



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

SARAH GABRIELLY BRANDÃO DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ
POLIMÉRICA EPÓXI REFORÇADOS COM PORCENTAGENS ALTERNADAS DE
FIBRAS DE ENVIRA PRETA (*Bocageopsis multiflora*)**

Ananindeua, PA

2025

SARAH GABRIELLY BRANDÃO DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ
POLIMÉRICA EPÓXI REFORÇADOS COM PORCENTAGENS ALTERNADAS DE
FIBRAS DE ENVIRA PRETA (*Bocageopsis multiflora*)**

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: Prof^a. Dr^a. Verônica Scarpini Candido.

Ananindeua, PA

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S719a Souza, Sarah Gabrielly Brandão de.
Avaliação das prioridades mecânicas de compósitos de matriz polimérica epóxi reforçados com porcentagens alternadas de fibras de envira preta (*Bocageopsis multiflora*) / Sarah Gabrielly Brandão de Souza. — 2025.
71 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Verônica Scarpini Candido
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2025.

1. Compósitos de Matriz Polimérica . 2. Fibras Vegetais Amazônicas. 3. Fibras de Envira Preta . 4. Propriedades Mecânicas . 5. Análise Estatística . I. Título.

CDD 620.11

SARAH GABRIELLY BRANDÃO DE SOUZA

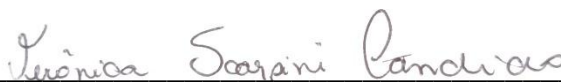
**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ
POLIMÉRICA EPÓXI REFORÇADOS COM PORCENTAGENS ALTERNADAS DE
FIBRAS DE ENVIRA PRETA (*Bocageopsis multiflora*)**

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.

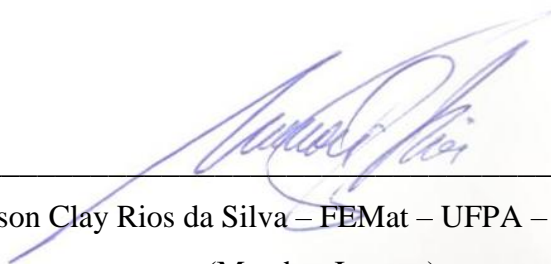
Data da Avaliação: 27/02/2025

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA:



Prof^a. Dr^a. Verônica Scarpini Candido – FEMat – UFPA – *Campus* Ananindeua
(Orientadora)



Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva – FEMat – UFPA – *Campus* Ananindeua
(Membro Interno)



Prof. Dr. Marcos Vinícius da Silva Paula – FEMat – UFPA – *Campus* Ananindeua
(Membro Interno)

Dedico este trabalho à minha vó Zuleika Brandão e à minha madrinha Maria Augusta, que sob muito sol, fizeram-me chegar na sombra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir viver este sonho e me fortalecer em todos os momentos que fraquejei, sem Ele, nada disso seria possível.

A minha vó, Zuleika Brandão, que é meu maior alicerce, que me incentivou desde pequena a persistir e acreditar nos meus sonhos, que pegou na minha mão para me ensinar a escrever, e que agora, pega na minha mão para concluir este ciclo. Obrigada por ser o maior exemplo que tenho em minha vida.

Ao meu avô, Augusto Reis, que por muitas noites que passei em claro, mesmo sem entender o porquê, me fez companhia até quando pode. Obrigada por mostrar que lealdade e honestidade não são negociáveis.

A minha mãe, Cristhianne Brandão, por me amar e apoiar incondicionalmente. Obrigada por me trazer conforto nas horas em que meu coração se encontrava aflito.

Ao meu pai, Lincoln Brandão, por acreditar mais em mim do que eu mesma, por me mostrar que o esforço nos leva a lugares inimagináveis e que precisamos “dar a cara” ao mundo para vencer. Obrigada por todas as mensagens que me tiraram de muitos momentos de angústia.

A minha madrinha, Maria Augusta, por ser minha amiga, mãe, parceira, confidente e o maior exemplo de caráter e integridade que eu tenho. Obrigada por me acompanhar desde os primeiros dias da escola e por estar ao meu lado em todos os momentos, essa vitória é nossa!

Aos meus irmãos, Gabriel, Gabryella, Nicolas, Lincoln Jr e Melissa, por despertarem o melhor lado em mim, por me impulsionarem, mesmo sem saber, a ser uma pessoa melhor. Obrigada por todos os momentos que eu senti o amor mais puro e genuíno ao lado de vocês.

Ao meu companheiro de vida, Luiz Viana, que nos momentos em que eu mesma não queria estar perto de mim, permaneceu ao meu lado, cuidou de mim, me escutou, me aconselhou e me incentivou. Esse trabalho não seria o mesmo sem você. Obrigada por ser meu porto seguro, por acreditar em mim e por me amar plenamente.

A minha madrastra, Andressa Pina, por ser minha amiga e parceira de todos os momentos. Obrigada por acreditar tanto em mim.

Ao restante da minha família: padrasto, tios e primos, por torcerem por mim de perto e de longe.

A minha segunda família: minha madrinha Fabiola, que vibrou com cada uma das minhas conquistas, meu irmão Leonam, que trouxe a alegria e descontração nos momentos de aflição, e minha irmã Lanna, que foi o apoio e refúgio durante esse processo e durante toda minha vida.

Aos meus sogros, Rosane e Sandro, por terem tornado o processo mais leve e divertido e por terem me acolhido com tanto carinho em sua família.

Aos amigos que tive o privilégio de conhecer graças a faculdade: Giovana Zagalo, Paulo Aranha, Paloma Sousa, Manoel Vinicius e Joelly Nascimento. Trago um pouco de vocês por onde eu estiver e sei que vocês brilharão por onde passarem. Obrigada por todos os momentos que guardo com tanto carinho em minha memória.

A minha orientadora, Verônica Scarpini, por ser o meu maior exemplo de profissional e pesquisadora. Obrigada por me acolher, acreditar em mim e repassar todos os ensinamentos necessários para desenvolver esta pesquisa.

A todos os professores da FEMat, que foram essenciais nesse caminho e contribuíram para minha formação acadêmica. Em especial, ao Prof. Edegarino Araújo, que fomentou minha paixão por materiais cerâmicos e ao Prof. Alisson Rios, que abriu as portas para meu interesse por materiais compósitos.

Ao GPMCOMP e todos que o integram. Em especial, Miriane Pinheiro, por ter me dado a base e todo chão de laboratório para mergulhar na pesquisa; Damares Barbosa, por todo conhecimento repassado em relação a escrita científica e tratamento de dados, e Edson Miranda, que além de me ensinar tudo que sei sobre manufatura aditiva, com toda paciência do mundo, se tornou um amigo muito querido.

A Universidade Federal do Pará, *Campus* Ananindeua, por ter sido meu lar durante esses anos e a Turma 2020, por todos os momentos passados.

A todos, meu Muito Obrigada!

“Depois do medo, vem o mundo”

Clarice Lispector

RESUMO

A busca por reforços naturais que sejam alternativas sustentáveis aos reforços sintéticos é de extrema importância para produção de materiais compósitos mais responsáveis ecologicamente. Em vista disso, a Amazônia se tornou foco de estudos devido a sua inexplorada diversidade vegetal. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a incorporação volumétrica (5, 15, 25, 35 e 45%) de fibras de envira preta (*Bocageopsis multiflora*), uma planta pouco explorada na região amazônica, em uma matriz polimérica epóxi, com o intuito de investigar suas propriedades mecânicas e características físicas, químicas, térmicas e morfológicas. Em relação as características físicas, a fibra de envira apresentou massa específica de $0,25\text{g/cm}^3$, seção transversal circular, relação inversa entre densidade e diâmetro, aspecto rugoso e superfície longitudinal. O FTIR apresentou os grupos funcionais característicos das fibras lignocelulósicas como celulose, hemicelulose e lignina, e o TG/DTG, indicou que a fibra de envira perde cerca de 69% de massa até degradar totalmente a $365,50^\circ\text{C}$. Em relação as propriedades mecânicas, além de aumentar a rigidez do material, a adição de fibras de envira proporcionou um aumento significativo na resistência à tração e flexão, especialmente na fração volumétrica de 45%, onde apresentou resultados de 78 e 95 MPa, respectivamente, confirmados pela análise estatística via Análise de Variância (ANOVA) e Teste Tukey. Logo, os resultados obtidos neste estudo evidenciam o grande potencial das fibras de envira preta como reforço em compósitos de matriz polimérica epóxi, tanto por apresentarem características físicas, mecânicas e químicas compatíveis com aplicações estruturais, como pelo seu caráter renovável, sua abundância na região amazônica e pela possibilidade de contribuir significativamente para a redução da dependência de reforços sintéticos e se alinhar as diretrizes da sustentabilidade.

Palavra(s)-chave: Compósitos poliméricos, Fibras de Envira Preta, Propriedades Mecânicas, Sustentabilidade, Análise Estatística.

ABSTRACT

The search for natural reinforcements as sustainable alternatives to synthetic reinforcements is of utmost importance for the production of more environmentally responsible composite materials. In view of this, the Amazon has become a focus of studies due to its unexplored plant diversity. Thus, this study aims to evaluate the volumetric incorporation (5, 15, 25, 35, and 45%) of envira preta fibers (*Bocageopsis multiflora*), a plant scarcely explored in the Amazon region, into an epoxy polymer matrix to investigate its mechanical properties and physical, chemical, thermal, and morphological characteristics. Regarding physical characteristics, the envira fiber exhibited a specific mass of 0.25 g/cm³, a circular cross-section, an inverse relationship between density and diameter, a rough texture, and a longitudinal surface. FTIR analysis identified functional groups characteristic of lignocellulosic fibers, such as cellulose, hemicellulose, and lignin, while TG/DTG analysis indicated that the envira fiber loses approximately 69% of its mass before completely degrading at 365.50°C. Regarding mechanical properties, in addition to increasing the material's stiffness, the addition of envira fibers significantly improved tensile and flexural strength, especially at the 45% volumetric fraction, where it achieved results of 78 MPa and 95 MPa, respectively, confirmed by statistical analysis using Analysis of Variance (ANOVA) and Tukey's Test. Therefore, the results obtained in this study highlight the great potential of envira preta fibers as reinforcement in epoxy polymer matrix composites. These fibers not only exhibit physical, mechanical, and chemical characteristics suitable for structural applications but also stand out for their renewable nature, their abundance in the Amazon region, and their potential to significantly reduce dependence on synthetic reinforcements while aligning with sustainability guidelines.

Keywords: Polymer Composites, Black Envira Fibers, Mechanical Properties, Sustainability, Statistical Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Classificação de compósitos com base nos tipos de matriz e reforço..... | 19 |
| Figura 2: Tipos de reforços de materiais compósitos..... | 21 |
| Figura 3: Diferença representativa entre (a) polímero termoplástico e (b) polímero termorrígido..... | 22 |
| Figura 4: Grupo oxirano | 24 |
| Figura 5: Processo de formação da resina epóxi..... | 24 |
| Figura 6: Processo de cura da resina epóxi..... | 25 |
| Figura 7: Classificação das fibras sintéticas | 26 |
| Figura 8: Classificação das fibras naturais | 28 |
| Figura 9: Estrutura molecular da celulose | 30 |
| Figura 10: Estrutura molecular xiloglucano..... | 31 |
| Figura 11: (a) estrutura proposta da lignina; (b) álcoois primários (monômeros) da lignina... | 31 |
| Figura 12: Estrutura organizacional de fibras vegetais..... | 32 |
| Figura 13: Árvore de Envira..... | 33 |
| Figura 14: (a) Casca de envira (b) Resina (c) Epóxi | 36 |
| Figura 15: Fibras de envira..... | 37 |
| Figura 16: Microscópio óptico | 38 |
| Figura 17: Dimensões em milímetros de corpos de prova estipulados pela norma ASTM D638 para tração | 41 |
| Figura 18: Dimensões em milímetros de corpos de prova estipulados pela norma ASTM D790 para flexão | 42 |
| Figura 19: (a) Ensaio de tração; (b) Ensaio de flexão | 43 |
| Figura 20: Gráfico do número de fibras em relação ao intervalo de diâmetro..... | 46 |
| Figura 21 Gráfico da densidade geométrica em relação ao intervalo de diâmetro..... | 47 |
| Figura 22: Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier da fibra de envira..... | 48 |
| Figura 23: Análise termogravimétrica da fibra de Envira | 49 |
| Figura 24: Microscopia Eletrônica de Varredura da fibra de envira em diferentes diâmetros com aumento de 800×..... | 50 |
| Figura 25: Resistência à tração de fibras isoladas de Envira..... | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 26: Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de envira. | 52 |
| Figura 27: Aspecto macroscópico de corpos de prova de tração de diferentes porcentagens após serem fraturados | 53 |
| Figura 28: Resistência à tração de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras de envira. | 54 |
| Figura 29: Módulo de Young e deformação de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras de envira. | 55 |
| Figura 30: Aspecto da fratura dos corpos de prova após ensaio de flexão..... | 56 |
| Figura 31: Resistência à flexão de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras de envira | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Propriedades de resinas poliméricas do tipo termofixas. | 22 |
| Tabela 2: Vantagens e limitações das resinas poliméricas. | 23 |
| Tabela 3: Diferença entre as características de reforços sintéticos e naturais | 26 |
| Tabela 4: Diferença na pegada de carbono de fibras naturais e sintéticas | 27 |
| Tabela 5: Custos de fibras sintéticas e naturais | 28 |
| Tabela 6: Composição química das fibras lignocelulósicas | 29 |
| Tabela 7: Parâmetros dos corpos de provas produzidos..... | 40 |
| Tabela 8: Parâmetros da ANOVA..... | 44 |
| Tabela 9: Valores para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação para compósitos de matriz epóxi reforçados com frações volumétricas de fibras de envira | 54 |
| Tabela 10 - Comparativo de desempenho de compósitos epóxi reforçados com fibras naturais. | 56 |
| Tabela 11 - Valores para resistência à tração e módulo de elasticidade para compósitos de matriz epóxi reforçados com frações volumétricas de fibras de envira | 58 |
| Tabela 12 - análise de variância para resistência à tração, módulo de Young e deformação... .. | 58 |
| Tabela 13 - Teste Tukey para as propriedades de tração dos materiais compósitos ensaiados .. | 59 |
| Tabela 14 - análise de variância para resistência à flexão, módulo de Young e deformação. . | 60 |
| Tabela 15 - Teste Tukey para as propriedades de flexão dos materiais compósitos ensaiados. | 61 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 16 |
| 1.2 | OBJETIVO GERAL | 17 |
| 1.2.1 | Objetivos específicos | 17 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 19 |
| 2.1 | MATERIAIS COMPÓSITOS..... | 19 |
| 2.2 | RESINA POLIMÉRICAS..... | 21 |
| 2.2.1 | Resina Epóxi | 24 |
| 2.3 | REFORÇOS FIBROSOS DE MATRIZES POLIMÉRICAS | 25 |
| 2.3.1 | Fibras Lignocelulósicas..... | 29 |
| 2.3.2 | Fibras de Envira | 32 |
| 2.4 | MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS | 33 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 36 |
| 3.1 | MATERIAIS..... | 36 |
| 3.1.1 | Beneficiamento da matéria prima | 36 |
| 3.2 | MÉTODOS | 37 |
| 3.2.1 | Caracterização física | 37 |
| 3.2.1.1 | Diâmetro fibrilar | 37 |
| 3.2.1.2 | Densidade Geométrica | 38 |
| 3.2.2 | Espectroscopia por Transformada de Fourier (FTIR);..... | 39 |
| 3.2.3 | Análise Termogravimétrica (TG/DTG) | 39 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.4 | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)..... | 39 |
| 3.2.5 | Ensaio de Tração das Fibras Isoladas..... | 39 |
| 3.2.6 | Fabricação dos compósitos | 39 |
| 3.2.6.1 | Caracterização mecânica dos compósitos..... | 41 |
| 3.2.7 | Análise estatística..... | 44 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 46 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL..... | 46 |
| 4.1.1 | Determinação da Densidade Geométrica | 47 |
| 4.2 | ESPECTROSCOPIA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) | 48 |
| 4.3 | ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG/DTG)..... | 49 |
| 4.4 | MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) | 50 |
| 4.5 | ENSAIO DE TRAÇÃO DAS FIBRAS ISOLADAS..... | 51 |
| 4.6 | CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS | 52 |
| 4.6.1 | Espectroscopia por Transformada de Fourier (FTIR) dos Compósitos Epóxi/Fibras de Envira | 52 |
| 4.6.2 | Caracterização mecânica de tração | 53 |
| 4.6.3 | Caracterização mecânica de flexão | 56 |
| 4.6.4 | Análise estatística..... | 58 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 64 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 65 |
| | REFERÊNCIAS..... | 65 |

1 INTRODUÇÃO

A dependência excessiva em materiais derivados de matérias-primas não renováveis e de origem fóssil, como polímeros e metais, tem gerado impactos significativos à humanidade e à sustentabilidade. Isso ocorre em virtude a diversos fatores, como: o aumento da emissão de gases de efeito estufa, a intensificação da poluição ambiental e o esgotamento de recursos naturais (Thomas; Rouxel; Jose, 2022). Assim, a demanda por soluções inovadoras e sustentáveis tem sido um dos maiores desafios para a indústria e para a pesquisa científica (Xie, 2021). E devido a redução do consumo energético e o fomento a economia circular, os compósitos produzidos a partir de materiais renováveis e que estão alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estipulados pela ONU, se tornaram uma alternativa com grande potencial de controle e resolução a estas problemáticas (Shogren, 2019).

Os materiais compósitos apresentam essa capacidade em razão da possibilidade de combinar duas ou mais fases distintas, compostas por matriz e reforço, em um material engenheirado com propriedades superiores em relação aos componentes individuais (Krauklis, 2021). Além disso, agregam vantagens como: elevada resistência mecânica, leveza, durabilidade e a possibilidade de personalização para aplicações específicas, como no setor da construção civil, automobilístico e aeroespacial. Também contribuem para minimização de impactos ambientais em virtude da redução da pegada de carbono, da promoção da reciclagem e da reutilização de materiais, do aumento a eficiência de recursos e da utilização de reforços de fontes naturais (Cazan, 2022; Zhang, *et al.*, 2020).

Os compósitos reforçados com fontes ecológicas, como as fibras naturais, sejam elas de origem mineral, animal, e principalmente, vegetal, têm ganhado evidente notoriedade por consequência de suas propriedades mecânicas e caráter renovável (Milosevic; Valásek; Ruggiero, 2020). Fibras lignocelulósicas, como as de rami, juta e sisal, oferecem vantagens como baixa densidade, biodegradabilidade e baixo custo, além de serem mais sustentáveis quando comparadas as fibras sintéticas (Miniappan *et al.*, 2023). Seus principais benefícios incluem resistência mecânica aprimorada, flexibilidade e resistência ao impacto. Essa gama de possibilidades e vantagens faz com que esses compósitos sejam ideais para aplicações em setores da construção civil, automotivo e de embalagens (De Lima, *et al.*, 2022).

A Amazônia apresenta uma biodiversidade reconhecida mundialmente, e também, grande potencial vegetal pouco explorado para o desenvolvimento de materiais compósitos sustentáveis. Alguns exemplos de fibras lignocelulósicas extraídas de plantas nativas da região

amazônica para estas aplicações são as de buriti, curauá, tucum e ubim, que oferecem vantagens significativas, agregando leveza, resistência e caráter renovável ao material final, sem impedir o ciclo de vida da vegetação. O emprego dessas fibras no desenvolvimento de compósitos pode, não só inovar a indústria, como também gerar impactos positivos no ecossistema e na economia local (Costa *et al.*, 2020).

Estudos como o de Pereira *et al.* (2021), que investigaram o potencial da fibra da folha de buriti (*Mauritia flexuosa*) como reforço para produção de compósitos de matriz polimérica mais leves e resistentes, e De Oliveira; Filho (2024), que analisaram as propriedades mecânicas e a durabilidade da inserção de 5% de fibras de juta (*Corchorus capsularis*) e malva (*Urena lobata* L.) como reforço de compósitos cimentícios para aplicações estruturais e semi estruturais na área da construção civil, são alguns exemplos de estudos de sucesso com fibras endêmicas da região amazônica e que fomentam o estudo sobre elas para a pesquisa.

Outro exemplo disto, é a envira (*Bocageopsis multiflora*), uma planta pouco explorada que cresce de forma abundante em áreas de floresta densa e tropical úmida. Suas fibras apresentam grande potencial como reforço devido ao histórico de utilização em utensílios ou estruturas que demandem resistência (Couto, 2021). Dessa forma, o presente trabalho tem o intuito de realizar a caracterização da fibra de envira e avaliar seu potencial como reforço para compósitos de matrizes poliméricas epóxi.

1.1 Justificativa

Este trabalho justifica-se pela busca por reforços naturais pouco explorados na região amazônica que apresentem potencial como substitutos de reforços sintéticos na produção de materiais compósitos. Tudo isso alinhado a vertente técnico-científica e as esferas do desenvolvimento sustentável, conhecidas como: ambiental, econômica e social.

Do ponto de vista técnico científico, a avaliação das propriedades mecânicas e das características da fibra de envira e dos compósitos produzidos a partir dela, contribui tanto para o avanço do conhecimento sobre recursos naturais utilizados como reforço de materiais compósitos, como também, na busca por materiais que atendam à crescente demanda por produtos leves, resistentes e de caráter renovável. Essa abordagem se alinha ao ODS 9, que incentiva o desenvolvimento de infraestrutura e inovação sustentável, e também ao ODS 12, que fomenta padrões de consumo e produção responsáveis.

No âmbito econômico, o uso de fibras de envira pode agregar valor a um recurso natural subutilizado, ao promover o desenvolvimento de cadeias produtivas locais e fortalecimento da bioeconomia regional, reduzindo assim, a dependência em reforços sintéticos de maior custo.

No que se refere ao aspecto social, a incorporação destas fibras lignocelulósicas como reforço pode gerar oportunidades para comunidades locais, fomentando o extrativismo sustentável e a valorização da biodiversidade regional, que integrada a práticas de manejo sustentável, contribui para a geração de emprego e renda em comunidades extrativistas, conforme o previsto pelo ODS 8, que visa trabalho decente e crescimento econômico.

Já do ponto de vista ambiental, a utilização de fibras vegetais, como a envira, reduz a pegada de carbono associada à produção de compósitos que utilizam fibras sintéticas, além de que, sua extração ocorre de forma que não afeta o ciclo de vida da árvore. Assim, o uso de recursos renováveis e biodegradáveis somados às práticas de economia circular, se alinham ao ODS 13, que estimula ações contra as mudanças climáticas, e ao ODS 15, pelas práticas de conservação da biodiversidade local.

1.2 Objetivo geral

Investigar o potencial das fibras de envira como reforço em materiais compósitos de matriz epóxi, avaliando suas propriedades mecânicas, químicas, térmicas e morfológicas, a fim de verificar sua viabilidade como alternativa sustentável aos reforços sintéticos usuais.

1.2.1 Objetivos específicos

- Analisar as características físicas e as morfológicas das fibras de enviira;
- Analisar a estabilidade térmica e grupos funcionais das fibras de envira;
- Avaliar a resistência mecânica isolada das fibras de envira preta;
- Fabricar compósitos de matriz epóxi reforçados com diferentes frações volumétricas de fibras de envira preta.
- Investigar as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos por meio de ensaios de tração e flexão.
- Avaliar a interação interfacial entre a matriz epóxi e as fibras de envira preta via análise química.

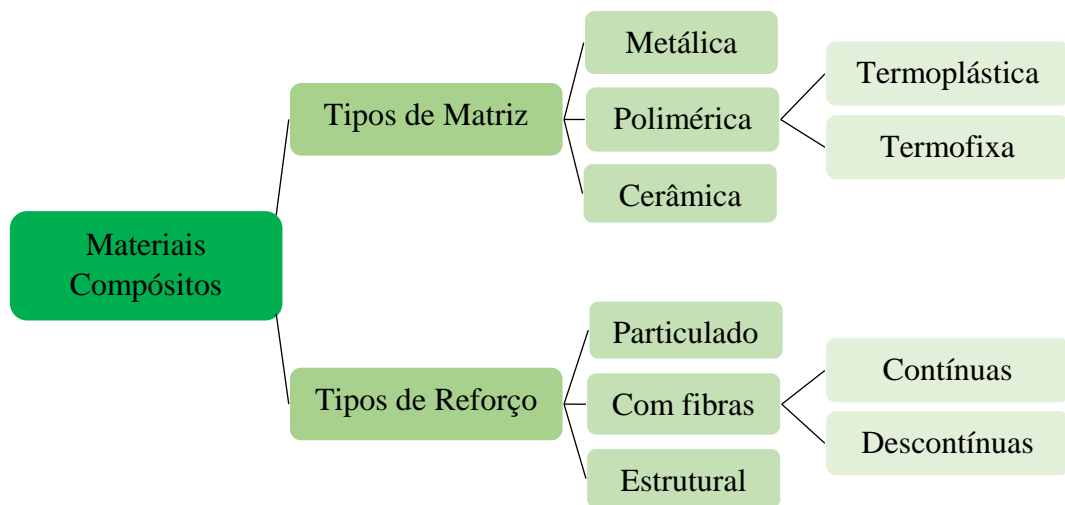
- Realizar análise estatística dos resultados mecânicos de tração e flexão para validar a influência do reforço com fibras de envira preta nas propriedades dos compósitos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Materiais compósitos

Os materiais compósitos são sistemas heterogêneos amplamente conhecidos devido a capacidade de atender requisitos específicos de desempenho mecânico, térmico, funcional e de leveza em indústrias automobilísticas, da construção civil e da aviação (Elfaleh *et al*, 2023). Eles são constituídos por duas ou mais fases com propriedades físicoquímicas distintas, compostas por uma matriz contínua e reforço, que são separadas por uma interface. Após serem engenheirados, resultam em materiais com desempenho superior aos dos componentes individuais. (Akram *et al.*, 2022). Por isso, são amplamente visados em diversas aplicações e dispõem uma gama de possibilidades de matrizes e reforços que são de extrema valia para a indústria e para pesquisa, como apresentado na Figura 1.

Figura 1: Classificação de compósitos com base nos tipos de matriz e reforço



Fonte: Adaptado de Akhil, 2023.

A matriz, também conhecida como fase contínua, segundo Shrivastava (2024), desempenha papéis de extrema importância para o compósito, como: integridade estrutural, pois mantém os componentes do compósito unidos; proteção do reforço de agentes externos, como oxidação e abrasão; e transferência uniforme das tensões aplicadas na matriz ao reforço. Além disso, dependendo da escolha do tipo de matriz, tanto as condições de fabricação como as características principais do produto final são alteradas.

Os compósitos de matriz metálica (CMM) são fabricados por métodos como fundição convencional, infiltração e deposição de partículas por meio de técnicas de solidificação. São

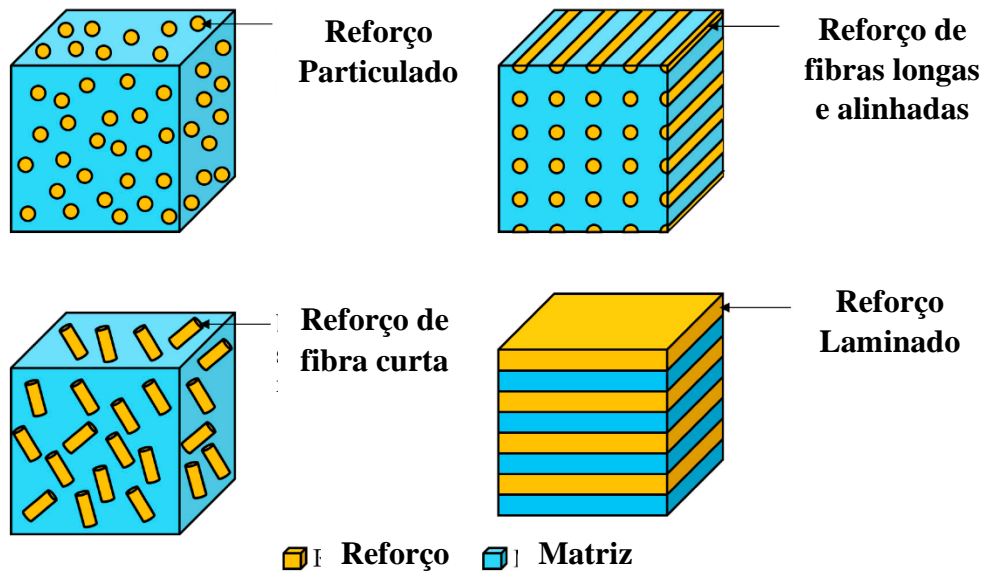
referência nos quesitos como: alta resistência mecânica, capacidade de suportar altas temperaturas, condutividade térmica e resistência ao desgaste, o que faz com que sejam muito utilizados em indústrias aeroespaciais e automotivas. Comparada à outras matrizes, a matriz metálica possui maior ductilidade quando comparada à matriz cerâmica e apresenta maior rigidez e durabilidade em relação à matriz polimérica (Tadesse & Ganesh, 2020).

Os compósitos de matriz cerâmica (CMC) utilizam métodos de fabricação como infiltração de polímeros ceramizantes, sinterização e técnicas de deposição química a vapor. As principais vantagens da sua utilização envolvem alta resistência a temperaturas extremas, excelente estabilidade química, resistência à corrosão e baixa densidade. Quando comparados a outras matrizes, são mais leves e estáveis em quesito de integridade estrutural, principalmente quando expostas à ambientes com elevadas temperaturas, se comparadas a matrizes metálicas, e mais rígidas e aptas a operar em condições mais severas se comparadas a matrizes poliméricas (Shvydyuk, *et al.*, 2023).

Já as matrizes poliméricas (MP) são divididas em dois tipos: termoplásticas, que podem ser amolecidas, derretidas e recicladas, e termofixas, que são mais rígidas e duráveis após a cura. Alguns exemplos de termoplásticos são o polietileno, poliestireno, poliamidas e polipropileno; e de termofixas são epóxi, resinas de poliamida fenólica e poliéster (Ratanawilai; Raksarak, 2024). Esse tipo de matriz é produzida a partir de métodos como moldagem, infusão e pultrusão, que são essenciais na produção de peças de caráter mais complexo. As suas principais vantagens são leveza, facilidade de processamento e boas propriedades mecânicas. Além de que, quando comparadas a outras matrizes, apresentam melhor custo-benefício, flexibilidade no design, maior resistência à corrosão, e também, a possibilidade de serem ambientalmente corretas, em decorrência ao menor consumo de energia na produção e à sua reciclabilidade (Wu, *et al.*, 2023).

De acordo com Suriani (2021), a escolha do reforço, ou fase dispersa, é crucial para produção de um material eficiente, já que ele tem a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas e físicas do material, fazendo com que ele suporte tensões, deformações, forças externas, e que, conseqüentemente, aumente o desempenho mecânico, seja ele em relação à resistência à tração, rigidez e/ou resistência ao impacto. Os reforços são divididos como: particulados, que podem ser partículas grandes ou reforçados por meio de dispersão; fibras, que podem ser de origem sintética ou natural e serem longas (contínuas) ou curtas (descontínuas); e de forma estrutural, sendo laminados ou painéis sanduiches, como demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Tipos de reforços de materiais compósitos.



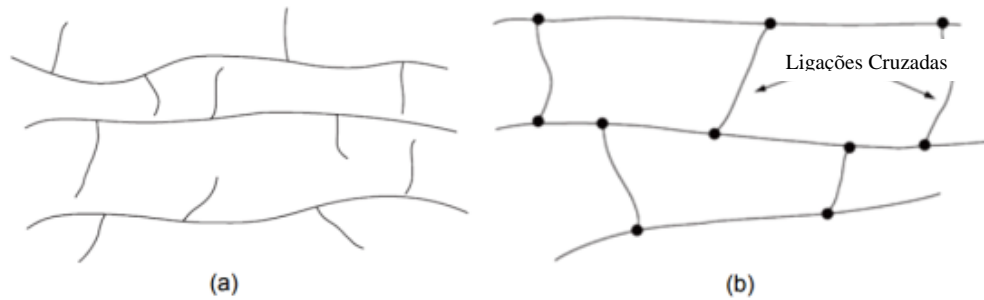
Fonte: Ostolaza, *et al*, 2023.

2.2 Resina poliméricas

Através da descoberta do baquelite, o primeiro material polimérico totalmente sintético feito a partir de fenol e formaldeído no início do século XX, as resinas poliméricas, e os materiais poliméricos como um todo, começaram a ser produzidos em larga escala na indústria. Assim, estas resinas, formadas por cadeias de macromoléculas orgânicas e conhecidas como polímeros, apresentaram a possibilidade de serem obtidas de forma natural ou sintética em diversas aplicações que atendiam às necessidades humanas. E, devido à diferença de seu comportamento perante à temperatura, puderam ser classificadas em dois tipos: termorrígidas e termoplásticas (Davolos, 2019).

As resinas termofixas/termorrígidas, como epóxi, poliéster insaturado ou fenólicas, após sofrerem o processo de cura química, se tornam irreversivelmente endurecidas em razão da formação de uma rede tridimensional de ligações cruzadas, presentes percentualmente em quase toda macromolécula, como apresentado na Figura 3 (b), que também, agregam características como: alta estabilidade mecânica e térmica à resina. Já as resinas termoplásticas, como polietileno (PE), polipropileno (PP) e policarbonato (PC), quando submetidas a aquecimento amolecem, e quando resfriadas solidificam. Este comportamento se dá por consequência da presença de ligações secundárias entre as cadeias poliméricas atuantes, como demonstrado na Figura 3 (a), e que também, permitem a sua reprocessabilidade (Masuda, 2023).

Figura 3: Diferença representativa entre (a) polímero termoplástico e (b) polímero termorrígido.



Fonte: Cavalcanti, 2022.

Quando aplicadas em materiais compósitos, as resinas poliméricas se tornam essenciais para um bom desempenho nas mais diversas áreas de aplicações. Isso se dá pois a sua utilização agrega características indispensáveis, como: leveza, que ocasiona menor densidade aos compósitos, e por consequência, os tornam ideais para aplicações que demandem redução de peso no produto final; elevada resistência mecânica, que confere a capacidade de suportar cargas elevadas quando combinadas com reforços estruturais; resistência térmica e química, fatores que são extremamente relevantes em ambientes agressivos ou de alta temperatura; e versatilidade, fator que permite uma ampla gama de possibilidades de formulações de compósitos para atender às necessidades do mercado mundial competitivo (Thomas, 2020).

Entre os tipos de resinas mais utilizadas como matriz de materiais compósitos, pode-se destacar as resinas epóxi, poliéster insaturado, fenólica e vinil éster. Essa preferência de escolha é justificada pelas propriedades que estas resinas apresentam, como elucidado na Tabela 1, onde a baixa densidade é combinada com resistência à tração satisfatória, tornando-as ideais para aplicações que exijam materiais leves, porém resistentes (Silva; Souza; Oliveira, 2022).

Tabela 1: Propriedades de resinas poliméricas do tipo termofixas.

| Tipo de Resina | Densidade (g/cm³) | Resistência à Tração (MPa) |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Fenólica | 1,19-1,2 | 10 |
| Poliéster Insaturado | 1,025-1,5 | 40-90 |
| Vinil Ester | 1,2-,1,4 | 69-83 |
| Epóxi | 1,1-1,4 | 35-100 |

Fonte: Adaptado de Lee *et al.*, 2021.

Porém, apesar das inúmeras vantagens, as resinas poliméricas apresentam algumas limitações, como apresentado na Tabela 2, que vão influenciar na hora da escolha da matriz do compósito.

Tabela 2: Vantagens e limitações das resinas poliméricas.

| Tipo de Resina | Vantagens | Limitações |
|-----------------------|---|--|
| Epóxi | Alta resistência mecânica e química; aderência superior | Custo elevado; longos ciclos de cura |
| Poliéster | Baixo custo; fácil processamento | Resistência limitada a solventes e temperatura |
| Fenólica | Resistência térmica; retardante de chama | Fragilidade; baixa resistência ao impacto |
| Poliuretano | Boa adesão; boa resistência a abrasão | Sensibilidade à umidade durante a cura |
| Acrílica | Alta transparência; resistência a UV | Menor resistência a produtos químicos |

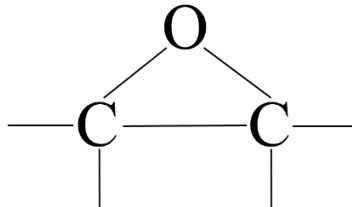
Fonte: Adaptado de Pinheiro, 2020.

Alguns exemplos disto podem ser citados como: a resina epóxi, que apesar de apresentar elevado custo e rigidez, é amplamente aplicada em estruturas aeronáuticas e automotivas devido à sua alta resistência mecânica, térmica, química e excelente aderência (Pinto, 2020); a resina poliéster insaturada, que é amplamente utilizada na construção civil e em embarcações devido ao seu baixo custo e facilidade de processamento, apesar da resistência limitada a solventes e temperaturas elevadas; as resinas fenólicas, que são frequentemente escolhidas para aplicações que exijam resistência ao fogo e altas temperaturas, como revestimentos e painéis, mesmo sendo altamente frágeis e apresentando baixa resistência ao impacto (Masuda, 2023); as resinas de poliuretano, que, apesar de sua sensibilidade à umidade durante a cura, é utilizada em larga escala em revestimentos, adesivos e espumas estruturais, em razão da sua boa flexibilidade e alta aderência (Kausar, 2023); e as resinas acrílicas, que são amplamente aplicadas em revestimentos e acabamentos de alta transparência, por consequência da sua excelente resistência aos raios UV e boa estabilidade óptica, mesmo que apresente menor resistência a produtos químicos (Guo *et al.*, 2024).

2.2.1 Resina Epóxi

As resinas epóxi são polímeros termorrígidos amplamente utilizados em diversas aplicações industriais, tecnológicas, e principalmente, como matriz de materiais compósitos, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, térmicas e químicas. Foram descobertas por Nikolai Prilezhaev, em 1909, e sua estrutura é caracterizada pela presença de grupos epóxi, estruturas simples composta por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, como mostra a Figura 4, também conhecidos como oxirano, que são altamente reativos e permitem a formação de redes tridimensionais por meio de processos de cura (Lee et al., 2021).

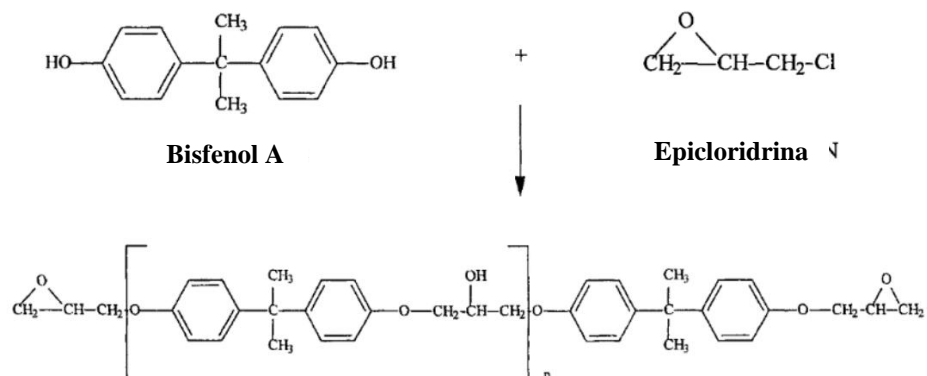
Figura 4: Grupo oxirano



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Dessa forma, é possível citar as três principais resinas epóxis: epóxis cicloalifáticos, epóxis de óleos epoxidizados e epóxis glicidados. Porém, dentre as três, a mais visada comercialmente é aquela obtida pela glicidação do bisfenol A (BPA) com epicloridrina, pois a estrutura do anel aromático e a rigidez do BPA resulta no alto desempenho à resina curada ou aos seus compósitos. A reação ocorre entreo bisfenol-A (2,2-bis(4-hidroxifenil)propano) e a epicloridrina, resultando no diglicidil éter de bisfenol-A (DGEBA), apresentado na Figura 5. A estrutura química do DGEBA possui grupos epóxi nas suas extremidades, que, ao reagirem com agentes de cura, formam uma rede polimérica reticulada (Cavalcanti, 2023).

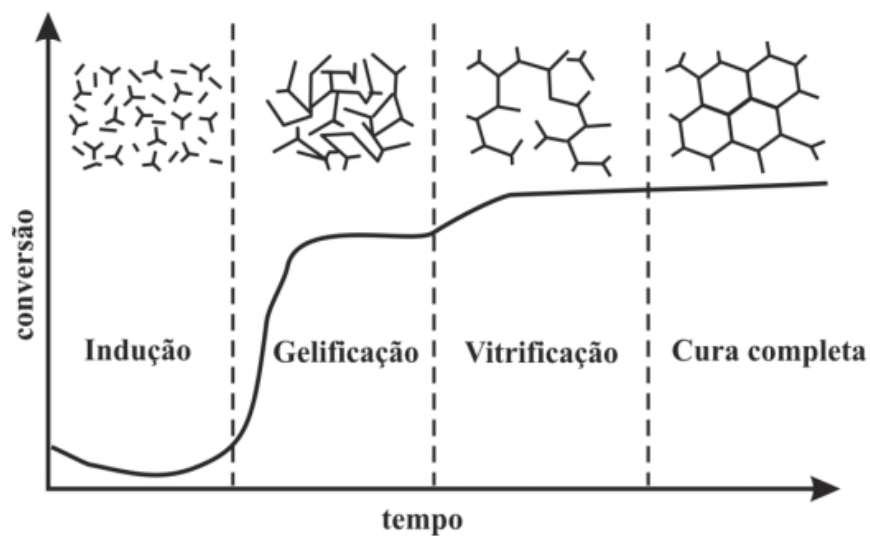
Figura 5: Processo de formação da resina epóxi.



Fonte: Adaptado de Lee *et al.*, 2021

O processo de formação da resina epóxi ainda pode sofrer alterações na sua viscosidade e propriedades mecânicas a partir da variação na razão molar entre os reagentes e o grau de polimerização, fazendo com que ela se adeque a diversas aplicações (Jin; Li; Park, 2015). Já o processo de cura, envolve a reação entre os grupos epóxi com os agentes de cura, que podem ser: aminas, anidridos ou poliamidas. O resultado disso é a formação de ligações cruzadas, que, transformam a resina líquida em material sólido (Mustapha *et al.*, 2019). Tudo isso ocorre em quatro etapas: a indução, onde a reação é controlada pela natureza química dos participantes dela; a gelificação, onde há a transição do estado líquido viscoso para um gel elástico, indicando o início do processo de cura/formação da rede tridimensional; a vitrificação, onde um sólido vítreo se forma à medida que aumenta a densidade e a rigidez do material, até o último estágio, a cura completa, como demonstrado na Figura 6 (Capricho *et al.*, 2020).

Figura 6: Processo de cura da resina epóxi.



Fonte: Cavalcanti, 2022.

2.3 Reforços fibrosos de matrizes poliméricas

A incorporação de fibras em matrizes poliméricas tem sido amplamente visada em decorrência das elevadas propriedades mecânicas, versatilidade e facilidade de fabricação que dispõem. Contudo, devido as diferentes origens deste material, os reforços fibrosos foram classificados como: naturais e sintéticos. Os denominados naturais, demonstram características heterogêneas, por consequência das particularidades que cada tipo de fibra apresenta, enquanto os sintéticos, apresentam uma constância em suas características, pois são produzidos pelo homem. E, apesar de apresentarem desempenho superior em relação à resistência à tração e

módulo de Young, as fibras sintéticas perdem relevância no quesito densidade para as fibras naturais, que conseguem balancear propriedades mecânicas satisfatórias com leveza e sustentabilidade. Como demonstra a Tabela 3 (Begum, 2020).

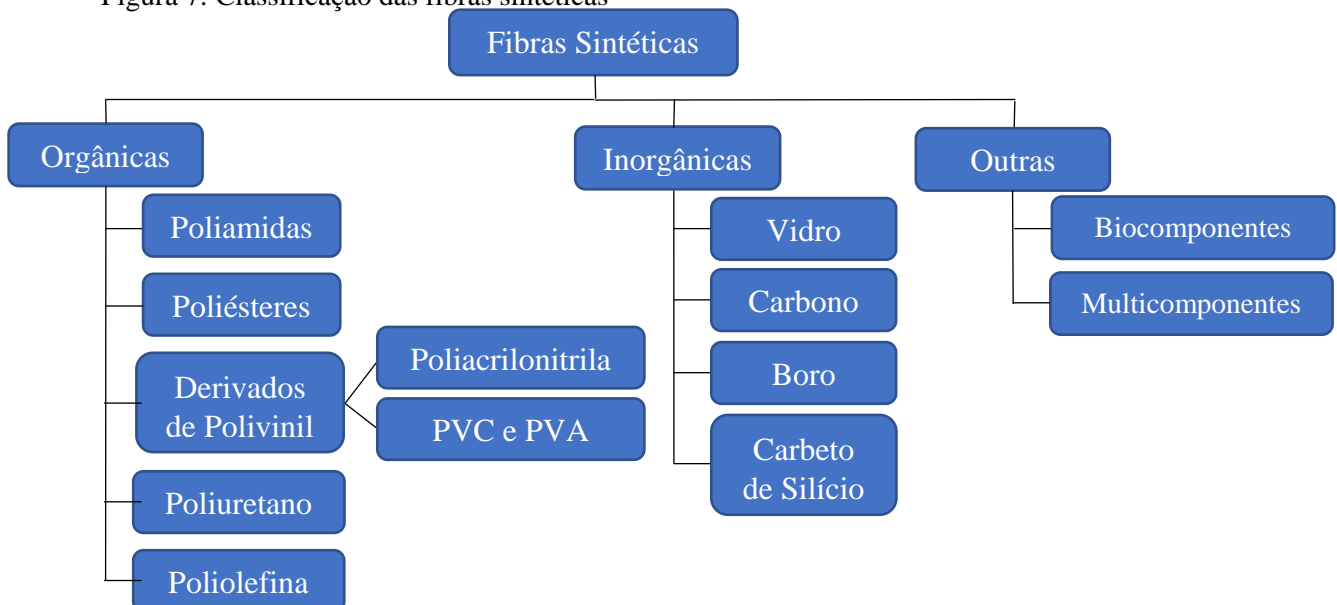
Tabela 3: Diferença entre as características de reforços sintéticos e naturais

| Tipos de Fibras | Densidade (g/cm ³) | Resistência à tração (MPa) | Módulo de Young (GPa) | |
|------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------|
| Sintética | Aramida | 1,40 | 300 | 124 |
| | Kevlar | 1,30–1,44 | 2900–3620 | 70–83 |
| | Nylon | 1,14 | 54 | 0,94–3 |
| | Vidro | 2,50 | 2000–3000 | 70 |
| | Carbono | 1,40 | 4000 | 230–240 |
| | Boro | 2800 | 385 | 2,5–2,6 |
| Natural | Juta | 1,30–1,45 | 393–773 | 13–27 |
| | Coco | 0,67–1,15 | 220 | 6 |
| | Banana | 1,35 | 335 | 33,8 |
| | Bambu | 1,32 | 140–230 | 11–17 |
| | Sisal | 1,45–1,50 | 67 | 3,7 |
| | Linho | 1,54 | 28–85 | 0,3–2 |

Fonte: Begum, 2020.

As fibras sintéticas são produzidas em laboratórios a partir de matérias primas não renováveis, geralmente derivadas de subprodutos do petróleo. Elas podem ser divididas em três principais tipos: fibras sintéticas orgânicas, fibras sintéticas inorgânicas e outras, que são subdivididas de acordo com sua origem, como exposto na Figura 7 (Rajak *et al.*, 2022).

Figura 7: Classificação das fibras sintéticas



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

A fabricação de fibras sintéticas gira em torno de quatro etapas: a polimerização, onde ocorre a transformação dos materiais sólidos em um fluido espesso por meio de reações químicas; a fiação, onde há a extrusão do material por uma fiadeira para formar as fibras contínuas; o enrolamento, que converte as fibras extrudadas em fios, e por último, o armazenamento das fibras. Entre os métodos de produção, a eletrofiação se destaca pela capacidade de produzir nanofibras com elevada área superficial, porosidade ajustável e estruturas morfológicas controláveis. Esse processo é um aliado muito importante para os avanços na nanotecnologia, sendo promissor para diversas aplicações industriais e tecnológicas devido à sua flexibilidade e potencial de inovação (Rajak, *et al.*, 2022).

Porém, mesmo que apresente variadas vantagens e seja amplamente utilizada nos setores industriais, as fibras sintéticas enfrentam desafios significativos em relação à sustentabilidade. Fatores como: não renovabilidade, utilização de matéria prima derivada do petróleo, não biodegradabilidade, influência direta no acúmulo de resíduos sólidos no meio ambiente e consumo exacerbado de energia e recursos naturais, fez com alternativas ecológicas fossem priorizadas. A partir disso, as fibras naturais se tornaram a solução mais apta a minimizar os impactos gerados pelas fibras sintéticas, tanto por emitirem menos gases de efeito estufa, como demonstrado na Tabela 4, como também por serem mais viáveis economicamente, como apresentado na Tabela 5 (Maiti, *et al.*, 2022).

Tabela 4: Diferença na pegada de carbono de fibras naturais e sintéticas

| | Fibra | Pegada de Carbono (kg-CO₂/kg) |
|------------------|--------------------|---|
| Natural | Juta | 0,566 |
| | Coco | 0,367 |
| | Linho | 0,520 |
| Sintética | Vidro | 0,85 |
| | Fibra de Vidro | 1,45 |
| | Compósito de Vidro | 8,1 |

Fonte: Adaptado de Shahinur & Hasan, 2019.

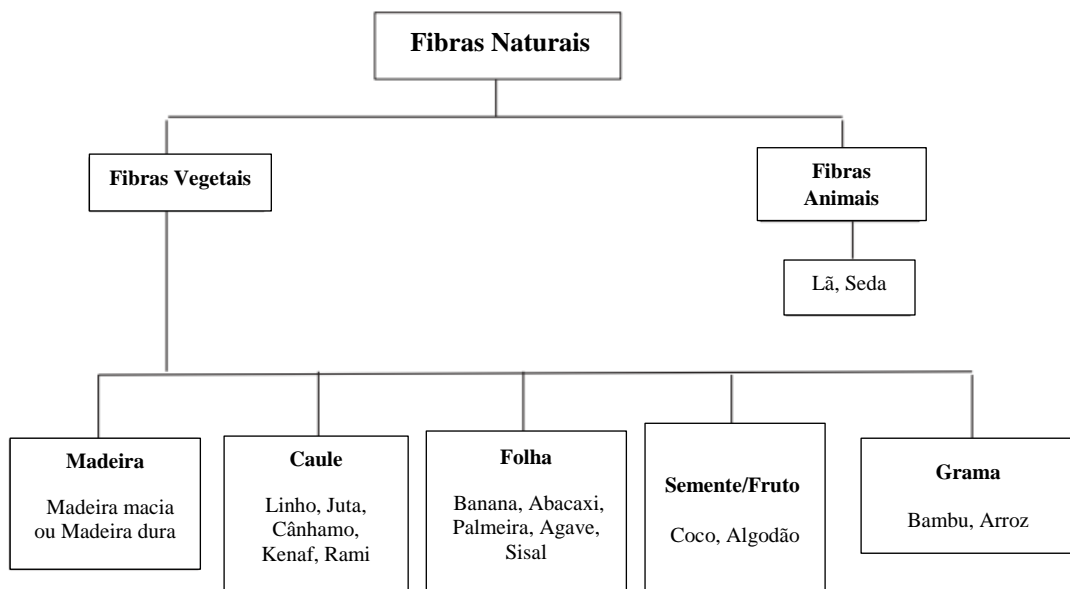
Tabela 5: Custos de fibras sintéticas e naturais

| | Fibra | Preço de Mercado (USD) |
|------------------|--------------|-------------------------------|
| Natural | Juta | 58/kg (\$0,7) |
| | Coco | 83,76/kg (\$1,0) |
| | Bambu | 188/kg (\$2,25) |
| Sintética | Kevlar | 711/kg (\$8,5) |
| | Aramida | 3350/kg (\$0) |
| | Carbono | 251.280/kg (\$3000) |

Fonte: Adaptado de Shahinur & Hasan, 2019.

As fibras naturais têm um amplo grupo de matérias-primas de fontes renováveis, como plantas, minerais e animais, como elucidado na Figura 8. Cada grupo tem uma base diferente que implica, diretamente, em suas propriedades. As fibras vegetais são dependentes dos teores de celulose; as fibras animais são relacionadas à proteína; e as fibras minerais, a composição inorgânica. Estas fibras estão presentes no uso humano há milênios através de roupas, construções e itens diários, mas, atualmente, são muito visadas pela indústria para aplicações tecnológicas (Seid; Adimass, 2024).

Figura 8: Classificação das fibras naturais



Fonte: Adaptado de Begum *et al.*, 2020.

Dentre os três grupos, o foco das atuais investigações acadêmicas, são as fibras vegetais. Suas vantagens incluem: biodegradabilidade, baixo impacto ambiental durante o ciclo de vida, leveza, baixo custo de produção e redução da pegada de carbono, pois absorvem CO₂ durante seu cultivo e exigem menor consumo energético em sua produção (Hasan *et al.*, 2022).

2.3.1 Fibras Lignocelulósicas

As fibras vegetais, também são conhecidas como fibras lignocelulósicas (FLNs), devido à presença majoritária de hemicelulose, celulose e lignina em sua estrutura, como apresenta a Tabela 6. Esses três componentes, atrelados a outros em menores porcentagens, como pectina e cera, conferem propriedades únicas de resistência, rigidez e estabilidade térmica às fibras. Além de que, a extração destas fibras pode ser realizada de diversas partes das plantas, como caules, folhas, sementes e frutos, refletindo diretamente nas características finais (Aguilar *et al.*, 2023).

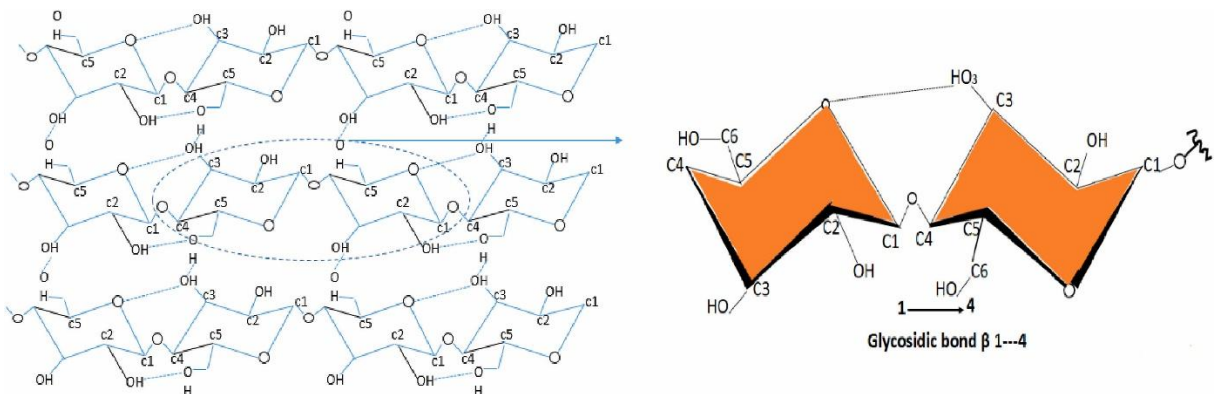
Tabela 6: Composição química das fibras lignocelulósicas

| Fibra Natural | Celulose (%) | Hemicelulose (%) | Lignina (%) |
|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|
| Bagaço | 55,2 | 16,8 | 25,3 |
| Bambu | 26–43 | 30 | 21–31 |
| Linho | 71 | 18,6–20,6 | 2,2 |
| Kenaf | 72 | 20,3 | 9 |
| Juta | 61–71 | 14–20 | 12–13 |
| Cânhamo | 68 | 15 | 10 |
| Rami | 68,6–76,2 | 13–16 | 0,6–0,7 |
| Sisal | 65 | 12 | 9,9 |
| Palma de Óleo | 65 | 9 | 29 |
| Casca de Arroz | 35–45 | 19–25 | 20 |
| Banana | 63–67,6 | 10 | 5 |
| Coco | 36–43 | 0,15–0,25 | 41–45 |
| Palha de Arroz | 41–57 | 33 | 18 |
| Sabugo de Milho | 26,1 | 45,9 | 11,3 |
| Abacá | 56–63 | 20–25 | 1–9 |
| Fibra de Coco | 32–43 | 0,15–0,25 | 40–45 |
| Algodão | 82,7–90 | 5,7 | <2 |
| Trigo | 38–45 | 15–31 | 12–20 |

Fonte: Yusuff *et al.*, 2020.

A celulose, de fórmula química $C_6H_{10}O_5$, é o polissacarídeo natural mais abundante do mundo e desempenha papel essencial para a parede celular vegetal (Alias *et al.*, 2021). Podem conter duas formas estruturais: celulose nativa, presente nas paredes celulares vegetais e altamente cristalina, e celulose regenerada, obtida após tratamento químico da celulose nativa com hidróxido de sódio (NaOH) e alormorficamente modificada. Sua estrutura é composta por longas cadeias de celobiose, formadas por duas unidades de D-anidroglicopiranoose (AGU) ligadas por ligações glicosídicas $\beta(1\rightarrow4)$, como apresentado na Figura 9, que resultam em uma estrutura semicristalina, caracterizada por regiões cristalinas e amorfas. Em decorrência ao elevado número de grupos hidroxila (-OH) que formam ligações de hidrogênio entre as moléculas, a celulose se torna responsável pela alta rigidez e resistências das fibras, confirmando sua relevância para produção de compósitos de alto desempenho (Bates, *et al.*, 2023).

Figura 9: Estrutura molecular da celulose



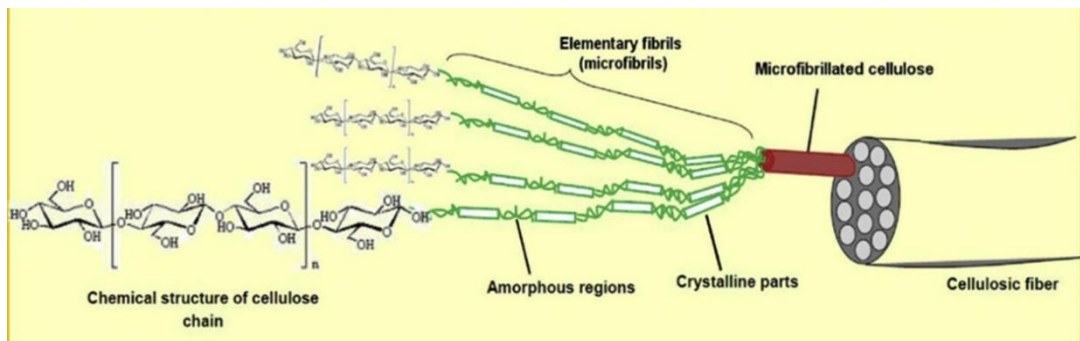
Fonte: Elfaleh *et al.*, 2023.

A hemicelulose é um polissacarídeo de baixo peso molecular fundamental para o fortalecimento da parede celular das fibras, pois serve como matriz de reforço para a celulose e a lignina entre as microfibrilas de celulose. Possui estrutura ramificada, heterogênea e composta por vários açúcares, como D-xilose, D-manose, D-galactose, D-glicose, L-arabinose, e ácidos D-galacturônico e D-glucurônico, como apresenta a Figura 10, que tornam a estrutura amorfa e menos resistente à hidrólise. Apesar de contribuírem com a coesão estrutural, a hemicelulose torna as fibras mais suscetíveis à biodegradação, absorção de umidade, e degradação térmica (Kwon *et al.*, 2021).

Fonte: Elfaleh *et al.*, 2023.

A presença destes componentes químicos nas fibras gira em torno de: 40-50% do peso para celulose, 25-35% do peso para hemicelulose e 15-20% do peso para lignina. Além disso, a maioria das fibras vegetais são compostas por duas paredes, primária e secundária, como apresentado na Figura 12. A parede primária permite o crescimento celular e atua como esqueleto para a fibra, contendo hemicelulose, pectinas, proteínas e microfibrilas de celulose desordenadas, que garantem certa flexibilidade a fibra. A parede secundária é mais espessa, agrega rigidez, altas propriedades mecânicas e é dividida em: parede externa S1, a parede central S2, e a parede interna S3, relacionada ao lúmen, uma cavidade oca que, permite a circulação de água e nutrientes (Karimah *et al.*, 2021).

Figura 12: Estrutura organizacional de fibras vegetais.



Fonte: Karimah *et al.*, 2021.

Porém, outros fatores também afetam a qualidade e características das fibras, como: o ângulo microfibrilar (formado por cadeias de cristais de celulose conectados por zonas amorfas, também conhecidas como microfibrilas, enroladas as paredes da fibra em relação ao seu eixo), o arranjo dentro da parede celular, as condições ambientais, os nutrientes, temperaturas de exposição, estação do ano, condições de transporte, tempo de armazenamento e método de extração (Karimah *et al.*, 2021).

2.3.2 Fibras de Envira

A envira preta, *Bocageopsis multiflora*, é uma planta nativa da região amazônica, que pode chegar até 12 metros de altura e 30 cm de diâmetro, como mostra a Figura 13 (Lorenzi, 1998). Apesar de não apresentar muitos estudos em relação à sua capacidade como reforço de materiais compósitos de matriz polimérica, as fibras de envira apresentam potencial ecológico, econômico e estrutural para tal, em decorrência de suas aplicações na confecção de artesanatos,

cestos, tapetes e cordas de amarração de barracões e casas de palhas (Couto, 2021). A sua extração é feita do caule, de forma que não se degrade ou impeça o ciclo de vida da árvore (Branco, 2022).

Figura 13: Árvore de Envira



Fonte: Própria autora, 2024.

2.4 Materiais compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas

A diversidade de fibras vegetais permite a criação de compósitos com propriedades variadas. Porém, antes de combinar matriz polimérica com fibras vegetais, há a necessidade de avaliar fatores que implicam na sua produção, como: tipo de fibra, devido à variedade de comprimentos e formas; características da matriz; qualidade almejada para o produto; complexidade da peça, custos associados e método de fabricação, que pode ser moldagem por compressão, manual, extrusão, injeção, ou processos de manufatura aditiva. No entanto, desafios relacionados à aderência interfacial entre a matriz polimérica e as fibras naturais ainda são pertinentes, devido à polaridade das fibras lignocelulósicas, que são hidrofílicas, e à natureza hidrofóbica da maioria das matrizes poliméricas, mas, estratégias como tratamentos químicos e uso de agentes de acoplamento têm sido adotadas para melhorar a compatibilidade interfacial e, conseqüentemente, o desempenho mecânico do compósito (Thapliyal *et al.*, 2023). Desta forma, estes compósitos vêm sendo estudados por diversos pesquisadores:

Pinheiro *et al.*, (2023), investigaram as características microestruturais, morfológicas e mecânicas de uma fibra vegetal inédita para aplicação na área de engenharia, a *Cochlospermum orinocense*, também conhecida como periquiteira, endêmica da região amazônica. Seus resultados foram promissores quanto às futuras aplicações em compósitos de matriz polimérica, já que apresentaram baixa densidade, em torno de $0,43 \text{ g/cm}^3$, índice de cristalinidade por volta de 70,4% e ângulo microfibrilar de $7,32^\circ$. Segundos os autores, esses valores são associados as boas propriedades mecânicas dessas fibras, que apresentaram uma resistência média à tração de 178 MPa e módulo de Young de 2,92 GPa.

Santos *et al.*, (2022), analisaram o uso de fibras vegetais amazônicas, como juta e malva, e seu ciclo de vida sob diferentes perspectivas: uma sem processamento e outra na forma de tecido como reforço para compósitos cimentícios. Os resultados apresentados pelos autores destacaram a relevância do uso de matérias-primas locais, o impacto ambiental reduzido que elas têm na produção de compósitos e a possibilidade de que a produção comercial ajude a desenvolver uma bioeconomia, promovendo a criação de empregos verdes em comunidades que cultivam fibras.

Gomes *et al.* (2024), estudaram o desempenho do reforço do pecíolo de jupati, *Raphia taedigera*, provindo de uma palmeira amazônica, em compósitos com matriz de gesso. Os autores avaliaram aspectos físicos, mecânicos e microestruturas de corpos de prova preparados com o aumento gradual do pecíolo em relação à massa de gesso. Seus resultados mostraram a diminuição da densidade e aumento da absorção de água ao decorrer da inserção do pecíolo de jupati, o que afetou negativamente as propriedades mecânicas e positivamente o isolamento acústico destes compósitos.

Silva *et al.*, (2024), avaliaram o tecido de fibra de ráfia, extraída da folha da palmeira *Raphia vinífera* endêmica na região amazônica, e através de análises termoquímicas e estruturais, desenvolveram um estudo com a intenção de promover este tecido na aplicação de materiais compósitos. Os resultados exibidos pelos autores se mostraram promissores devido a semelhança aos resultados encontrados nos estudos de outras fibras vegetais eficientes no ramo dos materiais compósitos, principalmente no que se refere ao teor de umidade, índice de cristalinidade, ângulo microfibrilar, densidade, temperatura de perda de umidade, temperatura de degradação, picos endotérmicos, picos exotérmicos e composição química.

Dessa forma, perante a crescente procura por reforços sustentáveis que se equiparem ou superem os reforços sintéticos, tanto no que se refere à critérios ambientais ou de desempenho térmico e/ou mecânico, as fibras de envira preta (*Bocageopsis multiflora*), apresentam uma alternativa amazônica promissora, abundante e pouco explorada como reforço de matrizes

poliméricas. Estudos indicam que as fibras de envira preta são leves, resistentes, e que, sua extração não prejudica o ciclo de vida da árvore a qual é retirada (Branco, 2022). Assim, a avaliação de suas características físicas, químicas, térmicas e morfológicas, aliada à análise de seu desempenho mecânico quando incorporada a matrizes poliméricas, não só será de extrema valia para compor a base do conhecimento sobre fibras lignocelulósicas amazônicas, como também, mostrará a possibilidade de produzir materiais que balanceiem sustentabilidade e alto desempenho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

No presente estudo foram utilizados três materiais: as fibras de envira preta, obtidas no município de Irituia, região nordeste do estado do Pará, a partir da casca da árvore, como apresenta a Figura 14(a), a resina epóxi, exposta na Figura 14(b) e o endurecedor, apresentado na Figura 14(c).

Figura 14: (a) Casca de envira (b) Resina (c) Epóxi



Fonte: própria autora, 2023.

A resina epóxi, da marca Confibras MC 130, foi utilizada como matriz polimérica e curada a partir do endurecedor da marca Confibras MC 154, que foi adicionado em proporção volumétrica de 1,5% em relação a resina.

3.1.1 Beneficiamento da matéria prima

A matéria-prima foi beneficiada no Laboratório de Práticas Tecnológicas da Universidade Federal do Pará, *Campus Ananindeua*. A priori, ocorreu a separação da parte de interesse para a pesquisa, abundante em fibras, da área da casca. Em seguida, a parte de interesse foi transferida para um suporte metálico e levada à estufa a 80 °C, onde permaneceu por 2 horas. Após isso, foi realizado o desfibramento com auxílio de uma pinça até a obtenção da quantidade necessária, como apresenta a figura 15, para que, posteriormente, fossem direcionadas as devidas caracterizações e à confecção dos compósitos.

Figura 15: Fibras de envira



Fonte: própria autora, 2023

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 120 fibras aleatórias de envira, divididas em 6 intervalos, para a realização da análise do diâmetro fibrilar. Assim, com o auxílio do microscópio óptico modelo Even, como mostra a figura 16, acoplado ao software WinJoe, foi possível realizar medições em ângulos de 0 e 90° em 5 pontos igualmente espaçados ao longo do comprimento.

Figura 16: Microscópio óptico



Fonte: Própria autora, 2023.

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 $\pm 0,0001$ 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 médio;
- c: comprimento da fibra.

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

$$\rho_{geométrica} = \frac{m}{V} \quad (2)$$

3.2.2 Espectroscopia por Transformada de Fourier (FTIR);

A caracterização química da fibra de envira foi analisado a partir da Espectroscopia por Transformada de Fourier. 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} .

3.2.3 Análise Termogravimétrica (TG/DTG)

As amostras para análise termogravimétrica foram cortadas, moídas e armazenadas no tubo amostral. O analisador termogravimétrico (modelo STA - NEXTA STA300) foi utilizado para explorar o comportamento da fibra de envira ao decorrer das seguintes mudanças térmicas estabelecidas: aquecimento constante de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e variação da temperatura a partir da mais baixa à mais alta, 27 a 613°C .

3.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise morfológica das amostras de fibras de diferentes diâmetros e dos compósitos fraturados foi conduzida usando um microscópio eletrônico de varredura da marca TESCAN, modelo MIRA3 no laboratório do Museu Emílio Goeldi, onde, antes da análise, as amostras foram pulverizadas com ouro para garantir a condutividade elétrica

3.2.5 Ensaio de Tração das Fibras Isoladas

Utilizando a norma ASTM C1557 (2014) como referência, foram ensaiadas 120 fibras, sendo 20 fibras para cada um dos 6 intervalos previamente determinados no item 3.2.1.1. As fibras foram coladas em moldes produzidos de acordo com a norma, utilizando um adesivo epóxi ao centro do papel do tipo gofrata de gramatura média ($180\text{ g}/\text{cm}^3$). O teste mecânico foi realizado na 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 dos compósitos

Os corpos de prova foram produzidos pelo método de moldagem manual, sem desmoldante e sem pressão. As porcentagens escolhidas foram justificadas pela necessidade de análises mais abrangentes do comportamento mecânico e estrutural dos compósitos, além do interesse em verificar a saturação da matriz. Estudos como de Al-Oqla *et al.* (2021) e Kannan

& Thangaraju (2021), evidenciam que a escolha dos percentuais afeta diretamente as propriedades mecânicas do compósito, e que muitas vezes, frações volumétricas convencionais como 10, 20 e 30% não são eficientes para todas as aplicações. Sendo assim, é necessário tanto a investigação de frações volumétricas superiores a 30%, como a de frações volumétricas alternadas, para analisar como a variabilidade estrutural influencia na adesão interfacial e na distribuição de tensões dentro da matriz polimérica, permitindo assim, uma investigação detalhada do seu desempenho como reforço.

Dessa forma, foi calculada, partir da equação da regra da mistura, a quantidade de resina e endurecedor necessárias para a produção dos compósitos, como apresenta a equação 4.

$$\%f = \frac{\frac{mf}{\rho f}}{\frac{mf}{\rho f} + \frac{mr}{\rho r}} \quad (4)$$

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

Assim, a quantidade de resina e catalisador necessários foram misturados efetivamente a fim de evitar a formação de bolhas na mistura. Após isso, uma parte foi vertida em moldes de silicone, dimensionados de acordo com as normas, para que a quantidade de fibras almejadas fosse depositada. Esse processo foi realizado com o intuito de garantir uma boa molhabilidade das fibras de envira preta. Então, a parte restante da mistura de resina e endurecedor foi vertida nos moldes, onde o material permaneceu até sua cura completa. Após curados, os corpos de prova foram lixados e polidos com lixas de granulometria de 80,100 e 220. Toda produção seguiu os critérios estabelecidos mostrados na Tabela 7;

Tabela 7: Parâmetros dos corpos de provas produzidos.

| Composições | Quantidade | Volume (%) | |
|--------------|------------|------------|-------|
| | | Resina | Fibra |
| FEE0 | 6 | 100 | - |
| FEE5 | 6 | 95 | 5 |
| FEE15 | 6 | 85 | 15 |

| | | | |
|--------------|---|----|----|
| FEE25 | 6 | 75 | 25 |
| FEE35 | 6 | 65 | 35 |
| FEE45 | 6 | 55 | 45 |

Abreviação: FEE0: epóxi com 0% de reforço; FEE5: epóxi com 5% de reforço fibroso; FEE15: epóxi com 15% de reforço fibroso; FEE25: epóxi com 25% de reforço fibroso; FEE35: epóxi com 35% de reforço fibroso; FEE45: epóxi com 45% de reforço fibroso.

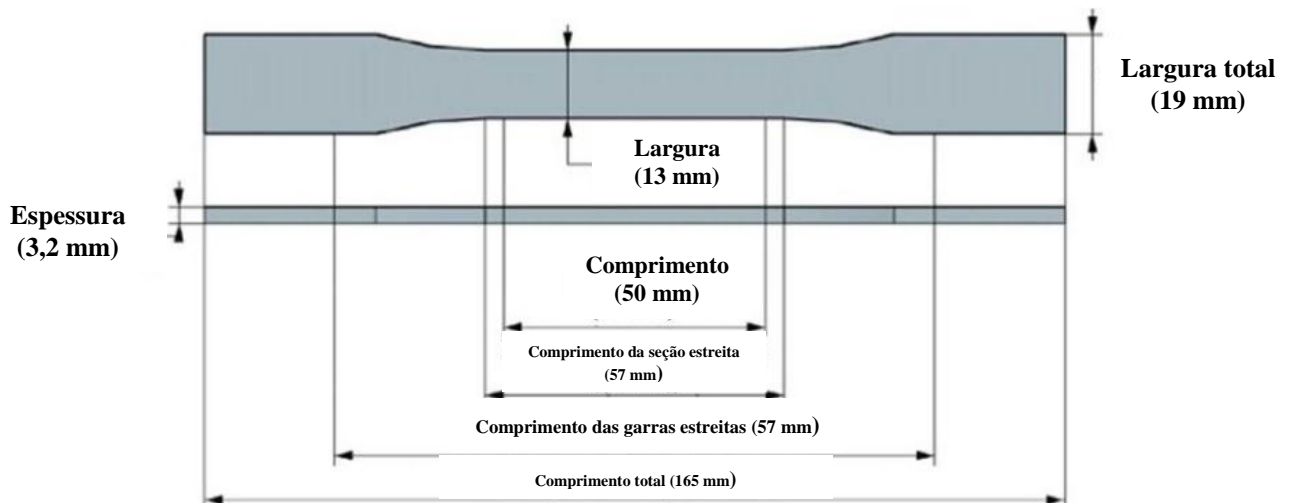
Fonte: Própria autora, 2024.

3.2.6.1 Caracterização mecânica dos compósitos

Os ensaios de tração e flexão foram realizados no Laboratório de Caracterização dos Materiais (LCMAT), da Universidade Federal do Pará, *Campus Ananindeua*, segundo a norma ASTM D638 (2022) e ASTM D790 (2017).

Para fabricação dos corpos de prova de tração, foi utilizada a norma ASTM D638 (2022), seguindo as medidas demonstradas na Figura 17.

Figura 17: Dimensões em milímetros de corpos de prova estipulados pela norma ASTM D638 para tração



Fonte: Hibbert *et al.*, 2019.

As propriedades mecânicas dos corpos de prova produzidos foram, posteriormente, calculadas pelas equações 5.1, para tensão máxima suportada pelo material e 5.2, para o módulo de elasticidade, obtido a partir da porção linear do gráfico gerado dos compósitos produzidos.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

Onde:

σ : tensão máxima;

F: carga aplicada;

A: a área da seção transversal do corpo de prova.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (5.2)$$

Onde:

E: módulo de elasticidade;

σ : tensão máxima;

ϵ : deformação.

Para flexão, foi utilizada a norma ASTM D790 (2017), seguindo as medidas demonstradas na Figura 18.

Figura 18: Dimensões em milímetros de corpos de prova estipulados pela norma ASTM D790 para flexão



Fonte: Leite, 2022.

A tensão máxima para flexão dos corpos de prova produzidos se deu pela equação 6.1 e a deformação na flexão e módulo de elasticidade, que foi obtido a partir da porção linear do gráfico gerado dos compósitos produzidos, dados pelas equações 6.2 e 6.3.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (6.1)$$

Onde:

P: carga máxima;

L: Distância entre suportes;

b: Largura;

d: Espessura

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (6.2)$$

$$E_f = (\sigma_{f2} - \sigma_{f1}) / (\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}) \quad (6.3)$$

Onde:

D: Deflexão;

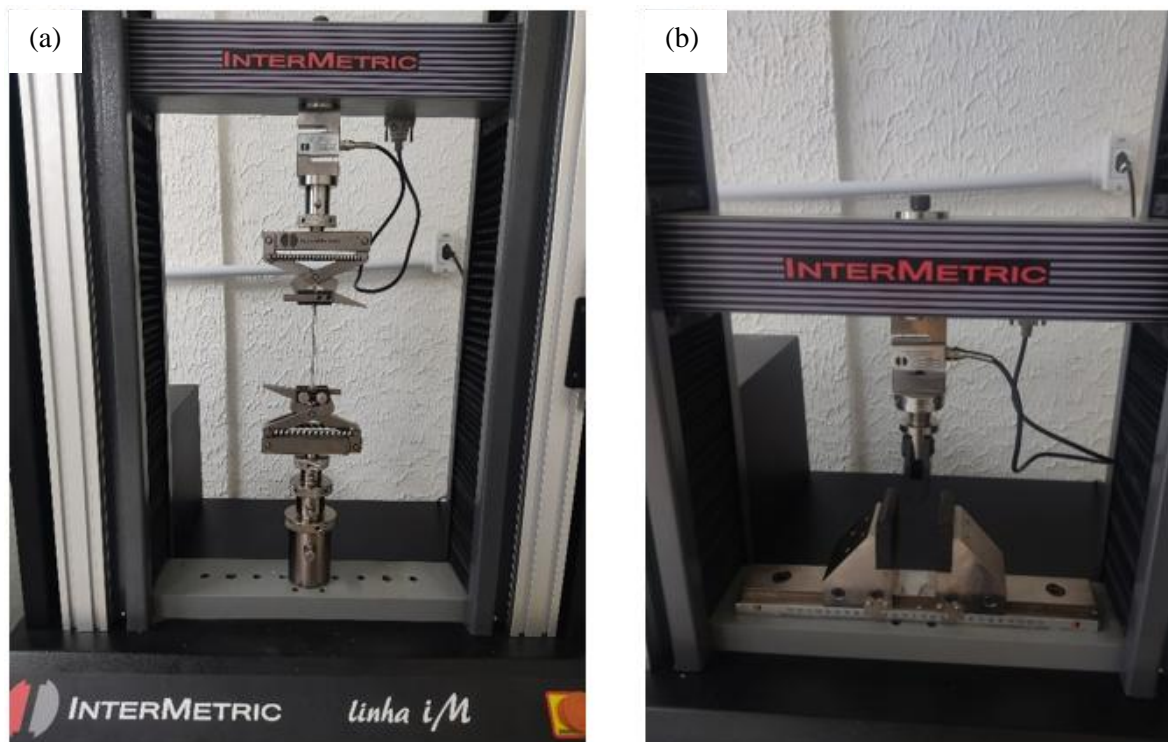
L: Distância entre os suportes;

d: Espessura;

σ_{f1} e σ_{f2} : Tensões de flexão, medidas nos pontos predefinidos na curva de deflexão de carga; ε_{f1} e ε_{f2} : Deformações de flexão, medidas nos pontos predeterminados na curva de deflexão de carga.

Para estes ensaios, foi utilizada a máquina universal de ensaios Intermetric, modelo Im50, com carga de 5 kN e velocidade de ensaio de 1 mm/min, como apresentado na Figura 19 (a) para tração e Figura 19 (b) para flexão.

Figura 19: (a) Ensaio de tração; (b) Ensaio de flexão



Fonte: Própria autora, 2024.

3.2.7 Análise estatística

Os dados obtidos em relação as propriedades das fibras de envira foram validados a partir dos parâmetros da análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 8 com intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$).

Tabela 8: Parâmetros da ANOVA.

| Fonte 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: Leite, 2022.

Onde:

| | |
|--|--|
| SQ - Soma dos quadrados; | SQTr - Soma dos quadrados dos tratamentos; |
| GL - Número de graus de liberdade; | k - Número de tratamentos; |
| MQ - Quadrado médio; | QMT - Quadrado médio dos tratamentos; |
| F - Estatística F; | QMR - Quadrado médio do resíduo; |
| SQR - Soma dos quadrados do resíduo | SQT - Soma dos quadrados total |
| r - Número de repetições do tratamento | n - Número total de observações; |
| 85n-1 - Número total de graus de liberdade | |

. Em caso de análises que apresentem o valor de F calculado superior ao F crítico, infere-se que as médias obtidas apresentam diferença significativa entre si, ou seja, possuem um d.m.s (diferença mínima significativa). Nestes casos, é necessário realizar o Teste de Tukey, afim de avaliar quantitativamente quais são essas diferenças, de acordo com a equação 7 (Pinheiro, 2020).

$$d.m.s = q \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (7)$$

Onde:

q: Amplitude total e valor tabelado, obtido através do valor do grau de liberdade (GL) do resíduo e do número de tratamentos;

QMR: Quadrado médio do resíduo;

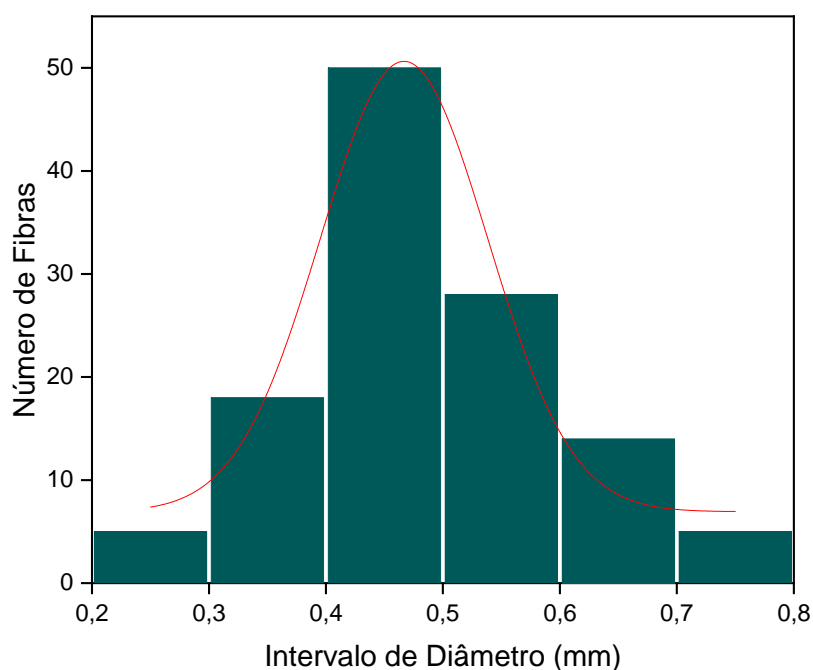
r: Número de repetições para cada tratamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Dimensional

Na Figura 20 é apresentado o gráfico de frequência das fibras em relação ao seu diâmetro.

Figura 20: Gráfico do número de fibras em relação ao intervalo de diâmetro.



Fonte: Própria autora, 2023.

É possível observar que a maior quantidade de fibras é encontrada na faixa de diâmetro de 0,40-0,50 mm, que indica um comportamento estatisticamente próximo ao de uma distribuição normal, e infere que, possivelmente, fibras médias de envira são menos quebradiças do que as restantes. Esse resultado expõe comportamento similar à de outros estudos de fibras lignocelulósicas, como ubim, que apresenta a concentração de fibras no intervalo médio de 0,55-0,57 mm (Marchi *et al.*, 2022), de titica, que apresenta o mesmo tipo de concentração no diâmetro médio de 0,65 mm (Cunha *et al.*, 2022), e da fibra de *Kigelia africana* (Siva *et al.*, 2020) e periquiteira (Pinheiro *et al.*, 2023), que apresentam o acúmulo de fibras no intervalo de diâmetro de 0,50 mm.

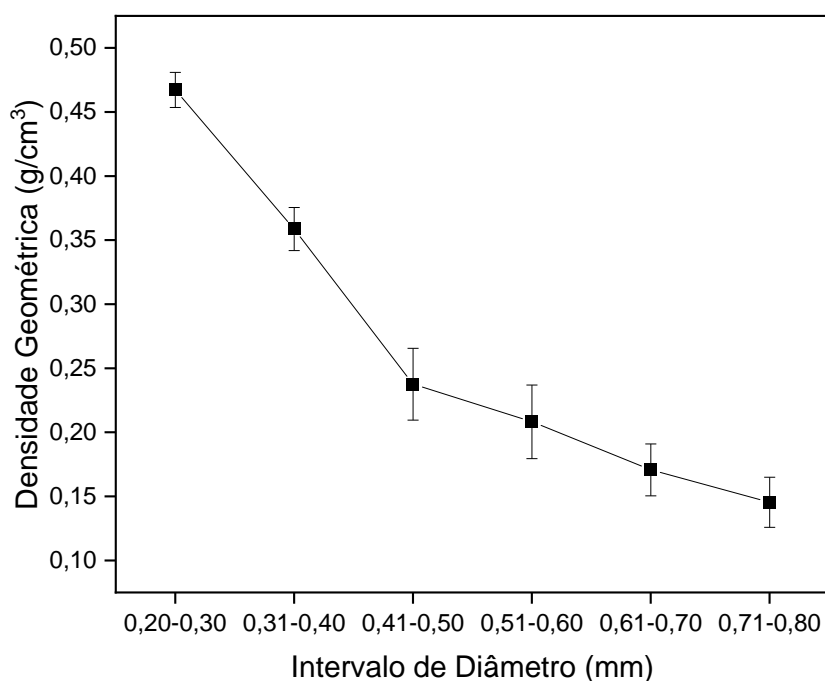
Esse tipo de concentração e comportamento de fibras no intervalo médio, possivelmente se dá devido à sua natureza, de caráter mais compacto, ou pelo método de desfibramento

adotado. De toda forma, é notável um certo padrão para fibras naturais, mesmo que apresentem espessuras e diâmetros diferentes entre si e entre outras espécies (Tamanna, 2021).

4.1.1 Determinação da Densidade Geométrica

Na Figura 21 é apresentado o gráfico que evidencia a relação entre a densidade geométrica das fibras (g/cm^3) e o intervalo de diâmetro (mm).

Figura 21 Gráfico da densidade geométrica em relação ao intervalo de diâmetro.



Fonte: Própria autora, 2023.

Os valores obtidos a partir da média dos cálculos de densidade geométrica, realizados pela Equação 2, resultaram em uma densidade de $0,25g/cm^3$ para as fibras de envira. Dessa forma, é possível indicar a presença de densidades mais elevadas em diâmetros menores e de densidades mais baixas em diâmetros maiores. Isto possivelmente ocorre devido as características que fibras mais grossas apresentam, como maior quantidade de defeitos e vazios, que resultam em densidades menores. Diferente de fibras mais finas, que possuem maior compactação estrutural e resultam em densidades maiores (Madueke *et al.*, 2022).

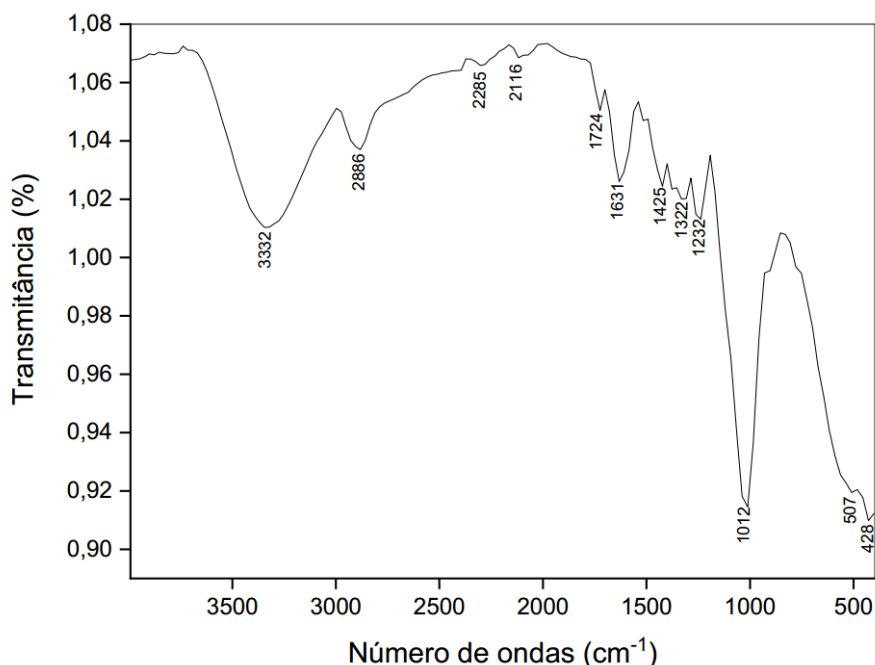
A densidade média encontrada para as fibras de envira se mostrou menor em relação à outras fibras conhecidas, como: periquiteira ($0,43 g/cm^3$) (Pinheiro *et al.*, 2023), ubim ($0,70 g/cm^3$) (Marchi *et al.*, 2021), guarumã ($0,50 g/cm^3$) (Reis *et al.*, 2020) e juta

($1,30 \text{ g/cm}^3$) (Chandekar; Chaudhari; Waigaonkar, 2020). Esse resultado sugere que, a fibra de envira, tem grande potencial como reforço de compósitos leves e de alto desempenho mecânico, podendo ser também, uma alternativa à substituição de fibras sintéticas em aplicações estruturais.

4.2 Espectroscopia por Transformada de Fourier (FTIR)

A figura 22 demonstra as bandas de absorção dos diferentes grupos químicos funcionais presentes nas estruturas da celulose, hemicelulose e lignina da fibra de envira.

Figura 22: Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier da fibra de envira.



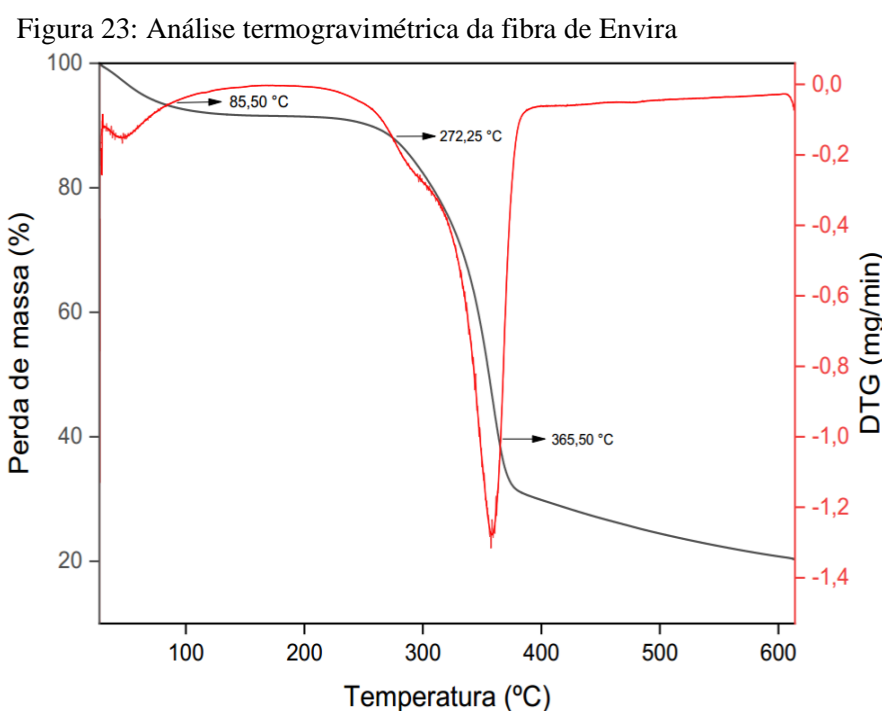
Fonte: própria autora, 2023.

A banda de 3332 cm^{-1} é atribuída ao estiramento axial do grupo O-H, comum para fibras vegetais, como sisal (Ranielle *et al.*, 2020), e fibra do caule de *Grewia damine* (Moshi *et al.*, 2020), ligada à interação com a umidade. Já a banda 2886 cm^{-1} , caracteriza o estiramento do constituinte da celulose e hemicelulose, C-H, em cadeias alifáticas. As bandas $2285 - 2116 \text{ cm}^{-1}$ indicam a presença da cadeia alquílica (cera) (Pinheiro *et al.*, 2023). Os espectros presentes em 1724 e 1631 cm^{-1} representam o estiramento da carbonila, C = O, das hemiceluloses e possíveis interações com umidade. Em 1425 cm^{-1} há a flexão simétrica de C-H₂ por conta da celulose (Somasundaram, *et al.*, 2022). A banda de 1332 cm^{-1} demonstra o dobramento de O-H e 1232 cm^{-1} é atribuída ao estiramento das ligações C-O (Ribeiro *et al.*, 2021). Já a banda 1012 cm^{-1} denota a presença de um anel aromático relacionado à flexão e vibração de C-H e C-

O e as bandas de 428-507 cm^{-1} representam o dobramento de C-H (Khan *et al.*, 2019). Desta forma, as bandas identificadas demonstraram similaridade e proximidade com as encontradas no FTIR de outras fibras lignocelulósicas (Wong *et al.*, 2023).

4.3 Análise Termogravimétrica (TG/DTG)

Na figura 23 é demonstrado a termogravimetria (TG) e a derivada da termogravimetria (DTG) da fibra de envira.



Fonte: própria autora, 2023.

É importante citar alguns acontecimentos essenciais para a análise térmica: a primeira perda de massa a 85,50 °C por conta da liberação de umidade superficial e compostos voláteis presentes na fibra, (Cunha *et al.*, 2021); a segunda perda evidente em aproximadamente 272,25 °C devido a clivagem das ligações glicosídicas da celulose e da degradação da lignina (Souza; Costa; Oliveira, 2022), e por último, a degradação da celulose e estabilidade dos componentes da fibra em torno de 365,50 °C, indicando que boa parte dos componentes orgânicos foram degradados termicamente (Pinheiro *et al.*, 2023).

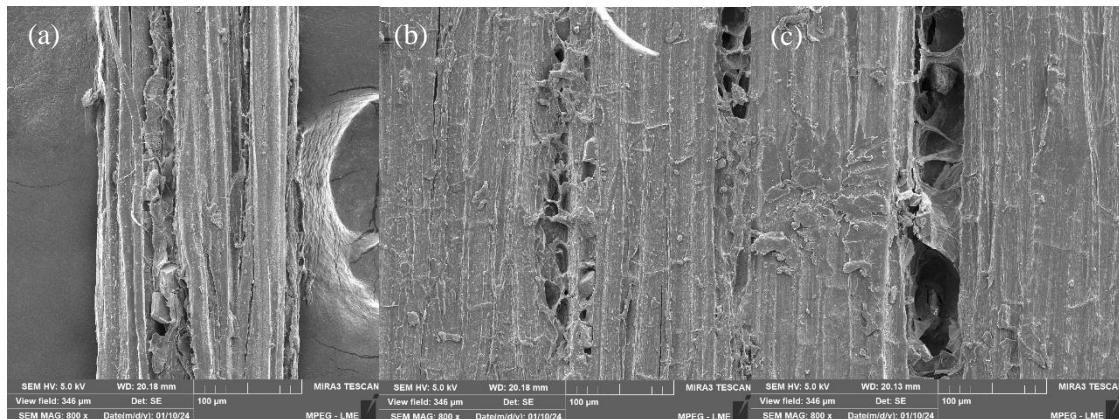
Até alcançar sua estabilidade, a fibra de envira perdeu cerca de 69% de massa e apresentou maior grau de instabilidade no intervalo de 272,25 a 365,50 °C, conforme observado pela taxa acelerada de perda mássica nas curvas TG e DTG, demonstrando assim, maior degradação térmica dos componentes lignocelulósicos. Esse comportamento das fibras de

envira é similar ao observado em outros estudos, como o de Rambo *et al.* (2015), que identificou os mesmos três estágios durante o processo de caracterização térmica, o que reforça o potencial das fibras de envira para aplicações em compósitos poliméricos e materiais sustentáveis que necessitem da exposição em temperaturas relativamente altas.

4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A figura 24 apresenta a microscopia eletrônica de varredura da superfície longitudinal das fibras de envira com ampliação de 800× e com diferentes diâmetros: fino, apresentado na Figura 24(a); médio, apresentado na Figura 24(b) e grosso, apresentado na figura 24(c).

Figura 24: Microscopia Eletrônica de Varredura da fibra de envira em diferentes diâmetros com aumento de 800×.



Fonte: Própria autora, 2024.

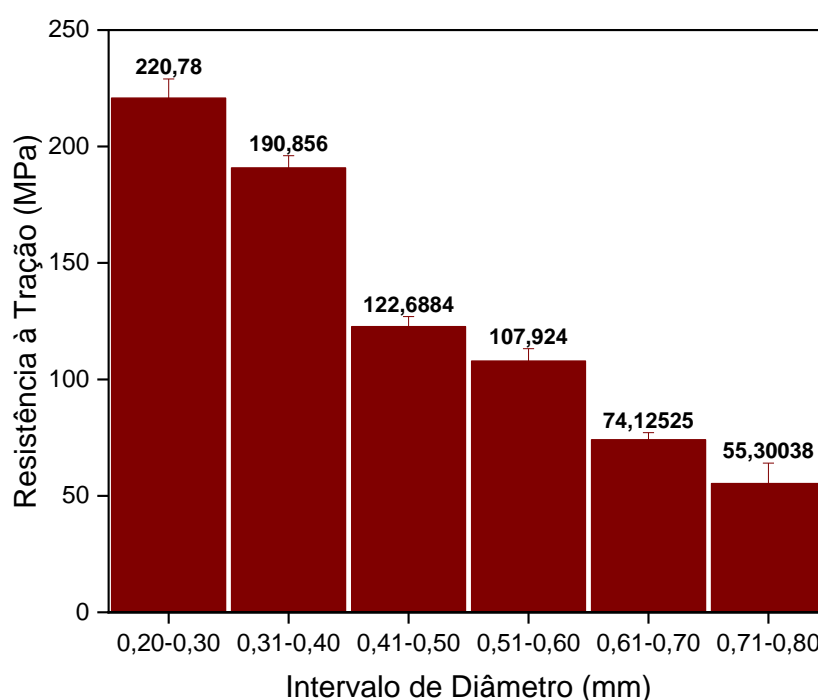
É possível verificar que a fibra de envira tem suas fibrilas acompanhando o sentido longitudinal da superfície e apresenta um aspecto naturalmente rugoso, independente da variação de diâmetro. Isso infere que, possivelmente, as fibras de envira preta apresentarão uma boa adesão quando inseridas à uma matriz polimérica, aumentando a ancoragem mecânica e melhorando a transferência de tensões, que poderá, posteriormente, resultar em um comportamento mecânico satisfatório (Belouadah *et al.* 2020). Também, é possível observar o aumento de rugosidades, poros, vazios e defeitos com o aumento do diâmetro, provavelmente devido à tendência das microfibrilas de se unirem a fim de formar feixes mais espessos (Leite, 2022). Isto pode indicar que o aumento destas discontinuidades estruturais de acordo com o aumento do diâmetro, atuará como concentradores de tensões quando as fibras forem inseridas a matriz epóxi, aumentando a suscetibilidade a delaminação, que reduz a resistência mecânica dos materiais. Além disso, este comportamento corrobora com o fundamento que fibras mais finas possuem maior densidade devido sua maior compactação estrutural e menor presença de

poros. Dessa forma, a análise morfológica das fibras de envira demonstra similaridade às de outras fibras que contém celulose como seu constituinte, como sisal, juta, linha e fibra de *Centaurea solstitialis* (Seki *et al.*, 2022).

4.5 Ensaio de Tração das Fibras Isoladas

Na figura 25 é apresentado o gráfico da relação entre os 6 intervalos de diâmetro (mm) da fibra de envira com a resistência à tração (MPa) isolada das fibras.

Figura 25: Resistência à tração de fibras isoladas de Envira.



Fonte: Própria autora, 2024.

A resistência média das fibras de envira ficou em torno de 129 MPa, valor que se assemelha e supera a de outras fibras já utilizadas como reforços de matrizes poliméricas, como sisal e linha (Begum, 2020). É notável que, as fibras com menor intervalo de diâmetro apresentaram maior resistência à tração, e que esse valor se comporta de maneira inversamente proporcional com o aumento do diâmetro.

No menor intervalo de diâmetro entre 0,2 e 0,3 mm, a resistência à tração atinge seu maior valor, de 220,78 MPa, e conforme o diâmetro aumenta, a resistência diminui gradativamente, chegando a apenas 55,30 MPa no intervalo entre 0,71 e 0,8 mm, totalizando uma perda de 74,95% de resistência mecânica. Este acontecimento, possivelmente, é resultado da menor presença de defeitos e vazios em fibras mais finas ou pela maior área superficial que elas

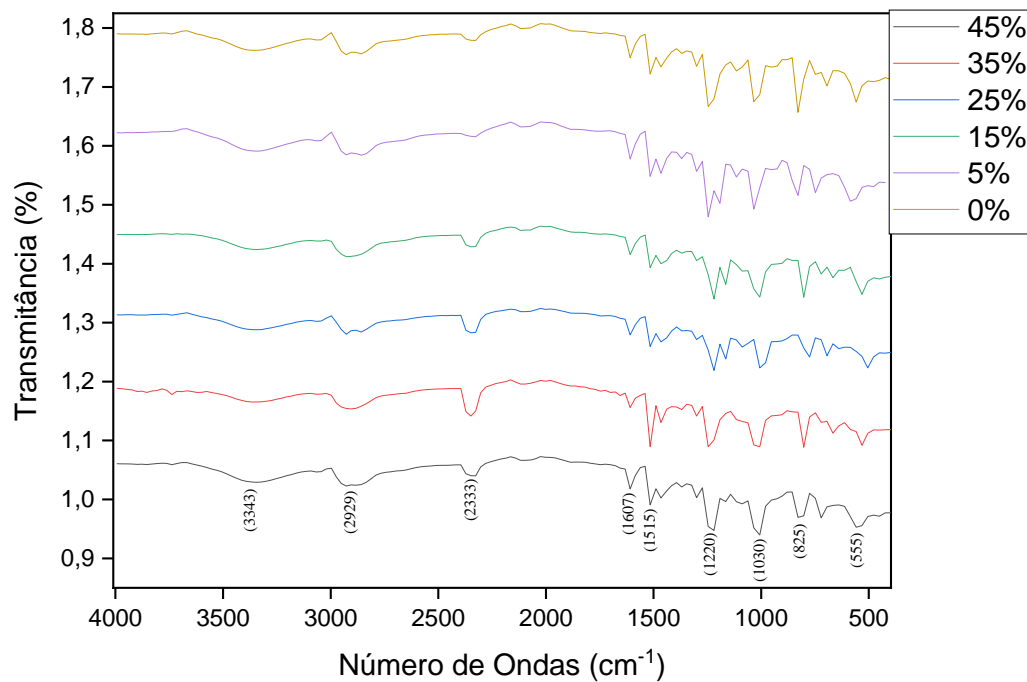
apresentam, que contribuem para uma distribuição mais uniforme das forças aplicadas, resultando assim, em maior resistência à tração (Pinheiro *et al.*, 2023).

4.6 Caracterização dos compósitos

4.6.1 Espectroscopia por Transformada de Fourier (FTIR) dos Compósitos Epóxi/Fibras de Envira

A figura 26 mostra os espectros da matriz epóxi e dos compósitos da matriz polimérica reforçados com 5 a e 45% de fração volumétrica de fibras de envira.

Figura 26: Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de envira.



Fonte: Própria autora, 2024.

É possível observar que a resina e os compósitos possuem bandas de absorção similares. A banda de 3343 cm^{-1} pouco intensa é relacionada diretamente ao estiramento típico de O-H, ligada a umidade superficial. A banda 2929 cm^{-1} é atribuída ao estiramento de grupos C-H e C-H₂ do anel aromático e a banda 2333 cm^{-1} representa o CO₂ não foi totalmente deduzido do ar. Já as bandas $1607\text{-}1515\text{ cm}^{-1}$ são características do estiramento das ligações C=C e C-C em anéis aromáticos e a banda 1220 cm^{-1} demonstra um estiramento assimétrico das ligações C-O do anel aromático. Na banda 1030 cm^{-1} ocorre o estiramento C-O-C de éteres do grupo epóxi oxirano e na banda 825 cm^{-1} a deformação dos anéis aromáticos fora do plano. As bandas 3343 , 2929 , 1607 e 1030 cm^{-1} podem indicar tanto similaridade com as bandas encontradas no FTIR

das fibras de envira, como também interações entre fibra e matriz ou só da matriz. Porém, de modo geral, pode se inferir que a interação entre os grupos funcionais entre epóxi e fibras de envira foi eficiente, devido a diminuição da intensidade da banda presente no FTIR das fibras e ligada a hidroxila (3343 cm^{-1}), a aparição de grupos funcionais característicos do epóxi, e também, pela semelhança as bandas encontradas em outras fibras lignocelulósicas (Delatorre *et al.*, 2022; Reddy *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2018).

4.6.2 Caracterização mecânica de tração

A Figura 27 mostra o aspecto da fratura dos compósitos produzidos. É notável que todos os corpos de prova fraturam de maneira frágil e dentro da área útil, sem região preferencial. Em relação a produção, os corpos de prova de 45% apresentarem evidente dificuldade em serem produzidos pelo método de moldagem manual devido a quantidade exacerbada de fibras.

Figura 27: Aspecto macroscópico de corpos de prova de tração de diferentes porcentagens após serem fraturados



Fonte: Própria autora, 2024.

Os valores referentes à resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de envira estão apresentados na Tabela 9.

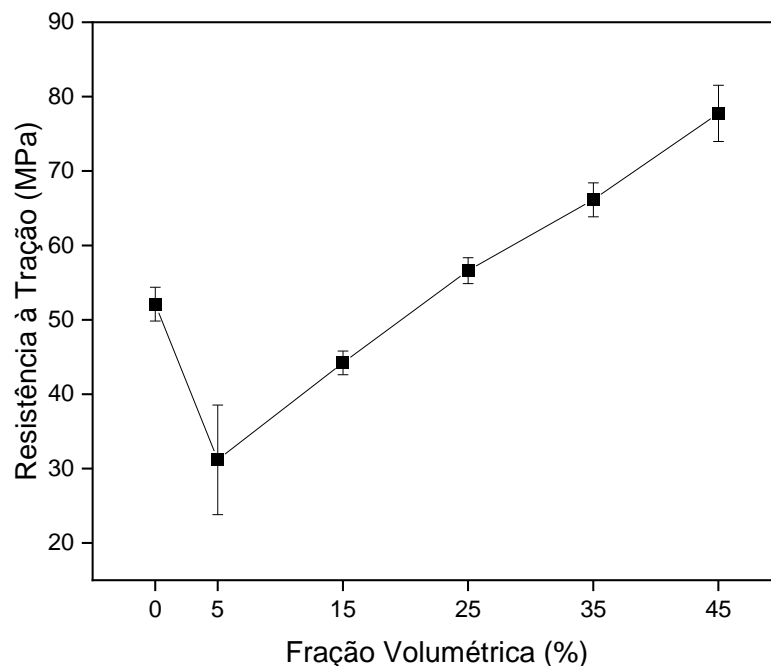
Tabela 9: Valores para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação para compósitos de matriz epóxi reforçados com frações volumétricas de fibras de envira

| Fração Volumétrica (%) | Resistência à Tração (MPa) | Módulo de Young (GPa) | Deformação (mm/mm) |
|------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| FEE0 | 52,12 ($\pm 2,27$) | 1,04 ($\pm 0,065$) | 0,066 ($\pm 0,007$) |
| FEE5 | 31,20 ($\pm 7,37$) | 1,10 ($\pm 0,119$) | 0,048 ($\pm 0,005$) |
| FEE15 | 44,22 ($\pm 1,59$) | 1,32 ($\pm 0,046$) | 0,046 ($\pm 0,002$) |
| FEE25 | 56,62 ($\pm 1,73$) | 1,57 ($\pm 0,118$) | 0,042 ($\pm 0,008$) |
| FEE35 | 66,14 ($\pm 2,28$) | 1,74 ($\pm 0,075$) | 0,043 ($\pm 0,010$) |
| FEE45 | 77,76 ($\pm 3,77$) | 1,83 ($\pm 0,072$) | 0,041 ($\pm 0,008$) |

Fonte: Própria autora, 2024.

É possível observar que a incorporação de fibras acarretou em uma diminuição gradual da resistência à tração nas porcentagens de 5 e 15% vol em relação à matriz plena de epóxi. Este fato pode ter ocorrido devido a atuação da fibra como carga de enchimento para o compósito (Leite, 2022). A partir de 25% vol, é notável que o comportamento de enchimento assume o caráter de reforço à esta matriz, tendo um aumento gradativo até 45% da sua composição, onde se obteve a média de 77,76 MPa, totalizando um aumento de cerca de 49,21% na resistência média final em relação a matriz, como apresentado na figura 28.

Figura 28: Resistência à tração de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras de envira.

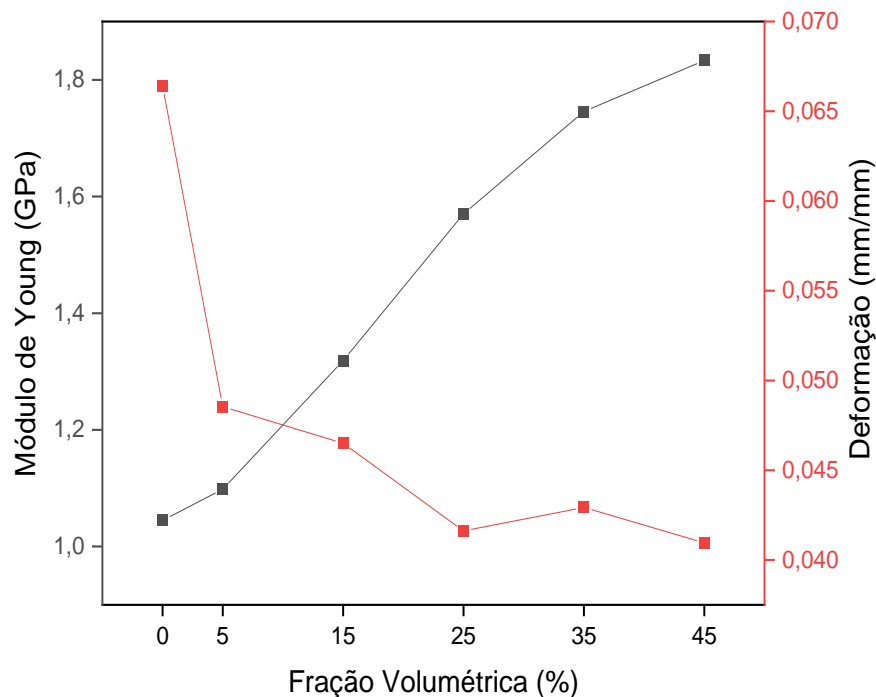


Fonte: Própria autora, 2024.

Este comportamento está atrelado à eficiente transferência de tensões da matriz para as fibras, que possivelmente, foi resultado da boa interação interfacial matriz/reforço, da escolha da fibra contínua e unidirecional e pela ancoragem mecânica satisfatória, auxiliada pela rugosidade natural das fibras, fazendo com que elas conseguissem atuar como barreiras mecânicas, retardando a propagação de trincas e aumentando a resistência à tração destes compósitos (Fieldkircher, 2023; Singh *et al.*, 2020).

Outro fator importante de citar, é o aumento do módulo de Young e a diminuição da deformação dos compósitos produzidos, apresentado na Figura 29.

Figura 29: Módulo de Young e deformação de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras de envira.



Fonte: Própria autora, 2024

Desde a primeira porcentagem estudada, 5% vol, houve aumento da rigidez do material, que manteve seu crescente exponencial até 45% vol, onde apresentou módulo de Young de cerca de 1,83 GPa. Já em relação a deformação, a incorporação das fibras resultou na diminuição de 34,85% em relação à deformação inicial, da matriz.

Logo, todo o comportamento referente à resistência à tração e a deformação/módulo de Young se justifica pela distribuição uniforme de tensões e a ausência expressiva de bolhas e vazios (Raja; Yuvarajan, 2024). Dessa forma, os resultados apresentados se mostraram

semelhantes e até mesmo, superiores, à de outros tipos de envira e de fibras como: guarumã (Pinheiro *et al.*, 2019), junco sete-ilhas (De Mendonça Neuba *et al.*, 2020), caranã (Leite, 2022), hemp (Ribeiro *et al.*, 2021), envira (Branco, 2022) e envira cheirosa (Monteiro, 2025), como mostra a Tabela 10, evidenciando o potencial da utilização desta fibra como reforço de matrizes poliméricas na produção de materiais resistentes, rígidos e leves.

Tabela 10 - Comparativo de desempenho de compósitos epóxi reforçados com fibras naturais.

| Fibra | Resistência à tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Referência |
|-------------------------|----------------------------|------------------------------|--|
| Envira Preta | 77,76 ± 3,77 | 1,83 ± 0,072 | Este Trabalho (2025) |
| Junco sete-ilhas | 15,2 ± 3,6 | 3,77 ± 0,05 | De Mendonça Neuba <i>et al.</i> , 2020 |
| Caranã | 34,89 ± 4,84 | 0,69 ± 0,07 | Leite, 2022 |
| Guarumã | 59,9 ± 7,1 | 0,60 ± 0,02 | Pinheiro <i>et al.</i> , 2019 |
| Hemp | 51,7 ± 9,9 | 2,05 ± 0,19 | Ribeiro <i>et al.</i> , 2021 |
| Envira | 51,41 ± 2,66 | 2,10 ± 0,14 | Branco, 2022 |
| Envira Cheirosa | 62,69 ± 3,67 | - | Monteiro, 2025 |

Fonte: Própria autora, 2025.

4.6.3 Caracterização mecânica de flexão

A Figura 30, apresenta o aspecto macroscópico dos corpos de prova rompidos em flexão. Diferente dos corpos de prova de tração, estes apresentaram zonas da fratura em áreas similares mas apresentaram a mesma dificuldade de fabricação na porcentagem de 45%.

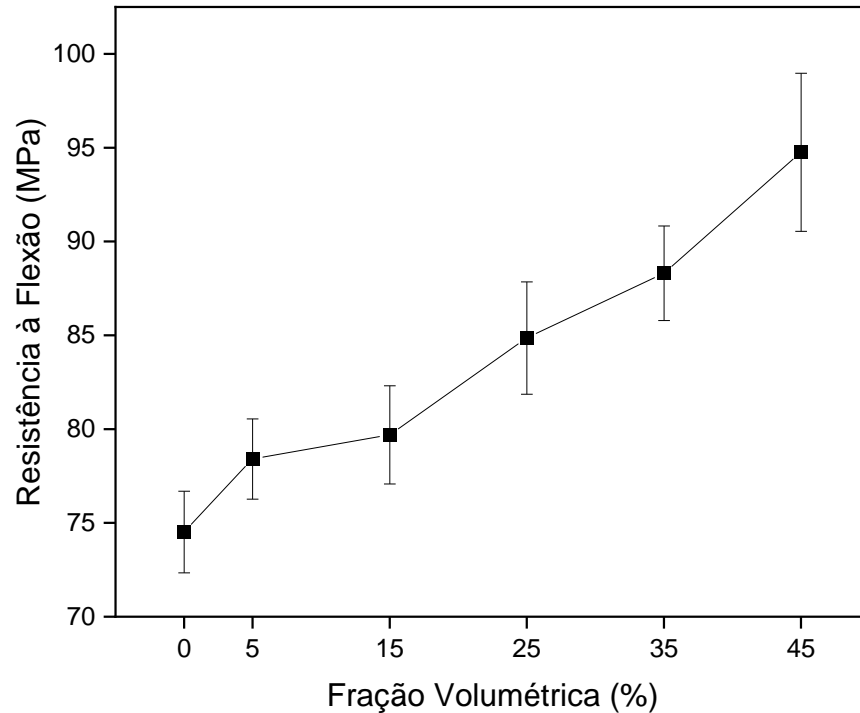
Figura 30: Aspecto da fratura dos corpos de prova após ensaio de flexão



Fonte: Própria autora, 2024.

Na figura 31, é apresentado o gráfico de resistência à flexão dos compósitos produzidos. Dessa forma, torna-se evidente a relação direta entre a fração volumétrica e a resistência à flexão dos compósitos reforçados com fibras de envira.

Figura 31: Resistência à flexão de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras de envira



Fonte: Própria autora, 2024.

O comportamento deixa claro que, a inserção de fibras na matriz polimérica foi promissora, e pode ser explicada pela eficiente distribuição de cargas entre a matriz e o reforço e pela boa adesão interfacial entre os mesmos (Fieldkircher, 2023). Este fato acarretou no aumento da rigidez e da resistência à flexão ao decorrer da inserção de maiores porcentagens de fibra, onde, até a porcentagem estudada, de 45% vol, as fibras não apresentaram saturação em relação a matriz. O que implica que, possivelmente, em maiores porcentagens, estes compósitos reforçados com fibras de envira podem ser ainda mais resistentes.

Além disso, é notável que mesmo que tenham se esbarado dentro do desvio padrão em algumas porcentagens, a resistência aumentou de forma progressiva até 45% de fração volumétrica, como mostra a Tabela 11. A maior resistência à flexão encontrada foi de 95 MPa, onde o aumento em relação a matriz epóxi foi de 27,16%.

Tabela 11 - Valores para resistência à tração e módulo de elasticidade para compósitos de matriz epóxi reforçados com frações volumétricas de fibras de envira

| Fração Volumétrica (%) | Resistência à Flexão (MPa) | Módulo de Young (GPa) |
|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| FEE0 | 74,52 ($\pm 2,17$) | 2,50 ($\pm 0,36$) |
| FEE5 | 78,41 ($\pm 2,13$) | 3,27 ($\pm 0,43$) |
| FEE15 | 79,70 ($\pm 2,61$) | 3,71 ($\pm 0,32$) |
| FEE25 | 84,86 ($\pm 3,00$) | 3,40 ($\pm 0,55$) |
| FEE35 | 88,31 ($\pm 2,52$) | 3,71 ($\pm 0,44$) |
| FEE45 | 94,75 ($\pm 4,21$) | 3,89 ($\pm 0,32$) |

Fonte: Própria autora, 2024.

4.6.4 Análise estatística

4.6.4.1 Análise estatística para propriedades de tração

A análise estatística de variância (ANOVA) da resistência a tração, módulo de Young e deformação para os compósitos epóxi/envira são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - análise de variância para resistência à tração, módulo de Young e deformação

| Resistência à Tração (MPa) | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------------|------------------|
| Fonte da variação | SQ | Gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 3222,038 | 5 | 644,4075 | 139,6961 | 7,72 x 10 ⁻²⁰ | 2,533555 |
| Dentro dos grupos | 138,3877 | 30 | 4,612923 | | | |
| Total | 3360,425 | 35 | | | | |
| Módulo de Young (GPa) | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | Gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 0,852085 | 5 | 0,170417 | 28,25486 | 1,69x10 ⁻¹⁰ | 2,533555 |
| Dentro dos grupos | 0,180943 | 30 | 0,006031 | | | |
| Total | 1,033028 | 35 | | | | |
| Deformação (mm/mm) | | | | | | |

| Fonte da variação | SQ | GI | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------------------|----------|----|-----------------------|----------|-----------------------|-----------|
| Entre grupos | 0,003156 | 5 | 0,000631 | 14,79925 | 2,45x10 ⁻⁷ | 2,533555 |
| Dentro dos grupos | 0,00128 | 30 | 4,27x10 ⁻⁵ | | | |
| Total | 0,004436 | 35 | | | | |

Fonte: Própria autora, 2024.

Todos os valores de F calculados apresentaram valores maiores do que os valores de F críticos para todas as variáveis. Dessa forma, rejeita-se a hipótese de igualdade entre os valores médios para um nível de significância de 5%. Com base nessa afirmativa, foi realizado o teste de Tukey afim de avaliar a influência da incorporação das fibras de envira nas propriedades mecânicas de tração dos compósitos produzidos. Os resultados do teste de Tukey são apresentados na Tabela 13, onde todos os valores em negrito apresentam diferença mínima significativa.

Tabela 13 - Teste Tukey para as propriedades de tração dos materiais compósitos ensaiados

| Resistência à tração (D.M.S =6,59) | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | FEE0 | FEE5 | FEE15 | FEE25 | FEE35 | FEE45 |
| FEE0 | 0 | 20,93033 | 7,907667 | 4,49715 | 14,01567 | 25,63633 |
| FEE5 | 20,93033 | 0 | 13,02267 | 25,42748 | 34,946 | 46,56667 |
| FEE15 | 7,907667 | 13,02267 | 0 | 12,40482 | 21,92333 | 33,544 |
| FEE25 | 4,49715 | 25,42748 | 12,40482 | 0 | 9,518517 | 21,13918 |
| FEE35 | 14,01567 | 34,946 | 21,92333 | 9,518517 | 0 | 11,62067 |
| FEE45 | 25,63633 | 46,56667 | 33,544 | 21,13918 | 11,62067 | 0 |
| Módulo de Young (D.M.S =0,15) | | | | | | |
| | FEE0 | FEE5 | FEE15 | FEE25 | FEE35 | FEE45 |
| FEE0 | 0 | 0,053333 | 0,273833 | 0,5255 | 0,700833 | 0,7885 |
| FEE5 | 0,053333 | 0 | 0,2205 | 0,472167 | 0,6475 | 0,735167 |
| FEE15 | 0,273833 | 0,2205 | 0 | 0,251667 | 0,427 | 0,514667 |
| FEE25 | 0,5255 | 0,472167 | 0,251667 | 0 | 0,175333 | 0,263 |
| FEE35 | 0,700833 | 0,6475 | 0,427 | 0,175333 | 0 | 0,087667 |
| FEE45 | 0,7885 | 0,735167 | 0,514667 | 0,263 | 0,087667 | 0 |
| Deformação (D.M.S =0,013) | | | | | | |

| | FEE0 | FEE5 | FEE15 | FEE25 | FEE35 | FEE45 |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| FEE0 | 0 | 0,017885 | 0,019919 | 0,024812 | 0,023496 | 0,025472 |
| FEE5 | 0,017885 | 0 | 0,002034 | 0,006927 | 0,00561 | 0,007587 |
| FEE15 | 0,019919 | 0,002034 | 0 | 0,004893 | 0,003577 | 0,005553 |
| FEE25 | 0,024812 | 0,006927 | 0,004893 | 0 | 0,001317 | 0,000659 |
| FEE35 | 0,023496 | 0,00561 | 0,003577 | 0,001317 | 0 | 0,001976 |
| FEE45 | 0,025472 | 0,007587 | 0,005553 | 0,000659 | 0,001976 | 0 |

Fonte: Própria autora, 2024.

Os valores de d.m.s. obtidos para a resistência à tração, módulo de Young e deformação foram, respectivamente, 6,59, 0,15 e 0,013. Dessa forma, foi possível afirmar que todos os valores acima destes, apresentaram médias estatisticamente diferentes. Para resistência à tração, quase todos os valores se distanciaram estatisticamente, menos 0% em relação a 25%, devido à proximidade e encontro de valores médios em relação à resistência.

Para o módulo de Young, os únicos valores que não diferenciaram estatisticamente foram 0% em relação à 5% e 45% em relação à 35%, ocasionado pelo encontro das médias do módulo. Já para deformação, os valores referentes a inserção volumétrica de fibras não apresentaram diferenças estatísticas entre si, somente quando comparados a matriz epóxi, 0%, o que confirma o aumento de rigidez do material, mas também infere que, apesar da menor deformação ao inserir as fibras em todas as porcentagens, em termos estatísticos, elas apresentaram uma variação baixa entre os valores médios.

Dessa forma, torna-se fato que, a inserção de fibras de envira atuou como reforço a matriz epóxi, aumentando a sua resistência à tração, módulo de Young e tenacidade.

4.6.4.2 Análise estatística para propriedades de flexão

A análise de variância (ANOVA) para os resultados de resistência à flexão e módulo de Young são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - análise de variância para resistência à flexão, módulo de Young e deformação.

| <i>Fonte da variação</i> | Resistência à Flexão (MPa) | | | | | |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|----------|------------------------|------------------|
| | <i>SQ</i> | <i>GI</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1635,356924 | 5 | 327,0714 | 39,90038 | $2,25 \times 10^{-12}$ | 2,533555 |

| Dentro dos grupos | 245,916 | 30 | 8,1972 | | | |
|------------------------------|-------------|-----------|-----------|----------|------------------------|------------------|
| Total | 1881,273 | 35 | | | | |
| Módulo de Young (GPa) | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | GI | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 7,599469889 | 5 | 1,509894 | 8,88273 | 2,92x10 ⁻¹⁵ | 2,533555 |
| Dentro dos grupos | 5,133199 | 30 | 0,171107 | | | |
| Total | 12,73267 | 35 | | | | |

Fonte: Própria autora, 2024.

É notável que os valores de F calculado são maiores do que os do F crítico para os dois parâmetros. Logo, rejeita-se a hipótese de igualdade entre as médias, e se faz necessário a utilização do teste de Tukey para identificar onde e quanto estas médias são diferentes em relação ao grupo.

Logo, na tabela 15, os resultados do teste Tukey confirmam a influência positiva da incorporação de fibras nas propriedades de resistência à flexão e módulo de Young dos compósitos produzidos. Todos os valores em negrito apresentam diferença mínima significativa.

Tabela 15 - Teste Tukey para as propriedades de flexão dos materiais compósitos ensaiados.

| Resistência à flexão (D.M.S =5,02) | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | FEE0 | FEE5 | FEE15 | FEE25 | FEE35 | FEE45 |
| FEE0 | 0 | 3,891167 | 5,175167 | 10,336 | 13,7898 | 20,232 |
| FEE5 | 3,891167 | 0 | 1,284 | 6,444833 | 9,898667 | 16,34083 |
| FEE15 | 5,1751 | 1,284 | 0 | 5,160833 | 8,614667 | 15,0583 |
| FEE25 | 10,336 | 6,444833 | 5,16083 | 0 | 3,453833 | 9,896 |
| FEE35 | 13,78983 | 9,898667 | 8,614667 | 3,453833 | 0 | 6,442167 |
| FEE45 | 20,232 | 16,34083 | 15,05683 | 9,896 | 6,442167 | 0 |
| Módulo de Young (D.M.S =0,72615) | | | | | | |
| | FEE0 | FEE5 | FEE15 | FEE25 | FEE35 | FEE45 |
| FEE0 | 0 | 0,76783 | 1,20983 | 0,9023 | 1,21267 | 1,3966 |

| | | | | | | |
|-------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| FEE5 | 0,76783 | 0 | 0,442 | 0,1345 | 0,444833 | 0,628833 |
| FEE15 | 1,20983 | 0,442 | 0 | 0,3075 | 0,002833 | 0,186833 |
| FEE25 | 0,902333333 | 0,1345 | 0,3075 | 0 | 0,310333 | 0,49433 |
| FEE35 | 1,212667 | 0,444833 | 0,002833 | 0,310333 | 0 | 0,184 |
| FEE45 | 1,39666 | 0,628833 | 0,186833 | 0,494333 | 0,184 | 0 |

Fonte: Própria autora, 2024

Em relação a resistência à flexão, apesar dos valores não diferenciarem estatisticamente nas porcentagens entre 0 e 5%, 5 e 15% e 25 e 35%, é perceptível o aumento gradual dos valores médios em relação a inserção das fibras à matriz. Fato que corrobora com a ideia de que as fibras de envira serviram como reforço e aumentaram a resistência à flexão do material.

No que se refere ao módulo de Young, o aumento volumétrico de fibras na matriz acarretou em maior rigidez ao material, comportamento comprovado pelo aumento dos valores de d.m.s em relação a 0%. No entanto, quando comparados entre si, os percentuais de volume de fibras se encontraram estatisticamente, apresentando uma variação baixa nos valores de módulo encontrados após a inserção de 5 a 45% de fibras.

Logo, os resultados obtidos neste estudo demonstram que a incorporação de fibras de envira preta (*Bocageopsis multiflora*) em matriz polimérica epóxi proporciona melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos compósitos. Além de apresentar características físicas, morfológicas, químicas e térmicas similares à de outras fibras lignocelulósicas, que confirma o potencial das fibras de envira preta como alternativa amazônica sustentável aos reforços sintéticos na produção de compósitos leves e de propriedades mecânicas satisfatórias.

E que também, permite presumir que, em relação à aplicação, as fibras de envira preta atenderão critérios essenciais para produção de painéis termoacústicos e compósitos estruturais para construção civil e para indústria automotiva. Pois, de acordo com estudos como o de Sharma *et al.* (2023), Aly *et al.* (2021) e Majumder *et al.* (2023), os compósitos à base de fibras naturais, com características similares as fibras de envira, apresentam redução de peso, aumento da resistência mecânica, baixa condutividade térmica e boa absorção acústica, características necessárias para produção de isolamento de edificações e componentes internos de veículos. E também, estudos como o de Khan *et al.* (2024), que confirma que as fibras naturais possuem notório potencial como substitutas aos reforços sintéticos em partes não estruturais de automóveis, contribuindo para eficiência energética e redução do impacto ambiental dos veículos. Diante disso, a integração das fibras de envira preta em matrizes poliméricas pode

representar uma alternativa viável e sustentável a estes setores, ampliando as possibilidades de aplicação destas fibras na engenharia de materiais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A incorporação de fibras de envira em compósitos de matriz epóxi proporcionou um aumento significativo nas propriedades mecânicas de resistência à tração e flexão;
- A fibra de envira apresentou massa específica de 0.25 g/cm^3 , sendo um grande potencial para aplicações que necessitem leveza;
- A maior frequência de fibras se localizou no intervalo de diâmetro de 0,41 a 0,50 mm;
- As fibras de envira apresentaram relação inversa de densidade e diâmetro, ou seja, quanto maior o diâmetro menor a densidade;
- O FTIR apresentou grupos funcionais característicos das fibras lignocelulósicas como celulose, hemicelulose e lignina, e também, estiramentos e flexões das ligações destes grupos funcionais, tanto quanto sozinhos, como quando incorporados à resina epóxi;
- O TG/DTG da fibra de envira demonstrou comportamento similar às outras fibras vegetais: evaporação da água superficial, clivagem das ligações glicosídicas da celulose e da degradação da lignina, degradação da celulose e estabilidade dos componentes, que para a fibra de envira ocorreu em torno de $365,50 \text{ }^\circ\text{C}$, totalizando uma perda de massa de 69%;
- O MEV demonstrou a aparição de rugosidades, vazios e defeitos maiores com o aumento do diâmetro;
- A resistência a tração de fibras isoladas apresentou melhor resultado para fibras de intervalos de diâmetros menores, como 0,20-0,30 e 0,31-0,40mm, com 220,78 MPa e 190,856 MPa, respectivamente;
- O uso das fibras de envira como reforço sustentável se mostrou promissor, não apenas pela melhoria das propriedades mecânicas, confirmada pela análise estatística, mas também pelo impacto ambiental reduzido, já que sua produção não emitiu gases poluentes e sua extração não afetou o ciclo de vida da árvore;
- Os resultados demonstraram que a fibra de envira apresenta desempenho comparável e, em alguns casos, superior a outras fibras naturais amplamente utilizadas, como juta, guarumã e ubim, tornando-se uma alternativa viável para aplicações estruturais.
- A utilização da envira preta valoriza recursos da biodiversidade amazônica, contribuindo para o desenvolvimento sustentável, de cadeias produtivas locais que promovem a bioeconomia regional e incentiva a diminuição na utilização de reforços sintéticos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar outras matrizes poliméricas, e se possível, de caráter sustentável, como resinas naturais;
- Fabricar corpos de prova por prensagem, para sanar problemas de molhabilidade e garantir a interação fibra/matriz eficiente nos maiores percentuais volumétricos;
- Realizar DRX, para de avaliar a estrutura cristalina da fibra;
- Realizar o tratamento químico superficial das fibras de envira para avaliar suas propriedades mecânicas, térmicas e químicas pós tratamento;
- Realizar testes de resistência em condições adversas para avaliar durabilidade e o envelhecimento dos compósitos reforçados com fibras de envira;
- Produzir compósitos para ensaio de impacto Charpy e Izod e investigar o comportamento mecânico encontrado;
- Produzir compósitos com variações de diâmetros, de fibras finas, medias e grossas;
- Investigar a possibilidade de boas propriedades acústicas e potencial como isolantes térmicos dos compósitos reforçados com fibras de envira;
- Produzir compósitos em porcentagens maiores para encontrar o percentual de saturação da fibra de envira quando incorporada a matriz epóxi;
- Explorar o uso de compósitos híbridos combinando fibras de envira com fibras sintéticas ou outras fibras naturais.

REFERÊNCIAS

- Akram, *et al.* Polymer-Reinforced Hybrid Composites: Review. **International Journal** 101271, 1 July 2023, pp. 101271–101271, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>.
- Alias, Aisyah Humaira, *et al.* Hybridization of MMT/Lignocellulosic Fiber Reinforced Polymer Nanocomposites for Structural Applications: A Review. **Coatings**, vol. 11, no. 11, 3 Nov. 2021, p. 1355, <https://doi.org/10.3390/coatings11111355>.
- Al-Oqla, F. M.; Hayajneh, M. T.; Aldhirat, A. Tribological and mechanical fracture performance of Mediterranean lignocellulosic fiber reinforced polypropylene composites. **Polymer Composites**, 31 jul. 2021.
- Aly, N. M. *et al.* Acoustic and thermal performance of sustainable fiber reinforced thermoplastic composite panels for insulation in buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 40, p. 102747, ago. 2021.
- ASTM D 638 – 2022 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 790 - 2017 Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
- Bates, Irena, *et al.* Usability of Discarded Lignocellulosic Fibers in Paper for Secondary Green Packaging and Labeling. **Sustainability**, vol. 15, no. 6, 17 Mar. 2023, p. 5378, <https://doi.org/10.3390/su15065378>. Accessed 14 Apr. 2023.
- Begum, S., Fawzia, S., & Hashmi, M. S. J. (2020). Polymer matrix composite with natural and synthetic fibres. **Advances in Materials and Processing Technologies**, 1–18. doi:10.1080/2374068x.2020.1728645.
- Belouadah *et al.* Characterization of ligno-cellulosic fiber extracted from Atriplex halimus L. plant. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 168, p. 806–815, 23 nov. 2020.
- Branco, N. T. ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO de COMPÓSITOS de MATRIZ POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS de ENVIRA (*Bocageopsis Multiflora*). 2022.
- Capricho, J. C.; Fox, B.; Hamed, N.r. Multifunctionality in epoxy resins. **Polymer Reviews**, v. 60, n. 1, p. 1-41, 2020.
- Cavalcanti, Washington Moreira. **Produção e caracterização de painéis compósitos constituídos de resíduos lignocelulósicos e misturas de resinas epóxi sintética e de óleo vegetal residual epoxidado**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/52457>.

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

Chandekar, H.; Chaudhari, V.; Waigaonkar, S. A review of jute fiber reinforced polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 2079–2082, 2020.

Costa, U. O. *et al.* Mechanical properties of composites with graphene oxide functionalization of either epoxy matrix or curaua fiber reinforcement. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 13390–13401, 2 out. 2020.

Couto RJdaC, Colares A. História de saberes amazônicos e emancipação política: o artesanato em Juruti-PA: History of Amazonian knowledge and political emancipation: handicraft in Juruti-PA. **Revista Cocar**. 2021; 15(33); 1-21.

Cunha, J. *et al.* Study on Mechanical and Thermal Properties of Amazon Fibers on the Polymeric Biocomposites: Malva and Tucum. **Fibers and Polymers**, v. 22, n. 11, 9 jun. 2021. Cunha, J. *et al.* Titica Vine Fiber (Heteropsis flexuosa): A Hidden Amazon Fiber with Potential Applications as Reinforcement in Polymer Matrix Composites. **Journal of composites science**, v. 6, n. 9, p. 251–251, 27 ago. 2022.

Daniel J. Thomas. Developing hybrid carbon nanotube- and graphene-enhanced nanocomposite resins for the space launch system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 109, no. 9, 2020, pp. 2563–2574. DOI: 10.1007/s00170-020-06038-7.

Davolos, Frederico. Universidade Federal De Uberlândia Instituto De Química Curso De Química Industrial Pigmentos Inorgânicos Para Aplicação Em Plásticos. *Dec. 2019*.

Demosthenes LCDC, Luz FSD, Nascimento LFC, Monteiro SN. Buriti Fabric Reinforced Epoxy Composites as a Novel Ballistic Component of a Multilayered Armor System. **Sustainability**. 2022; 14(17); 10591.

De Lima, T. E. S. *et al.* Potential of Using Amazon Natural Fibers to Reinforce Cementitious Composites: A Review. **Polymers**, v. 14, n. 3, p. 647, 1 jan. 2022.

De Mendonça Neuba, L.; Pereira Junio, R.F.; Ribeiro, M.P.; Souza, A.T.; De Sousa Lima, E.; Garcia Filho, F.D.C.; Figueiredo, A.B.-H.d.S.; Braga, F.d.O.; Azevedo, A.R.G.d.; Monteiro, S.N. Promising Mechanical, Thermal, and Ballistic Properties of Novel Epoxy Composites Reinforced with *Cyperus malaccensis* Sedge Fiber. **Polymers**, 2020, 12, 1776. <https://doi.org/10.3390/polym12081776>

De Oliveira, J. M. Z.; FILHO, J. DE A. M. Evaluation of the durability of cementitious composites reinforced with natural vegetable fibers from the Amazon. **Brazilian Journal of Development**, v. 10, n. 2, p. e67006–e67006, 6 fev. 2024.

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.

Fieldkircher, B. P. Avaliação comparativa do desempenho de misturas asfálticas do tipo BBSG com a incorporação de fibra de sisal. **Ufsc.br**, 2023.

Gomes, Antonio, *et al.* Plastery Matrix Composites Reinforced with Palm Fiber from the Amazon Region. **Construction and Building Materials**, vol. 411, 29 Nov. 2023, pp. 134121–134121, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134121>.

Guo, Guixuan, *et al.* Ultraviolet-Cured Polyurea-Polyurethane Acrylate/Polysiloxane Hybrid Anti-Fouling Coatings with Superior Mechanical Properties, Transparency, and Durability. **Progress in Organic Coatings**, vol. 197, Dec. 2024, p. 108832, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108832>.

Hasan, Afnan, *et al.* Making the Lignocellulosic Fibers Chemically Compatible for Composite: A Comprehensive Review. **Cleaner Materials**, vol. 4, June 2022, p. 100078, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100078>.

Hibbert, Kemar; Warner, Grant; Brown, Celeste; *et al.* The Effects of Build Parameters and Strain Rate on the Mechanical Properties of FDM 3D-Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene. **Open Journal of Organic Polymer Materials**, v. 09, n. 01, p. 1–27, 2019. <https://doi.org/10.29322/ijsrp.12.07.2022.p12769>.

Kannan, G.; Thangaraju, R. Recent Progress on Natural Lignocellulosic Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review. **Journal of Natural Fibers**, p. 1–32, 15 jul. 2021.

Karimah, Azizatul, *et al.* A Review on Natural Fibers for Development of Eco-Friendly Bio-Composite: Characteristics, and Utilizations. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 13, no. 13, July 2021, pp. 2442–2458, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.014>.

Kausar, Ayesha. A review of polyurethane foams for multi-functional and high-performance applications. **Polymers**, v. 16, n. 22, p. 3182, 2023. DOI: 10.3390/polym16223182.

Kerly Samaniego-Aguilar, *et al.* Valorization of Agricultural Waste Lignocellulosic Fibers for Poly(3-Hydroxybutyrate-Co-Valerate)-Based Composites in Short Shelf-Life Applications. **Polymers**, vol. 15, no. 23, 23 Nov. 2023, pp. 4507–4507, <https://doi.org/10.3390/polym15234507>.

Khan, A. *et al.* Extraction and Characterization of Natural Fiber from Eleusine Indica Grass as Reinforcement of Sustainable fiber-Reinforced Polymer Composites. **Journal of Natural Fibers**, p. 1–9, 29 nov. 2019.

Khan, F. *et al.* Advances of Composite Materials in Automobile Applications – A Review. **Journal of Engineering Research**, 27 fev. 2024.

Krauklis, Andrey E., *et al.* Composite Material Recycling Technology—State-of-The-Art and Sustainable Development for the 2020s. **Journal of Composites Science**, vol. 5, no. 1, 15 Jan. 2021, p. 28, www.mdpi.com/2504-477X/5/1/28, <https://doi.org/10.3390/jcs5010028>.

Kwon, S., Zambrano, M. C., Pawlak, J. J., & Venditti, R. A. (2021). Effect of lignocellulosic fiber composition on the aquatic biodegradation of wood pulps and the isolated cellulose, hemicellulose and lignin components: kinetic modelling of the biodegradation process. **Cellulose**, 28(5), 2863–2877. doi:10.1007/s10570-021-03680-6

Lee, C.H.; Khalina, A.; Nurazzi, N.M.; Norli, A.; Harussani, M.M.; Rafiqah, S.A.; Aisyah, H.A.; Ramli, N. The Challenges and Future Perspective of Woven Kenaf Reinforcement in Thermoset Polymer Composites in Malaysia: A Review. **Polymers** 2021, 13, 1390. <https://doi.org/10.3390/polym13091390>.

Lorenzi, H. *Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil*. 2. Ed. **Nova Odessa**, SP: Editora Plantarum, 1998. 352.

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. **Polymers Bull.** 2022. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04241-y>.

Maiti, Saptarshi, *et al.* Sustainable Fiber-Reinforced Composites: A Review. **Advanced Sustainable Systems**, vol. 6, no. 11, 19 Sept. 2022, p. 2200258, <https://doi.org/10.1002/adsu.202200258>.

Majumder, A. *et al.* Thermo-acoustic building insulation materials fabricated with recycled fibers – Jute, Wool and Loofah. **Energia and Buildings**, v. 293, n. 113211, 15 ago. 2023.

Marchi BZ, Oliveira MS, Bezerra WBA, de Sousa TG, Candido VS, da Silva ACR, et al. Ubim Fiber (*Geonoma baculifera*): A Less Known Brazilian Amazon Natural Fiber for Engineering Applications. **Sustainability**. 2022; 14(1); 421.

Masuda, Julia Mayumi. **Reciclagem de compósitos de resina epóxi e fibra de carbono: evolução e tendências**. 2023. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2023.

Milosevic, M.; Valášek, P.; Ruggiero, A. Tribology of Natural Fibers Composite Materials: An Overview. **Lubricants**, v. 8, n. 4, p. 42, 4 abr. 2020.

Miniappan, P. K. *et al.* Mechanical, fracture-deformation, and tribology behavior of fillers-reinforced sisal fiber composites for lightweight automotive applications. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 62, n. 1, 1 jan. 2023.

Monteiro, M. V. F. Análise da propriedade mecânica de tração e resistência à chama de compósitos poliméricos com fibras de Envira Cheirosa (*Annona paludosa* Abul.). **Ufpa.br**, 2025.

Moshi, A. M. M. *et al.* Characterization of natural cellulosic fiber extracted from *Grewia damine* flowering plant's stem. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 164, p. 1246–1255, dez. 2020.

Mustapha, R., Rahmat, A. R., Abdul Majid, R., & Mustapha, S. Vegetable oilbased epoxy resins and their composites with bio-based hardener: A short review. **PolymerPlastics Technology and Materials**, v. 58, n. 12, p. 1311-1326, 2019.

Oliveira MS, Luz FSD, Teixeira SA, Demosthenes LCDC, Pereira AC, Filho FDCG, et al. Tucum fiber from Amazon *Astrocaryum vulgare* palm tree: Novel reinforcement for polymer composites. **Polymers**. 2020, 12(10), 2259.

Omer B. I; Ahmed Y. M.; Abdalrahman, R. M. Impact of textile types and their hybrids on the mechanical properties and thermal insulation of mohair-reinforced polyester Composite laminates. **Results in Materials**, v. 21, p. 100502–100502, 1 mar. 2024.

Ostolaza, M. *et al.* Latest Developments to Manufacture Metal Matrix Composites and Functionally Graded Materials through AM: A State-of-the-Art Review. **Materials**, v. 16, n. 4, p. 1746, 20 fev. 2023.

Pereira, W. A. *et al.* Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 1, 2021.

Pinheiro, M. A. *et al.* Periquiteira (*Cochlospermum Orinocense*): A Promising Amazon Fiber for Application in Composite Materials. **Polymers**, vol. 15, no. 9, 28 Apr. 2023, pp. 2120–2120, <https://doi.org/10.3390/polym15092120>.

Pinheiro M. A., Gomes LG, Silva ACR, Candido VS, Reis RHM, Monteiro SN. Guaruman: A natural Amazonian fiber with potential for Polymer composite reinforcement. **Materials Research**. 2019; 22: e20190092.

Pinto, M. F. S. (2020). **Compósitos híbridos de fibras e nanotubos de carbono em resina epóxi**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade do Minho, Braga. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt>.

Raja T., Yuvarajan, D. Analysis of the Properties of a Novel Natural Fibre Extracted from Pumpkin Plant Stalks: A Sustainable Alternative for Lightweight Applications. **Materials Letters**, vol. 357, 1 Feb. 2024, pp. 135748–135748, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135748>

Rajak, Dipen Kumar, *et al.* A Review on Synthetic Fibers for Polymer Matrix Composites: Performance, Failure Modes and Applications. **Materials**, vol. 15, no. 14, 1 Jan. 2022, p. 4790, www.mdpi.com/1996-1944/15/14/4790/htm, <https://doi.org/10.3390/ma15144790>.

Rambo, M. K.; Schmidt, F.; Rodrigues, C. A. Caracterização térmica e química de biomassas lignocelulósicas para fins energéticos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 10, p. 988-994, 2015. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4675/467546194069.pdf>.

Ratanawilai, T.; Raksarak, N. Properties of polypropylene composites as function of reinforcement by plant fibers. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 120025, dez. 2024.

Reis, R. *et al.* Guaruman fiber: another possible reinforcement in composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 1, p. 622–628, 1 jan. 2020.

Ribeiro, M.P *et al.* Mechanical, thermal and ballistic performance of epoxy composites reinforced with Cannabis sativa hemp fabric. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 221–233. 2021.

Ribeiro, Maurício Maia. **Estudo da incorporação de resíduos industriais, lama vermelha e caulim, nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de juta e malva**. Orientadora: Verônica Scarpini Candido. 2022. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/14612>. Acesso em: 17 de outubro de 2022.

Santos *et al.* Environmental performance of a cement composite reinforced with vegetable fibers cultivated in the Brazilian Amazon. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, v. 3, p. 100034–100034, 1 dez. 2022.

Seid, Abdu Mohammed, and Solomon Alemneh Adimass. Review on the Impact Behavior of Natural Fiber Epoxy Based Composites. **Heliyon**, vol. 10, no. 20, 10 Oct. 2024, p. e39116, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402415147X, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39116>.

Seki, Y., Selli, F., Erdoğan, Ü.H. et al. A review on alternative raw materials for sustainable production: novel plant fibers. **Cellulose** 29, 4877–4918 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04597-4>

Siva, R. *et al.* Study on a Novel natural cellulosic fiber from *Kigelia africana* fruit: Characterization and analysis. **Carbohydrate Polymers**, v. 244, p. 116494, set. 2020.

Singh, J. I. P., *et al.* Influence of Fiber Volume Fraction and Curing Temperature on Mechanical Properties of Jute/PLA Green Composites. **Polymers and Polymer Composites**, vol. 28, no 4, maio de 2020, p. 273–84. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1177/0967391119872875>.

Sharma, S. *et al.* Emerging progressive developments in the fibrous composites for acoustic applications. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 102, p. 443–477, 1 set. 2023.

Shahinur, S.; Hasan, M. Natural Fiber and Synthetic Fiber Composites: Comparison of Properties, Performance, Cost and Environmental Benefits. **Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials**, P. 794–802, 2020.

Shogren, Randal, *et al.* Plant-Based Materials and Transitioning to a Circular Economy. **Sustainable Production and Consumption**, vol. 19, July 2019, pp. 194–215, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.04.007>.

Shrivastava, S. *et al.* Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties, and Applications. **Ceramics**, v. 7, n. 2, p. 652–679, 1 jun. 2024.

Shvydyuk, K. O. *et al.* Review of Ceramic Composites in Aeronautics and Aerospace: A Multifunctional Approach for TPS, TBC and DBD Applications. **Ceramics**, v. 6, n. 1, p. 195–230, 10 jan. 2023.

Somasundaram, R. *et al.* Utilization of discarded *Cymbopogon flexuosus* root waste as a novel lignocellulosic fiber for lightweight polymer composite application. **Polymer Composites**, v. 43, n. 5, p. 2838–2853, 9 mar. 2022.

Silva, Douglas Santos, *et al.* Thermochemical and Structural Characterization of Raffia Fiber Fabric (*Raphia Vinifera*) from the Amazon Region. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 30, 26 Apr. 2024, pp. 5069–5079, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.219>.

Silva, J. F.; Souza, A. L.; Oliveira, M. R. Obtenção de compósitos de baixa densidade e sua caracterização a partir do processo de laminação manual Hand Lay-Up com matriz poliéster insaturada reforçada com fibra de vidro. **Matéria (Rio J.)**, v. 27, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2021-48547>.

Souza, R. L.; Costa, J. P.; Oliveira, T. M. Determinação das etapas de degradação térmica de fibras lignocelulósicas. **Revista Brasileira de Materiais**, Foz do Iguaçu, v. 11, n. 2, p. 89-103, 2022. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/bitstreams/32b8ab68-1781-49a4-aaf6-0a987d04bf61/download>.

Suriani, M. J. *et al.* Critical Review of Natural Fiber Reinforced Hybrid Composites: Processing, Properties, Applications and Cost. **Polymers**, v. 13, n. 20, p. 3514, 1 jan. 2021.

Tadesse, A.; Ganesh, S. Uma visão geral sobre processamento de compósitos de matriz metálica e propriedades mecânicas baseadas em Al7075. **Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)** 2020, 9.

Tamanna, T.A., Belal, S.A., Shibly, M.A.H. *et al.* Characterization of a new natural fiber extracted from *Corypha taliera* fruit. **Sci Rep** 11, 7622 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87128-8>.

Thapliyal, Devyani, *et al.* Natural Fibers Composites: Origin, Importance, Consumption Pattern, and Challenges. **Journal of Composites Science**, vol. 7, no. 12, 1 Dec. 2023, p. 506, www.mdpi.com/2504-477X/7/12/506, <https://doi.org/10.3390/jcs7120506>.

Thomas, S., Rouxel, D. & Jose, S. Green composites: material for a sustainable world. **Emergent mater.** 5, 601–602 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00395-7>

Wong, C. K. *et al.* Extraction and Characterization of Natural Fiber from Herbaceous Residues of *Orthosiphon aristatus*. **Springer Proceedings in Materials**, p. 3–14, 1 jan. 2023.

Wu, C. *et al.* Manufacturing Technologies of Polymer Composites—A Review. **Polymers**, v. 15, n. 3, p. 712, 1 jan. 2023.

Xie, F. Sustainable polymer composites: functionality and applications. **Functional Composite Mater** 2, 15 (2021). <https://doi.org/10.1186/s42252-021-00027-z>

Yusuff, I., Sarifuddin, N., & Ali, A. M. (2020). A review on kenaf fiber hybrid composites: Mechanical properties, potentials, and challenges in engineering applications. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 147776062095343. doi:10.1177/1477760620953438

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.