F. *et al.* Development of fibrous materials applied in timber-framed construction using recycled fibers from textile waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 347, p. 131203, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131203>.

SANDIN, G.; PETERS, G, M. Environmental impact of textile reuse and recycling—A review. **Journal of cleaner production**, v. 184, p. 353-365, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>.

SANGTHONG, S. *et al.* Mechanical property improvement of unsaturated polyester composite reinforced with admicellar-treated sisal fibers. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 40, n. 6-7, p. 687-694, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.12.004>.

SCHMUTZ, M.; SOM, C. Identifying the potential for circularity of industrial textile waste generated within Swiss companies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 182, p. 106132, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106132>.

SERRA, A. *et al.* Recycling dyed cotton textile byproduct fibers as polypropylene reinforcement. **Textile Research Journal**, v. 89, n. 11, p. 2113-2125, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517518786278>.

SHI, S. Q. *et al.* Fiberboard Made from Scrap Denim: Characterization of its Properties by Effective Bulk Modulus Elastography. **BioResources**, v. 18, n. 2, 2023. <https://doi.org/10.15376/biores.18.2.3279-3294>.

SONNENBERG, N. C. *et al.* Apparel disposal in the South African emerging market context: Exploring female consumers' motivation and intent to donate post-consumer textile waste.

Resources, Conservation and Recycling, v. 182, p. 106311, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106311>.

TASDEMIR, M. Investigation of Properties of Polymer/Textile Fiber Composites. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 189-196, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/00914030903231415>.

TODOR, M. P. *et al.* Development of fabric-reinforced polymer matrix composites using bio-based components from post-consumer textile waste. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 4150-4156, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.927>

TONK, D. *et al.* Development of fire retarding composite board for fire compartmentation application using waste denim: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 60, p. 259-266, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.513>

TRAN, N.P. *et al.* Repurposing of blended fabric waste for sustainable cement-based composite: Mechanical and microstructural performance. **Construction and Building Materials**, v. 362, p. 129785, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129785>.

VASCONCELOS, G. *et al.* Evaluation of the performance of recycled textile fibres in the mechanical behaviour of a gypsum and cork composite material. **Cement and Concrete Composites**, v. 58, p. 29-39, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.01.001>

VERA, R. E. *et al.* Transforming textile wastes into biobased building blocks via enzymatic hydrolysis: A review of key challenges and opportunities. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, p. 100026, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100026>.

VÖLTZ, L. R. *et al.* Resource-efficient manufacturing process of composite materials: Fibrillation of recycled textiles and compounding with thermoplastic polymer. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 175, p. 107773, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107773>.

WANG, Y. *et al.* Research on Sustainable Furniture Design Based on Waste Textiles Recycling. **Sustainability**, v. 15, n. 4, p. 3601, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15043601>.

WONDMAGEGNEHU, B. T. *et al.* Fabricated and analyzed the mechanical properties of textile waste/glass fiber hybrid composite material. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 7297-7303, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.984>

YAN, L.; KASAL, B.; HUANG, L. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. **Composites Part B: Engineering**, v. 92, p. 94-132, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>.

ZAGHLOUL, M. Y. M. *et al.* Developments in polyester composite materials—An in-depth review on natural fibres and nano fillers. **Composite Structures**, v. 278, p. 114698, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114698>.

ZAMANI, B. Carbon footprint and energy use of textile recycling techniques. 2011.

ARTIGO 1 - VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA AGLOMERADA UTILIZANDO RESINA DE ORIGEM VEGETAL

Renata Costa Terra; Marcos Abdo Samia; Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira; José Benedito Guimarães Júnior; Lourival Marin Mendes.

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade da incorporação de resíduos têxteis triturados (RTT) e partículas de *Pinus oocarpa* na produção de painéis aglomerados, utilizando resina poliuretana de origem vegetal. Os painéis foram produzidos com diferentes proporções de RTT (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), empregando 12% de resina poliuretana à base de óleo de mamona. Inicialmente, os materiais foram secos e reduzidos em partículas menores (*Sliver*) e homogeneizados manualmente, seguidos da formação do colchão de partículas. Posteriormente, os painéis foram prensados a frio em prensa hidráulica, sob pressão de 5 MPa por 5 minutos, sendo mantidos sob grampeamento por 24 horas para cura e, em seguida, climatizados até massa constante, sendo produzidos 3 painéis por tratamento. Os painéis foram caracterizados quanto à sua morfologia, quanto as suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas. A análise por microscopia eletrônica de varredura evidenciou aumento da porosidade e da ocorrência de vazios e trincas com o incremento do teor de RTT. Nos ensaios físicos, a densidade não apresentou variação significativa entre os tratamentos, enquanto o aumento da fração de RTT resultou em maiores valores de teor de umidade, absorção de água e inchamento em espessura. As propriedades mecânicas (MOE, MOR, compressão e dureza Janka) reduziram com o aumento do teor de RTT, em função da menor integridade estrutural. A condutividade térmica não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, mantendo o caráter isolante dos painéis. Em relação ao desempenho acústico, painéis com maior teor de RTT apresentaram maior capacidade de atenuação sonora, atribuída à maior porosidade e aos mecanismos de dissipação de energia acústica. Os resultados demonstram que a incorporação de resíduos têxteis triturados em painéis aglomerados é tecnicamente viável para aplicações não estruturais, especialmente em sistemas de isolamento e revestimento acústico e térmico em ambientes internos, como painéis de vedação, revestimentos de paredes, forros e elementos de mobiliário, nos quais não sejam exigidas elevadas propriedades mecânicas. Dessa forma, os compósitos desenvolvidos apresentam potencial como materiais sustentáveis destinados à construção civil e ao setor moveleiro, contribuindo para a valorização de resíduos têxteis e para os princípios da economia circular.

Palavras-chave: Economia circular; materiais lignocelulósicos; aplicações tecnológicas.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the feasibility of incorporating shredded textile waste (STW) and *Pinus oocarpa* particles in the production of particleboards using a bio-based polyurethane resin. The panels were manufactured with different proportions of STW (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%), using 12% castor oil-based polyurethane resin. Initially, the materials were dried, reduced into smaller particles (slivers), and manually homogenized, followed by the formation of the particle mat. Subsequently, the panels were cold-pressed in a hydraulic press under a pressure of 5 MPa for 5 minutes and maintained under clamping for 24 hours for curing. Afterward, the panels were conditioned until reaching constant mass, with three panels produced per treatment. The panels were characterized regarding their morphology, physical, mechanical, thermal, and acoustic properties. Scanning electron microscopy analysis revealed an increase in porosity, void formation, and cracks with the increase in STW content. In the physical tests, density showed no significant variation among treatments, whereas the increase in the STW fraction resulted in higher values of moisture content, water absorption, and thickness swelling. The mechanical properties (modulus of elasticity – MOE, modulus of rupture – MOR, compression strength, and Janka hardness) decreased with increasing STW content due to the lower structural integrity of the panels. Thermal conductivity showed no significant differences among treatments, maintaining the insulating characteristics of the panels. Regarding acoustic performance, panels with higher STW content exhibited greater sound attenuation capacity, attributed to the increased porosity and the mechanisms of acoustic energy dissipation. The results demonstrate that the incorporation of shredded textile waste into particleboards is technically feasible for non-structural applications, particularly in indoor thermal and acoustic insulation and finishing systems, such as partition panels, wall coverings, ceilings, and furniture components, where high mechanical performance is not required. Therefore, the developed composites exhibit potential as sustainable materials for the construction and furniture sectors, contributing to the valorization of textile waste and promoting the principles of the circular economy.

Keywords: Circular economy; lignocellulosic materials.

1 INTRODUÇÃO

É cada vez maior o interesse pelo desenvolvimento de novos materiais aliado à necessidade de reduzir os impactos gerados durante sua produção, especialmente os de natureza ambiental. A busca por um uso mais eficiente, tanto do ponto de vista tecnológico quanto econômico e social, visa garantir melhores condições de vida para as próximas gerações, incorporando processos produtivos mais sustentáveis e menos agressivos ao meio ambiente. Nesse cenário, as fibras vegetais têm ganhado destaque como alternativas aos reforços sintéticos e às cargas minerais em compósitos, demonstrando elevado potencial para aplicações tecnológicas (Nóbrega *et al.*, 2021).

Dentro dessa perspectiva, os painéis aglomerados destacam-se como materiais compósitos amplamente utilizados nos setores moveleiro e da construção civil, sendo produzidos pela consolidação de partículas de madeira ou outros materiais lignocelulósicos, unidas por meio de um agente adesivo e submetidas à aplicação de pressão e temperatura. Esses materiais apresentam como principais vantagens o aproveitamento de resíduos e subprodutos da indústria madeireira, a possibilidade de utilização de matérias-primas alternativas, a estabilidade dimensional e a versatilidade de aplicação em produtos como móveis, revestimentos, divisórias e componentes internos (Iwakiri, 2005).

Entretanto, a produção convencional desses painéis utiliza predominantemente partículas de madeira como matéria-prima e adesivos sintéticos, como ureia-formaldeído e fenol-formaldeído, que representam os principais sistemas adesivos empregados na indústria de painéis reconstituídos (Maloney, 1993; Iwakiri, 2005). A dependência de recursos florestais e de componentes de origem petroquímica tem impulsionado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais alternativos, buscando reduzir impactos ambientais e ampliar a utilização de resíduos disponíveis em diferentes cadeias produtivas. Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos provenientes da agroindústria brasileira apresenta-se como uma alternativa promissora para atender à demanda por novas matérias-primas na produção de painéis aglomerados. Esses resíduos apresentam potencial de utilização devido à sua disponibilidade, baixo custo e composição rica em celulose, hemiceluloses e lignina, podendo agregar valor a materiais anteriormente considerados descartes (Mendes *et al.*, 2012).

Dessa forma, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para a produção de compósitos utilizando fibras lignocelulósicas como cargas de reforço (Borges *et al.*, 2025; Khoo *et al.*, 2025; Kumar; Singh, 2025; Nóbrega *et al.*, 2021), em razão de características como baixo custo, disponibilidade, biodegradabilidade, reciclabilidade e propriedades mecânicas satisfatórias (Rangappa *et al.*, 2022; Thakur *et al.*, 2012).

Paralelamente, o aumento expressivo da geração de resíduos têxteis tem se tornado uma preocupação ambiental relevante, uma vez que grande parte desses materiais é descartada de forma inadequada, contribuindo para a poluição ambiental e o acúmulo em aterros sanitários (Shamsuzzaman *et al.*, 2025).

Nesse sentido, estima-se que, globalmente, cerca de 92 milhões de toneladas de resíduos têxteis sejam acumuladas ao longo de seus ciclos de vida, sendo aproximadamente 50% provenientes do estágio pós-consumo. Apenas 15–20% desses resíduos são destinados à reutilização e reciclagem, enquanto mais de 80% são encaminhados para aterros sanitários e/ou incineração, ocasionando aumento da pegada de carbono, perdas energéticas e desperdício de matérias-primas (Gupta *et al.*, 2022; Shamsuzzaman *et al.*, 2023). Diante desse cenário, estratégias baseadas nos princípios da economia circular têm ganhado destaque ao promover a extensão do ciclo de vida dos produtos por meio de práticas como reutilização, reciclagem, reparabilidade e compartilhamento de recursos, transformando resíduos em recursos com potencial de reinserção nas cadeias produtivas (Chen *et al.*, 2021; Islam *et al.*, 2025). Nesse contexto, abordagens como o *upcycling*, caracterizado pela conversão de resíduos em produtos de maior valor agregado ou desempenho, representam alternativas sustentáveis para minimizar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses materiais (Wang *et al.*, 2020).

Apesar desses avanços, a indústria têxtil ainda enfrenta desafios significativos relacionados à implementação de estratégias eficientes de gerenciamento de resíduos, principalmente no desenvolvimento de novos materiais e na reintegração desses resíduos às cadeias produtivas (DeVoy *et al.*, 2021). Nesse cenário, os materiais compósitos destacam-se como uma alternativa promissora devido à sua versatilidade e à possibilidade de incorporação de resíduos lignocelulósicos e têxteis em sua composição (Pakdel *et al.*, 2021). Dessa forma, o desenvolvimento de compósitos sustentáveis utilizando resíduos têxteis representa uma abordagem inovadora para a valorização desses materiais, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para o avanço de soluções alinhadas aos princípios da economia circular.

Embora diversos estudos tenham investigado a utilização de resíduos lignocelulósicos e fibras naturais na produção de materiais compósitos, ainda são limitadas as pesquisas que avaliam a incorporação de resíduos têxteis triturados em painéis aglomerados produzidos com resinas de base renovável, especialmente considerando a influência de diferentes proporções desses resíduos sobre o desempenho físico, mecânico, térmico e acústico dos materiais desenvolvidos. Dessa forma, existe uma lacuna científica quanto à utilização desses resíduos como matéria-prima alternativa na fabricação de painéis compósitos destinados a aplicações não estruturais. Assim, permanece a necessidade de compreender como a substituição parcial

ou total das partículas lignocelulósicas convencionais por resíduos têxteis pode modificar as propriedades dos painéis e quais aplicações tecnológicas podem ser viabilizadas.

Nesse contexto, a valorização de resíduos têxteis por meio de sua incorporação em compósitos lignocelulósicos, como painéis aglomerados, surge como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de materiais sustentáveis. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar painéis aglomerados à base de retalhos de tecido triturado (RTT) e partículas de *Pinus oocarpa*, com o intuito de promover uma destinação mais eficiente e ambientalmente adequada a esses resíduos, agregando valor e ampliando suas possibilidades de aplicação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Obtenção e transformação das matérias-primas

Para a fabricação dos painéis, foram empregues retalhos de tecido triturado (RTT), partículas de *Pinus oocarpa* e a resina comercial Imperveg AGT 1315, utilizada como matriz polimérica. Trata-se de uma resina bicomponente à base de poliuretano de origem vegetal, derivada do óleo de mamona (PUR), caracterizada por ser 100% sólida, biodegradável, compostável e isenta de solventes tóxicos, apresentando, portanto, caráter sustentável e ambientalmente favorável.

Os retalhos de tecido triturado (RTT) foram classificados como tricoline, constituídos por fibras 100% algodão, provenientes de resíduos gerados por uma confecção de camisas masculinas localizada no município de Nepomuceno, Minas Gerais, Brasil. Inicialmente, os resíduos foram submetidos à triagem manual, sendo separados por coloração, com o objetivo de assegurar maior homogeneidade do material. Em seguida, os retalhos foram processados mecanicamente em moinho de martelos, utilizando peneira com malha de 8,65 mm, resultando em um material com aspecto predominantemente fibroso após a moagem.

A madeira de *Pinus oocarpa* foi obtida a partir de árvores com idade de dezoito anos, cultivadas em área experimental da Universidade Federal de Lavras (UFLA), localizada em Lavras, Minas Gerais, Brasil. Após o abate, as toras foram transportadas para a Unidade Experimental de Painéis de Madeira (UEPAM/UFLA), onde foram submetidas a tratamento hidrotérmico em água a 65 °C por um período de 24 horas, com a finalidade de aumentar a maleabilidade da madeira para o processo de laminação. Posteriormente, as toras foram processadas em laminador, obtendo-se lâminas com espessura aproximada de 1,5 mm. Essas lâminas foram então desfiadas manualmente e submetidas à moagem em moinho de martelos,

utilizando peneira de 4 mm, para a obtenção de partículas do tipo *sliver*. Por fim, as partículas de pinus foram secas em estufa a 60 °C até atingirem teor de umidade aproximado de 4%.

2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi definido em função da proporção do resíduo têxtil triturado (RTT), das partículas de pinus utilizadas como reforço e da resina Poliuretana. Foram avaliados cinco tratamentos. Nesses tratamentos, a quantidade de resina foi mantida constante em 12% (m/m), enquanto o percentual de partículas de pinus foi variado em função da proporção de RTT.

Para a fabricação dos painéis o percentual de variação do (RTT) foi de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Para cada tratamento, foram produzidos três painéis, totalizando quinze painéis experimentais. A Tabela 1 apresenta o plano de delineamento experimental adotado.

Tabela 1 - Tratamentos propostos para a confecção dos painéis

Tratamentos	Tecido (%)	Pinus (%)
1	0	100
2	25	75
3	50	50
4	75	25
5	100	0

Fonte: Da autora (2026).

2.3 Processo de fabricação dos painéis aglomerados

Inicialmente, realizou-se a homogeneização manual da resina poliuretana à base de óleo de mamona com as partículas de resíduo têxtil triturado (RTT) e partículas de pinus. Após a obtenção de uma mistura homogênea, procedeu-se à formação do colchão de partículas.

A conformação do colchão foi realizada manualmente em uma caixa de madeira com dimensões de 15 × 15 cm, na qual a mistura foi distribuída de forma uniforme. Em seguida, o colchão foi retirado da forma e acondicionado entre duas placas de ferro, sendo delimitado por espaçadores de 1,5 cm, responsáveis por definir a espessura final dos painéis.

Posteriormente, o material foi submetido à prensagem em temperatura ambiente utilizando uma prensa hidráulica manual, durante 5 minutos, sob pressão de 5 MPa. Após a prensagem, os painéis permaneceram fixados entre as placas de ferro por meio de sargentos, durante um período de 24 horas, visando garantir a estabilização inicial do material.

Na sequência, os painéis foram acondicionados em sala climatizada, mantida a 20 ± 2 °C e umidade relativa de $65 \pm 3\%$, até atingirem massa constante. Por fim, os painéis foram cortados em serra de fita para a obtenção dos corpos de prova, os quais foram submetidos aos ensaios físicos e mecânicos. Todo o processo de geração das partículas até a formação dos painéis é descrito na Figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática das etapas do processo de produção dos painéis, incluindo a obtenção das matérias-primas, processamento das partículas e formação dos painéis



Fonte: Da autora (2026)

2.4 Propriedades avaliadas

Os compósitos foram caracterizados quanto às propriedades morfológicas, físicas, mecânicas, térmicas e acústicas, conforme descrito nos tópicos a seguir.

2.4.1 Caracterização morfológica

A caracterização morfológica dos compósitos foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o equipamento SEM Zeiss EVO 40, operado com corrente de sonda de 2 nA e tensão de aceleração de 15 kV. As amostras analisadas foram constituídas por fragmentos obtidos após os ensaios de flexão estática, os quais foram posteriormente dimensionados em tamanhos menores, fixados em suportes *stub* e submetidos ao revestimento com ouro pelo processo de *sputtering*. As análises foram conduzidas utilizando

os detectores de elétrons retroespalhados e elétrons secundários, sem inclinação das amostras, com distância de trabalho de 8,5 mm.

2.4.2 Avaliação das propriedades físicas

Os compósitos foram avaliados quanto às propriedades físicas de teor de umidade, densidade aparente, absorção de água e inchamento em espessura. Os ensaios foram conduzidos seguindo a metodologia estabelecida pela norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018), utilizada como referência metodológica para avaliação de painéis de madeira reconstituída.

2.4.3 Avaliação das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas avaliadas compreenderam os ensaios de flexão estática, compressão e dureza Janka. Os ensaios mecânicos foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio (Arotec), pertencente ao laboratório da Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM).

Para a avaliação da resistência à flexão estática, foram adotados os procedimentos estabelecidos pela norma ANSI A208.1-09 (ANSI, 1993). O ensaio de compressão foi realizado conforme a metodologia descrita na norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018). A determinação da dureza Janka foi conduzida de acordo com a norma ASTM D143-14 (ASTM, 2014).

2.4.4 Avaliação da propriedade térmica

A condutividade térmica dos compósitos de madeira foi determinada conforme a metodologia proposta por Setter *et al.* (2020). Para realização dos ensaios, foi utilizado um aparato desenvolvido em escala laboratorial na Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM), da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

2.4.5 Avaliação do desempenho acústico

O desempenho acústico dos compósitos foi avaliado por meio de ensaios de isolamento acústico, realizados com base em uma adaptação da norma ISO 10534-2 (ISO, 1998).

2.4.6 Análise estatística dos dados

Os dados obtidos para as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas dos compósitos, considerando os diferentes tratamentos experimentais, foram submetidos à análise estatística. Inicialmente, foi realizada a análise de variância (ANOVA) ao nível de 5% de significância. Quando observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, foi aplicado o

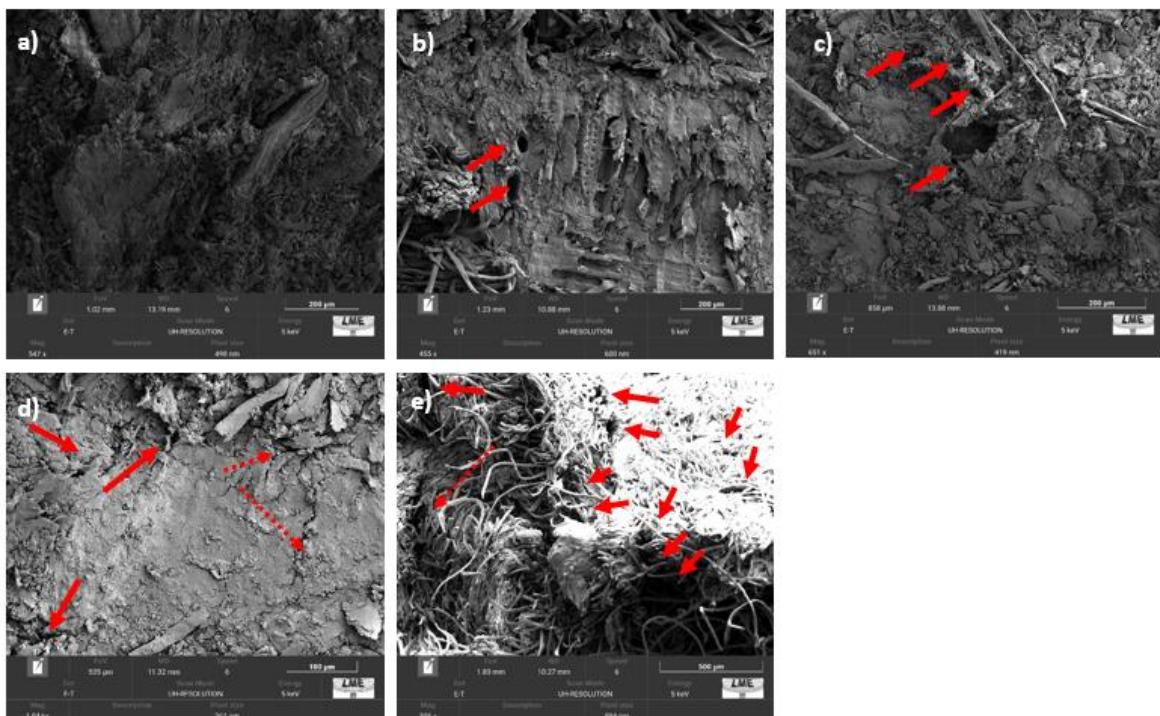
teste de comparação de médias de Scott-Knott a 5% de probabilidade. O experimento foi conduzido em um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), composto por diferentes tratamentos experimentais com três repetições.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização morfológica dos painéis

A Figura 2 apresenta as micrografias obtidas por MEV dos diferentes painéis avaliados, evidenciando alterações na organização estrutural em função da variação na composição das fibras. De modo geral, observa-se que modificações na proporção de fibras influenciam a homogeneidade da matriz, o grau de compactação e a formação de regiões com descontinuidades, como poros e trincas. Painéis com maior teor de lignina tendem a apresentar estruturas mais homogênea e com menor incidência de vazios, enquanto aqueles com maior fração de fibras celulósicas ou provenientes de resíduos têxteis podem apresentar maior exposição fibrilar e regiões menos compactas, favorecendo a formação de defeitos.

Figura 2 - Morfologia dos painéis nos diferentes tratamentos.



Legenda: a) Painéis produzidos com 100% de fibra de pinus; b) Painéis produzidos com 75% de fibra de pinus+ 25% retalhos de tecido triturado (RTT); c) Painéis produzidos com 50% de fibra de pinus+ 50% retalhos de tecido triturado (RTT); d) Painéis produzidos com 25% de fibra de pinus+ 75% retalhos de tecido triturado (RTT); e) Painéis produzidos com 100% de fibra de retalhos de tecido triturado

(RTT). Onde: Setas contínuas indicam a presença de poros e as setas tracejadas indicam a presença de trincas. Fonte: Da autora (2026).

A ocorrência de vazios e descontinuidades na interface fibra-matriz pode atuar como regiões de concentração de tensões, além de facilitar a penetração de umidade. Esses fatores contribuem para as variações observadas nos ensaios físicos e mecânicos, podendo resultar em maior fragilidade estrutural do painel.

Segundo Li *et al.* (2015), a presença de vazios em compósitos lignocelulósicos atua como pontos de concentração de tensões, reduzindo a resistência mecânica, especialmente à tração e ao cisalhamento interlaminar, sendo sua quantidade e localização fatores críticos no desempenho do material.

A ocorrência de vazios, poros e trincas observada nas micrografias de MEV (Figura 2), especialmente nos tratamentos com maior teor de retalhos de tecido triturado (RTT) (Figuras 2 c, d e e), exerceu influência direta não apenas nas propriedades físicas e mecânicas, mas também no desempenho térmico e acústico dos painéis. Embora essas descontinuidades estruturais possam atuar negativamente na resistência mecânica, elas desempenham papel importante na redução da transferência de calor e na dissipação da energia sonora. A presença de poros pode influenciar as propriedades de transferência de calor dos materiais, sendo, portanto, um parâmetro relevante para a análise da condutividade térmica apresentada a seguir (Tabela 7).

Portanto, os resultados de MEV demonstram que a microestrutura dos painéis exerce papel fundamental no desempenho funcional dos materiais. Enquanto a maior compactação estrutural favorece propriedades mecânicas, a presença controlada de vazios e poros mostrou-se benéfica para aplicações voltadas ao isolamento térmico e à atenuação acústica, ampliando o potencial de utilização desses painéis em aplicações não estruturais relacionadas ao conforto termo acústico.

3.2 Caracterização Física dos painéis

3.2.1 Densidade Aparente

Os valores de densidade observada para os diferentes tratamentos nos painéis são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 -Valores médios de densidade nominal e densidade observada dos painéis aglomerados

Tratamento	Densidade nominal g/cm ³	Densidade aparente observada g/cm ³	Umidade (%)
1	0,95	0,88 ($\pm 0,04$) a	2,33 ($\pm 0,06$) a
2		0,91 ($\pm 0,06$) a	2,22 ($\pm 0,015$) a
3		0,89 ($\pm 0,04$) a	3,52 ($\pm 0,30$) b
4		0,90 ($\pm 0,07$) a	3,75 ($\pm 0,34$) b
5		0,89 ($\pm 0,06$) a	4,43 ($\pm 0,05$) b
CV (%)		6,5	8,83

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5 % de probabilidade. Desvio padrão entre parenteses. Legenda: tratamento 1= Painéis produzidos com 100% de fibra de pinus; tratamento 2= Painéis produzidos com 75% de fibra de pinus+ 25% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 3= Painéis produzidos com 50% de fibra de pinus+ 50% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 4= Painéis produzidos com 25% de fibra de pinus+ 75% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 5= Painéis produzidos com 100% de fibra de retalhos de tecido triturado (RTT). Fonte: Da autora (2026).

Observa-se que os valores obtidos são inferiores à densidade nominal estabelecida no plano experimental (0,95 g/cm³), o que pode ser atribuído, principalmente, à perda de partículas durante o manuseio nas etapas que antecedem a consolidação do painel, em decorrência das condições laboratoriais de manufatura. Nesse contexto, verifica-se que todos os tratamentos apresentaram comportamento estatisticamente semelhante, não sendo observadas diferenças significativas entre eles, conforme indicado pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Essa igualdade na densidade observada entre os diferentes tratamentos indica que a variação na proporção de tecido e pinus não exerceu influência significativa sobre essa propriedade dos painéis aglomerados

Os valores médios de densidade dos painéis variaram de 0,88 a 0,91 g/cm³. De acordo com as normas ABNT NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009), os painéis de partículas são classificados da seguinte forma: até 0,59 g/cm³ – baixa densidade; de 0,60 a 0,79 g/cm³ – média densidade; e acima de 0,80 g/cm³ – alta densidade. Desta forma, todos tratamentos foram classificados como painéis de alta densidade.

Em relação ao teor de umidade os resultados mostram que o teor de umidade diferiu significativamente entre os tratamentos, formando dois grupos distintos: os tratamentos T1 e T2, com menores valores, e os tratamentos T3, T4 e T5, com maiores teores de umidade.

Os menores teores de umidade nos tratamentos T1 (100% pinus) e T2 (75% pinus +

25% RTT) podem ser explicados pela maior presença de lignina, um componente de caráter mais hidrofóbico. A lignina atua como uma barreira natural à retenção de água, reduzindo a quantidade de sítios disponíveis para ligação com moléculas de água. Além disso, as micrografias desses tratamentos mostram estruturas mais homogêneas e compactas, com menor incidência de vazios e trincas, o que limita a retenção de umidade no interior do material.

Por outro lado, o aumento do teor de umidade nos tratamentos T3, T4 e T5 está associado ao maior percentual de retalhos de tecido triturado (RTT). Esse material, por ter sido submetido a tratamentos químicos como alcalinização e branqueamento, apresenta maior exposição de grupos hidroxila ($-OH$) da celulose, o que eleva sua afinidade com a água e, consequentemente, sua capacidade de retenção de umidade. De acordo com Santos *et al.* (2018), o tratamento alcalino promove a remoção de lignina e hemicelulose da superfície das fibras, resultando na maior disponibilidade de grupos hidroxila da celulose e no aumento da hidrofilicidade do material, favorecendo a absorção de água por meio de ligações de hidrogênio. Além disso, conforme evidenciado nas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), os tratamentos T3, T4 e T5 apresentam maior quantidade de vazios, poros e descontinuidades estruturais, que atuam como sítios de retenção de água, contribuindo para o aumento do teor de umidade mesmo em condições de equilíbrio higroscópico.

Esse comportamento está de acordo com Guimarães *et al.* (2021), que observaram que o que o tratamento alcalino promove a remoção parcial de hemicelulose e extrativos, aumentando o teor relativo de celulose em diferentes fibras lignocelulósicas. Entretanto, o branqueamento alcalino mostrou-se mais eficiente, proporcionando uma redução mais acentuada da lignina e maior purificação da fração celulósica. Esse comportamento foi mais pronunciado para as fibras de pseudocaule de bananeira, enquanto a casca de café apresentou maior resistência à remoção de lignina, indicando que a eficiência dos tratamentos depende da natureza da biomassa.

Corroborando esses achados, diversos estudos relatam a eficácia dos tratamentos químicos, como alcalinização e branqueamento, na remoção de constituintes amorfos das fibras (lignina e hemicelulose), bem como de extrativos, promovendo o enriquecimento da fração celulósica e maior organização estrutural das fibras (Teodoro *et al.*, 2011; Yue *et al.*, 2015; Cisneros-López *et al.*, 2015; Vardhini *et al.*, 2016). Segundo Faruk *et al.* (2012), o tratamento alcalino promove a remoção de componentes não celulósicos, como lignina, ceras e óleos da superfície externa da parede celular, além de provocar a ruptura de ligações de hidrogênio, resultando em aumento da rigidez superficial das fibras.

Diante disso, os valores de teor de umidade observados nos painéis, variando de 2,22%

a 4,43%, situaram-se abaixo da faixa de 5 a 13% estabelecida pela ABNT na norma NBR 14810-2 (2018). Esse resultado reforça que, apesar das diferenças entre os tratamentos, especialmente o aumento do teor de umidade nos painéis com maior teor de RTT, todos os painéis apresentaram baixo teor de umidade de equilíbrio nas condições de ensaio.

3.2.2 Absorção de água e inchamento em espessura

Os resultados de absorção e inchamento em espessura, após 2 e 24 horas de imersão em água, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios de absorção de água e inchamento em espessura, após 2 e 24 horas de imersão em água

Tratamento	AA 2h (%)	AA 24h (%)	IE 2h (%)	IE 24h (%)
1	5,91 ($\pm 0,88$) b	10,77 ($\pm 0,83$) b	3,40 ($\pm 0,45$) b	4,71 ($\pm 0,40$) b
2	2,75 ($\pm 0,66$) a	8,71 ($\pm 0,62$) a	1,53 ($\pm 0,38$) a	3,02 ($\pm 0,72$) a
3	8,17 ($\pm 0,82$) c	12,44 ($\pm 0,53$) c	3,11 ($\pm 0,53$) b	5,26 ($\pm 0,64$) b
4	7,78 ($\pm 0,45$) c	12,07 ($\pm 1,09$) c	3,06 ($\pm 0,48$) b	5,05 ($\pm 0,65$) b
5	10,08 ($\pm 0,53$) d	14,75 ($\pm 0,65$) d	5,04 ($\pm 0,94$) c	7,10 ($\pm 0,18$) c
CV (%)	11,01	6,71	13,89	11,95

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. Desvio padrão entre parênteses. Legenda: AA (2 e 24h): Absorção de água em 2 e 24 horas; IE (2 e 24h): Inchamento em espessura em 2 e 24 horas de imersão em água. Onde: tratamento 1= Painéis produzidos com 100% de fibra de pinus; tratamento 2= Painéis produzidos com 75% de fibra de pinus+ 25% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 3= Painéis produzidos com 50% de fibra de pinus+ 50% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 4= Painéis produzidos com 25% de fibra de pinus+ 75% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 5= Painéis produzidos com 100% de fibra de retalhos de tecido triturado (RTT). Fonte: Da autora (2026).

Os valores médios de absorção de água e de inchamento em espessura, determinados após 2 e 24 horas de imersão, evidenciaram variações significativa entre os tratamentos, situando-se entre 2,75% e 10,08% e entre 8,71% e 14,75% para absorção de água, e entre 1,53% e 5,04% e entre 3,02% e 7,10% para o inchamento em espessura, respectivamente. Esses resultados indicam a influência direta da composição dos painéis sobre o comportamento higroscópico e a estabilidade dimensional dos materiais.

A análise estatística revelou diferenças significativas entre os tratamentos avaliados, corroborando que a proporção dos constituintes exerce papel determinante nas propriedades físicas dos painéis. De modo geral, verifica-se que os painéis produzidos com 100% de retalhos de tecido triturado (RTT) apresentaram os maiores valores tanto de absorção de água quanto de inchamento em espessura, em ambos os tempos de imersão (2 e 24 horas), o que pode estar

associado à maior afinidade desses materiais com a água e à sua estrutura mais suscetível à penetração de umidade. Esse comportamento pode estar relacionado às características químicas do RTT, que, por ser proveniente de resíduos têxteis obtidos por processos industriais, apresenta redução parcial dos teores de lignina e hemiceluloses, tornando-se relativamente mais rico em celulose. Segundo Kabir, Wang, Lau, Cardona (2012), os tratamentos químicos empregados no processamento de fibras vegetais promovem a remoção parcial de lignina, hemiceluloses e componentes superficiais, tornando a superfície relativamente mais rica em celulose exposta. Como a celulose possui elevada concentração de grupos hidroxila (-OH), ocorre maior formação de ligações de hidrogênio com as moléculas de água, favorecendo a absorção de umidade. Em contrapartida, a madeira de *Pinus oocarpa*, por manter maior teor de lignina em sua estrutura, apresenta comportamento mais hidrofóbico, dificultando a penetração de água e contribuindo para menores valores de absorção e inchamento. Segundo Ray e Rout (2005), as moléculas de água são atraídas pelos grupos hidrofílicos das fibras naturais e interagem com os grupos hidroxila (-OH) presentes nas moléculas de celulose, formando ligações de hidrogênio, mecanismo considerado um dos principais responsáveis pela absorção de umidade em materiais lignocelulósicos.

Outra possível explicação para os maiores valores de absorção de água e inchamento em espessura observados no tratamento T5 (100% de retalhos de tecido triturado) está relacionada às características estruturais do painel, especialmente à formação de uma rede de partículas com maior heterogeneidade e maior quantidade de espaços vazios em sua estrutura interna. A maior heterogeneidade das partículas e a menor eficiência de compactação do colchão durante a prensagem podem favorecer a formação de espaços vazios na estrutura interna do painel. Esses vazios atuam como regiões preferenciais para a entrada e retenção de água, aumentando a absorção de umidade e o inchamento em espessura do material (Kelly, 1977; Maloney, 1993; Iwakiri, 2005). Em contrapartida, o tratamento T2 (25% de tecido e 75% de *Pinus oocarpa*) apresentou os menores valores dessas propriedades, possivelmente em razão da melhor distribuição granulométrica dos constituintes, maior eficiência de empacotamento das partículas e redução da porosidade interna, dificultando a difusão da água no interior do painel (Iwakiri *et al.*, 2005).

Essa tendência pode ser melhor compreendida a partir da análise microestrutural obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Conforme apresentado na Figura 2, painel com maior teor de fibras de *Pinus* (Figuras 2 a e b) exibem estrutura mais homogênea e compacta, com menor incidência de vazios e trincas. Essa característica dificulta a penetração de água, reduzindo tanto a absorção quanto o inchamento. Por outro lado, painéis com maior proporção

de resíduos têxteis (Figuras 2 c, d e e) apresentam maior quantidade de descontinuidades, como poros e trincas, indicadas pelas setas nas micrografias, que atuam como vias preferenciais para a entrada de água.

A presença desses vazios e falhas interfaciais favorece a difusão de umidade e intensifica o inchamento em espessura, uma vez que a água absorvida promove a expansão das fibras e o afastamento da matriz. Além disso, a menor adesão interfacial entre fibra e matriz contribui para a formação desses defeitos, potencializando o efeito higroscópico. Segundo Li *et al.* (2015), a presença de vazios em painéis lignocelulósicos não apenas reduz a resistência mecânica, mas também facilita a absorção de água, agravando processos de inchamento e degradação dimensional.

Yang *et al.* (2006) observaram diferenças no comportamento de absorção de água e inchamento em espessura entre painéis produzidos com diferentes materiais lignocelulósicos, como farinha de casca de arroz e farinha de madeira. Os autores verificaram que painéis contendo farinha de casca de arroz apresentaram menores valores dessas propriedades em comparação aos produzidos com farinha de madeira. Esse comportamento foi atribuído, principalmente, às diferenças na composição química e na estrutura desses materiais. A casca de arroz apresenta maior teor de sílica e menor quantidade de grupos hidrofílicos disponíveis, conferindo maior resistência à absorção de água. Por outro lado, a farinha de madeira possui elevado teor de holocelulose, rica em grupos hidroxila ($-OH$), o que aumenta sua afinidade com a água. Além disso, aspectos estruturais também influenciam esse comportamento, uma vez que a farinha de madeira apresenta maior porosidade, facilitando a difusão de água, enquanto a casca de arroz atua como uma barreira mais eficiente. Adicionalmente, a menor adesão interfacial entre a matriz polimérica e os materiais lignocelulósicos pode levar à formação de microvazios, que contribuem para o aumento da absorção de água e do inchamento, sendo esse efeito mais pronunciado em painéis com farinha de madeira.

Ao relacionar os resultados obtidos com critérios normativos, verifica-se que os valores de inchamento em espessura após 24 horas variaram de 3,02% a 7,10%, sendo significativamente inferiores aos limites estabelecidos pela NBR 14810-2 (ABNT, 2018), que variam de 22% a 10%, dependendo da classe de uso. Dessa forma, todos os tratamentos atenderam aos requisitos normativos, inclusive para a classe mais restritiva (P7), indicando elevada estabilidade dimensional dos painéis produzidos.

3.3 Caracterização mecânica dos painéis

3.3.1 Flexão Estática

Na tabela 4 estão expressos os valores encontrados no ensaio mecânico de Flexão Estática, o qual determinou os Módulos de Elasticidade (MOE) e o Módulo de Ruptura (MOR).

Tabela 4 – Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) obtidos no ensaio de flexão estática para os diferentes tratamentos.

Tratamento	MOE (MPa)	MOR(MPa)
1	1185,52 ($\pm 69,34$) d	22,62 ($\pm 3,35$) b
2	1370,30 ($\pm 26,42$) e	24,54 ($\pm 3,93$) b
3	1034,49 ($\pm 18,68$) c	16,47 ($\pm 2,16$) a
4	729,12 ($\pm 28,65$) b	14,70 ($\pm 2,96$) a
5	450,40 ($\pm 49,50$) a	17,28 ($\pm 2,38$) a
CV (%)	5,00	17,06

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. Desvio padrão entre parenteses. Legenda: MOE = módulo de elasticidade; MOR = módulo de ruptura. Onde: tratamento 1= Painéis produzidos com 100% de fibra de pinus; tratamento 2= Painéis produzidos com 75% de fibra de pinus+ 25% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 3= Painéis produzidos com 50% de fibra de pinus+ 50% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 4= Painéis produzidos com 25% de fibra de pinus+ 75% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 5= Painéis produzidos com 100% de fibra de retalhos de tecido triturado (RTT). Fonte: Da autora (2026).

Para o módulo de elasticidade (MOE), observa-se que todos os tratamentos diferem significativamente entre si, conforme indicado pelas letras distintas associadas às médias, evidenciando a elevada sensibilidade dessa propriedade às variações entre os tratamentos.

Nesse contexto, os painéis com maior proporção de retalhos de tecido triturado (RTT), especialmente o tratamento 5 (100% RTT), apresentaram os menores valores de MOE (450,40 MPa), diferindo estatisticamente dos demais e indicando menor rigidez. Esse comportamento pode estar associado às características microestruturais observadas por MEV (Figura 2 e), nas quais se verificou maior incidência de vazios, trincas e regiões com baixa compactação.

Esse achado está em concordância com o estudo de Srinivasul; Ramachandran; Jayasankar (2015), que demonstraram que a presença de vazios em compósitos exerce forte influência negativa nas propriedades elásticas. Segundo os autores, o aumento da fração volumétrica de vazios promove redução significativa do módulo de elasticidade, uma vez que esses defeitos atuam como descontinuidades estruturais, prejudicando a transferência de tensões

no material, enquanto a forma e o tamanho individuais dos vazios têm influência secundária. Dessa forma, os menores valores de MOE observados nos tratamentos com maior teor de RTT podem ser diretamente relacionados à maior incidência de defeitos microestruturais, corroborando o comportamento reportado na literatura.

A presença de vazios nos compósitos atua como regiões de concentração de tensões e reduz a área resistente efetiva do material, favorecendo a nucleação e propagação de trincas. Como consequência, observa-se uma redução significativa nas propriedades mecânicas, especialmente na resistência à tração transversal e à flexão, podendo atingir valores da ordem de 10 a 20% para cada 1% de aumento no teor de vazios, conforme relatado na literatura (Mehdikhani *et al.*, 2019).

Quanto ao módulo de elasticidade, para painéis com espessura entre 13 e 20 mm, não estruturais e destinados a uso interno, a norma brasileira ABNT NBR 14810-2:(2013) e a norma europeia EN 622-5 (2006) estabelecem valor mínimo de MOE de 1800 MPa, enquanto a norma americana ANSI A208.1 (2009) adota 1700 MPa; no entanto, nenhum dos tratamentos avaliados atendeu ao mínimo exigido por essas normativas.

Em relação ao MOR, observa-se, pela análise estatística, a formação de dois grupos distintos. Os tratamentos T1 e T2 não diferem significativamente entre si e apresentam os maiores valores de resistência à ruptura (22,62 e 24,54 MPa). Já os tratamentos T3, T4 e T5 também não diferem entre si, porém apresentam valores significativamente inferiores. Esse resultado indica que há diferença estatística clara entre os grupos, mas não dentro de cada grupo, evidenciando que apenas os tratamentos T1 e T2 se destacam em termos de MOR.

Os maiores valores de MOR observados nos tratamentos T1 (100% Pinus) e T2 (75% Pinus + 25% RTT) estão diretamente relacionados à melhor integridade estrutural dos painéis, evidenciada pela análise de MEV (Figura 2 a e b). Nesses tratamentos, a maior proporção de pinus contribui para uma estrutura mais homogênea, com maior compactação e menor incidência de vazios e trincas, o que favorece a eficiente transferência de tensões ao longo do material durante o carregamento em flexão. Além disso, o pinus apresenta maior teor de lignina, que atua como agente cimentante, promovendo maior coesão entre as partículas e contribuindo para a resistência à ruptura.

Por outro lado, os menores valores de MOR nos tratamentos T3, T4 e T5 estão associados ao aumento da proporção de RTT, que promove alterações significativas na microestrutura. Conforme observado no MEV (Figura 2 c,d e e), esses painéis apresentam maior incidência de vazios, trincas e regiões com baixa compactação, que atuam como pontos de concentração de tensões e facilitam a propagação de falhas sob carregamento. Assim, as

diferenças estatísticas observadas no MOR podem ser explicadas pela combinação entre composição química, qualidade da interface fibra-matriz, grau de compactação e presença de defeitos microestruturais. Enquanto T1 e T2 apresentam condições mais favoráveis à resistência mecânica, T3, T4 e T5 sofrem com o aumento de descontinuidades e redução da coesão

Os painéis produzidos enquadram-se na faixa de 13 a 20 mm estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas na norma ABNT NBR 14810-2:(2013). Para essa faixa, os valores mínimos de Módulo de Ruptura (MOR) são de 11 MPa para condições secas e 14 MPa para condições úmidas, sendo esses parâmetros adotados como referência para a avaliação do desempenho mecânico dos painéis. Dessa forma, todos os painéis atenderam aos valores mínimos exigidos pela norma, tanto para condições secas quanto úmidas.

Quando comparados aos requisitos da ANSI A208.1 (2009) para painéis na faixa de 13 a 20 mm, os Tratamentos 1, 2 e 5 atenderam aos critérios das classes Class-1 (≥ 21 MPa), Premium (≥ 24 MPa) e Class-2 (≥ 17 MPa), respectivamente, indicando potencial para aplicações em mercados internacionais, como o setor moveleiro. Em contrapartida, os Tratamentos 3 e 4, embora atendam à ABNT NBR 14810-2 (2013) (≥ 14 MPa para condições úmidas e ≥ 11 MPa para condições secas), não alcançam os requisitos mais rigorosos da norma americana, evidenciando a necessidade de ajustes nos parâmetros de processamento.

3.3.2 Resistência a compressão

Conforme apresentado na Tabela 5 (resistência à compressão), a análise de comparação de médias evidenciou a formação de dois grupos estatisticamente distintos. Os tratamentos T1, T2 e T3 não diferiram significativamente entre si, da mesma forma que os tratamentos T4 e T5 não apresentaram diferenças estatísticas entre eles. No entanto, observou-se diferença significativa entre esses dois grupos, indicando que os tratamentos T1 a T3 exibiram valores de resistência à compressão superiores aos observados em T4 e T5. O coeficiente de variação (CV = 13,32%) caracterizou variabilidade moderada nos dados, classificada como adequada para ensaios desse tipo, conferindo assim maior confiabilidade aos resultados obtidos.

Tabela 5 – Resistência à compressão (MPa) dos tratamentos avaliados.

Tratamento	Compressão (MPa)
1	21,02 ($\pm 1,21$) b
2	19,74 ($\pm 1,70$) b
3	16,47 ($\pm 0,54$) b
4	12,05 ($\pm 0,71$) a
5	9,71 ($\pm 0,49$) a

CV (%)	13,32
--------	-------

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. Desvio padrão entre parênteses. **Legenda:** tratamento 1= Painéis produzidos com 100% de fibra de pinus; tratamento 2= Painéis produzidos com 75% de fibra de pinus+ 25% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 3= Painéis produzidos com 50% de fibra de pinus+ 50% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 4= Painéis produzidos com 25% de fibra de pinus+ 75% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 5= Painéis produzidos com 100% de fibra de retalhos de tecido triturado (RTT). Fonte: Da autora (2026).

Observa-se que os maiores valores de resistência à compressão registrados nos tratamentos T1, T2 e T3 podem estar associados à maior proporção de partículas de pinus, cuja lignina preservada confere integridade estrutural às fibras lignocelulósicas. A lignina desempenha papel fundamental como agente de rigidez, promovendo maior resistência à deformação sob esforços compressivos, uma vez que apresenta módulo de elasticidade na ordem de gigapascals ($\approx 3,3$ a $4,3$ GPa) e comportamento de encruamento sob compressão, característico de polímeros estruturais rígidos (Zhang *et al.*, 2024). Enquanto a celulose possui módulo significativamente superior (≈ 150 GPa) e resistência à tração é de aproximadamente 10 GPa (Kamel, 2007), entretanto, sob compressão, seu desempenho é limitado pela instabilidade das microfibrilas, que tendem a sofrer flambagem (Nadermann *et al.*, 2010).

Desta forma a celulose, apesar do elevado módulo longitudinal, contribui principalmente para resistência à tração, sendo suscetível à instabilidade por *buckling* sob compressão. Essa complementaridade explica $T1-T3 > T4-T5$ (10 MPa). Materiais ricos em celulose apresentam menor resistência à compressão devido à instabilidade (*buckling*) das microfibrilas sob carga (Nadermann *et al.*, 2010).

Essa limitação da celulose sob compressão é corroborada pelos achados de Wang *et al.* (2012), que investigaram a estrutura das paredes celulares e a resistência à flambagem de fibras em bambu moso (*Phyllostachys pubescens*). Os autores observaram que a orientação quase axial das microfibrilas de celulose nas paredes celulares maximiza o módulo de elasticidade longitudinal, enquanto a lignificação aumenta a rigidez transversal. Essa organização estrutural e a heterogeneidade da lignificação, com maior concentração nas camadas externas e nos cantos celulares, contribuem para a alta resistência à flambagem, permitindo que fibras finas mantenham integridade estrutural mesmo sob cargas compressivas elevadas. Assim, nos painéis analisados, a predominância de lignina preservada em T1–T3 atua de forma análoga, reforçando a resistência à compressão, enquanto a exposição relativa da celulose em T4–T5 limita a capacidade de suportar deformação.

3.3.3 Dureza Janka

A Tabela 6 apresenta os valores médios de dureza dos painéis aglomerados em função das proporções de tecido e pinus utilizadas. Observa-se que a incorporação de tecido influenciou significativamente essa propriedade, sendo o maior valor de dureza obtido para o tratamento T2 (25% de tecido e 75% de pinus). Por outro lado, os tratamentos com maiores proporções de tecido (T4 e T5) apresentaram os menores valores de dureza. Esse comportamento sugere que a presença predominante de pinus contribui para maior resistência à penetração, possivelmente devido à maior rigidez estrutural e melhor compactação do material. Em contrapartida, o aumento do teor de tecido pode ter promovido menor coesão interna, reduzindo a dureza dos painéis.

Tabela 6- Valores médios de dureza (MPa) dos painéis aglomerados submetidos a diferentes tratamentos

Tratamento	Dureza (MPa)
1	8,18 ($\pm 0,59$) b
2	9,49 ($\pm 0,19$) c
3	7,62 ($\pm 1,04$) b
4	5,43 ($\pm 0,64$) a
5	6,5 ($\pm 0,15$) a
CV (%)	10,13

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. Desvio padrão entre parenteses. **Legenda:** tratamento 1= Painéis produzidos com 100% de fibra de pinus; tratamento 2= Painéis produzidos com 75% de fibra de pinus+ 25% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 3= Painéis produzidos com 50% de fibra de pinus+ 50% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 4= Painéis produzidos com 25% de fibra de pinus+ 75% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 5= Painéis produzidos com 100% de fibra de retalhos de tecido triturado (RTT). Fonte: Da autora (2026).

A variação da dureza observada entre os tratamentos pode ser explicada, principalmente, pelas diferenças na composição química e na integridade estrutural dos materiais lignocelulósicos utilizados. O pinus, por apresentar maior teor de lignina, tende a conferir maior rigidez e resistência à deformação localizada aos painéis, uma vez que a lignina atua como agente cimentante na parede celular, promovendo coesão entre as microfibrilas e contribuindo para a integridade estrutural. Em contrapartida, os retalhos de tecido triturado (RTT), por serem submetidos a tratamentos químicos, apresentam redução significativa nos teores de lignina e hemicelulose, resultando em uma estrutura enriquecida em celulose.

De acordo com Cosse *et al.* (2023), a remoção desses componentes provoca alterações estruturais relevantes, como aumento da fibrilação, maior rugosidade superficial e formação de

vazios, podendo reduzir a estabilidade mecânica das fibras, uma vez que lignina e hemicelulose atuam como agentes de ligação e conferem rigidez à estrutura lignocelulósica. Embora a maior exposição das microfibrilas de celulose possa favorecer a interação com a matriz, a perda desses componentes estruturais torna o material mais flexível e menos resistente a esforços localizados. Como consequência, há redução da resistência à penetração, refletida na diminuição da dureza dos painéis. Dessa forma, o aumento da proporção de RTT contribui diretamente para a redução da dureza, especialmente nos tratamentos com maior teor desse material, em função da menor rigidez estrutural e da presença de descontinuidades que atuam como pontos de concentração de tensões.

As observações obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) reforçam essa interpretação. As micrografias (Figura 2) evidenciaram que os tratamentos T1 e, principalmente, T2 apresentaram estrutura mais homogênea, maior grau de compactação e menor incidência de vazios e trincas, enquanto os tratamentos com maiores proporções de RTT (T4 e T5) exibiram maior ocorrência de poros e falhas interfaciais. Essas características estruturais corroboram os resultados do ensaio de dureza Janka, indicando que a maior integridade da estrutura interna favorece a resistência à penetração. Resultados semelhantes foram relatados por Li *et al.* (2015), que associaram a redução da dureza à presença de vazios, à qualidade da interface fibra-matriz e ao grau de compactação dos compósitos.

O valor mínimo estipulado para dureza Janka pela Norma ANSI/A 208.1 (1993) é 22,70 MPa desta forma todos os painéis produzidos ficaram abaixo do mínimo estipulado para essa normativa.

3.4 Caracterização térmica e acústica dos painéis

3.4.1 Condutividade térmica

Na Tabela 7 estão contidos os resultados para os ensaios de condutividade térmica nos diferentes tratamentos.

Tabela 7– Médias da condutividade térmica para os painéis nos diferentes tratamentos

Tratamento	Condutividade térmica (W/m.K)
1	0,128 ($\pm 0,00024$) a
2	0,127 ($\pm 0,00256$) a
3	0,125 ($\pm 0,00506$) a
4	0,127 ($\pm 0,00199$) a
5	0,128 ($\pm 0,000571$) a
CV (%)	2,45

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade. Desvio padrão entre parenteses. **Legenda:** tratamento 1= Painéis produzidos com 100% de fibra de pinus; tratamento 2= Painéis produzidos com 75% de fibra de pinus+ 25% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 3= Painéis produzidos com 50% de fibra de pinus+ 50% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 4= Painéis produzidos com 25% de fibra de pinus+ 75% retalhos de tecido triturado (RTT); tratamento 5= Painéis produzidos com 100% de fibra de retalhos de tecido triturado (RTT). Fonte: Da autora (2026).

A Tabela 7 mostra que não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos quanto à condutividade térmica. Assim, a substituição de retalhos de tecido triturado por pinus não alterou significativamente a capacidade dos painéis de conduzir calor. Os valores de condutividade térmica variaram entre 0,125 e 0,128 W/m·K, indicando baixa variação entre os tratamentos. Esse resultado sugere que as diferentes proporções de retalhos de tecido triturado e pinus não exerceram influência significativa na condução térmica dos painéis.

Conforme Adamy *et al.* (2016), o aumento da resistência térmica do material está associado à redução da transferência de calor, favorecendo seu desempenho como isolante térmico.

De acordo com Li *et al.* (2024) e Wang (1988), a condutividade térmica pode ser usada para avaliar o efeito de isolamento térmico de um material, quanto menor a condutividade térmica de um material (<0.25 W/m.K) melhor será o seu efeito de isolamento térmico. Valores de condutividade térmica abaixo deste limite (<0.25 W/m.K) permitem que um material seja classificado como isolante (Zhang *et al.*, 2017). Ao analisar os resultados apresentados na tabela 7, observa-se que os painéis apresentam características de material isolante térmico, pois exibem valores de condutividade térmica inferiores a 2 W/m·K, conforme estabelecido pela NBR 15220 Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). Dessa forma, evidencia-se o potencial de aplicação desses painéis como materiais para isolamento térmico.

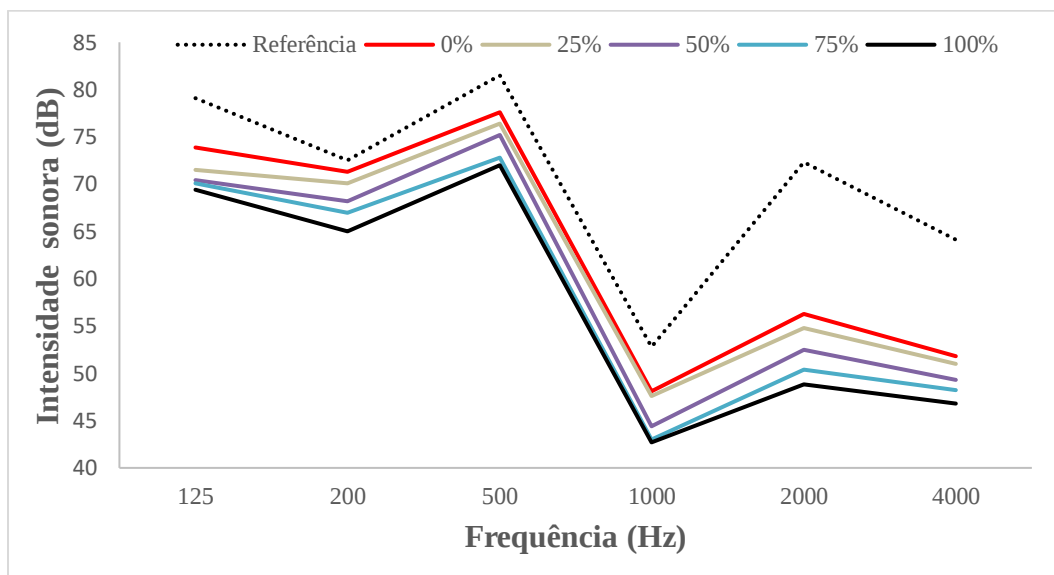
Nesse contexto, todos os painéis avaliados no presente estudo enquadram-se nessa faixa, evidenciando elevada eficiência na redução da transferência de calor. Os baixos valores observados podem ser atribuídos à presença de vazios na estrutura, à natureza lignocelulósica

do reforço e à matriz polimérica, fatores que dificultam a condução térmica. Além disso, a similaridade entre os tratamentos sugere que o comportamento térmico é dominado pela estrutura do painel, e não pelas variações introduzidas nas formulações.

3.4.2 Propriedade acústica

A figura 3 mostra a intensidade sonora (dB) em função da frequência (Hz) para os diferentes painéis produzidos com variações de RTT (tecido) e pinus, conforme os tratamentos T1 a T5.

Figura 3 - Frequência sonora.



Fonte: Da autora (2026).

De maneira geral, observa-se que todos os painéis apresentam comportamento semelhante ao longo das frequências analisadas, com variações na capacidade de atenuação sonora. Esse comportamento é caracterizado por pequenas variações nas baixas frequências (125 a 500 Hz), uma queda acentuada na intensidade sonora em 1000 Hz, seguida de elevação em 2000 Hz e nova redução em 4000 Hz, indicando um padrão consistente entre os tratamentos.

Nas frequências de 125 e 200 Hz, observa-se variação entre os tratamentos, indicando que a proporção de RTT e pinus já exerce influência nessa faixa. Em 500 Hz, os valores tornam-se mais próximos entre si, sugerindo comportamento mais uniforme entre os painéis. Destaca-se que, na frequência de 1000 Hz, todos os painéis apresentaram os menores valores de intensidade sonora, evidenciando maior eficiência na atenuação acústica. Além disso, observa-se que o desempenho acústico é dependente da frequência, com maior eficiência em torno de 1000 Hz, comportamento também verificado no presente estudo (Novais *et al.*, 2021; Pedreño-Rojas *et al.*, 2017).

Em contrapartida, na frequência de 2000 Hz observa-se aumento da intensidade sonora, indicando redução da eficiência de atenuação. Já em 4000 Hz, há uma leve diminuição da intensidade, sugerindo uma discreta recuperação do desempenho acústico. Nessa região, as diferenças entre os tratamentos tornam-se mais evidentes, indicando que a composição do material influencia de forma mais significativa o desempenho acústico em frequências mais elevadas.

O comportamento acústico observado pode ser diretamente relacionado às características microestruturais evidenciadas por MEV. Os tratamentos com maior teor de retalhos de tecido triturado (RTT) apresentaram maior incidência de vazios, poros e descontinuidades estruturais (Figura 2 c, d e e), favorecendo a dissipação da energia acústica por mecanismos de fricção interna e perdas viscosas. Em materiais porosos, essa dissipação ocorre devido ao atrito das moléculas de ar com as paredes dos poros e às perdas viscosas associadas ao escoamento do ar no interior da estrutura (Egab; Mohammad; Wang, 2014). Dessa forma, à medida que a onda sonora se propaga pelo material, sua energia é gradualmente reduzida em função da interação com a estrutura porosa, resultando na atenuação da intensidade sonora medida.

Assim, a maior porosidade dos painéis com elevado teor de RTT contribui para o aumento da atenuação sonora, indicando potencial aplicação como materiais absorvedores acústicos. Por outro lado, painéis com maior proporção de pinus, mais densos e homogêneos, tendem a apresentar menor capacidade de dissipação sonora. Além disso, ao comparar os painéis com a amostra de referência, verifica-se que, em geral, os materiais desenvolvidos apresentam menor intensidade sonora ao longo das frequências analisadas, reforçando seu potencial para aplicação em controle acústico.

4 CONCLUSÃO

A incorporação de retalhos de tecido triturado (RTT) em painéis aglomerados produzidos com partículas de *Pinus oocarpa* e resina poliuretana à base de óleo de mamona mostrou-se tecnicamente viável para aplicações não estruturais. Os resultados evidenciaram que o aumento da proporção de RTT promove alterações na microestrutura dos painéis, caracterizadas por maior porosidade, incidência de vazios e descontinuidades, refletindo em maior absorção de água, redução da rigidez, da resistência mecânica e da dureza Janka.

Embora o aumento do RTT tenha promovido maior absorção de água e inchamento em espessura, os painéis apresentaram baixa condutividade térmica e melhoria no desempenho

acústico, indicando potencial para aplicações em que o conforto térmico e a absorção sonora sejam desejáveis

De modo geral, os resultados demonstram que a incorporação parcial de RTT representa uma alternativa promissora para a produção de painéis sustentáveis, conciliando o aproveitamento de resíduos industriais com o desenvolvimento de materiais de interesse para a construção civil e o setor moveleiro em aplicações não estruturais.

Como perspectiva para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida, visando quantificar os impactos ambientais associados à produção desses compósitos e comparar seu desempenho ambiental com o de painéis convencionais. Adicionalmente, investigações sobre durabilidade, envelhecimento acelerado, resistência biológica, comportamento ao fogo e otimização da interface entre o RTT e a matriz adesiva poderão ampliar o conhecimento sobre o desempenho e as aplicações desses materiais.

REFERÊNCIAS

ADAMY, A. P. A.; ROSA, F. S.; ROSA, L.C. Desempenho térmico de compósitos à base de talos de girassol em componentes de edificações, **Espacios**, v. 37, n. 15, 2016.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1**: Mat formed wood particleboard: specifications. Gaithersburg, 1993.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1-2009**: Particleboard. Washington, DC, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143-14**: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Book of Standards, v. 04.10. Philadelphia, 31p., 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14810-2** Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade: Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14810-3**: Painéis de partículas de média densidade — Determinação das propriedades físicas e mecânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

BORGES, L, S. *et al.* Influência das configurações de empilhamento na caracterização

mecânica de compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta. **Revista Matéria**, v.30, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2025-0385>

CAO, L. *et al.* Porous materials for sound absorption. **Composites Communications**, v. 10, p. 25–35, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2018.05.001>

CHEN, X. *et al.* Circular economy and sustainability of the clothing and textile industry. **Materials Circular Economy**. v.3, n. 12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00026-2>

CISNEROS-LÓPEZ, E. O. *et al.* Effect of agave fiber surface treatment on the properties of polyethylene composites produced by dry-blending and compression molding. **Polymer Composites**, Hoboken, v. 38, n.1, p. 96-104, may 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.23564>

COSSE, R. L. *et al.* The effect of size and delignification on the mechanical properties of polylactic acid (PLA) biocomposites reinforced with wood fibres via extrusion RSC **Sustainability**, v. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3su00039g>

DEVOY, J.E. *et al.* Postconsumer textile waste and disposal: differences by socioeconomic, demographic, and retail factors. **Waste Management**, v.136, p.303–309., 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.009>

EGAB, L.; MOHAMMAD, F.; WANG, X. Acoustical characterisation of porous sound absorbing materials: a review. **International Journal of Vehicle Noise and Vibration**, v. 10, n. 1/2, p.129-149, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJNVN.2014.059634>

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. European Standard **EN 622** – Tableros de fibras – Especificaciones. Parte 5: Requisitos de los tableros de fibras fabricados por proceso seco (MDF). 2006.

FARUK, O. *et al.* Biocomposites reinforced with natural fibers. **Progress in Polymer Science**, Oxford, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, Nov. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

GUIMARÃES, B. M.R. G. *et al.* Bio-based lms/nanopapers of banana tree pseudostem: From lignocellulosic wastes to addedvalue micro/nanomaterials. **Environmental Engineering**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-473285/v1>

GUPTA, R. *et al.* Chapter 10 - Waste management in fashion and textile industry: Recent advances and trends, life-cycle assessment, and circular economy. **Emerging Trends to Approaching Zero Waste**, p. 215–242, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85403-0.00004-9>

ISLAM, M. *et al.* Environmental sustainability of fashion product made from post-consumer waste: Impact across the life cycle. **Sustainability**, v. 17, n.5, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17051917>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10534-2:1998**. Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method. Geneva: ISO, 1998.

IWAKIRI, S. Painéis de madeira reconstituída. Curitiba: FUPEF, 2005, 274 p.

KABIR, M. M.; WANG, H.; LAU, K. T.; CARDONA, F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: an overview. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 7, p. 2883–2892, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>.

KAMEL, S. Nanotechnology and its applications in lignocellulosic composites, a mini review. **eXPRESS Polymer Letter**, n.1 n.9, p.546–575, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2007.78>

KELLY, M. W. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. **USDA**, for. Ser. Gen. Tech. Rep. FPL. Madison, v.10, 66 p., 1977.

KHOO, P. S. *et al.* Sustainable chemically treated lignocellulosic pineapple leaf fibre-reinforced polymer composites: mechanical properties, environmental aspects and applications. **Cellulose**, v. 32, p. 4101–4142, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-025-06519-6>

KUMAR, K.S.; SINGH, I. Sustainable oxalic acid treatment of lignocellulosic fibers for ensuring improved performance of treated fibers based bio PBS composites. **International Journal of Biological Macromolecule**, v.294, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139507>

LI, Y. *et al.* The voids formation mechanisms and their effects on the mechanical properties of flax fiber reinforced epoxy composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 72, p. 40-48, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.029>

LI, Y. *et al.* Optimisation of particle distribution and performance in three-layer tubular particleboards using response surface methodology. **Journal of Building Engineering**, v.82, p.108256, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.108256>

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 2nd ed. São Francisco: M. Freeman, 1993. 689 p.

MEHDIKHANI, M. *et al.* Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. **Journal of Composite Materials**, v.53, n.12, p. 1579-1669, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998318772152>

MENDES, R. F. *et al.* Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 161-170, jan./mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050985088>

NADERMANN, N. *et al.* Buckling of sheared and compressed microfibrils. **Journal Royal Society Interface**, n. 7 v.52, p.1581–1589, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2010.0147>

NÓBREGA, J. V. S. *et al.* Estudo da absorção de água em compósitos com fibras vegetais: uma prática de gestão ambiental. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.9, p.294-310, 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.009.0023>

NOVAIS, R. M. *et al.* Simple and effective route to tailor the thermal, acoustic and

hygrothermal properties of cork-containing waste derived inorganic polymer composites. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102501, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102501>

PAKDEL, E. *et al.* Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 166, 2021. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105340>

PEDREÑO-ROJAS, M. A. *et al.* Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 690–705, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.077>

RAY, D.; ROUT, J. **Thermoset Biocomposites**, Ed. by A.K. Mohanty, M. Misra and L.T. Drzal, Taylor & Francis Group, New York (2005) p. 310–313. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203508206.ch9>

RANGAPPA, S. M. *et al.* Lignocellulosic fiber reinforced composites: Progress, performance, properties, applications, and future perspectives. **Polymer Composite**, v.43, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.26413>

SANTOS, E. B.C. *et al.* Effect of Alkaline and Hot Water Treatments on the Structure and Morphology of Piassava Fibers. **Materials Research**, v.21, 2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0365>

SETTER, C. *et al.* Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. **In: Crops Prod.**, v. 154, p. e112731, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112731>

SHAMSUZZAMAN, M. *et al.* Waste Management in Textile Industry. In: Rahman, M.M., Mashud, M., Rahman, M.M. (eds) **Advanced Technology in Textiles. Textile Science and Clothing Technology**, p.279-299,2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2142-3_10

SHAMSUZZAMAN, Md. *et al.* Fashion Circularity: Potential of Reusing and Recycling Remnant Fabric to Create Sustainable Products, **Sustainability**, v. 17, 2025. DOI:10.3390/su17052010

SRINIVASUL, G.; RAMACHANDRAN, V.; JAYASANKAR, S. Influence of void microstructure on the effective elastic properties of discontinuous fiber-reinforced composites, **Journal of Composite Materials**, v. 49, n. 22, p 2745-2755, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998314554122>

TEODORO, K. B. R. *et al.* Whiskers de fibra de sisal obtidos sob diferentes condições de hidrólise ácida: efeito do tempo e da temperatura de extração. **Polímeros**, São Carlos, v. 21, n.4, p.280 -285, Sep. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000048>

THAKUR, V. *et al* Biopolymers Based Green Composites: Mechanical, Thermal and Physico-chemical Characterization. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 20, p.412 – 421, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-011-0389-y>

VARDHINI, K. J. V. *et al.* Optimisation of alkali treatment of banana fibres on lignin removal. **Indian Journal of Fibre and Textile Research**, New Delhi, v. 41, n.2, p. 156-160, Jun. 2016.

- WANG, B. *et al.* Blockchain-enabled circular supply chain management: A system architecture for fast fashion. **Computers in Industry**, v. 123, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103324>
- WANG, S.H. Construction materials science. **Construction Industry Publisher**, China Beijing, 1988.
- WANG, x. *et al.* Cell wall structure and formation of maturing fibres of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) increase buckling resistance. **Journal Royal Society Interface**, v. 9, n.70: p. 988–996, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0462>
- YANG, H. S. *et al.* Water absorption behavior and mechanical properties of lignocellulosic filler–polyolefin bio-composites. **Composite Structures**, n. 72 p. 429–37, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.01.013>
- YUE, Y. *et al.* Cellulose fibers isolated from energycane bagasse using alkaline and sodium chlorite treatments: Structural, chemical and thermal properties. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.76, p. 355-363, Dec. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.006>
- ZHANG, S. *et al.* Thermal insulation boards from bamboo paper sludge. **Bioresources**, v. 12, n. 1, p. 56-67, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.56-67>
- ZHANG, S. *et al.* Atomistic Simulations of Mechanical Properties of Lignin. **Polymers**, n.16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16243552>