SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOELLY VERA NASCIMENTO

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS DE MUNGUBA (*Pseudobombax munguba*)

Ananindeua, PA

2025

JOELLY VERA NASCIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará - Campus Ananindeua, para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profª. Drª. Verônica Scarpini Candido.

Coorientadora: Msc. Damares da Cruz B. Nascimento

Ananindeua, PA

2025

JOELLY VERA NASCIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Data de aprovação: ___/___/___

Conceito:

Banca Examinadora:

_____

Profª. Drª Verônica Scarpini Candido – FEMat – UFPA – *Campus* Ananindeua

(Orientadora)

_____

Me. Damares da Cruz B. Nascimento – IME

(Coorientadora)

_____

Me. Miriane Alexandrino Pinheiro – Proderna – ITEC

(Membro Interno)

_____

Profª. Drª. Roseane de Lima Silva– FEMat – UFPA - *Campus* Ananindeua

(Membro Interno)

Dedico este trabalho, meu companheiro de Vida Andrey, a minha Aimée, minha mãe Socorro e ao meu Pai Vander (*in memorian)* que em meio a escuridão me deram luz para seguir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e à Virgem, por me derem forças para não desistir, já que foram inúmeras as vezes em que me passou pela cabeça deixar tudo para lá.

Agradeço à minha mãe, Socorro Vera, por sempre, sempre estar ali por mim, me dando forças, me incentivando mesmo quando eu não tinha nenhuma, por me apoiar quando pensei em desistir depois da gestação, por estar sempre me guiando pelos melhores caminhos. Obrigada, Mãe.

Agradeço ao meu pai, Vander Nascimento (in memoriam), mesmo que ele não esteja presente em vida, sempre esteve e está em meus pensamentos, e sempre me lembro dos seus ensinamentos. Obrigada, Pai.

Agradeço ao meu esposo, Andrey Afonso, que, nesses cinco anos de curso, esteve comigo e me ajudou a chegar até aqui. Mesmo depois de sabermos que seríamos pais, pensei em desistir, e ele, com toda sua calma e amor, me incentivou a continuar, mesmo que demorasse, mas eu tinha de voltar. Mesmo com minhas reclamações de todo santo dia, ele me ama incondicionalmente e continua ali por nós, pela nossa família. Obrigada, Amor.

Agradeço também a uma das pessoas mais importantes: minha Mômô, minha Aimée Sophia, pois tudo isso foi por ela e para ela. Tudo que faço agora é pensando no quanto quero que ela veja meu esforço e minha dedicação, que minha ausência durante o dia e a tarde é para conseguir dar o melhor, sempre o melhor. Você é a minha força, mesmo quando eu nem sabia que a tinha, pois foi depois de você que percebi que precisava lutar, lutar por tanta coisa, lutar por um futuro brilhante para mim e para você, e, junto com seu pai, um futuro calmo e sereno para nós. Obrigada, minha Mômô, por ter vindo no melhor momento.

Agradeço também ao meu meio-irmão Lucca Lorenzo, mas conhecido como Lolo, por me apoiar mesmo não sabendo, por toda ajuda, por guardar meus CP’s que deram errado, por sempre conta algo do IC que nem ele sabia o que é, mas perguntava com entusiasmo cada coisa que eu fazia. Obrigada, Lolo.

Agradeço também aos meus familiares: Mãezinha Maria, tio Chico, tio Pereira, tia Iara e Joelma, ao meu primo Gllen, e às minhas primas Aieska, Larissa, Aracely e Gleyciane, por todo apoio

Aos meus amigos e colegas de graduação: Márcia Adelaide, Emily Pinheiro, Marcelo Júnior, Edson Miranda, Paloma Sousa e Manoel Vinícius, por todo apoio e incentivo durante essa graduação. Obrigada por todos os momentos.

À minha orientadora, Verônica Scarpini, por ser um exemplo de profissional para mim, além de sua incansável dedicação à pesquisa. Agradeço por me acolher, acreditar em meu potencial mesmo nos momentos em que duvidei de mim e por compartilhar, com generosidade, todos os ensinamentos que tornaram possível o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada, Professora.

À minha coorientadora, Damares Barbosa, que me ajudou nessa caminhada, mesmo com a distância, com vários puxões de orelha, correções em cima de correções, incentivando a cada volta de revisão, e, quando eu desmotivava, começava a cobrar. Obrigada por todo o conhecimento repassado em relação à escrita científica e ao tratamento de dados. Obrigada por sua amizade e coorientação.

A todos os professores da FEMat, que foram essenciais nesse caminho e contribuíram para minha formação acadêmica.
Ao GPMCOMP e a todos que o integram. Em especial, à Miriane Pinheiro, por ter me ensinado como desfibrar, como moldar, por me apresentar o “mundo” das fibras e por outros momentos que ficaram marcados em minha memória.

À Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, por ter sido meu lar durante esses anos.

A todos, o meu muito obrigada!

Confie no Senhor de todo o coração e não se apoie no seu próprio entendimento. *Reconheça-o* em todos os seus caminhos, e ele endireitará nas suas veredas. (PROVERBIOS 3:5-6)

RESUMO

O crescimento do consumo de recursos naturais, como água e energia, associado ao aumento na geração de resíduos incluindo gases de efeito estufa, efluentes e compostos químicos tem intensificado as preocupações relacionadas à sustentabilidade. Diante disto, as fibras naturais da Amazônia que são provenientes de plantas e resíduos agrícolas, sobressaem por serem renováveis. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho das fibras e dos compósitos com fração volumétrica 10,20 e 30% de fibras de munguba (*Pseudobombax munguba*), que são oriundas da região amazônica, em uma matriz polimérica poliéster, com o intuito de investigar suas propriedades mecânicas e características físicas, químicas, morfológicas, por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e grupos funcionais por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e térmicas por meio de Termogravimetria (TGA). O FTIR revelou grupos funcionais típicos de celulose, hemicelulose e lignina, confirmando a composição lignocelulósica. A TGA indicou estabilidade térmica moderada até 200 °C, e o MEV mostrou que fibras mais finas apresentaram superfícies rugosas favoráveis à ancoragem mecânica, enquanto as mais grossas exibiram baixa rugosidade. O ensaio de tração das fibras revelou valores máximos de resistência de 115,96 MPa e módulo de Young de 1,57 GPa, demonstrando relação inversa entre diâmetro e resistência. Nos compósitos, a matriz pura apresentou maior resistência à tração, mais com a adição de 10% de fibra houve redução significativa; já em 20% e 30% ocorreram leve recuperação da resistência e aumento inicial do módulo de Young. Nos ensaios de resistência à flexão em compósitos, observou-se aumento no módulo com 20% de fibra, atingindo 81,92 MPa. A análise de variância (ANOVA) para flexão indicou diferenças significativas no módulo de Young, evidenciando o efeito moderado da fibra no comportamento mecânico. Assim, conclui-se que a fibra de Munguba apresenta potencial promissor como reforço em compósitos poliméricos, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis e a valorização dos recursos naturais da Amazônia.

Palavra(s)-chave: Compósitos poliméricos; Fibra de Munguba; Propriedades mecânicas

ABSTRACT

The growth in the consumption of natural resources, such as water and energy, associated with the increase in waste generationg including greenhouse gases, effluents, and chemical compounds has intensified concerns related to sustainability. In this context, natural fibers from the Amazon, which are derived from plants and agricultural residues, stand out for being renewable. Therefore, the present work aims to evaluate the performance of fibers and composites with 10, 20, and 30% volume fractions of munguba fibers (Pseudobombax munguba), originating from the Amazon region, in a polyester polymer matrix, in order to investigate their mechanical properties and their physical, chemical, and morphological characteristics by Scanning Electron Microscopy (SEM), functional groups by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and thermal behavior by Thermogravimetric Analysis (TGA). FTIR revealed functional groups typical of cellulose, hemicellulose, and lignin, confirming the lignocellulosic composition. TGA indicated moderate thermal stability up to 200 °C, and SEM showed that finer fibers exhibited rough surfaces favorable to mechanical anchoring, whereas thicker ones displayed low roughness. Tensile tests of the fibers revealed maximum strength values of 115.96 MPa and a Young's modulus of 1.57 GPa, demonstrating an inverse relationship between diameter and strength. In the composites, the neat matrix exhibited the highest tensile strength; however, with the addition of 10% fiber, a significant reduction was observed, while at 20% and 30% there was a slight recovery in strength and an initial increase in Young's modulus. In the flexural strength tests of the composites, an increase in the modulus was observed with 20% fiber, reaching 81.92 MPa. Analysis of variance (ANOVA) for flexural tests indicated significant differences in Young's modulus, evidencing the moderate effect of the fiber on the mechanical behavior. Thus, it is concluded that munguba fiber shows promising potential as reinforcement in polymer composites, contributing to the development of sustainable materials and the valorization of the natural resources of the Amazon.

Keywords: Polymeric composites; Munguba fiber; Mechanical properties

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificação de compósitos com base no reforço e matriz ---------- 19
Figura 2: Tipos de reforços de materiais compósitos ---------- 20
Figura 3: Esquema representativo entre (a) Polímero termoplástico (b) Polímero termofixos ---------- 23
Figura 4a: Reação química do glicol e diácido para formar um polímero de poliéster ---------- 25
Figura 5: Classificação das fibras sintéticas ---------- 27
Figura 6: Classificação das Fibras naturais ---------- 29
Figura 7: Estrutura da celulose ---------- 30
Figura 8: Estrutura da Hemicelulose ---------- 31
Figura 9: Estrutura da Lignina---------- 32
Figura 10 a) Organização estrutural das FLs e (b) Esquema de uma parede celular ---------- 33
Figura 11: Árvore de Munguba---------- 35
Figura 12: a) Fruto da arvore de munguba (b) Fruto de Pseudobombax munguba ---------- 35
Figura 13: Figura 13: (a) Casca da munguba (b) Poliester (c) MEK---------- 40
Figura 14: Microscópio Óptico ---------- 41
Figura 15:Dimensões em milímetros de corpos de prova pela norma ASTM D638 para tração.---------- 44
Figura 16: Dimensões em milímetros de corpos de prova pela norma ASTM D790 para flexão. ---------- 45
Figura 17: (a) Ensaio de tração; (b) Ensaio de flexão ---------- 46
Figura 18: (a) Distribuição da frequência das fibras por intervalo de diâmetro e (b) Relação de densidade por Intervalo de diâmetro da fibra ---------- 50
Figura 19: FTIR da Fibra de Munguba---------- 51
Figura 20: Curva termogravimétrica da Fibra de Munguba ---------- 52
Figura 21: Morfologia superficial MEV da fibra de Munguba (a) seção transversal da fibra fina (b) seção transversal da fibra média e (c) seção longitudinal da fibra grossa ---------- 54

Figura 22: Aspecto visual de tração da fibra ---------- 55
Figura 23: (a) Gráfico de resistência a tração em relação ao intervalo de diâmetro e (b) gráfico de modulo de Young x deformação em relação ao intervalo de diâmetro. ---------- 56
Figura 24: FTIR obtido para os compósitos reforçados com fibra de munguba -- 60
Figura 25: Aspecto macroscópico de corpos de prova de tração de diferentes porcentagens após serem fraturados---------- 61
Figura 26: Gráfico de Resistencia à tração x Composição---------- 62
Figura 27: Gráfico de fração volumétrica, modulo de Young e Deformação------ 63
Figura 28: Aspecto macroscópico de corpos de prova de flexão de diferentes porcentagens após serem fraturados---------- 67
Figura 29: Gráfico de Resistencia à flexão x Composição ---------- 68
Figura 30:Gráfico de Modulo de Young x Deformação x Composição ---------- 69
Figura 31:Morfologia da superfície do MEV do Compósito da Fibra de Munguba (a) Compósito de 0%; (b) Compósito de 10%; (c) Compósito de 20% e (d) Compósito de 30%. ---------- 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades principais das matrizes poliméricas.....23
Tabela 2: Vantagens e desvantagens das resinas 23
Tabela 3: Características mecânicas de fibras naturais e sinteticas 26
Tabela 4: Comparação da fibra sintética (vidro) e a fibra natural 28
Tabela 5: Composição bioquímicas de fibras lignocelulósicas. 29
Tabela 6: Corpos de provas produzidos.....44
Tabela 7: Parâmetros de ANOVA.....47
Tabela 8: Resultados das propriedades em tração das fibras de Munguba.....56
Tabela 9: Análise à Tração da Fibra.....58
Tabela 10: Teste Tukey para resistência à tração, módulo de Young e deformação 59
Tabela 11: Valores para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação para compósitos de matriz poliester reforçados com frações volumétricas de fibras de munguba. 64
Tabela 12:Análise estatística à tração.....65
Tabela 13: Teste Tukey para resistência à tração, módulo de Young e deformação 66
Tabela 14: Valores para resistência à flexão e módulo de elasticidade para compósitos de matriz epóxi reforçados com frações volumétricas de fibras de munguba 68
Tabela 15: Análise estatística à flexão 72
Tabela 16: Teste Tukey para resistência à flexão, módulo de Young e deformação. 73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO ---------- 15

1.1. Justificativa ---------- 17

1.2. Objetivo geral ---------- 17

1.2.1. Objetivo específico ---------- 17

2 Revisão bibliográfica---------- 19

2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS ---------- 19

2.2. RESINAS POLIMÉRICAS ---------- 22

2.2.1. Resina Poliéster ---------- 24

2.3. Reforços fibrosos em matriz polimérica ---------- 26

2.3.1. Fibras Lignocelulósicas---------- 29

2.3.2 Fibra de Munguba ---------- 34

2.4. Materiais compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas ---------- 36

2.5. A Sustentabilidade na Aplicação de Fibras Naturais em Compósitos Poliméricos ---------- 39

3 MATERIAIS E MÉTODOS---------- 40

3.1 MATERIAIS---------- 40

3.1.1. Beneficiamento da matéria-prima ---------- 40

3.2. MÉTODOS ---------- 41

3.2.1 Caracterização física---------- 41

3.2.1.1 Diâmetro fibrilar ---------- 41

3.2.1.2 Densidade geométrica ---------- 41

3.2.2 Espectroscopia de Infravermelho com Transformação de Fourier (FTIR) ---------- 42

3.2.3 Análise Termogravimétrica (TG/DTG) ---------- 42

3.2.4 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)---------- 42

3.2.5 Ensaio de Tração das Fibras Isoladas ---------- 43

3.2.6 Fabricação de compósitos ---------- 43

3.2.6.1. Caracterização mecânica dos compósitos.---------- 44

3.2.7 Análise estatística ---------- 47

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES ---------- 50

4.1. CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL DA FIBRA DE MUNGUBA ---------- 50

4.2. ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) DA FIBRA DE MUNGUBA ---------- 51

4.3. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG/DTG) DA FIBRA DE MUNGUBA 52

4.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DA FIBRA DE MUNGUBA---------- 54

4.5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA FIBRA DE MUNGUBA ---------- 55

4.5.1. Resistencia à tração---------- 55

4.6.1. Análise estatística tração da fibra de munguba ---------- 58

4.7. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS ---------- 60

4.7.1. Análise de FTIR do Compósito da Fibra de Munguba ---------- 60

4.7.2. Propriedades em Tração para os Compósitos ---------- 61

4.7.3.1. Análise estatística para propriedades de tração dos compósitos------ 65

4.7.4. Propriedades em Flexão para os Compósitos ---------- 66

4.7.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em compósitos---------- 70

4.7.6.1. Análise estatística à flexão para compósitos---------- 72

5. CONCLUSÃO ---------- 75

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS---------- 76

7. REFERÊNCIAS ---------- 77

1 INTRODUÇÃO

O aumento no consumo de recursos como água e energia, aliado ao crescimento dos fluxos de resíduos, incluindo gases de efeito estufa, efluentes e compostos químicos, tem intensificado as preocupações quanto à sustentabilidade. Além disso, os esforços em prol de práticas mais sustentáveis são impulsionados pela implementação de novas regulamentações e políticas em âmbito nacional e internacional (Elser,2024). Essa crescente conscientização ambiental, voltada à sustentabilidade dos produtos manufaturados, tem impulsionado o desenvolvimento de materiais mais ecológicos, priorizando o uso de matérias-primas renováveis (Kamarudin et al., 2022).

Os materiais compósitos apresentam essa capacidade de combinar dois ou mais materiais distintos, nos quais um atua como fase de reforço e o outro como matriz (Abdollahiparsa *et al*., 2023). Além disso, esses materiais apresentam vantagens significativas, como uma alta resistência mecânica, leveza, durabilidade, podendo ser utilizada nos setores da construção civil, automobilístico e aeroespacial. Contribuem ainda para a mitigação dos impactos ambientais, por meio da redução da pegada de carbono, do incentivo à reciclagem e à reutilização de materiais, do aumento da eficiência no uso de recursos e da incorporação de reforços provenientes de fontes naturais (Cazan, 2022; Zhang, *et al*., 2020).

Considerando os princípios da sustentabilidade, os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais despertam amplo interesse devido ao seu potencial ecológico e às suas propriedades favoráveis ao desenvolvimento de materiais sustentáveis (Prasad *et al.,*2024). Assim, as fibras naturais destacam-se por sua versatilidade e ampla disponibilidade, podendo ser extraídas de diversas plantas, árvores e resíduos agrícolas (Veigas; Najimi; Shafei, 2021). Por serem fontes renováveis e apresentarem boas propriedades mecânicas, vêm sendo aplicadas como reforços em substituição a materiais derivados do petróleo e fibras sintéticas (Lotfi et al., 2021).

A Amazônia dispõe de uma ampla diversidade de espécies vegetais das quais podem ser extraídas fibras lignocelulósicas naturais (FLNs), que são constituintes de uma fonte promissora de materiais renováveis (da Silveira *et al,*2024). As FLNs apresentam estruturas formadas por grupos hidroxilas que, em contato com a umidade,

tornam-se mais polares e hidrofílicas (Sarker et al., 2018; Costa et al., 2019; Filho et al., 2020; Nascimento,2025). Em relação à resistência da fibra, observa-se que o teor de celulose exerce influência significativa sobre a resistência à tração e o módulo de Young. Em contrapartida, a lignina apresenta efeito inverso nesses parâmetros mecânicos. Já a hemicelulose, a pectina e a cera, de forma semelhante à celulose, também contribuem para o comportamento do módulo de Young específico (Farias *et al.,*2017; Karimah *et al*.,2021)

Diante dessa perspectiva, no Brasil, a região Amazônica por ser uma região de clima tropical, possui uma diversidade de plantas propicias ao uso no desenvolvimento de novos compósitos como é o caso da fibra de Munguba (*Pseudobombax munguba*). (Lopes *et al.,*2015). A Munguba é uma espécie de árvore da família Malvaceae sensu latu, subgrupo das famílias Grewioideae (Menicucci, 2007). As fibras da Munguba (*Pseudobombax munguba*), são nativas da região amazônica tendo como espécie de característica de florestas inundáveis em região de várzea na Amazônia (Flora do Brasil,2025). A fibra da Munguba pode ser utilizada pelas populações tradicionais das regiões amazônicas em diversas aplicações cotidianas. Entre seus usos mais comuns estão a confecção de cordas, cestos, redes, utensílios de atividades de pesca e caça, além de objetos artesanais (Lopes *et al.,* 2015).

E em razão do crescente enfoque na sustentabilidade, torna-se necessária a realização de pesquisas básicas e aplicadas, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) destacando-se a ODS 9, que promove o desenvolvimento de soluções ecológicas e sustentáveis na indústria, a ODS 12 por desenvolver materiais com consumo de matérias-primas responsável e a ODS 13, que representam a utilização de fibras naturais sustentáveis, reduzindo a dependência de matérias-primas sintéticas, que são estabelecidos pela ONU, que tornaram-se uma alternativa de grande potencial para o controle e a mitigação dessas problemáticas (Kamarudin *et al*., 2022).

Dessa maneira, o presente estudo tem como objetivo caracterizar a fibra de munguba e investigar seu potencial de aplicação como reforço em compósitos de matriz polimérica à base de poliéster.

1.1. Justificativa

O desenvolvimento deste trabalho justifica-se pela crescente demanda por novos materiais sustentáveis, com destaque para os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais, que apresentam potencial para contribuir de forma significativa tanto no avanço técnico-científico quanto no âmbito econômico.

A escolha da fibra de munguba como reforço fundamenta-se em sua ampla disponibilidade na região Amazônica, aliada ao fato de ser um recurso de origem natural que não gera impactos ambientais relevantes. Assim, a utilização dessa fibra configura-se como uma alternativa estratégica para substituir modelos industriais convencionais, promovendo um sistema de produção mais econômico, sustentável e alinhado a ODS 9,12 e 13.

Nesse contexto, a fibra de munguba revela-se promissora para aplicação como reforço em compósitos poliméricos, visto que reúne características como sustentabilidade, biodegradabilidade e propriedades mecânicas que podem ser exploradas no desenvolvimento de novos materiais bifásicos.

Sob a ótica científica, este trabalho justifica-se, ainda, pela necessidade de compreender estruturalmente essa fibra natural, avaliando por meio de diferentes caracterizações e ensaios sua influência e viabilidade de utilização em matrizes poliméricas.

1.2. Objetivo geral

Investigar o potencial das fibras de munguba como reforço em compósitos de matriz poliéster, por meio da avaliação integrada de suas propriedades mecânicas, químicas, térmicas e morfológicas, como reforço em compósitos de matriz poliéster.

1.2.1. Objetivo específico

- Analisar as características físicas, químicas e as morfológicas, das fibras de Munguba por meio Densidade da Fibra, por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e grupos funcionais por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) pela das fibras de Munguba;
- Analisar a estabilidade térmica por meio de Termogravimetria (TGA);
- Avaliar a resistência mecânica por ensaio de tração da fibra isolada de Munguba;

- Investigar as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos com frações volumétricas de 0,10,20 e 30% por meio de ensaios de tração e flexão;
- MEV do aspecto da fratura dos materiais compósitos produzidos;
- Realizar análise estatística dos resultados mecânicos de tração e flexão para validar a influência do reforço com fibras de Munguba nas propriedades dos compósitos.

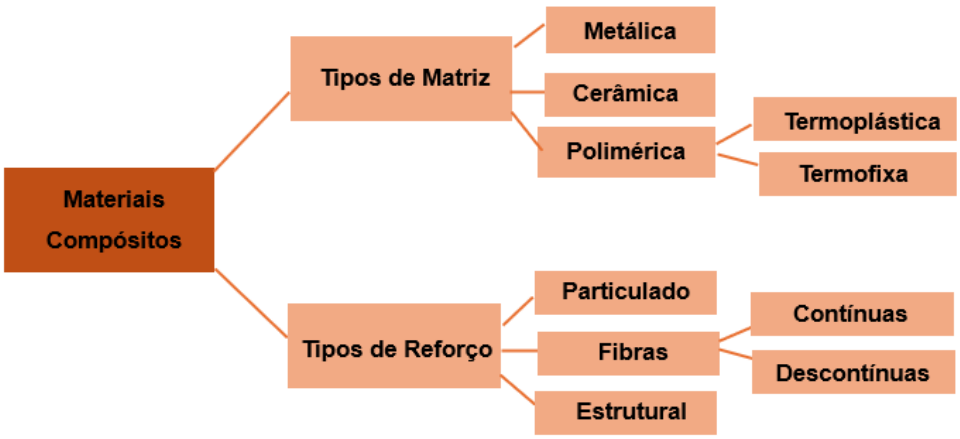
2 Revisão bibliográfica

2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material compósito consiste na união de dois ou mais materiais com características químicas ou físicas distintas, cuja combinação resulta em propriedades e desempenhos superiores aos que cada componente poderia oferecer individualmente (Brezas *et al*., 2024). Em geral, um dos constituintes atua como matriz, responsável por manter a forma obtida durante a fabricação e por transferir as forças aplicadas ao elemento de reforço (Brezas *et al*., 2024). De acordo com Aisyah *et al*., (2021), os materiais compósitos, destacam-se em relação aos materiais convencionais, pois apresentam um menor peso, uma elevada resistência, uma alta durabilidade frente à fadiga e facilidade de instalação. Diante disso, essas propriedades são amplamente empregadas na fabricação de estruturas aeronáuticas, dispositivos e invólucros eletrônicos, torres de transmissão, equipamentos médicos, veículos espaciais e em diversas aplicações na construção civil.

A ideia fundamental é combinar materiais diferentes de modo a projetar um novo material que tenha uma combinação de propriedades aprimoradas ou mais relevantes em comparação às dos componentes individuais (Aisyah *et al*., 2021), como apresentado na Figura 1.

Figura 1: Classificação de compósitos com base no reforço e matriz



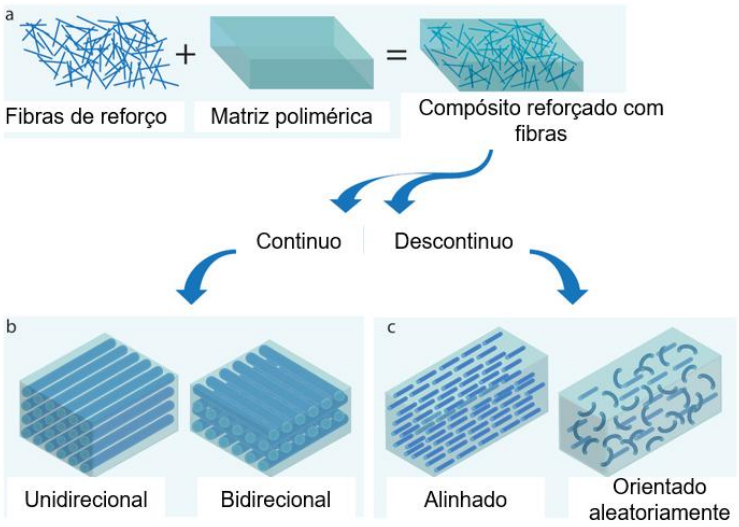
Fonte: Adaptado de Kumar, 2020

A matriz tem a função de manter o reforço posicionado e garantir a integridade estrutural do material. De modo geral, os reforços influenciam diretamente nas

propriedades mecânicas, físicas e químicas do compósito, bem como no comportamento de outros constituintes incorporados à matriz. Uma ampla variedade de propriedades pode ser obtida por meio da combinação adequada entre matriz e reforço, de forma a atender aos requisitos específicos de desempenho. O tipo de material empregado determina tanto o processo de fabricação quanto as características finais do compósito (Rajak *et al*., 2019)

De acordo com, Rajak *et al*., (2019) os reforços podem ser classificados em duas categorias principais: particulados, que consistem em partículas de grandes dimensões capazes de restringir o movimento da matriz ou, quando dispersos, limitar a deformação plástica; e fibrosos, que incluem fibras contínuas e alinhadas (longas), curtas e aleatórias, além das estruturais, utilizadas na forma de laminados ou painéis sanduíche, como pode ser observado na figura 2.

Figura 2: Tipos de reforços de materiais compósitos



Fonte: Maiti *et al.,* 2022.

As fibras, sejam de origem natural ou sintética, têm sido amplamente empregadas em diversos setores, como construção civil, engenharia mecânica, indústria automotiva, aeroespacial, biomédica e naval. As estruturas compósitas têm se destacado por promoverem melhorias significativas na resistência mecânica e na rigidez dos materiais, além de possibilitarem uma expressiva redução de peso (Wondmagegnehu, 2023). Como os materiais compósitos são empregados para uma ampla variedade de aplicações em campos importantes, muitos pesquisadores começaram a desenvolver vários tipos de técnicas avançadas de fabricação para

aumentar a produtividade e a eficiência (Rajak *et al.,* 2019). Depois de serem engenheirados, resultam em materiais com desempenho superior aos dos componentes individuais (Akram *et al.,* 2023).

Os compósitos de matriz metálica (CMM) são materiais apresentam propriedades mecânicas superiores, destacando-se pela elevada rigidez, alta resistência ao cisalhamento, à compressão e à temperatura. Além disso, possuem baixa absorção de umidade, são retardantes de chama, exibem altos coeficientes de condutividade elétrica e térmica e demonstram resistência à radiação. Entretanto, apesar de suas inúmeras vantagens, apresentam custo elevado e ainda se encontram em estágio de desenvolvimento (Alovsat *et al.,* 2024).

Os Compósitos de matriz cerâmica (CMC) são classificados como materiais compósitos e cerâmicas técnicas, em que sua estrutura é composta por fibras cerâmicas incorporadas a uma matriz cerâmica, resultando em um material reforçado com fibras. Embora os materiais cerâmicos apresentem natureza frágil, os CMC demonstram maior resistência em comparação aos seus constituintes individuais (Karadimas e Salonitis, 2024)

Materiais compósitos de matriz polimérica (CMP) são divididos em três grupos: termofixos, termoplásticos e elastômero. As resinas de poliéster e epóxi são mais utilizadas do que outras matrizes poliméricas mais empregadas entre o grupo dos termofixos. Quanto aos reforços, utilizam-se fibras de vidro, kevlar, boro e carbono. Os métodos de produção comumente utilizados na produção de compósitos de matriz polimérica são: fiação manual, enrolamento de fio, pultrusão, técnica de fluxo de líquido, reação reforçada, moldagem por injeção e métodos de extrusão. Materiais compósitos de matriz polimérica são utilizados no setor marítimo devido à sua resistência à corrosão e nos setores automotivo, de transporte e esportivo devido à sua leveza (Alovsat, Tanriverdiyev 2024).

Os compósitos termofixos são caracterizados por elevada resistência e rigidez, além de boa estabilidade ao desgaste; contudo, apresentam baixa ductilidade e reduzida resistência ao impacto, não permitindo sua remoldagem após a cura. Em contrapartida, os compósitos termoplásticos são mais dúcteis, menos frágeis e exibem excelente resistência ao impacto; entretanto, quando comparados aos termofixos, apresentam menor resistência à fluência. A principal vantagem dos materiais

termoplásticos reside no fato de poderem ser reutilizados e reciclados (Alovsat, Tanriverdiyev 2024).

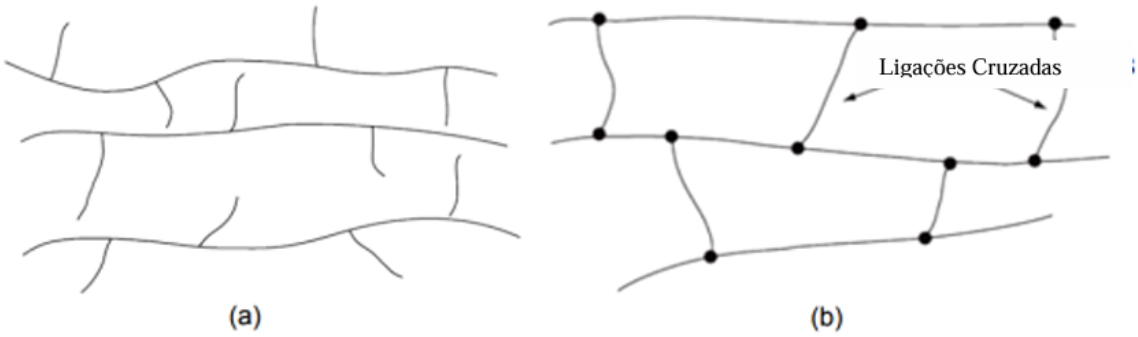
2.2. RESINAS POLIMÉRICAS

Segundo Elfaleh *et al*., (2023), um polímero é uma grande molécula composta de monômeros (ou unidades monoméricas) ligados por ligações covalentes. O grau de polimerização refere-se ao número de unidades monoméricas que compõem uma macromolécula. Os polímeros podem ser de origem natural (animal ou vegetal) ou sintética. Podem classificados em duas categorias: termofixos e termoplásticos que são as matrizes mais utilizadas para preparar compósitos poliméricos (Thimmegowda *et al.,* 2025)

Os materiais termoplásticos consistem em cadeias poliméricas lineares ou ramificadas. Quando energia térmica suficiente é fornecida, os polímeros termoplásticos fundem e as cadeias conseguem se difundir. Assim, quando aquecidos acima de um determinado nível de temperatura, os polímeros termoplásticos se comportam como um líquido viscoelástico e fluem. Quando resfriados, o material se solidifica novamente. Esse fato permite as opções típicas de processamento contínuo "plástico" que tornaram os (termoplásticos) os materiais mais populares para a produção rápida de bens de consumo de diversos formatos e dimensões, como demostrado na figura 3 (a) (Winne, Leibler & Du Prez, 2019). Os termofixos são bem conhecidos por sua singularidade exclusiva de criar ligações tridimensionais após a cura, e apresentam boas propriedades mecânicas, estabilidade térmica, resistência à fluência e biodegradabilidade aprimoradas, como demonstrado na figura 3 (b) (Atmakuri *et al.,* 2020).

Diante disto os polímeros termofixos apresentam: Epóxi, baquelite, resina fenólica e poliéster comumente usados para fabricar compósitos poliméricos e os termoplásticos usados incluem: éster vinílico, polipropileno (PP), poliéster insaturado (PI), polipropileno de baixa densidade (PBD) (Thimmegowda *et al.,* 2025).

Figura 3: Esquema representativo entre (a) Polímero termoplástico (b) Polímero termofixos



Fonte: Cavalcanti,2022

A preferência por essas resinas se dá por suas características típicas em suas propriedades, como pode ser observado na Tabela 1, em que as propriedades físicas e mecânicas fazem com que elas sejam amplamente utilizadas em compósitos (Maiti *et al.*, 2022).

Tabela 1: Propriedades principais das matrizes poliméricas

Resinas	**Densidade(g/cm³)**	**Resistencia à Tração (MPa)**	**Modulo de Young (GPa)**
Poliéster Insaturado	1,2-1,5	40-90	2,0-4,5
Epóxi	1,1-1,4	28-100	3,0-6,0
Resina Fenólica	1.3	35-62	2,8-4,8

Fonte: Maiti *et al.*, 2022.

As resinas poliméricas utilizadas como epóxi, poliéster e fenólicas, apresentam vantagens e desvantagens como mostrado na Tabela 2, nos quais apresentam excelente estabilidade dimensional e elevada resistência a altas temperaturas, mantendo sua integridade estrutural. Além disso, caracterizam-se por baixa absorção de água, alto módulo de elasticidade, elevada resistência mecânica e boa resistência química (Maiti *et al.*, 2022).

Tabela 2: Vantagens e desvantagens das resinas

Tipo de Resina	**Vantagem**	**Desvantagem**

Resina Epóxi	Alta resistência à água Alta resistência térmica e mecânica propriedades; Baixo tempo de cura Durabilidade.	Difícil de processar Endurecedor de amina corrosivo; Mais caro que o éster vinílico. Fragilidade Sensibilidade à umidade Dificuldade de reciclagem
Resina Poliéster	Menor custo; Fácil de usa.	Propriedades mecânicas moderadas; Enorme contração de cura Altas emissões de gases.
Fenólico	Alta resistência ao fogo.	Difícil de desenvolver.

Fonte: Atmakuri *et al.,* 2020.

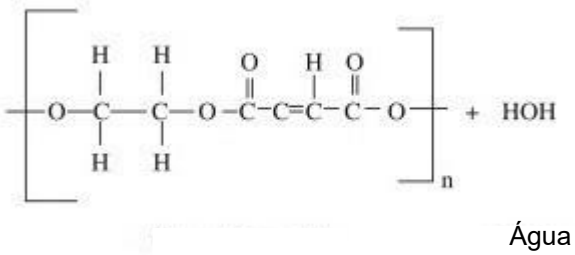
A resina fenólica, por exemplo, mantém seu interesse industrial e comercial um século após sua introdução devido às suas características apropriadas, são amplamente utilizadas na fabricação de produtos de madeira, plásticos moldados e componentes aeroespaciais. A resina epóxi constituem um dos sistemas termoendurecíveis mais funcionais, podendo fornecer várias propriedades dependendo dos agentes de cura e proporções, ciclos de cura e aditivos adicionados durante sua produção, são o primeiro ou o segundo sistema de resina comum na indústria aeroespacial. Já a resina poliéster é um dos sistemas de resina mais econômicos utilizados em aplicações de engenharia, particularmente nas indústrias marítima e automotiva, utilizadas como matriz para compósitos reforçados com fibras em uma ampla gama de aplicações de engenharia, como construção, automotiva, marítima, elétrica, decorativa e indústria aeroespacial. Apresentam um equilíbrio certo de propriedades de resistência mecânica, térmica, elétrica e química, fácil processabilidade, baixa densidade e baixo custo (Bahrami; Abenojar; Martínez, 2020).

2.2.1. Resina Poliéster

As resinas poliméricas do tipo poliéster são materiais sintético insaturados obtidos a partir da reação entre ácidos orgânicos dibásicos e álcoois poliídricos. A formação desses polímeros ocorre por meio de um processo de policondensação ou polimerização em etapas, no qual os reagentes reagem quimicamente para originar

intermediários que interajam entre si, resultando na formação da resina de poliéster. A sua estrutura e formada por ligações duplas insaturadas que são transformadas quimicamente em saturadas (ligações simples), à medida que o polímero aumenta seu peso molecular na primeira etapa, como mostra a figura 4 (a) (Greene, 2021).

Figura 4a: Reação química do glicol e diácido para formar um polímero de poliéster



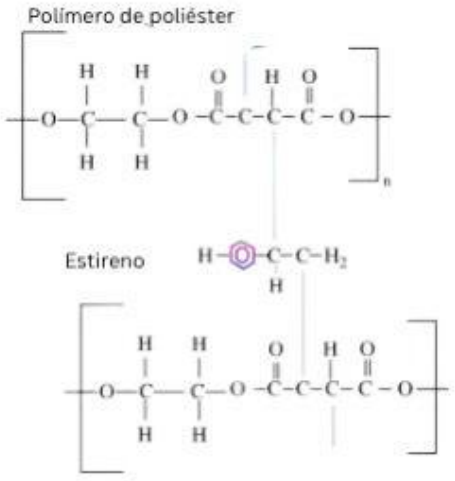
Água

Polímero de Poliéster

Fonte: Greene, 2021

A resina de poliéster passa pela reticulação na segunda etapa do processo de polimerização. Nesta fase, o calor ou a radiação podem iniciar a reação, na qual as ligações insaturadas do poliéster se rompem pela ação de um peróxido e reagem com o monômero de estireno, formando um polímero de poliéster reticulado. Trata-se de uma polimerização por adição, que não gera subprodutos. A reticulação ocorre com estireno e resina de poliéster, geralmente em moldes aquecidos. Para iniciar a reação, utiliza-se um catalisador, podendo ser adicionado um acelerador para aumentar a velocidade do processo ou um inibidor para interromper a reação de reticulação, como mostra a figura 4(b) (Greene, 2021).

Figura 4b: Reação química do poliéster e do estireno para formar um polímero reticulado



Fonte: Greene, 2021

2.3. Reforços fibrosos em matriz polimérica

O uso das fibras como reforços em matrizes poliméricas, tem atraído um interesse significativo, pois apresentam uma maior resistência específica e um módulo, além da leveza e bom comportamento mecânico. No entanto, as fibras podem ser de origem natural ou sintética. De acordo com (Rajak *et al.,* 2019) Nas fibras sintéticas, a resistência e a rigidez costumam ser significativamente superiores às da matriz, o que as torna elementos fundamentais de suporte de carga dentro da estrutura do compósito, já as fibras naturais (Maiti *et al.*, 2022), apresentam-se como materiais altamente promissores para a produção de compósitos sustentáveis, em razão de sua ampla disponibilidade, baixo custo e leveza, aliados a boas propriedades mecânicas, elevada resistência específica, caráter não abrasivo, natureza biodegradável e compatibilidade ambiental, a tabela 3 mostra as diferenças entre os reforços.

Tabela 3: Características mecânicas de fibras naturais e sintéticas

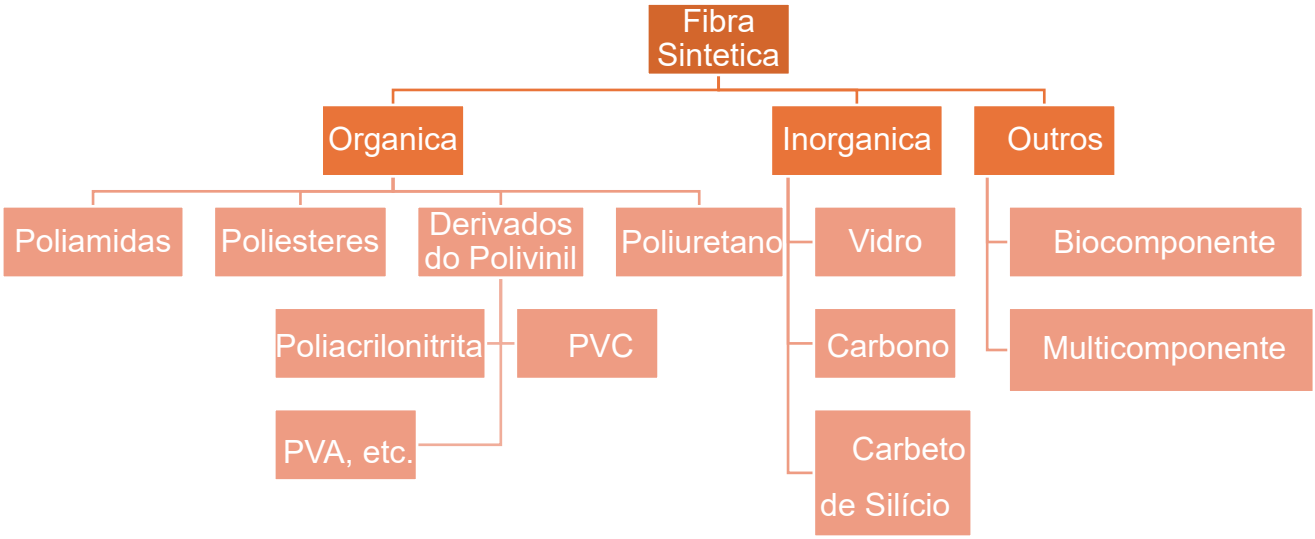
	Tipos de Fibras	**Densidade (g/cm³)**	**Resistência à Tração (MPa)**	**Modulo de Young (GPa)**
Sintéticas	Vidro	2,5	4570	86
	Aramida	1,4	3000-3150	63-70
	Carbono	1,4	4000	23-240

	Kevlar	1,4	3000	
Naturais	Banana	1,35	350-980	12-33,8
	Abacaxi	0,8-1,6	170-1672	60-82
	Fibra de coco	1,1-1,6	106-593	1,27-6
	Sisal	1,3-1,5	80-840	9-38

Fonte: Elfaleh *et al.,* 2023

As fibras sintéticas podem ser classificadas, de maneira geral, em três categorias principais: fibras orgânicas, fibras inorgânicas e uma terceira categoria denominada outras, sendo estas subdivididas conforme sua origem, como demostrado no esquema abaixo figura 5 (Rajak *et al.,* 2019).

Figura 5: Classificação das fibras sintéticas



Fonte: Adaptado de Rajak *et al.,* 2022

As fibras artificiais obtidas por síntese química são denominadas fibras sintéticas e podem ser classificadas em orgânicas ou inorgânicas, conforme a natureza de sua composição. O processo de produção das fibras sintéticas são feitos a partir de quatro etapas: a polimerização, onde o material passa por um processamento de filamento para que haja o processo das fibras sintéticas; Fiação, onde o material passa por fieiras para formar as fibras continuas; Fios de filamento

continuo, em que há uma necessidade de obter fibras com comprimentos limitados, onde elas são cortadas gerando assim as fibras descontinuas, e por fim o armazenamento das fibras, em que há um processo de velagem, no qual são organizadas em mantas ou feixes, sendo posteriormente comercializadas (Rajak *et al.,* 2019).

As fibras sintéticas apresentam diversas limitações, como a não biodegradabilidade, os riscos potenciais à saúde humana, a emissão de dióxido de carbono durante a queima e as dificuldades associadas ao descarte ambientalmente adequado. Diante desses desafios, as fibras naturais têm sido amplamente estudadas e empregadas na fabricação de compósitos, configurando-se como uma alternativa mais sustentável e ecologicamente viável (Thimmegowda *et al*., 2025). Nesse contexto, os compósitos de fibras naturais demonstram elevado potencial como substitutos aos materiais convencionais, por serem econômicos, leves e biodegradáveis. Além disso, compreender o comportamento e a morfologia dessas fibras mostra-se fundamental para promover avanços significativos em suas propriedades e desempenho (Zaini *et al.,* 2020), a Tabela 4 mostra uma comparação entre a sintética Vidro e a natural

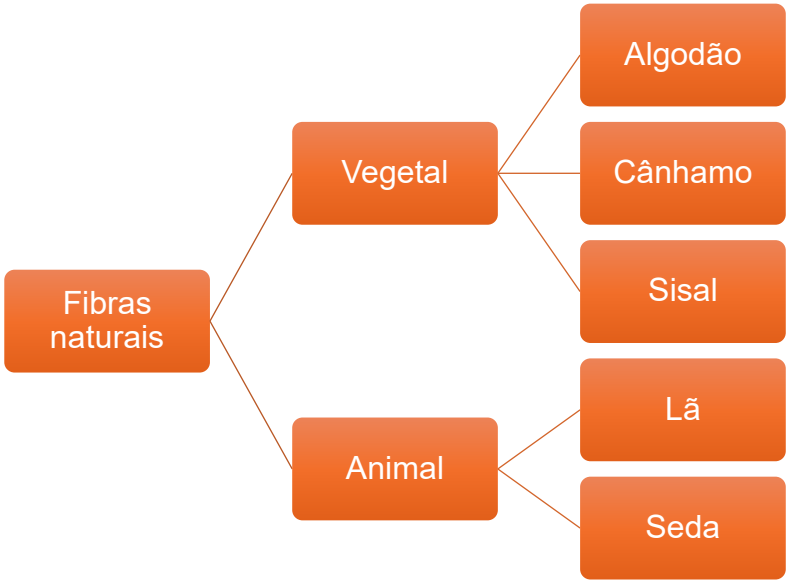
Tabela 4: Comparação da fibra sintética (vidro) e a fibra natural

	Fibras Naturais	**Fibras Sintéticas (Vidro)**
Preço	Baixo	Baixo, mas maior que Fibra Natural
Densidade/Peso	Baixo	O dobro da Fibra natural
Renovabilidade	Sim	Não
Reciclabilidade	Sim	Não
Distribuição	Largo	Largo
Absorção de Energia	Baixo	Alto
Equilibrado em carbono	Sim	Não
Risco à saúde ao respirar	Não	Sim
Abrasão em máquinas	Não	Sim
Disposição	Biodegradável	Não biodegradável

Fonte: Thimmegowda *et al.,* 2025

As fibras naturais, provenientes de fontes vegetais ou animais, conforme apresentado na Figura 6, destacam-se como alternativas às fibras sintéticas em diversas aplicações de engenharia, principalmente por serem biodegradáveis, renováveis, leves e de baixo custo (Thimmegowda *et al.,* 2025).

Figura 6: Classificação das Fibras naturais



Fonte: Thimmegowda *et al.,* 2025.

Diante disso, com foco nos estudos acadêmicos, destacam-se as fibras naturais de origem vegetal, que apresentam características comuns como baixo custo, biodegradabilidade e leveza. (Rajak *et al.,* 2022).

2.3.1. Fibras Lignocelulósicas

As fibras lignocelulósicas (FLs) são classificadas, devido à sua sustentabilidade, biodegradabilidade, reciclabilidade e respeito ao meio ambiente (Rajeshkumar *et al.,* 2023), constituídas por predominantemente de celulose, hemicelulose e lignina, além de apresentarem também pectina e outra impurezas, como demonstrado na Tabela 5 (Rajak *et al.,* 2022).

Tabela 5: Composição bioquímicas de fibras lignocelulósicas.

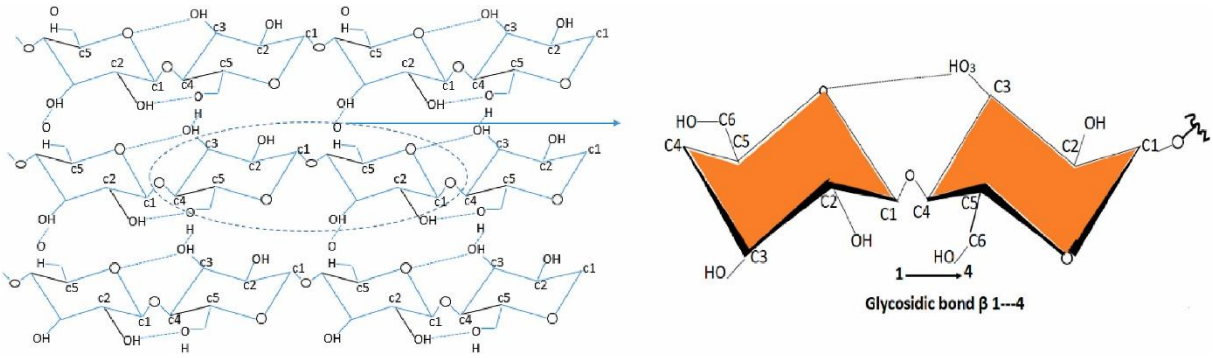
Fibras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Fibra de coco	32,0-43,0	0,05-0,25	40,0-45,0

Juta	59,0-72,0	12,0-21,0	11,8-13,0
Sisal	62,0-78,0	10,0-14,2	7,6-12,0
Linho	61,0-80,0	16,0-21,0	2,0-2,5
Cânhamo	64,0-75,0	16,0-23,0	2,5-6,0
Bambu	26,0-47,0	20,5-30,0	16,0-31,0
Abacá	56,0-63,0	15,0-25,0	7,0-12,0
Rami	68,0-76,2	13,1-16,7	0,6-0,7
Algodão	82,7-90,0	5,0-7,0	0,70-1,60
Bagaço	55,2	18,8	25,0-3,0

Fonte: Kumar; Kandasami; Singh, 2022

A celulose está presente na parede celular das plantas e apresenta como fórmula química $C_6H_{10}O_5$, é um dos materiais mais abundantes da natureza podendo ser definido como homopolímerio. A celulose é composta por cadeias de moléculas de celobiose, formadas por duas unidades de D-anidroglucopiranose (AGU) conectadas por ligações glicosídicas β(1→4) covalentes. Ao longo de sua estrutura, a celulose apresenta numerosos grupos hidroxila capazes de estabelecer ligações de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares, promovendo assim a formação de regiões altamente organizadas denominadas cristalitos. Essa configuração estrutural confere à celulose elevada rigidez e um módulo de elasticidade significativo, conforme demonstrado na Figura 7 (Elfaleh *et al.,* 2023).

Figura 7: Estrutura da celulose

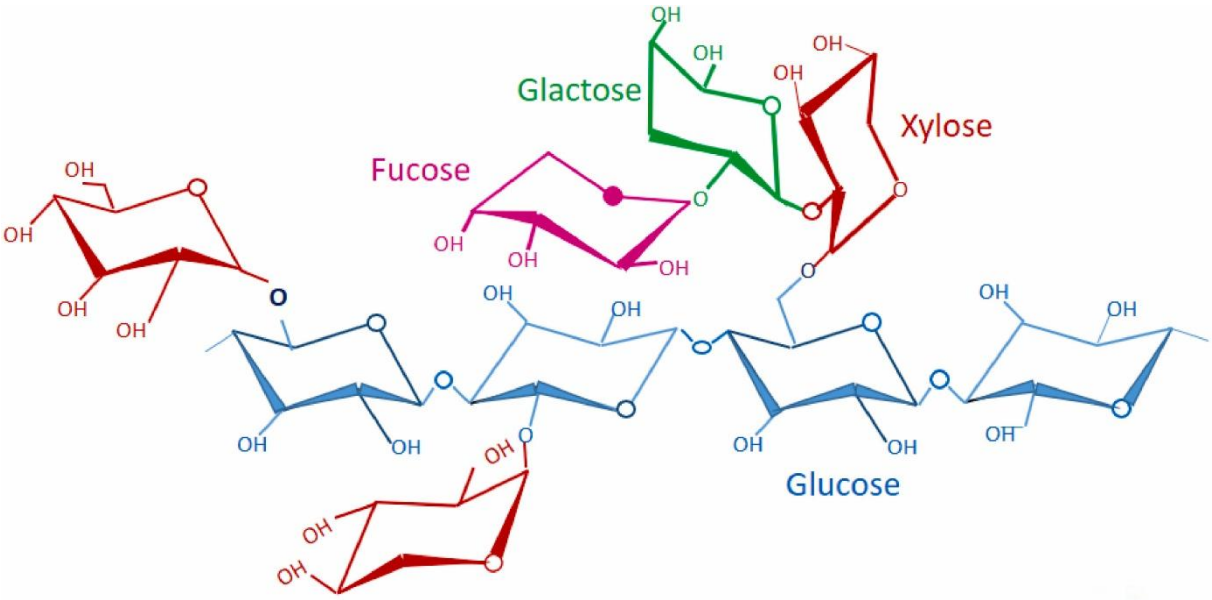


Fonte: Elfaleh *et al.,* 2023

A hemicelulose é um polímero amorfo e heterogêneo, constituído por cadeias ramificadas de monossacarídeos, como pentoses e hexoses, sendo os principais a D-galactose, D-xilose, D-manose, L-arabinose e D-glicose, com cadeias compostas por

aproximadamente 500 a 3000 unidades de açúcar. As ligações predominantes entre os monômeros são do tipo β-1,4-glicosídicas, com ocorrência ocasional de ligações β-1,3-glicosídica, conforme demonstrado na figura 8 (Zaini *et al*., 2018). As hemiceluloses são solúveis em água, o que as torna suscetíveis à biodegradação, absorção de umidade, degradação térmica e aumento do grau de inflamabilidade das fibras (Elfaleh *et al.,* 2023).

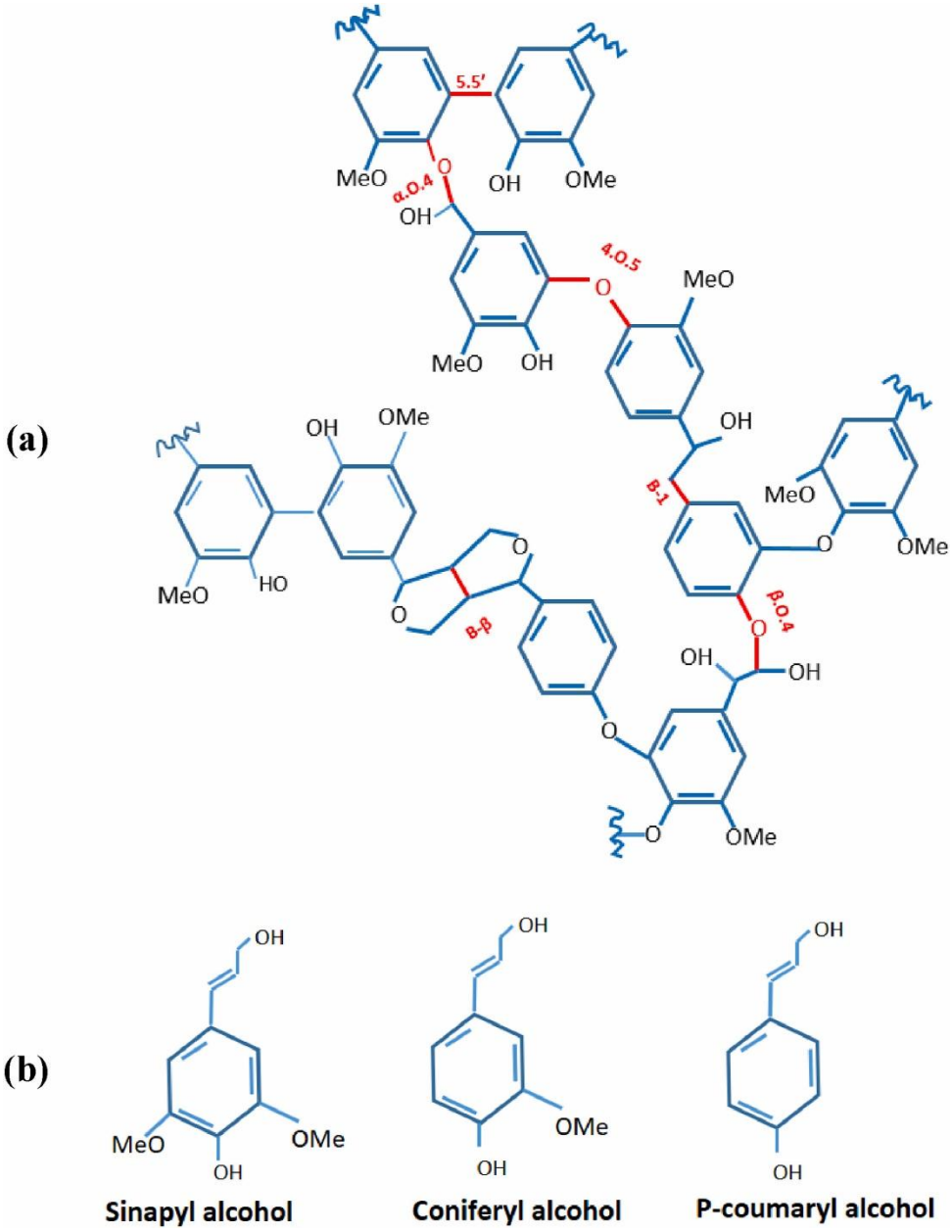
Figura 8: Estrutura da Hemicelulose



Fonte: Elfaleh *et al.,* 2023

A lignina é um polímero hidrocarboneto tridimensional ou um polímero termoplástico de altíssimo peso molecular, sendo necessária para o transporte de água, suporte mecânico e resistência à biodegradação. A lignina é completamente amorfa, hidrofóbica e insolúvel na maioria dos solventes, conferindo rigidez às plantas, os grupos metoxila, carbonila e hidroxila foram identificados como presentes em cada unidade de construção da lignina (Zaini *et al*., 2018), conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9: Estrutura da Lignina



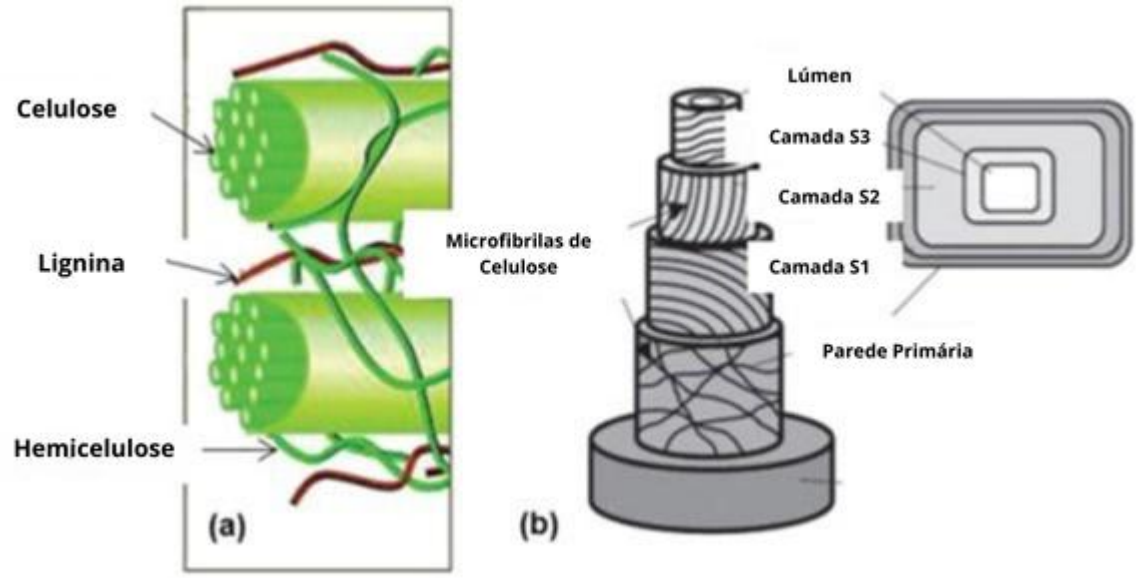
Fonte: Elfaleh *et al.,* 2023

As fibras lignocelulósicos são compostos por 35–55% em peso de celulose, 10–25% em peso de lignina e 20–40% em peso de hemicelulose, além de extratos (por exemplo, pectina, resinas, ceras, etc.), cinzas e minerais (Yang *et al*., 2019). As células das FLs possuem uma parede celular estruturada em diferentes camadas: lamela média, parede primária e parede secundária, como mostrado na Figura 10. A parede secundária é subdividida em três subcamadas distintas: S1, S2 e S3. Na

camada S1, as microfibrilas de celulose estão orientadas de forma quase perpendicular ao eixo longitudinal da fibra. A camada S2, mais espessa e desenvolvida em comparação à S1, apresenta microfibrilas dispostas em ângulo reduzido em relação ao eixo da fibra, sendo responsável por grande parte das propriedades mecânicas da célula. Já a camada S3 possui microfibrilas com orientação quase perpendicular ao eixo longitudinal da fibra, contribuindo para a estabilidade estrutural da parede celular (Abdessamad, 2019).

Assim como a parede primária, a parede secundária apresenta os mesmos constituintes, porém com maior teor de celulose e presença de lignina. Sua estrutura é formada por camadas concêntricas de microfibrilas de celulose compactadas, organizadas em orientação helicoidal ao longo do eixo da fibra (Elfaleh *et al*., 2023)

Figura 10 a) Organização estrutural das FLs e (b) Esquema de uma parede celular



Fonte: Abdessamad,2019.

O ângulo microfibrilar (AMF) difere de fibra para fibra, já que as características mecânicas de uma fibra dependem do conteúdo de celulose, do ângulo espiral, bem como do grau de polimerização (Mochane et al., 2021). O AMF constitui uma propriedade relevante da parede celular, definido como o ângulo entre o eixo longitudinal da fibra e a orientação das microfibrilas de celulose presentes na camada S2 da parede secundária. Essa característica apresenta estreita relação com propriedades mecânicas da fibra, como o módulo de elasticidade (Oliveira; Luz, & Monteiro (2022). As notáveis propriedades mecânicas das fibras vegetais derivam da

nanofibrila de celulose, cuja estrutura, em escala molecular, é formada por cadeias lineares de anéis de anidroglicose interligados por ligações covalentes de oxigênio e estabilizados adicionalmente por interações de hidrogênio (Königsberger, Lukacevic, & Füssl). Por tanto as fibras que consistem em um maior conteúdo de celulose e grau de polimerização, bem como um menor ângulo espiral, exibem uma maior resistência à tração e módulo (Mochane et al., 2021).

2.3.2 Fibra de Munguba

As fibras da Munguba (*Pseudobombax munguba*), são nativas da região amazônica tendo como espécie de característica de florestas inundáveis em região de várzea na Amazônia (Flora do Brasil). Trata-se de uma espécie arbórea que pode alcançar até 40 metros de altura (Gribel e Abbott, 1995), como demonstrado na Figura 11. A espécie possui relevante importância na região amazônica, sendo que a paina extraída de seus frutos é tradicionalmente utilizada na confecção de estofados, enquanto suas sementes, de elevado valor nutricional, são empregadas na alimentação em criadouros de tambaquis (Gribel & Abbott, 1996; Silva, et al., 2003).

A fibra da Munguba pode ser utilizada pelas populações tradicionais das regiões amazônicas em diversas aplicações cotidianas. Entre seus usos mais comuns estão a confecção de cordas, cestos, redes, utensílios de atividades de pesca e caça, além de objetos artesanais (Lopes *et al.,* 2015). É fundamental ressaltar que o processo de extração das fibras de Munguba não ocasiona danos permanentes ou a morte da árvore. A espécie possui elevada capacidade de regeneração, permitindo a retirada sustentável das fibras, uma vez que a planta se recupera naturalmente e continua fornecendo material fibroso para futuras coletas (Pinheiro, 2012).

Figura 11: Árvore de Munguba

Fonte: Keppler, 2020

Pseudobombax munguba, é uma espécie arbórea de médio porte que perde as folhas durante a cheia, período no qual produz, em torno de 50 frutos oviformes e vermelhos, com diâmetro de 8-12 cm e comprimento de 12-26 cm. Sem folhas, com seus frutos vermelhos e troncos verdes, esse fruto tem a função de transferência de água e nutrientes para desenvolver os diásporos. Trata-se de uma estrutura esponjosa de elevada umidade, sem sabor atrativo, como mostrado na figura 12 (a, b) (Kepler, 2020)

Figura 12: a) Fruto da arvore de munguba (b) Fruto de *Pseudobombax munguba*

(a) Fruto da arvore de Munguba

Fonte: Carvalho-Sobrinho; Yoshikawa, 2025

(b) Fruto de Pseudobombax munguba

Fonte: Kepler, 2020.

2.4. Materiais compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas

A diversidade de fibras naturais permite uma variedade de compósitos com propriedades variadas, no entanto antes de combinar matriz e reforço tem que avaliar fatores que implicam na sua produção, como as circunstâncias ambientais durante o crescimento, as considerações geográficas, o ângulo microfibrilar e outros fatores influenciam a resistência da fibra e do compósito (Arumugam *et al.,* 2022). Além disso, as técnicas de fabricação empregadas que podem ser por: compressão, extrusão, manual ou injeção, esse processo de seleção garante que o compósito resultante possua as características de desempenho desejadas e seja adequado para a aplicação pretendida (Thapliyal *et al.,* 2023).

No entanto, existem várias questões que devem ser investigadas para normalizar o uso, quando fibras hidrofílicas naturais são combinadas com matrizes hidrofóbicas, formam-se interfases fracas, que comprometem os potenciais qualidades mecânicas dos compósitos (Kamarudin *et al.,* 2022). Diante disto, diversos pesquisadores têm dedicado estudos a esses compósitos:

Simonassi; Pereira; Monteiro (2019), analisaram a Curauá (Ananas erectifolius) que é uma planta cultivada na região Amazônica, onde as fibras são utilizadas na fabricação de papel para pintura. Os autores tiveram como objetivo desenvolver compósitos, que pudessem ser obtidos os maiores valores de resistência a tração sem nenhum tipo de tratamento de superfície fosse realizada na fibra. Diante disto, os resultados obtidos foram: conseguiram confeccionar compósitos de alto desempenho em resistência a tração.

Oliveira *et al.,* (2020), analisaram as propriedades físicas e mecânicas de compósitos à base de gesso reforçados com fibras de *Eucalyptus* spp., e tinham como

objetivo: desenvolver materiais com desempenho superior**.** Os resultados obtidos foram promissores, demonstrando que a incorporação de fibras vegetais de Eucalyptus spp. em compósitos à base de gesso contribui para a viabilidade de sua aplicação na fabricação de placas para divisórias e forros, considerando os diferentes níveis de reforço avaliados.

de Lima *et al.,*(2022), em que buscaram pesquisar a utilização das fibras de lignocelulose natural (FLNs) da Amazônia como reforço para materiais cimentícios, em que abordaram suas vantagens e desvantagens em termos de aplicações e desafios no processamento e exploração desses recursos naturais, em que em relação as viabilidades a aplicação de FLNs em materiais cimentícios apresentam grande potencial. Os resultados apresentados mostram que em relação as propriedades físicas, apresentaram valores inferiores aos da matriz, que reduz o peso final do compósito e fazendo com que haja uma absorção de água nas fibras, em relação as propriedades mecânicas, a resistência a tração apresentaram valores bons em que melhora a propriedade a tração.

Pinheiro *et al.,* (2023), foi realizada uma investigação abrangente das propriedades microestruturais, morfológicas e mecânicas da fibra de periquiteira (*Cochlospermum orinocense*). Os resultados obtidos revelaram que, na caracterização mecânica, a fibra apresentou valores médios de resistência à tração de 178 MPa e módulo de Young aparente de 2,92 GPa. Observou-se, ainda, que a resistência mecânica da fibra está diretamente relacionada ao seu diâmetro fibrilar, sendo significativamente influenciada por defeitos naturais e intrínsecos à sua estrutura. Apesar dessas limitações, os baixos valores de densidade e os resultados satisfatórios em análises térmicas indicam que as fibras de periquiteira, classificadas como fibras lignocelulósicas naturais (FLN), apresentam potencial promissor para aplicação como material de reforço em compósitos poliméricos de baixa densidade.

Makri *et al.,* (2023), estudaram a planta *Centaurea hyalolepis* (CH), identificada como uma fonte de fibras lignocelulósicas ainda pouco explorada quanto ao seu potencial como reforço em materiais poliméricos. O estudo teve como objetivo a identificação, extração e caracterização dessas fibras, a fim de avaliar sua aplicabilidade em compósitos. Os resultados demonstraram que as fibras de *Centaurea hyalolepis* apresentam diâmetros variando entre 180 e 420 µm, densidade de 1,13 g/cm³, e, segundo análises de MEV, são constituídas por diversas fibrilas unidas por pectina, lignina e outros componentes não celulósicos, formando fibras

cujas células possuem formato poligonal e um lúmen central. Diante de seu comportamento térmico satisfatório, baixa densidade e resistência à tração relativamente elevada, concluíram que essas fibras apresentam potencial promissor como reforço em compósitos verdes.

Lozada *et al.,* (2023), foi realizada uma investigação utilizando borracha natural em combinação com fibras vegetais, uma vez que esses materiais são considerados alternativas viáveis para substituir equivalentes sintéticos, amplamente empregados na fabricação de diversos produtos. Os resultados evidenciaram um elevado potencial de aplicação em engenharia, devido à competitividade técnica, às propriedades físico-mecânicas favoráveis e ao menor impacto ambiental, destacando-se a possibilidade de uma redução da pegada de carbono em comparação às fibras sintéticas utilizadas em processos convencionais. Nesse contexto, ressalta que os compósitos produzidos a partir de borracha natural e fibras vegetais necessitam de pesquisas adicionais, com vistas à definição de formulações ideais, considerando as múltiplas variáveis que influenciam seus potenciais, aplicações industriais de caráter inovador, sustentável e economicamente viável.

Tavares *et al.,* (2025), investigaram pela primeira vez a fibra de embira, originaria da Amazônia, com o intuito usá-las para futuras aplicações na engenharia. Nos resultados observou-se que com a redução do diâmetro fibrilar, ocorre um aumento não apenas na resistência mecânica, mas também na densidade e no módulo de elasticidade da fibra. Tal comportamento indica que a concentração de defeitos estruturais e vazios internos tende a diminuir à medida que o diâmetro é reduzido, favorecendo, assim, a melhoria das propriedades mecânicas do material.

Santos *et al.,* (2025), estudaram a característica morfológica do tecido fibroso de tururi, além de determinar a massa específica para possível aplicação como reforço em compósitos de matriz polimérica. Os autores propõem a apresentação das fibras na forma de tecido fibroso, despertando elevado interesse no campo das pesquisas científicas, especialmente no desenvolvimento de materiais compósitos com propriedades aprimoradas. Em seus resultados, o tecido fibroso apresenta vantagens significativas no que se refere ao beneficiamento, devido ao seu elevado grau de entrelaçamento natural entre as fibras, o que favorece sua aplicação como reforço em compósitos. Ademais, a rugosidade observada por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) indica a viabilidade de estudos voltados à aplicação de tratamentos

químicos, visando à melhoria da interação interfacial com a matriz polimérica, tornando o tecido fibroso um potencial reforço em compósitos poliméricos.

2.5. A Sustentabilidade na Aplicação de Fibras Naturais em Compósitos Poliméricos

Diante desse contexto, no impulso pelo desenvolvimento sustentável e pela responsabilidade ecológica tem incentivado a busca por materiais alternativos, renováveis e de baixo impacto ambiental, especialmente no campo dos compósitos, onde se destacam os reforços de origem vegetal como soluções promissoras. A utilização de fibra de munguba *(pseudobombax munguba),* manifesta um interesse de origem amazônica para a utilização da fibra em materiais compósitos, fibra está pouco estudada. Em que Fonseca *et al.,* (2018) argumenta que as fibras da munguba apresentam potencial promissor como elemento de reforço em compósitos poliméricos, o que pode representar uma contribuição relevante para a área da Engenharia, além de despertar o interesse de setores industriais que poderão se beneficiar das tecnologias sustentáveis derivadas dessa aplicação.

No caso da Munguba, sua aplicação em compósitos se insere nesse mesmo panorama promissor. Apesar de ainda pouco estudada, a fibra apresenta potencial de contribuição para materiais sustentáveis, podendo ser utilizada em substituição parcial ou total de reforços sintéticos em setores como construção civil, transportes e embalagens. Fonseca *et al*., (2018) ressaltam que as fibras da Munguba, por suas características lignocelulósicas, podem oferecer boas propriedades de reforço, sobretudo quando aliadas a tratamentos químicos capazes de melhorar a adesão interfacial com a matriz polimérica.

Assim, a inserção da fibra de Munguba no campo dos compósitos poliméricos representa não apenas uma alternativa inovadora e de baixo impacto ambiental, mas também uma oportunidade estratégica para valorizar recursos amazônicos e fomentar a bioeconomia regional. Dessa forma, sua exploração científica e tecnológica contribui para ampliar o leque de fibras vegetais aplicáveis em engenharia, promovendo avanços alinhados aos princípios da sustentabilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

No presente estudo, foram empregados três materiais principais: as fibras de munguba, utilizadas como reforço natural, e foram obtidas na cidade de Marajó, Pará, a partir da casca da arvore como apresentado na Figura 13(a). A resina poliéster isoftálica, atuando como matriz polimérica, Figura 13(b), e o catalisador MEK (Butanox M-50), responsável pelo processo de cura da resina, na figura 13(c).

Figura 13: Figura 13: (a) Casca da munguba (b) Poliester (c) MEK

Fonte: Própria autora, 2025.

A resina cristal poliéster, da marca Confibras, foi utilizada como matriz polimérica e curada a partir do endurecedor da marca Confibras V300, que foi adicionado em proporção volumétrica de 2% em relação a resina.

3.1.1. Beneficiamento da matéria-prima

A matéria-prima Munguba foi beneficiada no Laboratório de Práticas Tecnológicas da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua. As amostras foram obtidas na cidade de Marajó, no estado do Pará, Brasil, onde inicialmente foi realizada a separação entre a raiz e o caule, sendo a casca o material de interesse por apresentar maior concentração de fibras. Em seguida, essa fração foi acondicionada em um suporte metálico e submetida à secagem em estufa a 80 °C, durante 2 horas. Posteriormente, procedeu-se ao desfibramento manual, com auxílio de pinça, até a obtenção da quantidade necessária de fibras, para então serem destinadas às etapas de caracterização e à produção dos compósitos.

3.2. MÉTODOS

3.2.1 Caracterização física

3.2.1.1 Diâmetro fibrilar

A caracterização dimensional foi realizada no Laboratório de Caracterização dos Materiais da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua. Foram selecionadas 100 fibras aleatórias de munguba, divididas em 5 intervalos, para a realização da análise do diâmetro fibrilar. Assim, com o auxílio do microscópio óptico modelo Even, como mostra a figura 14, acoplado ao software WinJoe, foi possível realizar medições em ângulos de 0 e 90° em 5 pontos igualmente espaçados ao longo do comprimento.

Figura 14: Microscópio Óptico

Fonte: Própria autora, 2025

3.2.1.2 Densidade geométrica

A densidade geométrica, considerando a fibra cilíndrica, foi determinada utilizando relação massa e volume da fibra. Com auxílio da balança analítica de precisão ± 0,0001 g da marca Chyo modelo JK, foi possível determinar a massa das fibras e, volume, determinado pela equação 1.

$$V = \frac{\pi \times d^2 \times c}{4} \quad (1)$$

Onde:

V: volume médio da fibra

d: diâmetro do médio

c: comprimento da fibra

A densidade geométrica considerando a fibra circular foi determinada utilizando a equação 2.

$$\rho\text{geometrica} = \frac{\text{m}}{\text{v}} \quad (2)$$

3.2.2 Espectroscopia de Infravermelho com Transformação de Fourier (FTIR)

A caracterização química da fibra de munguba foi analisado a partir da Espectroscopia por Transformada de Fourier. As análises foram realizadas no Laboratório de Espectroscopia Vibracional e Altas Pressões da Universidade Federal do Pará. O instrumento de refletância foi da marca Bruker, modelo Vertex 70v (Madison, WI, EUA) com comprimento de onda variando de 4.000 cm^{-1} a 400 cm^{-1}.O espectro foi obtido por reflectância total atenuada (ATR).

3.2.3 Análise Termogravimétrica (TG/DTG)

As amostras para análise termogravimétrica foram realizadas no Laboratório de Física da Universidade Federal do Pará (UFPA), as fibras foram cortadas, moídas e armazenadas no tubo amostral. O analisador termogravimétrico (modelo STA - NEXTA STA300) foi utilizado para explorar o comportamento da fibra de munguba ao decorrer das seguintes mudanças térmicas estabelecidas: aquecimento constante de 10°C/min e variação da temperatura a partir da mais baixa à mais alta, 27 a 613°C.

3.2.4 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)

A fibra e a fratura do compósito foram examinadas em sua superfície por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura foi conduzida no laboratório do Museu Emílio Goeldi, utilizando um equipamento de modelo Mira3 FEG 250 TESCAN equipado com MEV OXFORD INSTRUMENTS, the Business of Science, com uma ampliação de 1000x. As amostras foram submetidas à metalização com ouro (Au) por 5’32’’, formando uma fina película sobre sua superfície. As micrografias foram obtidas por meio da detecção de elétrons secundários, utilizando uma voltagem de 5,0 kV.

3.2.5 Ensaio de Tração das Fibras Isoladas

Utilizando a norma ASTM C1557 (2014) como referência, foram ensaiadas 100 fibras, sendo 20 fibras para cada um dos 5 intervalos previamente determinados no item 3.2.1.1. As fibras foram coladas em moldes produzidos de acordo com a norma, utilizando um adesivo ao centro do papel do tipo goffrata de gramatura média (180 g/cm^3). O teste mecânico foi realizado em máquina universal de ensaios fabricada pela Intermetric, modelo iM50, com célula de carga de 5 kN e velocidade de ensaio de 2 mm/min, no Laboratório de Caracterização dos Materiais, da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua.

3.2.6 Fabricação de compósitos

Os corpos de prova foram confeccionados por moldagem manual, sem o uso de desmoldante e sem aplicação de pressão. As porcentagens adotadas 10, 20 e 30%, foram definidas com o objetivo de possibilitar análises mais abrangentes do comportamento mecânico e estrutural dos compósitos, bem como de investigar a possível saturação da matriz.

Diante disso, foi calculado o percentual de fibra, a partir da equação da regra da mistura, a quantidade de resina e endurecedor necessários para a produção dos compósitos, como apresentado na equação 3.

$$\%f = \frac{\frac{mf}{\rho f}}{\frac{mf}{\rho f} + \frac{mr}{\rho r}} \tag{3}$$

Onde:

%f é a porcentagem de fibra

mf é a massa da fibra

ρf é a densidade da fibra

mr é a massa da resina

Sendo assim a quantidade necessária de resina e catalisador foi devidamente homogeneizada, buscando evitar a formação de bolhas na mistura. Em seguida, parte

dessa solução foi vertida em moldes de silicone, previamente dimensionados conforme as normas de ensaio para tração de acordo com a norma ASTM D638-22 e flexão D790-17, possibilitando a deposição da quantidade desejada de fibras de munguba. Esse procedimento visou assegurar a adequada molhabilidade das fibras. Posteriormente, o restante da mistura de resina e endurecedor foi adicionado aos moldes, onde permaneceu até a completa cura do material. Após esse processo, os corpos de prova foram lixados e polidos com lixas de granulometria 80, 100 e 220. Toda a produção foi conduzida de acordo com os critérios apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Corpos de provas produzidos

		Volume (%)	
Composições	Quantidade	Resina	Fibra
FMP0	6	100	-
FMP10	6	90	10
FMP20	6	80	20
FMP30	6	70	30

Abreviação: FMP0: poliéster com 0% de reforço; FMP10: poliéster com 10% de reforço fibroso; FMP 20: poliéster com 20% de reforço fibroso; FMP30: poliéster com 30% de reforço fibroso

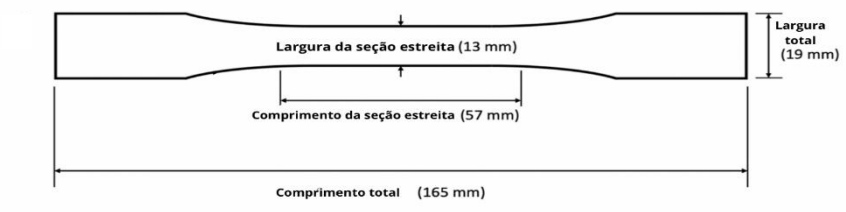
Fonte: própria autoria, 2025

3.2.6.1. Caracterização mecânica dos compósitos.

Os ensaios de tração e flexão foram conduzidos no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCMAT) da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, de acordo com as normas ASTM D638 (2022) para tração e ASTM D790 (2017) para flexão.

Para fabricação dos corpos de prova de tração, foi utilizada a norma ASTM D638 (2022), seguindo as medidas demonstradas na Figura 15.

Figura 15:Dimensões em milímetros de corpos de prova pela norma ASTM D638 para tração.



Fonte: Sola *et al*.,2023

As propriedades mecânicas dos corpos de prova foram determinadas por meio das equações 4.1 e 4.2, sendo a primeira utilizada para o cálculo da tensão máxima suportada pelo material e a segunda para a obtenção do módulo de elasticidade, este último definido a partir da região linear do gráfico correspondente aos compósitos analisados.

$$\sigma = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{A}} \tag{4.1}$$

Onde:

σ: tensão máxima;

F: carga aplicada;

A: área da seção transversal do corpo de prova.

$$\mathrm{E} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \tag{4.2}$$

Onde:

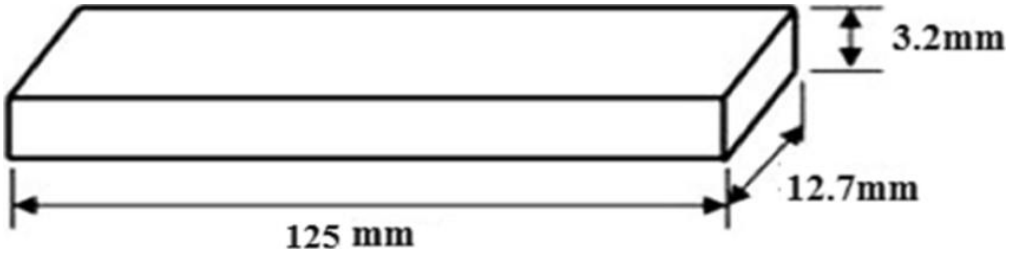
E: módulo de elasticidade;

σ: tensão máxima;

ε: deformação.

Para os ensaios de flexão, adotou-se a norma ASTM D790 (2017), respeitando as dimensões apresentadas na Figura 16.

Figura 16: Dimensões em milímetros de corpos de prova pela norma ASTM D790 para flexão.



Fonte: Prabhu *et al*., 2022

A tensão máxima em flexão dos corpos de prova foi determinada pela equação 5.1, enquanto a deformação em flexão e o módulo de elasticidade.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{5.1}$$

Onde:

P: carga máxima;

L: Distância entre suportes;

b: Largura;

d: Espessura.

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios Intermetric, modelo Im50, configurada com carga máxima de 5 kN e velocidade de ensaio de 1 mm/min, conforme ilustrado na Figura 17 (a) para tração e Figura 17 (b) para flexão.

Figura 17: (a) Ensaio de tração; (b) Ensaio de flexão

(a)

(b)

Fonte: própria autoria,2025

3.2.7 Análise estatística

Os dados obtidos em relação as propriedades das fibras de munguba foram validados a partir dos parâmetros da análise de variância (ANOVA), que visa testar a hipótese nula de que todas as médias são iguais, informando assim se ao menos um grupo difere significativamente dos demais, apresentada na Tabela 7 com intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$).

Tabela 7: Parâmetros de ANOVA

Fontes da Variação	**SQ**	**GL**	**MQ**	**F**	**F crítico**
Tratamentos	SQTr	k-1	QMT	QMT/QMR	Tabela F
Resíduos	SQR	k(r-1)	QMR		
Total	SQT	n-1			

Fonte: At, Jo, & Ro,2021

Onde:

SQ - Soma dos quadrados;

GL - Número de graus de liberdade;

MQ - Quadrado médio;

F - Estatística F;

SQR - Soma dos quadrados do resíduo;

r - Número de repetições do tratamento;

n-1 - Número total de graus de liberdade;

SQTr - Soma dos quadrados dos tratamentos;

k - Número de tratamentos;

QMT - Quadrado médio dos tratamentos;

QMR - Quadrado médio do resíduo;

SQT - Soma dos quadrados total;

n - Número total de observações.

Quando o valor de F calculado é inferior ao F crítico, pode-se concluir que as médias dos resultados obtidos para cada tratamento são estatisticamente iguais. Caso essa igualdade não seja observada, torna-se necessária a verificação da existência de diferenças significativas entre as médias dos resultados, a qual pode ser realizada por meio do teste de Tukey.

O teste de Tukey foi aplicado com o objetivo de identificar quais tratamentos apresentaram diferenças significativas a partir dos resultados da ANOVA. Essa identificação foi realizada por meio da comparação quantitativa entre os tratamentos, dois a dois, com base na diferença mínima significativa (DMS), calculada conforme a Equação 5.2 (Nascimento, 2017).

$$\mathrm{dms}=\mathrm{q}\sqrt{\frac{QMR}{r}} \tag{5.2}$$

Sendo:

q – Amplitude total studentizada (valor tabelado), é obtida em função do grau de liberdade (GL) do resíduo e do número de tratamentos;

QMR – Quadrado médio do resíduo;

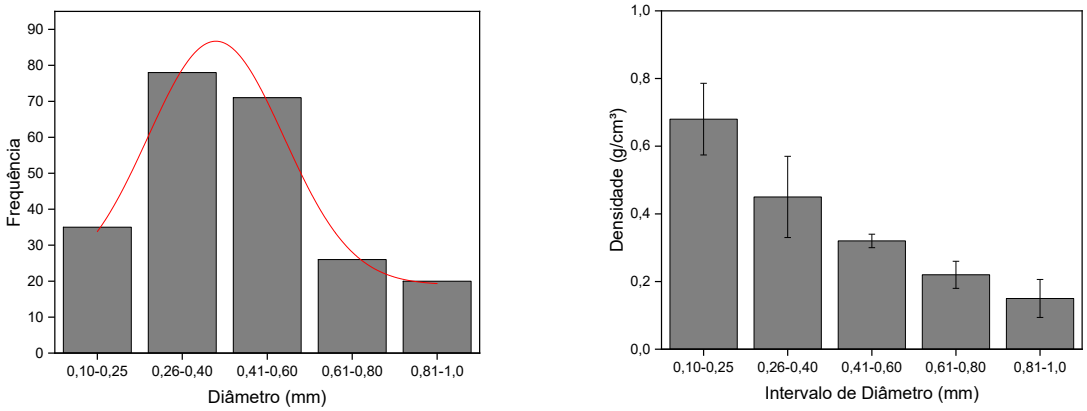
r – Número de repetições para cada tratamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL DA FIBRA DE MUNGUBA

Na figura 18 Distribuição da frequência das fibras em relação aos intervalos de diâmetro apresentados e a variação da densidade com diâmetro da fibra de Munguba.

Figura 18: (a) Distribuição da frequência das fibras por intervalo de diâmetro e (b) Relação de densidade por Intervalo de diâmetro da fibra



(a) (b)

Fonte: própria autora,2025

Observou-se uma maior concentração de fibras na faixa de diâmetro compreendida entre 0,26 mm e 0,60 mm, evidenciando um padrão de distribuição aproximadamente normal, de acordo com a curva de gauss de distribuição. Esse comportamento sugere que a fibra de Munguba apresenta, predominantemente, diâmetros médios dentro desse intervalo, o que indica uma tendência estatística quanto à uniformidade dimensional das fibras analisadas. O valor médio do diâmetro encontrado foi de 0,45 mm, resultado que também é reportado na pesquisa sobre a fibra de periquiteira (Pinheiro., 2023).

Diante disto, pode-se observar na figura (b) que ao se analisar a densidade em função do diâmetro, observa-se que o intervalo de 0,10 mm a 0,25 mm apresenta valores de densidade superiores aos demais intervalos. Esse resultado indica que as fibras com menores diâmetros possuem, proporcionalmente, maior massa por unidade de volume, o que pode estar relacionado à sua maior compactação estrutural. Como acordado por Tavares, Mendonça e Lopera (2025), esse aumento de densidade com a diminuição do diâmetro ocorre devido à menor presença de defeitos internos,

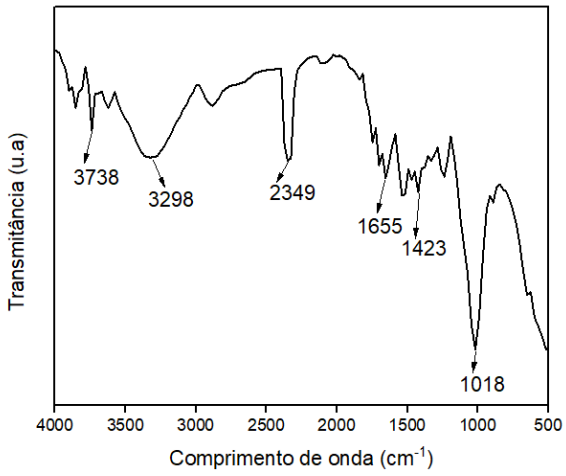
como vazios no interior das fibras. Fibras e feixes de maior espessura tendem a apresentar maior teor de porosidade e defeitos, os quais podem favorecer a ruptura precoce das fibras. Assim, as condições estruturais exercem influência direta sobre as propriedades mecânicas desses materiais.

De acordo com Madueke, Mbah e Umunakwe (2023), as fibras naturais apresentam variações intrínsecas em seus diâmetros, o que influencia diretamente suas propriedades. Fibras mais espessas tendem a apresentar maior número de falhas e irregularidades estruturais, enquanto fibras mais finas, por sua vez, possuem menor quantidade de defeitos e descontinuidades.

4.2. ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) DA FIBRA DE MUNGUBA

A Figura 19 apresenta as bandas de absorção correspondentes aos diferentes grupos funcionais químicos presentes nas estruturas da celulose, hemicelulose e lignina que compõem a fibra de munguba.

Figura 19: FTIR da Fibra de Munguba



Fonte: própria autora,2025

Entre a região de 3738 e 3298 cm^{-1} observa-se uma banda atribuída ao estiramento axial das ligações O–H, indicando a presença de ligações químicas hidroxílicas características dos constituintes de alfa-celulose (Arul *et al.,* 2020). Essa absorção está associada à presença de água ligada ou adsorvida à rede polimérica

que compõe as fibras naturais (Wembe *et al*.,2023), evidenciando, assim, a ocorrência de celulose e lignina na estrutura da fibra (Pinheiro et al., 2023).

Na região de 2349 cm $^{-1}$, o que indica à cadeia alquílica denota a presença de cera (Pinheiro *et al*., 2023). A banda de 1655 cm^{-1} é compatível ao estiramento C=C do anel benzênico referente ao teor de lignina (Pinheiro *et al*., 2023). Como observado por Raj *et al*., (2023), que a vibração aromática do anel benzênico presente na estrutura da lignina foi identificada.

A banda de 1423 cm $^{-1}$, sugerindo assim a presença de grupos de metila e metileno nas cadeias de polissacarídeos, o que indica como marcadores de cristalinidade (Prado; Spninacé,2015)

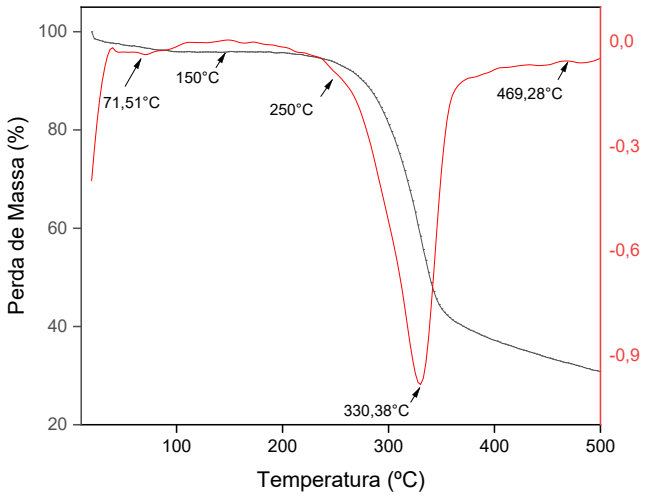
Já a banda em 1018 cm $^{-1}$, é atribuída à vibração de estiramento C-OH da celulose e hemicelulose. Além disso, está banda foi para a estiramento de ligação da deformação de CO em álcoois secundários e éteres alifáticos. (Zhuang *et al.,* 2020),

Deste modo, os resultados obtidos confirmam a composição de lignocelulósica da fibra de munguba, no que evidência pela presença de celulose, hemicelulose e lignina, além de grupos de hidroxila em abundância. Esses dados são fundamentais para compreender a estrutura e propriedades das fibras naturais em compósitos, conforme discutido por Liu et al. (2023) e Singh et al. (2022).

4.3. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG/DTG) DA FIBRA DE MUNGUBA

A curva termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG) obtidas para as fibras da Munguba são mostradas na figura 20.

Figura 20: Curva termogravimétrica da Fibra de Munguba



Fonte: própria autoria,2025

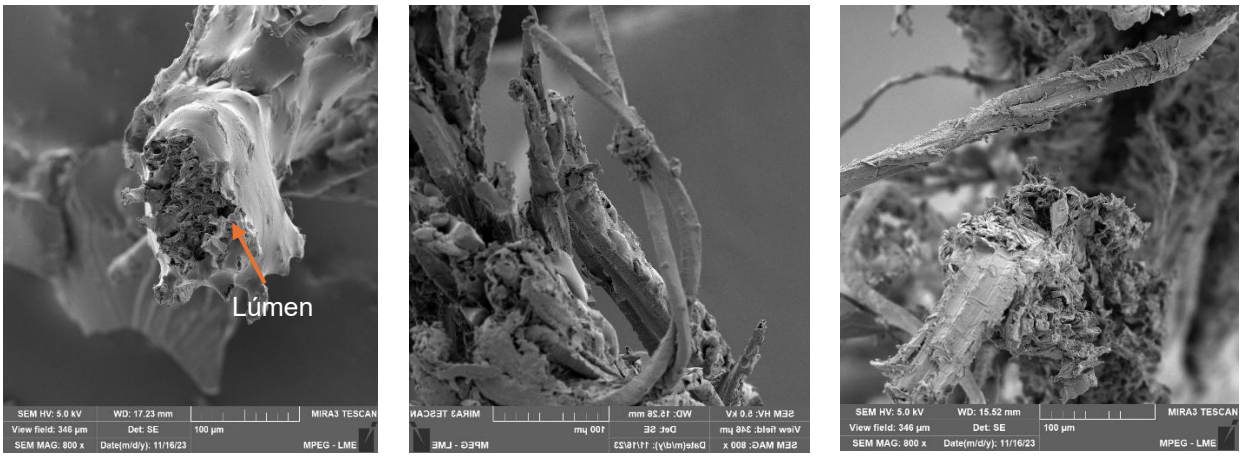
A fibra de munguba revela um perfil de degradação térmica característica de materiais lignocelulósicos, com três principais etapas de perda de massa. A primeira etapa ocorre em aproximadamente em 71,51°-150°C e está associada ao material volátil, como a água, é removido, seguido por uma temperatura estável sem alteração significativa (Shahinur *et al*., 2020). A segunda etapa compreende entre cerca de 250°C-330°C, que corresponde à degradação de hemicelulose e ao início da decomposição da celulose amorfa. Essa faixa marca uma acentuada perda de massa e por um pico intenso na curva DTG, no que vai indicar a máxima taxa de decomposição térmica. Tratando-se da fase mais intensa do processo de degradação térmica, com significativa liberação de voláteis. A terceira etapa ocorre entre 330,38 e aproximadamente 469,28ºC, sendo assim associada à degradação da celulose, como relatado por Neto *et al*., (2022), normalmente, a degradação térmica da lignina e da celulose ocorre na faixa de temperatura de 300–450 °C. Essa etapa e evidenciada por uma perda de massa menos acentuada e por um segundo pico na curva DTG, menos intenso que o anterior. A presença de resíduo acima de 450º sugere a formação de material carbonáceo, o que indica a carbonização parcial da fibra. Essas informações são essenciais para entender a estabilidade térmica e a composição do material, como discutido por Menard (2020) e Zafar (2022).

De modo geral, o comportamento térmico da fibra de munguba demostra que ela possui estabilidade térmica moderada até cerca de 200 ºC, sendo essa uma faixa segura para aplicações que envolvem um aquecimento leve.

4.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DA FIBRA DE MUNGUBA

A Figura 21 apresenta as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície longitudinal das fibras de munguba, com ampliação de 2000×, evidenciando diferentes diâmetros: na Figura 21(a) fibra fina, mostrada; na Figura 21(b) fibra média; na Figura 21(c) fibra grossa.

Figura 21: Morfologia superficial MEV da fibra de Munguba (a) seção transversal da fibra fina (b) seção transversal da fibra média e (c) seção longitudinal da fibra grossa



(a) (b) (c)

Fonte: própria autora, 2025

A Figura 21 apresenta as análises morfológicas da fibra de Munguba (*Pseudobombax munguba*), evidenciando características estruturais relevantes que demonstram morfologias típicas de fibras lignocelulósicas naturais. Na figura (a) observa-se a seção transversal longitudinal da fibra fina, no que revela uma superfície rugosa e irregular e com microfibrilas alinhadas, nas quais são observados lúmens com estreitamentos ao longo do eixo da fibra, caracterizando um efeito semelhante a um gargalo (Richely *et al*., 2021), e essa morfologia da fibra de munguba possivelmente terá uma boa interação interfacial com a matriz polimérica, pois a rugosidade contribui para maior ancoragem mecânica e, consequentemente, melhor desempenho desse compósito (Almeida *et.,* 2025). Já na imagem (b), também é possível observar a seção transversal da fibra média, essas fibras apresentam uma variação em termos de área da seção transversal, em formato do lúmen interno e tamanho. Essa variação afeta as propriedades de tração das fibras (Mendonza-

Quiroga *et al*., 2022). A parede celular relativamente delgada e a porosidade visível indicam uma boa capacidade de absorção de água e de impregnação por resinas (Demosthenes *et al.,* 2020), (Reis, RHM *et al.,* 2020).

E a imagem (c), que mostra a seção longitudinal da fibra grossa, onde destaca uma estrutura mais robusta, com feixes de microfibrilas espessas e paredes celulares aparentando maior densidade. Como relatado por (Nashmi *et al*., 2025) em que essa morfologia resulta em fibras com baixa rugosidade superficial, o que dificulta o intertravamento mecânico essencial para uma boa transferência de carga e, consequentemente, leva a um desempenho mecânico inferior.

Relacionando com o gráfico da figura 18b, pode-se perceber que fibras com menores espessuras tendem a apresentar maior densidade. E esse comportamento está associado à estrutura mais compacta das fibras, assim como observado na figura 21a. As fibras mais grossas como mostrado na figura 21c, exibem paredes celulares espessas. Diante disso, essa diferença estrutural afeta diretamente as propriedades mecânicas, em que fibras mais densas e finas, tendem a suportar maior coesão interna e menor quantidade de vazios, e apresentam maiores tensões.

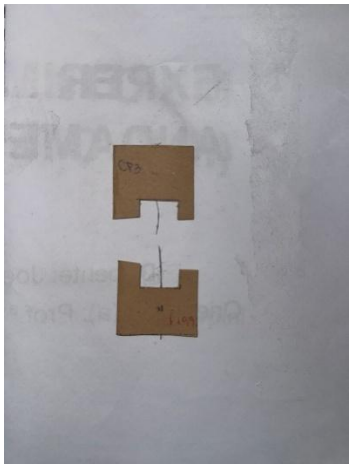
Dessa forma, observa-se que fibras com menor espessura e diâmetro, apresentam estrutura mais compacta o que contribui para um desempenho mecânico superior, enquanto fibras mais grossas tendem a comprometer os resultados nas propriedades mecânicas de tração e flexão.

4.5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA FIBRA DE MUNGUBA

4.5.1. Resistencia à tração

A Figura 22 apresenta um corpo de prova confeccionado para realização do ensaio de tração em filamento único.

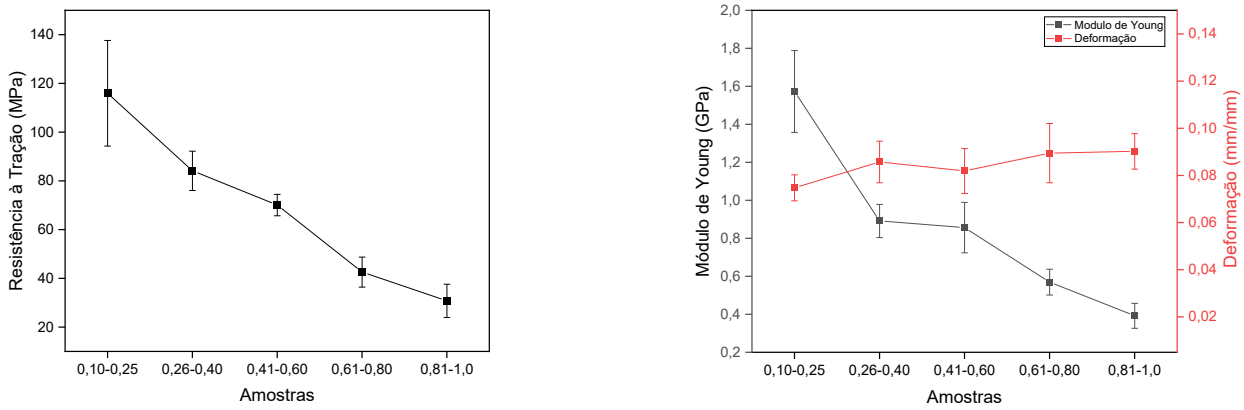
Figura 22: Aspecto visual de tração da fibra



Fonte: própria autora, 2025

A figura 23 mostra os resultados das propriedades mecânicas em tração das fibras de munguba em função do diâmetro fibrilar.

Figura 23: (a) Gráfico de resistência a tração em relação ao intervalo de diâmetro e (b) gráfico de modulo de Young x deformação em relação ao intervalo de diâmetro.



(a) (b)

Fonte: própria autora, 2025

A Tabela 8 apresenta os dados detalhados de resistência a tração e modulo das fibras por intervalo de diâmetro.

Tabela 8: Resultados das propriedades em tração das fibras de Munguba

Intervalo de Diâmetro (mm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação (mm/mm)
0,10 - 0,25	115,96 ± 21,67	1,57 ± 0,21	0,074 ± 0,005

0,26 - 0,40	84,15 ± 8,05	0,89 ± 0,087	0,085 ± 0,008
0,41 - 0,60	70,08 ± 4,39	0,85 ± 0,13	0,081 ± 0,009
0,61 - 0,80	42,59 ± 6,16	0,56 ± 0,06	0,086 ± 0,012
0,81 - 1,0	30,77 ± 6,81	0,39 ± 0,06	0,090 ± 0,007

Fonte: própria autora, 2025

O valor médio de resistência à tração obtido para as fibras de Munguba foi de 68,71 MPa, sendo inferior ao reportado para outras fibras naturais na literatura como a Periquiteira e o Ubim, conforme relatado nos estudos de Marchi et al. (2022) e Pinheiro et al. (2023). Entretanto, esse desempenho mostrou-se superior ao observado em outras fibras analisadas por Wang et al. (2019) e Venkatachalan et al. (2023).

A partir dos dados apresentados na Figura 24a, verificou-se que fibras com menores diâmetros atingiram resistência média à tração de 115,96 MPa, enquanto aquelas com maiores diâmetros apresentaram média de 30,77 MPa. Esses resultados indicam que o aumento do diâmetro fibrilar está associado à redução da resistência mecânica, sugerindo uma relação inversamente proporcional entre essas variáveis. Esse comportamento também foi relatado por Neuba *et al.,* (2022), que associam a redução do diâmetro das fibras ao aumento da resistência à tração, em razão à menor concentração de defeitos estruturais presentes em fibras mais finas, o que contribui para uma melhor distribuição das tensões aplicadas e, consequentemente, para o aprimoramento de sua resistência mecânica.

Os resultados apresentados na Figura 24b indicam que o valor médio do módulo de Young obtido para as fibras foi de 0,85 GPa. Verifica-se que com o aumento do diâmetro das fibras, ocorre uma redução no valor médio do módulo de Young. Esse comportamento evidencia que fibras de menor espessura apresentam maior rigidez em comparação às fibras de maior diâmetro.

Na análise de deformação das fibras de munguba em diferentes intervalos, há uma variação gradual no comportamento mecânico conforme o aumento da espessura das fibras. Observa-se que as fibras mais finas entre 0,10-0,25 mm, apresentou deformação média de 0,074 ± 0,005 mm/mm, que indica um comportamento mais rígido e menor capacidade de alongar antes de romper, e com o aumento do diâmetro nos intervalos 0,26-0,40 há um acrescente considerável na deformação, em que

atinge 0,085 ± 0,008 mm/mm, o que sugere que essas fibras mais espessas possuem maior capacidade de deformar sob tensão. Já nos intervalos intermediários, entre 0,41-0,60 mm, os valores de deformação atingem 0,081 ± 0,009, o que indica a ocorrência de uma ligeira redução, possivelmente dentro da margem de variação, sugerindo assim uma certa estabilização. Enquanto as de maior diâmetro entre 0,81-1,00 mm, atingiram 0,090 ± 0,007, o que indica uma leve tendencia de aumento da deformação com o crescimento do diâmetro.

Dessa forma, Muñoz-Blandón et al., (2023), relata que esse comportamento ao evidenciar que as fibras com menor diâmetro possuem maior capacidade de suportar cargas de tração, apresentando menores deformações sob os mesmos níveis de esforço, o que indica uma maior rigidez dessas fibras.

4.6. Análise estatística

4.6.1. Análise estatística tração da fibra de munguba

Análise Estatística dos dados foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA), para ensaio de tração das fibras de munguba, representado na Tabela 09.

Tabela 9: Análise à Tração da Fibra

Resistência à Tração (MPa)

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F-calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	45938,69	4	11484,67	80,95543	$5,77\times10^{-20}$	2,578739
Dentro dos grupos	6383,886	45	141,8641			
Total	52322,58	49				

Módulo de Young (GPa)

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F-calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,122533	4	2,030633	113,4168	$3,26\times10^{-23}$	2,574035
Dentro dos grupos	0,823592	45	0,017904			
Total	8,946125	49				

Deformação (mm/mm)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F-calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,001366	4	0,000341	3,619032	0,012187	2,578739
Dentro dos grupos	0,004246	45	$9,43\times10^{-5}$			
Total	0,005611	49				

Fonte: própria autora, 2025

Os resultados da ANOVA para resistência à tração da fibra indicam valores de F calculado 80,95 e F crítico 2,57, indicando que as medias entre os grupos diferem de

forma significativa. No módulo de Young, observou-se um F calculado 113,41 e F crítico 2,57, confirmando uma diferença altamente significativa entre os grupos, evidenciando que há uma rigidez no material. Já na deformação o F calculado foi 3,61 e F crítico 2,57, o que reforça a existência de variação entre as medias.

A Tabela 10 apresenta o resultado do teste Tukey para identificar as médias que diferem de cada composição.

Tabela 10: Teste Tukey para resistência à tração, módulo de Young e deformação

Resistência à Tração (MPa) – D.M.S.: 15,216

INTERVALOS	0,10-0,25	0,26-0,40	0,41-0,60	0,60-0,80	0,81-1,0
0,10-0,25	0	**31,8096**	**45,87068**	**73,36517**	**85,1841**
0,26-0,40	31,8096	0	14,06109	**41,55558**	**53,3745**
0,41-0,60	45,87068	14,06109	0	**27,49449**	**39,31342**
0,61-0,80	73,36517	41,55558	27,49449	0	11,81893
0,81-1,0	85,1841	53,3745	39,31342	11,81893	0

Modulo de Young (GPa) – D.M.S.: 0,170

INTERVALOS	0,10-0,25	0,26-0,40	0,41-0,60	0,61-0,80	0,81-1,0
0,10-0,25	0	**0,68145**	**0,716416**	**1,003266**	**1,180631**
0,26-0,40	**0,68145**	0	0,034965	0,321816	**0,499181**
0,41-0,60	**0,716416**	0,034965	0	0,28685	0,464216
0,61-0,80	**1,003266**	0,321816	0,28685	0	0,177365
0,81-1,0	**1,180631**	**0,499181**	0,464216	0,177365	0

Deformação (mm/mm) – D.M.S.: 0,012

INTERVALOS	0,10-0,25	0,26-0,40	0,41-0,60	0,61-0,80	0,81-1,0
0,10-0,25	0	0,010973	0,007146	0,011532	**0,015468**
0,26-0,40	0,010973	0	0,003827	0,000559	0,004495
0,41-0,60	0,007146	0,003827	0	0,004386	0,008322
0,61-0,80	0,011532	0,000559	0,004386	0	0,003936
0,81-1,0	**0,015468**	0,004495	0,008322	0,003936	0

Fonte: própria autora, 2025

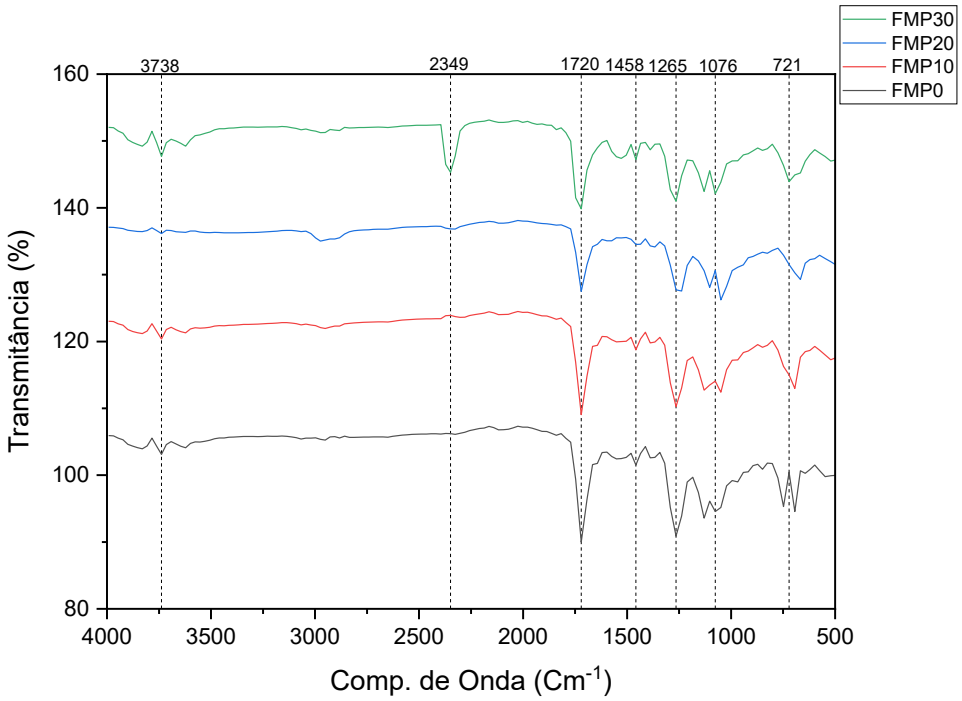
Nos dados apontados no teste Tukey, o DMS foi 15,21 MPa para resistência a tração da fibra, em que evidencia diferença significativa entre os intervalos analisados, o que indica a ocorrência de um efeito expressivo nas condições mecânicas de tração. Para o modulo, o DMS foi de 0,17 GPa, em que mostra diferenças entre os intervalos também, com valores superiores, o que confirma a diferença entre os grupos. Já na deformação, o DMS foi de 0,012 mm/mm, em que a maioria das diferenças entre os intervalos, apresentou valores inferiores ao limite de significância, mostrando que não houve diferença significativa entre os intervalos.

4.7. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

4.7.1. Análise de FTIR do Compósito da Fibra de Munguba

O FTIR do espectro dos compósitos de 0,10, 20 e 30% em volume da Fibra de Munguba e mostrada na figura 24.

Figura 24: FTIR obtido para os compósitos reforçados com fibra de munguba



Fonte: própria autora, 2025

A banda centrada em 3738 cm^{-1} é atribuída à vibração de estiramento dos grupos hidroxila (-OH), típicos de celulose e hemicelulose (Najeeb MI *et al.,* 2020). A banda de absorção 2349 cm^{-1} está associada ao grupo CO_2 (Hossain *et a*l., 2020). Já a banda 1720 cm^{-1} destaca-se uma banda atribuída a vibração do estiramento da carbonila (C=O) de forma assimétrica, pois há um deslocamento desigual dos átomos que são características do grupo éster ou ácidos carboxílicos. As bandas de 1458 e 1265 cm^{-1} estão relacionadas ao grupo CH (C-H) e CO (C-O) característico de estér e também do constituinte hemicelulose. (Gavilanes *et al.,* 2025; Hossain *et al*., 2020). A banda em 1076 cm^{-1} corresponde à vibração C-O-C, o que indica a presença de celulose. A banda de absorção mais baixa em 721 cm^{-1} pode estar associada as ligações de C-H, de estrutura aromática típicas de ligninas (Stelea *et al.,* 2022).

De modo geral, esses resultados obtidos fornecem informações relevantes sobre a composição química das fibras de munguba, que são essenciais para a otimização das propriedades e do processamento de compósitos à base desse material. A presença de diversos grupos funcionais nas fibras indica que ocorreu influência da fibra na matriz e consequente interação com a matriz polimérica, desempenhando um papel determinante nas propriedades mecânicas do compósito final.

4.7.2. Propriedades em Tração para os Compósitos

A Figura 25 apresenta a morfologia de fratura dos compósitos obtidos.

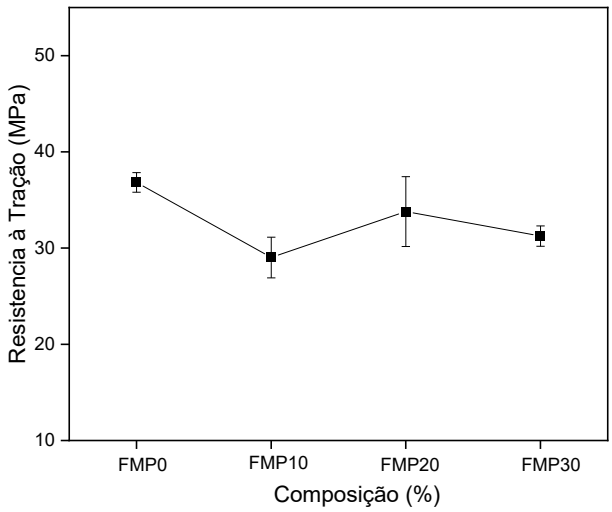
Figura 25: Aspecto macroscópico de corpos de prova de tração de diferentes porcentagens após serem fraturados

Fonte: própria autora, 2025

A partir da Figura 25, observa-se que todos os corpos de prova apresentaram fratura de caráter frágil, ocorrendo integralmente na região útil, sem o desenvolvimento de áreas preferenciais para a propagação da trinca. No que se refere ao processo de produção, a composição com 30% de fibras apresentou maior dificuldade durante a etapa de moldagem manual, em razão da elevada quantidade de fibras incorporadas à matriz, o que dificultou a adequada acomodação do material no molde.

A Figura 26 apresenta os dados obtidos pelo ensaio de resistência à tração dos corpos de provas avaliados.

Figura 26: Gráfico de Resistencia à tração x Composição



Fonte: própria autora, 2025

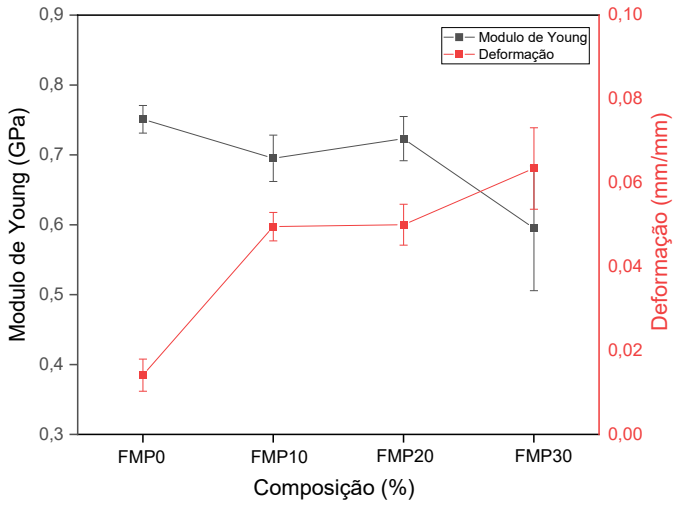
Para a composição com 0% de fibra matriz pura, observa-se o maior valor de resistência, resultado esperado em sistemas nos quais a matriz apresenta boa coesão interna e ausência de descontinuidades estruturais. Contudo, com a introdução de 10% de fibra, ocorre uma redução considerável da resistência, indicando possível baixa adesão entre a fibra e a matriz. O estudo de Seyoum *et al*., (2024) indicam que esse comportamento pode estar associado a fatores como adesão interfacial insuficiente, distribuição não uniforme das fibras, presença de vazios ou falta de molhabilidade, resultando no comprometimento da transferência de tensões da matriz para a fibra.

A partir do aumento de fibra no compósito para 20% e 30%, há uma leve recuperação da resistência, totalizando assim uma resistência média de 32,52 MPa para ambas as frações volumétricas em comparação com a matriz 0%. O que sugere assim uma possível reorganização estrutural e contribuição do reforço mecânico proporcionado pela presença da fibra lignocelulósica, cuja rigidez pode contribuir para o sutil aumento da resistência do compósito (Seyoum *et al*., (2024)

Conforme destacado por Suriani *et al*. (2021) observou que o aumento do volume de fibra reduz a resistência à tração, pois parte da fibra não se liga corretamente à

matriz, o que vai comprometer a transferência de tensões. Na figura 27 mostra o gráfico de modulo de Young aparente em relação a composição.

Figura 27: Gráfico de fração volumétrica, modulo de Young e Deformação



Fonte: própria autora, 2025

O gráfico da Figura 27 demonstra o comportamento do módulo de Young para compósitos com diferentes percentuais de fibras naturais. Inicialmente, com 20% de fibras, há um aumento no módulo de Young, indicando que a adição de fibras confere maior rigidez ao material, esse efeito é atribuído à possível boa aderência interfacial entre a matriz e o reforço em que permite uma eficiente transferência de tensões mecânicas. Isso é consistente com estudos que mostram que fibras naturais podem aumentar a rigidez do compósito quando bem dispersas na matriz polimérica (Martins *et al*., 2023; Silva *et al*., 2022). Esse aumento em algumas vezes resultado de uma boa transferência de carga entre a fibra e a matriz, proporcionando uma melhoria na resistência à deformação elástica.

Porém, na proporção de fibras de 30%, observa-se uma diminuição no módulo de Young. Esse comportamento pode ser atribuído a problemas como a aglomeração de fibras, que compromete a uniformidade das distribuições de fibras na matriz, e a fraca adesão interfacial, que reduz a eficiência na transferência de carga (Costa *et al*., 2023). Fibras mal distribuídas podem criar áreas de concentração de tensão, onde o compósito é mais propenso a falhar, resultando em um módulo de elasticidade reduzido (Santos *et al*., 2021). Em contrapartida, a deformação apresentou um

comportamento inverso ao módulo de Young, em que ele aumenta conforme o aumento de fibra. E isso, faz com que o aumento de fibras reduza a rigidez, porém aumente a capacidade de se alongar.

Os valores obtidos para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação dos compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de munguba encontram-se apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Valores para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação para compósitos de matriz poliester reforçados com frações volumétricas de fibras de munguba.

Fração Volumétrica (%)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação (mm/mm)
FMP0	36,83 (±1,01)	0,75 (±0,019)	0,014 (±0,038)
FMP10	29,02 (±2,11)	0,69 (±0,033)	0,049 (±0,003)
FMP20	33,80 (±3,62)	0,72 (±0,031)	0,050 (±0,004)
FMP30	31,25 (±1,05)	0,59 (±0,089)	0,063 (±0,009)

Fonte: própria autora, 2025

Pode-se perceber que a resistência diminui com o aumento da fração volumétrica da fibra, como observado no compósito de 0% em que sua resistência foi de 36,83 MPa, enquanto os compósitos com 30% de fibra atingiram 31,25 MPa. Essa possível redução pode ter ocorrido pela incorporação da fibra que reduziu sua capacidade de esforços de tração e possivelmente devido variações dimensionais da fibra levam a microfissuras, afetando assim a adesão fibra-matriz, conforme evidenciado por Zwawi*e* (2021). Em relação ao modulo de Young, apresentou um comportamento semelhante a resistência em que na composição de 0% exibiu 0,75 GPa enquanto o de 30% apresentou 0,59 GPa, e essa variação pode ter sido por conta que a fibra não contribui para o aumento da rigidez do material. Na deformação, apresentou os valores de 0,014 mm/mm para composição de 0% e de 0,063 mm/mm para 30%, indicando que compósitos com maior porcentagem de fibra apresenta maior ductilidade.

Conforme relatado por Stănescu *et al*., (2022), essa diminuição na resistência à tração pode ser atribuída à presença de concentrações de tensões na interface fibra-matriz. Além disso, observa-se que os alongamentos na ruptura dos três materiais compósitos apresentam valores próximos entre si, porém significativamente inferiores

aos das resinas utilizadas como matriz, indicando uma menor capacidade de deformação antes da fratura.

4.7.3. Análise Estatística

4.7.3.1. Análise estatística para propriedades de tração dos compósitos

Análise Estatística dos dados foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA), para a caracterização mecânica dos compósitos, apresentada na Tabela 12.

Tabela 12:Análise estatística à tração

Resistência à Tração (Mpa)

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F-calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	135,5702	3	45,19007	6,854829	0,00607	3,490295
Dentro dos grupos	79,10933	12	6,592444			
Total	214,6795	15				

Modulo de Young (GPa)

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F-calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,055535	3	0,018512	5,309875	0,01465	3,490295
Dentro dos grupos	0,041835	12	0,003486			
Total	0,09737	15				

Deformação (mm/mm)

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F-calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,005343	3	0,001781	37,06699	$2,4\times10^{-6}$	3,490295
Dentro dos grupos	0,000577	12	$4,8048\times10^{-5}$			
Total	0,00592	15				

Fonte: própria autora, 2025

Os resultados da ANOVA para resistência a tração apontam os valores de F calculado 6,85 e F crítico 3,49 é superior, o que indica que há diferença significativa entre os grupos. Para o módulo de Young os valores de F calculado 5,30 e F crítico 3,49 é superior, que também indica que há diferença significativa, quanto a rigidez do material. E para os resultados de deformação o F calculado 37,06 e F crítico 3,49 e muito maior, que sugerem que, há uma diferença altamente significativa entre os grupos, o que indica que os tratamentos influenciaram na capacidade de deformação.

A Tabela 13 apresenta o resultado do teste Tukey para identificar as médias que diferem para cada composição

Tabela 13: Teste Tukey para resistência à tração, módulo de Young e deformação

Resistencia à tração D.M.S: 5,391

Composição	0%	10%	20%	30%
0%	0	**7,807203**	3,026934	**5,579113**
10%	**7,807203**	0	4,780269	2,22809
20%	3,026934	4,780269	0	2,552178
30%	**5,579113**	2,22809	2,552178	0

Modulo de Young D.M.S: 0,123

Composição	0%	10%	20%	30%
0%	0	0,055855	0,027713	**0,151356**
10%	0,055855	0	0,028142	0,095501
20%	0,027713	0,028142	0	**0,123642**
30%	**0,151356**	0,095501	**0,123642**	0

Deformação D.M.S: 0,014

Composição	0%	10%	20%	30%
0%	0	**0,035414**	**0,035879**	**0,049286**
10%	**0,035414**	0	0,000465	0,013872
20%	**0,035879**	0,000465	0	0,013407
30%	**0,049286**	0,013872	0,013407	0

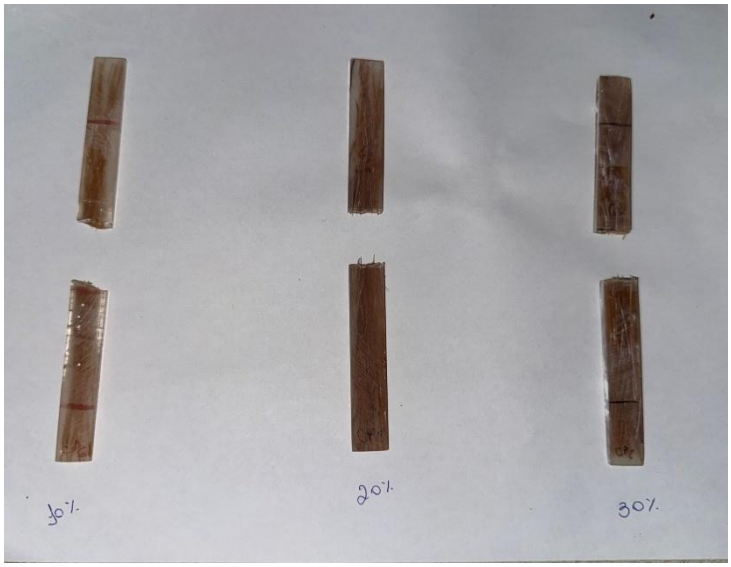
Fonte: própria autora,2025

De acordo com os dados apontados pelo teste Tukey, pode-se observar que na resistência à tração, houve uma diferença significativa entre as composições 10 e 30%. No modulo de Young, essa diferença e mais evidenciada, pois é superior ao DMS, o que indica que a adição de fibra pode ter afetado a rigidez do material. Já na Deformação, também há diferença significativa nas composições de 10,20 e 30%, indicando que o aumento na composição modifica a ductilidade do compósito.

4.7.4. Propriedades em Flexão para os Compósitos

A Figura 28 apresenta o aspecto macroscópico dos corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão.

Figura 28: Aspecto macroscópico de corpos de prova de flexão de diferentes porcentagens após serem fraturados

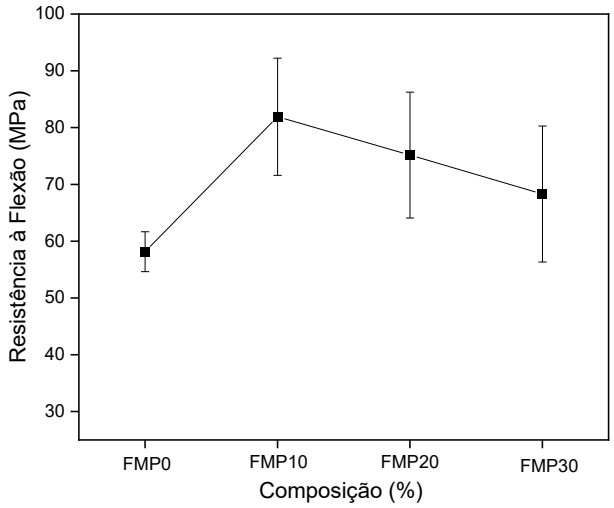


Fonte: própria autora, 2025

De forma distinta do observado nos ensaios de tração, as amostras apresentaram fratura em regiões semelhantes, evidenciando uma distribuição relativamente homogênea das zonas de ruptura, possivelmente em razão da atuação do cutelo, que concentra a aplicação da força nesse ponto do corpo de prova. Contudo, assim como já verificado nos compósitos com 30% de reforço, foi identificada a mesma dificuldade no processo de fabricação, em razão da elevada quantidade de fibras na matriz. A resistência à flexão aumenta de 0% para 10%, atingindo o valor máximo nessa composição. A partir de 10%, observa-se uma leve diminuição na resistência para as composições com 20% e queda mais acentuada para 30%, embora os valores ainda permaneçam próximos.

A figura 30 apresenta o resultado de resistência à flexão obtido para os compósitos de matriz polimérica com a fibra de Munguba com diferentes porcentagens de incorporação da fibra.

Figura 29: Gráfico de Resistencia à flexão x Composição



Fonte: própria autora, 2025

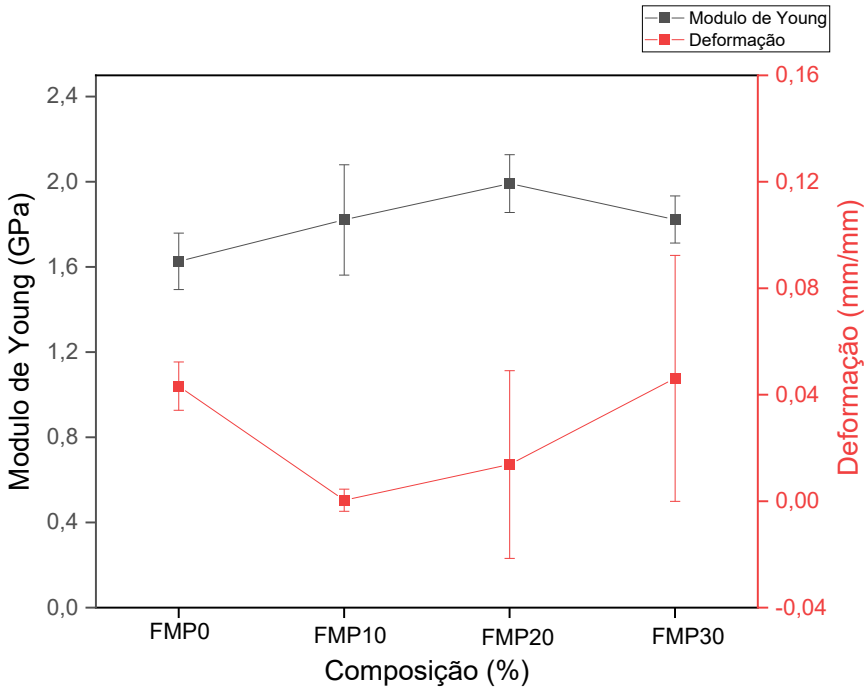
A análise da figura 29 mostram os resultados com a adição de 10% de fibra de Munguba vai proporcionar um melhor desempenho mecânico à flexão, o que pode sugerir uma boa interação entre matriz e fibra nesse ponto. Por outro lado, as composições de 20% e 30% possivelmente levaram à formação de regiões com má adesão interfacial, comprometendo a eficiência da transferência de tensões no material dispersão ou acumulados de fibra, como mostra a Tabela 14.

Tabela 14: Valores para resistência à flexão e módulo de elasticidade para compósitos de matriz epóxi reforçados com frações volumétricas de fibras de munguba

Fração Volumétrica (%)	Resistencia à Flexão (MPa)	Modulo de flexão (GPa)	Deformação (mm/mm)
FMP0	58,15 (±3,51)	1,62 (±0,13)	0,043 (±0,009)
FMP10	81,92 (±10,31)	1,82 (±0,26)	0,0003 (±0,004)
FMP20	75,16 (±11,08)	1,99 (±0,13)	0,036 (±0,009)
FMP30	68,31 (±11,96)	1,82 (±0,11)	0,046 (±0,012)

Fonte: própria autora, 2025

Figura 30:Gráfico de Modulo de Young x Deformação x Composição



Fonte: própria autora, 2025

A Figura 30 evidencia variações consideráveis, observando que o modulo aumenta levemente com adição de 10% de fibra, o que indica uma pequena melhora na rigidez do material em relação a matriz pura que pode ter se dado devido a uma boa dispersão, o que favorece essa transferência de tensões que vai contribuir para o aumento da resistência. Já na fração volumétrica de 20% apresenta um aumento novamente, embora indiferentes dos outros percentuais, que pode ser indicativo de uma reorganização estrutural, fazendo com que haja um melhor alinhamento das fibras. Em que essa leve recuperação sugere que apesar da dificuldade de dispersão em teores mais altos, essas partes podem atuar de forma efetiva na rigidez do compósito.

A composição com 30% apresenta uma redução acentuada, o que pode indicar a ocorrência de falhas no experimento, tais como má dispersões das fibras e presença de vazios, comprometendo a capacidade do compósito de resistir às tensões de flexão. Como relatado por Silva et al., (2025) em seu estudo ele avalia que os valores podem estar relacionados a falhas no processo de confecção dos corpos de prova, como má homogeneização durante a incorporação do catalisador à resina, além de

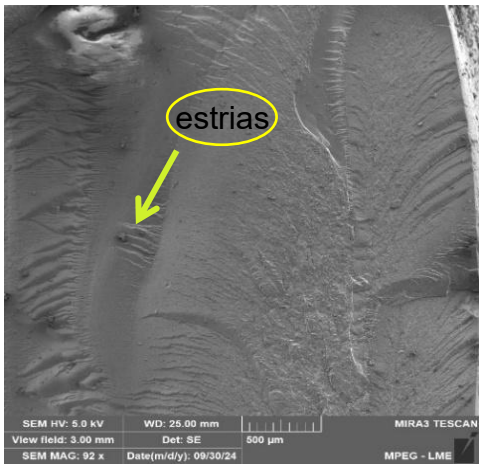
limitações na interface entre matriz hidrofóbica e fibra hidrofílica, o que pode comprometer a transferência de carga entre ambos.

No gráfico de deformação, e possível notar um comportamento inverso, em que os valores mais altos nas composições com menor módulo, e o que se espera, pois os materiais mais rígidos tendem a deformar menos. Essa redução na deformação e vista nas composições de 10 e 20%, em que se confirma o reforço estrutural e aumento na capacidade de suportar tensões.

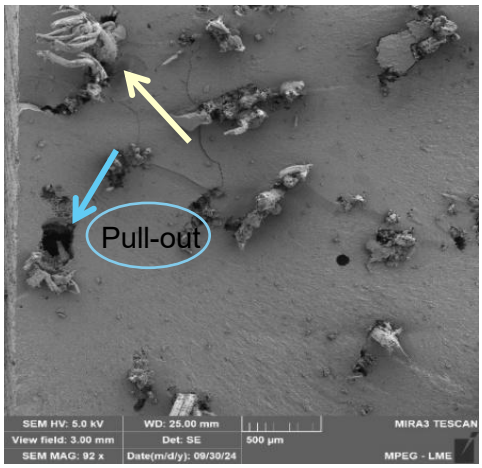
4.7.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em compósitos

Na figura 31 apresenta as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fibras em compósitos de flexão.

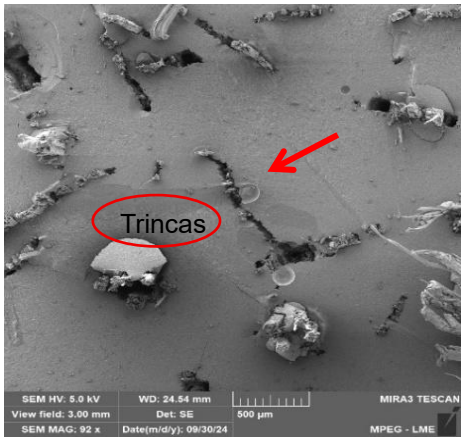
Figura 31:Morfologia da superfície do MEV do Compósito da Fibra de Munguba (a) Compósito de 0%; (b) Compósito de 10%; (c) Compósito de 20% e (d) Compósito de 30%.



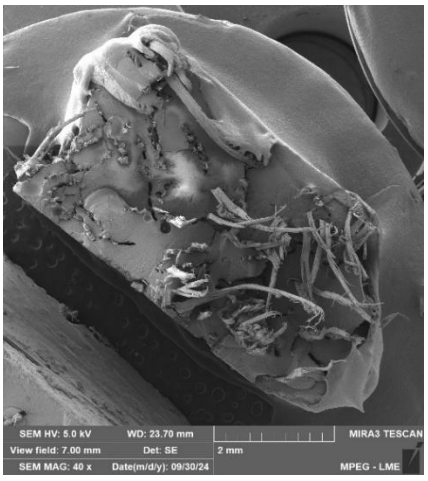
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: própria autora, 2025

E possível observar nas figuras 31a, que a matriz do compósito de 0% representada pela seta amarela apresenta uma superfície com estrias, que podem ser resultantes de um processo de deformação, características da fratura do tipo frágil. Sendo assim, e possível observar algumas áreas com variações de rugosidade. Estas características são citadas pelos autores Santa Rosa *et al.*, 2025; Almeida *et al*., 2025 e Marchi *et al.,* 2022.

Na figura 31b, o compósito de 10% pode-se observar que a fibra representada pela seta branca apresenta características da superfície do compósito onde se percebe a presença de fragmentos de fibras e a evidência de cavidades que sugerem que houve falhas de adesão fibra e matriz. Como foi relatado por Reis *et al.,* 2021 em que essa baixa adesão interfacial é responsável por desencadear o efeito pull-out neste tipo de compósito, e pode ser a fonte de outro importante mecanismo de falha para compósitos, como o métodos de fabricação manual, como indicado pela seta azul em que fica bem evidente o fenômeno de pull-out, em que mostra que a fibra foi removida da matriz deixando assim um vazio visível, esse comportamento é característico dessa baixa aderência no que indicou uma baixa compatibilidade. Além disso e possível notar a presença de trincas que se distribuem ao redor das fibras, o que gera uma concentração de tensões, essas trincas de ocorrência principal nas bordas como indica na seta branca, de acordo com Rosa *et al.,* 2024 essas microfissuras são típicas de propagação de falhas devido a concentração de tensões naquele ponto.

Na figura 31c, e no compósito 20%, apresenta trincas em sua superfície, pode se observar também regiões com cavidades isoladas que indica pontos de concentração de tensões. De acordo com Reis *et al.,* 2021, esse resultado implica uma eficácia do reforço de fibra. Quando as fissuras surgem por toda a matriz, elas acabam sendo interrompidas e contidas pelas fibras presentes. Observa-se também a presença de bolhas e efeito pull-out, que pode ter acontecido devido a uma maior porcentagem de fibra no processo de moldagem.

A figura 31d, na composição de 30% apresenta fragmentos de fibras embutidas parcialmente na matriz e regiões de onde a fibra foi arrancada. Segundo Reis *et al.,* 2021 e o Wang *et al*., 2025, os mecanismos de pullout, são caracterizados pela retirada da fibra da matriz polimérica e comumente usados para descrever falha em compósitos reforçados com fibras com baixa adesão interfacial entre fibra e matriz. Onde observa que a separação da interface entre a fibra e a matriz, bem como o

arrancamento da fibra e a ocorrência de quebras localizadas. Esses fenômenos indicam que a resistência de ligação interfacial entre a fibra e a matriz é insuficiente, resultando em um comportamento típico de falha interfacial.

A análise morfológica demonstrou que a presença de defeitos nas fibras contribuiu para redução da resistência à flexão e para menor rigidez do material, observados nesse estudo. Dessa forma, fica evidente que houve uma boa distribuição de reforço, uma escolha adequada de fibra e o processo de fabricação são elementos fundamentais na obtenção de compósitos com boas propriedades mecânicas.

4.7.6. Análise Estatística

4.7.6.1. Análise estatística à flexão para compósitos

Análise Estatística dos dados foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA), para a caracterização mecânica é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15: Análise estatística à flexão

Resistência à flexão (MPa)

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1235,177	3	411,7255	3,209062	0,061845	3,490295
Dentro dos grupos	1539,611	12	128,3009			
Total	2774,788	15				

Modulo de Young (GPa)

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,26763	3	0,08921	2,319015	0,127176	3,490295
Dentro dos grupos	0,461628	12	0,038469			
Total	0,729258	15				

Deformação (mm/mm)

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F-calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,005397	3	0,001799	15,73466	0,000185	3,490295
Dentro dos grupos	0,001372	12	0,000114			
Total	0,00677	15				

Fonte: própria autora, 2025

Os resultados da ANOVA apontam os valores de F calculado de 3,20 é menor que o F crítico 3,49, para resistência a flexão que indica que não há uma diferença estatística significativa entre os grupos testados. No modulo de Young o valor de F calculado 2,31 é consideravelmente maior que o F crítico 3,49 e evidenciado que não

houve diferença estatística. Os resultados podem indicar a ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos analisados para todos os parâmetros mecânicos avaliados. Já para os resultados de deformação o F calculado 15,73 e F crítico 3,49 de muito maior. Esses resultados sugerem que, há uma diferença altamente significativa entre os grupos, o que indica que os tratamentos influenciaram na capacidade de deformação.

Diante disto, fez-se análise de teste Tukey. para identificar quais médias que diferem para cada composição. A Tabela 16 apresenta os resultados observados para as frações volumétricas investigadas.

Tabela 16: Teste Tukey para resistência à flexão, módulo de Young e deformação.

Resistencia à flexão – (D.M.S.:23,786)

Composição	0%	10%	20%	30%
0%	0	**23,76634**	17,01056	10,15761
10%	**23,76634**	0	6,755785	13,60874
20%	17,01056	6,755785	0	6,852951
30%	10,15761	13,60874	6,852951	0

Modulo de Young - (D.M.S.:0,411)

Composição	0%	10%	20%	30%
0%	0	0,194603	0,365341	0,19669
10%	0,194603	0	0,170738	0,002087
20%	0,365341	0,170738	0	0,168651
30%	0,19669	0,002087	0,168651	0

Deformação – (D.M.S.:0,022)

Composição	0%	10%	20%	30%
0%	0	**0,042864**	0,006529	0,002948
10%	**0,042864**	0	0,036335	**0,045812**
20%	0,006529	0,036335	0	0,009477
30%	0,002948	**0,045812**	0,009477	0

Fonte: própria autoria, 2025

Observa-se que não houve diferenças significativas entre algumas composições avaliadas. Para a resistência à flexão o DMS foi de 23,78 MPa, apresenta diferença significativa na composição de 10% em que chegou próximo ao valor do DMS, indicando que adição de fibra influenciou de forma significativa. O mesmo comportamento foi observado no modulo de Young, apresenta um DMS foi 0,41 GPa, em que todas as diferenças entre as médias permaneceram abaixo do limite. Já em deformação houve diferenças significativas entre as composições, e as pequenas

variações indicam que a adição de fibra influência de forma relevante na deformação, mantendo o compósito com o comportamento mecânico estável.

5. CONCLUSÃO

- As fibras de munguba apresentaram diâmetro predominante entre 0,26 e 0,60 mm, com média de 0,45 mm, evidenciando uniformidade dimensional.
- O FTIR confirmou a presença de celulose, hemicelulose e lignina, caracterizando a natureza lignocelulósica da fibra.
- A análise termogravimétrica (TGA) indicou estabilidade térmica até 200 °C, típica de fibras naturais, o que permite aplicações em compósitos poliméricos.
- As imagens de MEV mostraram superfícies rugosas nas fibras finas, favorecendo a adesão à matriz, e baixa rugosidade nas fibras grossas, que limitaram a transferência de carga.
- Nos ensaios de tração, as fibras mais finas apresentaram maior resistência (115,96 MPa) e módulo de Young (1,57 GPa), demonstrando relação inversa entre diâmetro e resistência.
- Nos compósitos, a matriz pura exibiu maior resistência à tração, com redução significativa ao adicionar 10 % de fibra; porém, em 20 % e 30 % houve leve recuperação.
- Em flexão, a composição com 10 % de fibra apresentou melhor desempenho, com aumento no módulo de Young e resistência à flexão (81,92 MPa).
- A ANOVA apontou diferenças significativas na deformação em flexão, reforçando que o comportamento mecânico está diretamente ligado à interação fibra-matriz.
- Conclui-se que a fibra de munguba é promissora como reforço em compósitos poliméricos, podendo ser mais bem aproveitada com tratamentos superficiais que aumentem a adesão interfacial.
- O estudo evidencia o potencial da biodiversidade amazônica na geração de materiais sustentáveis e incentiva novas pesquisas para otimizar o desempenho mecânico e ambiental dos compósitos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar outras matrizes poliméricas;
- Realizar DRX, para de avaliar a estrutura cristalina da fibra;
- Realizar o tratamento químico superficial das fibras de munguba para avaliar suas propriedades mecânicas, térmicas e químicas pós-tratamento;
- Produzir compósitos para ensaio de impacto Charpy e Izod e investigar o comportamento mecânico encontrado;

7. REFERÊNCIAS

Abdessamad Oushabi, The pull-out behavior of chemically treated lignocellulosic fibers/polymeric matrix interface (LF/PM): **A review, Composites Part B: Engineering,** Volume 174, 2019,107059, ISSN 1359-8368, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107059.

Abdollahiparsa H, Shahmirzaloo A, Teuffel P, Blok R. A review of recent developments in structural applications of natural fiber-Reinforced composites (NFRCs). **Composites and Advanced Materials**. 2023;32. doi:10.1177/26349833221147540

Aisyah, H.A.; Paridah, M.T.; Sapuan, S.M.; Ilyas, R.A.; Khalina, A.; Nurazzi, N.M.; Lee, S.H.; Lee, C.H. A Comprehensive Review on Advanced Sustainable Woven Natural Fibre Polymer Composites. **Polymers** 2021, *13*, 471. https://doi.org/10.3390/polym13030471

Akram, et al. Polymer-Reinforced Hybrid Composites: Review. **International Journal** 101271, 1 July 2023,https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271

Almeida, L. M., Rios da Silva, A. C., Duarte Lopes, F. P., Simonassi, N. T., Monteiro, S. N., & Candido, V. S. (2025). Caranan fibers (Mauritiella armata) and new reinforcements of polyester composites with natural fibers functionalized with graphene oxide and their application potential. **Journal of Materials Research and Technology**, *34*, 2232–2252. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.233

Alsuwait, R.B.; Souiyah, M.; Momohjimoh, I.; Ganiyu, S.A.; Bakare, A.O. Recent Development in the Processing, Properties, and Applications of Epoxy-Based Natural Fiber Polymer Biocomposites. **Polymers** 2023, *15*, 145. https://doi.org/10.3390/polym15010145

Antonella Sola, Wei Juene Chong, Dejana Pejak Simunec, Yuncang Li, Adrian Trinchi, Ilias (Louis) Kyratzis, Cuie Wen, Open challenges in tensile testing of additively manufactured polymers: A literature survey and a case study in fused filament fabrication, **Polymer Testing**, Volume 117, 2023,107859, ISSN 0142-9418, https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107859.

Arumugam, S.; Kandasamy, J.; Venkatesan, S.; Murugan, R.; Lakshmi Narayanan, V.; Sultan, MTH; Shahar, FS; Shah, AUM; Khan, T.; Sebaey, TA. Uma revisão sobre o efeito do reforço de tecido no aumento da resistência de compósitos de fibras naturais. **Materiais** 2022, *15* , 3025. https://doi.org/10.3390/ma15093025

Atmakuri, A.; Palevicius, A.; Vilkauskas, A.; Janusas, G. Review of Hybrid Fiber Based Composites with Nano Particles—Material Properties and Applications. **Polymers** 2020, *12*, 2088. https://doi.org/10.3390/polym12092088

Bahrami, M., Abenojar, J., & Martínez, MA (2020). Recent progress in hybrid biocomposites: mechanical properties, water absorption and flame retardancy. **Materiais***, 13* .

Brezas, S., Katsipis, M., Kaleris, K., Papadaki, H., Katerelos, DT, Papadogiannis, NA, Bakarezos, M., Dimitriou, V., & Kaselouris, E. (2024). **Revisão de Processos de Fabricação e Avaliações Vibro-Acústicas de Materiais Compósitos e Alternativos para Instrumentos Musicais**. *Ciências Aplicadas* .

Carvalho-Sobrinho, J.G.; Yoshikawa, V.N. *Pseudobombax in* **Flora e Funga do Brasil.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB23596>. Acesso em: 18 ago. 2025

Cazan, Cristina. Advances in Sustainable Polymeric Materials. **Polymers**, vol. 14, no. 22, 17 Nov. 2022, p. 4972, https://doi.org/10.3390/polym14224972.

da Silveira, P.H.P.M.; Cardoso, B.F.d.A.F.; Marchi, B.Z.; Monteiro, S.N. Amazon Natural Fibers for Application in Engineering Composites and Sustainable Actions: A Review. *Eng* 2024, *5*, 133-179. https://doi.org/10.3390/eng5010009

de Farias, J.G.; Cavalcante, R.C.; Canabarro, B.R.; Viana, H.M.; Scholz, S.; Simão, R.A. Surface lignin removal on coir fibers by plasma treatment for improved adhesion in thermoplastic starch composites. **Carbohydr. Polym***.* **2017**, *165*, 429–436.

de Lima, TES; de Azevedo, ARG; Marvila, MT; Cândido, VS; Fediuk, R.; Monteiro, SN Potencial de utilização de fibras naturais da Amazônia para reforço de compósitos cimentícios: uma revisão. **Polímeros** 2022 , 14 , 647. https://doi.org/10.3390/polym14030647

Dejene, B. K. (2024). False Banana (Enset Ventricosum) Fibers: An Emerging Natural Fiber with Distinct Properties, Promising Potentials, Challenges and Future Prospects–A Critical Review. **Journal of Natural Fibers**, *21*(1). https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2311303

Dipen Kumar Rajak, Durgesh D. Pagar, Ravinder Kumar, Catalin I. Pruncu, Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials, **Journal of Materials Research and Technology**, Volume 8, Issue 6, 2019, Pages 6354-6374, ISSN 2238-7854, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068.

Elfaleh, I. et al. A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco friendly alternative to conventional materials. **Results in Engineering**, v. 19, n. 101271, p. 101271–101271, 1 jul. 2023.

Flora do Brasil. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/listaBrasil/FichaPublicaTaxonUC/FichaPublicaTaxonUC.do?id=FB23596>. Acesso em: 21 jul. 2025.

Greene, J. P. Automotive plastics and composites: Materials and processing. Norwich, CT, USA: William Andrew Publishing, 2021.

GRIBEL, R.; ABBOTT, R. J. Genetics of cytosolic phosphoglucose isomerase (PGI) variation in the Amazonian tree Pseudobombax munguba (Bombacaceae). Heredity, v. 76, p. 531 -538,1996

GRIBEL,R; ABBOTT, L. 1995**. Reprodutive Biology of Two Bombaceceae Tres in the Brazilian Central Amazon Doctor of Pfilosophy's Thesis**. University of St. Andrews united Kingdon, 1985 p.

I. Elser, M. R. Buchmeiser, Toward Sustainable Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Macromol. Mater. Eng.* 2024, 309, 2400013. **https://doi.org/10.1002/mame.202400013**

Issam Elfaleh, Fethi Abbassi, Mohamed Habibi, Furqan Ahmad Mohamed Guedri, Mondher Nasri, Christian Garnier, A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional **materials**, Results in Engineering, Volume 19, 2023, 101271, ISSN 2590-1230, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271.

jR. Lozada, E., Gutierrez Aguilar, C.M., Jaramillo Carvalho, J.A., Sánchez, J.C., & Barrera Torres, G. (2023). Vegetable Cellulose Fibers in Natural Rubber Composites. **Polymers***, 15*.

Kamarudin, S.H.; Mohd Basri, M.S.; Rayung, M.; Abu, F.; Ahmad, S.; Norizan, M.N.; Osman, S.; Sarifuddin, N.; Desa, M.S.Z.M.; Abdullah, U.H.; et al. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. **Polymers** 2022, 14, 3698. https://doi.org/10.3390/polym14173698

Karadimas, G.; Salonitis, K. Ceramic Matrix Composites for Aero Engine Applications—A Review. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 3017. https://doi.org/10.3390/app13053017

Karimah, A.; Ridho, M.R.; Munawar, S.S.; Ismadi; Amin, Y.; Damayanti, R.; Lubis, M.A.R.; Wulandari, A.P.; Nurindah; Iswanto, A.H.; et al. A Comprehensive Review on Natural Fibers: Technological and Socio-Economical Aspects. **Polymers** 2021, 13, 4280. https://doi.org/10.3390/polym13244280

Keppler, Stefan Friedrich **Potenciais socioeconômicos e ambientais da exploração comercial da paina da munguba, Pseudobombax munguba** (Mart. & Zucc.) Dugand, na Amazônia Central, Brasil / Stefan Friedrich Keppler. 2020 144 f.: il. color; 31 cm.

Königsberger, M., Lukacevic, M. & Füssl, J. Multiscale micromechanics modeling of plant fibers: upscaling of stiffness and elastic limits from cellulose nanofibrils to technical fibers. Mater Struct 56, 13 (2023). https://doi.org/10.1617/s11527-022-02097-2

KUMAR, N.; KANDASAMI, R. K.; SINGH, S. Effective utilization of natural fibres (coir and jute) for sustainable low-volume rural road construction – A critical review**. Construction and building materials**, v. 347, n. 128606, p. 128606, 2022.

L. Rajeshkumar, P. Sathish Kumar, M. Ramesh, M.R. Sanjay, Suchart Siengchin, Assessment of biodegradation of lignocellulosic fiber-based composites – A systematic review, **International Journal of Biological Macromolecules**, Volume 253, Part 5, 2023, 127237, ISSN 0141-8130, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127237.

Lopes, R.V., Leite, J.C., Fujiyama, R.T., Afonso, M.R., & Hermenegildo, E.R. (2015). Matrix polyester composite strengthened by munguba fiber (pseudobombax munguba) Amazon. **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications***, 1*.

Lotfi A, Li H, Dao DV, Prusty G. Natural fiber–reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**. 2019;34(2):238-284. doi:10.1177/0892705719844546.

Madueke, C.I., Mbah, O.M. & Umunakwe, R. A review on the limitations of natural fibres and natural fibre composites with emphasis on tensile strength using coir as a case study. **Polym**. Bull. 80, 3489–3506 (2023). https://doi.org/10.1007/s00289-022-04241-y

Maiti, S., Islam, M.R., Uddin, M.A., Afroj, S., Eichhorn, S.J., & Karim, N. (2022). Sustainable Fiber-Reinforced Composites: **A Review. Advanced Sustainable Systems***, 6*.

Makri H, Rokbi M, Meddah M, Belayachi N, Khaldoune A. Extraction and characterization of novel lignocellulosic fibers from Centaurea hyalolepis plant as a potential reinforcement for composite materials**. Journal of Composite Materials**. 2023;57(21):3317-3330. doi:10.1177/00219983231184020

Marchi Bz.; Oliveira Ms.; Bezerra Wba.; Sousa Tg.; Candido Vs.; Silva Acr.; Monteiro Sn. Ubim Fiber (Geonoma baculífera): A Less Known Brazilian Amazon Natural Fiber for Engineering Applications. **Sustainability**, 14(1):421, 2022. https://doi.org/10.3390/su14010421.

Mendoza-Quiroga, R., Mercado-Caruso, N., Fabregas-Villegas, J., Villa Domínguez, J., & Chimento, J. (2022). Effect of the Morphology Measuring Methods of Coconut Fiber on the Determination of Mechanical Tensile Properties**. Journal of Natural Fibers**, *19*(15), 11818–11830. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2044962

Menicucci, T. A., 2007, **Filogeografia e estrutura genética de populações da mungubeira (pseudobombax munguba (mart.&zucc.) dugand,malvaceae - bombacoideae) na Amazônia brasileira**. 2007. Dissertação (Mestrado em Biologia Tropical e Recursos Naturais), Instituto

Nacional de Pesquisas da Amazônia Universidade Federal do Amazonas, Manaus/AM.

Mochane, M.J.; Magagula, S.I.; Sefadi, J.S.; Mokhena, T.C. A Review on Green Composites Based on Natural Fiber-Reinforced Polybutylene Succinate (PBS). **Polymers** 2021, 13, 1200. https://doi.org/10.3390/polym13081200

Muñoz-Blandón, O.; Ramírez-Carmona, M.; Rendón-Castrillón, L.; Ocampo-López, C. Exploring the Potential of Fique Fiber as a Natural Composite Material: A Comprehensive Characterization Study. **Polymers** 2023, 15, 2712. https://doi.org/10.3390/polym15122712

Nascimento, Damares da Cruz Barbosa. **AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DAS FIBRAS DE COTIA E DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER** / Damares da Cruz Barbosa Nascimento. — 2025. 129 f. : il. color.

NASCIMENTO, L. F. C. **Caracterização do compósito epóxi-fibra de malva para emprego em blindagem balística multicamada**. 2017. 179f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, 2017.

Nashmi H. Alrasheedi, P. Manoj Kumar, D. Balaji, M. Sathishkumar, Hybrid natural fiber composites based on cashew apple bagasse and mahogany fruit for multifunctional performance, **Journal of Materials** Research and Technology, Volume 37, 2025,Pages 4739-4751, ISSN 2238-7854, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.111.

Neto, J.S.S.; de Queiroz, H.F.M.; Aguiar, R.A.A.; Banea, M.D. A Review on the Thermal Characterisation of Natural and Hybrid Fiber Composites. **Polymers** 2021, 13, 4425. https://doi.org/10.3390/polym13244425

Oliveira, A. S., Villela, L. S., Veloso, M. C. R. A., Silva, D. W., Mendes, L. M., & Guimarães Junior, J. B. (2020). Compósitos com matriz de gesso reforçada com fibras de madeira de eucalipto. **Scientia Forestalis**, 48(127), e3260. https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.23

Oliveira, M. S., Luz, F. S. da, & Monteiro, S. N. (2022). ESTUDO DO ÍNDICE DE CRISTALINIDADE E ÂNGULO MICROFIBRILAR DE FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS: TUCUM E FIQUE. **ABM Proceedings**.

Pinheiro, Ivanei Ferreira **Biocompósitos poliméricos de poli(butileno adipatoco-tereftalato) - PBAT e fibra natural de Munguba, nativa da Amazônia (Pseudobombax munguba)** / Ivanei Ferreira Pinheiro. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Pinheiro, MA; Ribeiro, M.M.; Rosa, DLS; Nascimento, DdCB; da Silva, ACR; dos Reis, MAL; Monteiro, SN; Candido, VS Periquiteira (Cochlospermum orinocense): Uma fibra amazônica promissora para aplicação em materiais compósitos. **Polímeros** 2023 , 15 , 2120. https://doi.org/10.3390/polym15092120

Prabhu, P. & Balakrishnan, Karthikeyan & Malar Vannan, Ravi & Alagappan, Balaji. (2022). Mechanical, thermal and morphological analysis of hybrid natural and glass fiber-reinforced hybrid resin nanocomposites. **Biomass Conversion and Biorefinery**. 14. 10.1007/s13399-022-02632-9.

Prasad, V.; Alliyankal Vijayakumar, A.; Jose, T.; George, S.C. A Comprehensive Review of Sustainability in Natural-Fiber-Reinforced Polymers. **Sustainability 2024**, *16*, 1223. https://doi.org/10.3390/su16031223

Raimundo V. P. Lopes et al./ ITEGAM-JETIA Vol.01, No 02, pp.62-68. Junho, 2015.

Raj, V.A.; Sankar, K.; Narayanasamy, P.; Moorthy, I.G.; Sivakumar, N.; Rajaram, S.K.; Karuppiah, P.; Shaik, M.R.; Alwarthan, A.; Oh, T.H.; et al. Development and Characterization of Bio-Based Composite Films for Food Packing Applications Using Boiled Rice Water and Pistacia vera Shells. **Polymers** 2023, 15, 3456. https://doi.org/10.3390/polym15163456

Rajak, D.K., Wagh, P.H., & Linul, E. (2022). A Review on Synthetic Fibers for Polymer Matrix Composites: Performance, Failure Modes and Applications. **Materials***, 15*.

Richely, E.; Durand, S.; Melelli, A.; Kao, A.; Magueresse, A.; Dhakal, H.; Gorshkova, T.; Callebert, F.; Bourmaud, A.; Beaugrand, J.; et al. Novel Insight into the Intricate Shape of Flax Fibre Lumen. **Fibers** 2021, 9, 24. https://doi.org/10.3390/fib9040024

S. Maiti, M. R. Islam, M. A. Uddin, S. Afroj, S. J. Eichhorn, N. Karim, Sustainable Fiber-Reinforced Composites: **A Review. Adv. Sustainable** *Syst.* 2022, 6, 2200258. **https://doi.org/10.1002/adsu.202200258**

Santa Rosa, D. L., Nascimento, D. da C. B., Duarte Lopes, F. P., Simonassi, N. T., Monteiro, S. N., Rios da Silva, A. C., & Scarpini Candido, V. (2025). Matamata (Lecythis idatimon): A novel lighter cost-effective amazonian fiber for eco-friendly composite applications in furniture design. **Journal of Materials Research and Technology,** *38*, 4027–4048. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.221

Santos, a. G. A. Et al. Caracterização morfológica da fibra de tururi para avaliar seu potencial uso como reforço de matriz polimérica. ABM Proceedings. Anais...São Paulo: **Editora Blucher**, 2022.

SARKER, F.; KARIM, N.; AFROJ, S.; KONCHERRY, V.; NOVOSELOV, K. S.; POTLURI, P. Compósitos de fibras naturais de alto desempenho à base de grafeno. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 10, 34502–34512, 2018. https://doi.org/10.1021/acsami.8b13018.

Seyoum, D., Asratie, A., Gnanadurai, R. et al. Experimental characterization of Grewia Ferruginea fiber reinforced polyester matrix composite materials. **Functional Composite** Mater 5, 7 (2024). https://doi.org/10.1186/s42252-024-00057-3

Shahinur, S.; Hasan, M.; Ahsan, Q.; Haider, J. Efeito do tratamento químico nas propriedades térmicas da fibra de juta usada em compósitos poliméricos. J. Compos. 2020 , 4 , 132. https://doi.org/10.3390/jcs4030132

Silva, D. S., Ribeiro, M. M., Rodrigues, J. da S., Corrêa, A. de C., Costa, D. C. L., Costa, H. A. de O., Silva, F. J. A. R. da, Santos, A. J. G. dos, Silva, M. H. P. da, & Fujiyama, R. T. (2022). Properties of flexural and impact of matrix composites polyester reinforced with short lignocellulosic fibers. **Research, Society and Development**, *11*(3), e32511326612. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26612

Silva, j.a.m; Filho, m. P; Oliveira-Pereira. 2003. Frutos e sementes consumidos pelo Tambaqui, Colossoma macrompum (Cuvier, 19818). Incorporados em rações. Digestibilidade e velocidade de trânsito pelo trato gastrointestinal. **R. Bras. Zootec**., v. 32 (6): 1815-1824 p

Simonassi, n. T.; pereira, a. C.; monteiro, s. N. Resistência a tração de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras naturais de curauá de alto desempenho. ABM Proceedings. Anais...São Paulo: **Editora Blucher**, 2019.

Stănescu, M.M.; Bolcu, A. A Study of the Mechanical Properties in Composite Materials with a Dammar Based Hybrid Matrix and Reinforcement from Crushed Shells of Sunflower Seeds. **Polymers** 2022, 14, 392. https://doi.org/10.3390/polym14030392

Suriani, M.J.; Radzi, F.S.M.; Ilyas, R.A.; Petrů, M.; Sapuan, S.M.; Ruzaidi, C.M. Flammability, Tensile, and Morphological Properties of Oil Palm Empty Fruit Bunches Fiber/Pet Yarn-Reinforced Epoxy Fire Retardant Hybrid Polymer Composites. **Polymers** 2021, 13, 1282. https://doi.org/10.3390/polym13081282

T., A., J. O., O., & R. O., A. (2021). Analysis of Variance: The Fundamental Concepts and Application with R. **International Journal Of Mathematics And Computer Research**, 9(10), 2408-2422. https://doi.org/10.47191/ijmcr/v9i10.04

Tanriverdiyev, YA, & Alovsat (2024). Classification and properties of composites based on matrix material. **World Journal of Advanced Research and Reviews**. https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.2.3608

Tavares, S.S., de Mendonça Neuba, L., Lopera, H.C. et al. The embira bark fiber: a sustainable Amazon tape. Adv Compos Hybrid Mater 8, 184 (2025). https://doi.org/10.1007/s42114-024-01170-4

Thapliyal, D.; Verma, S.; Sen, P.; Kumar, R.; Thakur, A.; Tiwari, AK; Singh, D.; Verros, GD; Aria, Compósitos de Fibras Naturais RK: Origem, Importância, Padrão de Consumo e Desafios.J. Compos. **Ciência**.2023,7, 506. https://doi.org/ 10.3390/jcs7120506

Thimmegowda, D.Y.; Hindi, J.; Markunti, G.B.; Kakunje, M. Enhancement of Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites Using

Different Approaches—A Review**. *J. Compos.*** *Sci.* 2025, *9*, 220. https://doi.org/10.3390/jcs9050220

Veigas, MG; Najimi, M.; Shafei, B. Compósitos cimentícios feitos com fibras naturais: Investigação de fibras de sisal revestidas e não revestidas. Estudo de Caso. Constr. Mater. 2021 , 16 , e00788.

Venkatarajan, S. et al. Effects of fiber content and its chemical treatment on the mechanical properties of screw pine fiber reinforced vinyl ester composite. **Materials research express**, v. 9, n. 6, p. 065308, 2022.

Wang, X.; Li, H.; Camilleri, D.; Surnam, B.Y.R.; Wu, Z.; Cheng, X.; Shi, L.; Lu, W. Analysis of Interfacial Properties in Flax Yarn-Reinforced Epoxy Resin Composites. **Fibers** 2025, 13, 118. https://doi.org/10.3390/fib13090118

Wembe, Brillant Djomsi, Wiryikfu, Nfor Clins, Ntamack, Guy Edgar, Kenmeugne, Bienvenue, Tchotang, Theodore, Rolland, Djomi, Stanislas, T ido Tiwa, Extraction and Physicochemical and Thermomechanical Characterizations of Water Hyacinth Fibers Eichhornia crassipes**, International Journal of Polymer Science**, 2023, 6652978, 9 pages, 2023. https://doi.org/10.1155/2023/6652978

Winne, JM, Leibler, L., & Du Prez, FE (2019). Química covalente dinâmica em redes poliméricas: uma perspectiva mecanicista. **Química de Polímeros** .

Wondmagegnehu BT. Investigating the influence of sugarcane bagasse ash volume variation in glass fiber reinforced with epoxy resin matrix composite material. **Polymers and Polymer Composites**. 2023;31. doi:10.1177/09673911231196037

YANG, J.; CHING, Y. C.; CHUAH, C. H. Applications of lignocellulosic fibers and lignin in bioplastics: A review. **Polymers,** v. 11, n. 5, p. 751, 2019. https://doi.org/10.3390/polym11050751

Zaini, E.S.; Azaman, M.D.; Jamali, M.S.; Ismail, K.A. Synthesis and characterization of natural fiber reinforced polymer composites as core for honeycomb core structure: A review. *J. Sandw. Struct. Mater.* ***2020***, *22*, 525–550

Zhang, Z. et al. High performances of plant fiber reinforced composites—A new insight from hierarchical microstructures. **Composites Science and Technology**, v. 194, p. 108151, jul. 2020.

Zwawi, M. A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications. **Molecules** 2021, *26*, 404. https://doi.org/10.3390/molecules26020404