



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

MANOEL VINÍCIUS FRANÇA MONTEIRO

**ANÁLISE DA PROPRIEDADE MECÂNICA DE TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À
CHAMA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS DE ENVIRA
CHEIROSA (*Annona paludosa Aubl.*)**

ANANINDEUA

2025

MANOEL VINÍCIUS FRANÇA MONTEIRO

**ANÁLISE DA PROPRIEDADE MECÂNICA DE TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À
CHAMA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS DE ENVIRA
CHEIROSA (*Annona paludosa* Aubl.)**

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.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Orientadora: Me. Eng^a. Ana Paula Souza de Sousa

ANANINDEUA

2025

MANOEL VINÍCIUS FRANÇA MONTEIRO


**ANÁLISE DA PROPRIEDADE MECÂNICA DE TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À
CHAMA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS DE ENVIRA
CHEIROSA (*Annona paludosa* Aubl.)**

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


Data de Aprovação: 13 / 12 / 2024

Conceito: EXCELENTE


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **DEIBSON SILVA DA COSTA**
Data: 14/02/2025 18:04:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
FEMat/CAMPANIN/UFPA - Orientador

Documento assinado digitalmente
 **ANA PAULA SOUZA DE SOUSA**
Data: 14/02/2025 12:00:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Ma. Eng^a. Ana Paula Souza de Sousa
PPGEQ/ITEC/UFPA - Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **ALISSON CLAY RIOS DA SILVA**
Data: 17/02/2025 11:30:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
FEMat/ CAMPANIN/UFPA - Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
 **HAIANNY BEATRIZ SARAIVA LIMA**
Data: 14/02/2025 15:44:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ma. Eng^a. Haianny Beatriz Saraiva Lima
PPGEQ/ITEC/UFPA - Examinadora Externa

Documento assinado digitalmente
 **MIRIANE ALEXANDRINO PINHEIRO**
Data: 14/02/2025 18:15:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ma. Miriane Alexandrino Pinheiro
PRODERNA/ITEC/UFPA - Examinadora Externa

A quem sempre sentiu orgulho ao me chamar de universitário; agora poderá me chamar de engenheiro. Esse espaço eu ocupo graças às suas renúncias, lutas e esperança. Obrigado, mãe.

AGRADECIMENTOS

A jornada de concluir minha graduação enquanto cursava um curso técnico simultaneamente foi, sem dúvida, um dos maiores desafios da minha vida. Foi uma experiência intensa e, muitas vezes, desgastante. Mas, nos dias difíceis, tive pessoas importantes ao meu lado.

Primeiramente, quero agradecer ao meu bom Deus e a Nossa Senhora de Lourdes, que sempre me vestiram de força e coragem para trilhar os caminhos da graduação, por me permitirem chegar até onde um dia eu sonhei, toda honra e glória para sempre.

A minha mãe, Enilza França, que além de me ensinar a contar nos dedos; me permitiu enxergar quão longe se pode chegar através da educação, pelo incentivo diário, pelas lutas compartilhadas, por chorar e sorrir comigo sempre, é tudo por você, te amo.

Ao meu pai, Eraldo Assunção, e meu irmão, Felipe Assunção, obrigado por cada palavra de incentivo, vocês estarão sempre em meu coração.

A minha família: avós, tios, primos e padrinhos, por torcerem pela minha formação acadêmica, em especial às minhas tias, Dynny Monteiro e Eunice Monteiro, que me acolheram em suas casas quando eu mais precisei.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Deibson Silva da Costa por me permitir desenvolver esta pesquisa, acreditar no meu potencial, pela paciência, conselhos e pelo conhecimento repassado.

A duas queridas amigas, que apesar do pouco tempo de convivência se tornaram muito especiais, Ana Paula Sousa e Haianny Lima, meus dois grandes exemplos da engenharia de materiais, por acreditarem no meu trabalho, seja ele de estagiário ou de orientando, pelos inúmeros conhecimentos partilhados, pelas nossas manhãs no laboratório, pelas risadas e chamadas de atenção quando necessárias; quando crescer quero ser igual a vocês.

Às grandes lendas da turma 2020, amigos que quero levar para vida inteira, Paloma Sousa, Joelly Nascimento, Sarah Brandão, Paulo Aranha e Giovana Zagalo, pela amizade que construímos, por todos os bons momentos juntos ao longo desses anos e por tornarem o peso do processo mais leve.

As amigas Jennifer Fernandes e Alicia Zanon, que mesmo com uma aproximação somente nos últimos anos da graduação, se tornaram grandes amigas que quero levar para a vida, obrigado por todas as nossas viagens e aventuras juntos, pelas trocas de conhecimento na escrita de artigos e pelas tardes de café no laboratório.

A uma pessoa muito especial, Nathalia Nogueira, minha chefe, coordenadora de projeto, meu exemplo de profissional e acima de tudo, amiga de todas as horas; pelo incentivo de

sempre, por ter me escolhido como bolsista por três anos e me permitir realizar sonhos paralelos a este, nunca esquecerei das nossas boas risadas juntos, você é incrível.

Aos grandes amigos que a UFPA me deu, Elayne Siqueira, Jenniffer Santos, Luiz Viana, Luciana Saldanha, Yan Araújo e Sinara Barbosa, por fazerem parte, direta ou indiretamente, dessa jornada e por tornarem a graduação muito mais leve e divertida.

A todo o corpo docente da Faculdade de Engenharia de Materiais, por todo conhecimento compartilhado ao longo desses cinco anos.

Ao Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS), Laboratório de Catálise e Biocatálise (LABCAT) e Laboratório de Síntese e Adsorção (LSA), na pessoa do Prof. Dr. Emerson Cardoso Rodrigues, pela disponibilidade de espaços e equipamentos para execução deste trabalho, também ao Grupo de Pesquisa em Materiais, Modelagem, Adsorção e Catálise - GPMMAC, pelos amigos que fiz e por toda experiência adquirida.

A Universidade Federal do Pará, em especial ao meu querido *Campus* Universitário de Ananindeua, o qual tenho orgulho de ter feito parte, por todo conhecimento e amizades adquiridas ao longo de minha graduação.

A todos, o meu muito obrigado!

"Os outros sonham com coisas que foram, e se perguntam 'Por quê?'. Eu sonho com coisas que nunca foram, e me pergunto 'Por que não?'".

(Cardeal Sain-Saens)

RESUMO

A crescente demanda da indústria por materiais sustentáveis e de alto desempenho tem se intensificado frente à crescente preocupação com os impactos ambientais. Dessa forma, o uso de fibras naturais como reforço em compósitos poliméricos surge como uma alternativa promissora. Nesse contexto, este trabalho abordou o uso das fibras naturais de envira cheirosa (*Annona paludosa* Aubl.) como reforço em compósitos poliméricos de matriz poliéster, visando desenvolver materiais sustentáveis. O objetivo foi caracterizar a fibra de envira cheirosa, com caracterizações de morfologia da fibra, por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Massa Específica Aparente da fibra (MEA), pelo método do picnômetro, ensaio de flamabilidade e ensaio mecânico de tração, utilizando normas ASTM como D 635 e D 638, respectivamente; e avaliar o desempenho dos compósitos em propriedades físicas, resistência à tração e flamabilidade. A fabricação foi realizada pelo método *Hand Lay-Up*, nas frações mássicas de 1%, 3% e 5%, com fibras curtas no tamanho de 15 mm, e longas no tamanho de 160 mm. Na análise da morfologia, as fibras apresentaram uma superfície levemente rugosa. A massa específica da fibra apresentou valor de 1,154 g/cm³, estando de acordo com valores encontrados nas literaturas para fibras vegetais. Nos ensaios físicos, os compósitos mostraram maior porosidade e absorção de água a medida em que se aumentava a fração mássica de fibras. Quanto à flamabilidade, os compósitos com 5% de fibras longas apresentaram melhor resistência à chama. No ensaio de tração, a tensão máxima foi registrada nos compósitos com 5% de fibras longas, com aumento de 40% em relação a matriz plena, destacando a eficiência da orientação e interação matriz/reforço, ao mesmo tempo que a análise estatística por ANOVA validou a significância dos resultados obtidos nos ensaios físicos, de flamabilidade e de tração. A análise fractográfica evidenciou a adesão fibra/matriz e padrões de fratura coesiva e interfacial, confirmando o desempenho mecânico superior das amostras com maior fração de reforço. Dessa forma, concluiu-se que a envira cheirosa é uma alternativa promissora para compósitos poliméricos, combinando eficiência estrutural, sustentabilidade e viabilidade econômica.

Palavras-chave: Compósitos Poliméricos; Fibras Naturais; Envira Cheirosa

ABSTRACT

The growing demand from the industry for sustainable and high-performance materials has intensified in response to increasing concerns about environmental impacts. In this context, the use of natural fibers as reinforcement in polymer composites emerges as a promising alternative. This study addressed the use of envira cheirosa (*Annona paludosa* Aubl.) natural fibers as reinforcement in polyester matrix polymer composites, aiming to develop sustainable materials. The objective was to characterize envira cheirosa fiber through fiber morphology analysis using Scanning Electron Microscopy (SEM), Apparent Specific Mass (ASM) measurement using the pycnometer method, flammability testing, and tensile mechanical testing, following ASTM standards such as D 635 and D 638, respectively. Additionally, the study evaluated the performance of the composites in terms of physical properties, tensile strength, and flammability. The fabrication process was conducted using the Hand Lay-Up method, with mass fractions of 1%, 3%, and 5%, employing short fibers of 15 mm and long fibers of 160 mm. The morphological analysis revealed that the fibers had a slightly rough surface. The specific mass of the fiber was 1.154 g/cm³, aligning with values reported in the literature for plant-based fibers. In the physical tests, the composites exhibited increased porosity and water absorption as the fiber mass fraction increased. Regarding flammability, composites with 5% long fibers demonstrated better flame resistance. In the tensile test, the maximum stress was recorded in composites with 5% long fibers, showing a 40% increase compared to the neat matrix. This result highlighted the efficiency of matrix/reinforcement orientation and interaction. Furthermore, statistical analysis using ANOVA validated the significance of the results obtained in the physical, flammability, and tensile tests. Fractographic analysis confirmed fiber/matrix adhesion and revealed cohesive and interfacial fracture patterns, supporting the superior mechanical performance of samples with a higher reinforcement fraction. Thus, it was concluded that envira cheirosa is a promising alternative for polymer composites, combining structural efficiency, sustainability, and economic feasibility.

Keywords: Polymer Composites; Natural Fibers; Envira Cheirosa.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática das geometrias da fase reforço: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação.....	20
Figura 2 - Fluxograma parcial de classificação dos compósitos.....	20
Figura 3 - Estrutura de reação do poliéster insaturado.....	23
Figura 4 - Estrutura molecular da resina ortoftálica.....	24
Figura 5 - Classificação dos reforços	25
Figura 6 - Classificação dos reforços fibrosos	26
Figura 7 - Esquema simplificado do método manual <i>hand lay-up</i>	29
Figura 8 - Mapa dos estados com presença da envira cheirosa.....	30
Figura 9 - Folhas da planta de envira cheirosa.....	30
Figura 10 - Casa antiga de taipa	31
Figura 11 - Esquema do aparato utilizado para o ensaio de flamabilidade horizontal.....	33
Figura 12 - Máquina universal de ensaio	33
Figura 13 - Componentes do microscópio eletrônico de varredura	34
Figura 14 - Fluxograma de caracterização da fibra e dos compósitos	35
Figura 15 - Principais equipamentos e materiais utilizados na fabricação balança analítica (a), estufa (b), molde de silicone (c) e chapa metálica (d).....	36
Figura 16 - Resina poliéster e iniciador MEK-P	37
Figura 17 - Municípios do Nordeste paraense	37
Figura 18 - Planta de Envira Cheirosa indicando em vermelho a área utilizada para retirada das fibras (a), as camadas da fibra presentes no caule (b).....	38
Figura 19 - Envira cheirosa imersa em água: Fibras imersas (a); destaque das fibras (b).....	38
Figura 20 - Fibras de envira cheirosa cortada em 160 mm para fibras longas (a) e a fibra curta com corte de 15 mm (b).	39
Figura 21 - Microscópio Eletrônico de Varredura	40
Figura 22 - Picnômetros utilizados no ensaio	40
Figura 23 - Fluxograma da fabricação dos compósitos.....	41
Figura 24 - Confecção dos corpos de prova: tração (a) e flamabilidade (b).....	42
Figura 25 - Dimensões do CP do ensaio físico (a) e CP's pronto para ensaio (b).....	43
Figura 25 - Dimensões do CP do ensaio de flamabilidade	43
Figura 26 - Realização do ensaio de flamabilidade no compósito.....	44
Figura 27 - Dimensões do CP do ensaio de tração.....	45

Figura 28 - Realização do ensaio de tração no compósito	45
Figura 29 - Micrografia da fibra de envira cheirosa.....	47
Figura 30 - Características da fibra de envira cheirosa (a); destaque das deformações na fibra (b)	48
Figura 31 - Gráfico de comparação de PA e AA dos compósitos	51
Figura 32 - Gráfico de comparação do resultado de tração com a porosidade aparente dos compósitos.....	58
Figura 33 - Análise fractográfica do compósito com fibras curtas com 1% (a), 3% (b) e 5% (c)....	60
Figura 34 - Análise fractográfica do compósito com fibras longas com 1% (a), 3% (b) e 5% (c)	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da massa específica com outras fibras vegetais	49
Tabela 2 - Dados dos ensaios físicos para os compósitos com fibras curtas.....	50
Tabela 3 - Dados dos ensaios físicos para os compósitos com fibras longas.....	50
Tabela 4 - Análise de Variância para os ensaios físicos.....	52
Tabela 5 - Resultado do ensaio de flamabilidade dos compósitos	53
Tabela 6 - Comparativo do ensaio de flamabilidade deste trabalho com a literatura.....	54
Tabela 7 - Análise de Variância para o ensaio de flamabilidade.....	55
Tabela 8 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos com fibras curtas	56
Tabela 9 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos com fibras longas.....	56
Tabela 10 - Análise de Variância para o ensaio de tração.....	57
Tabela 11 - Comparação dos resultados de tração com a literatura	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BPO	Peróxido de Benzoíla
CMP	Compósitos de Matriz Polimérica
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CP	Corpo de Prova
FC	Fibra Curta
FC 1%	1% de Fibra Curta
FC 3%	3% de Fibra Curta
FC 5%	5% de Fibra Curta
FEQ	Faculdade de Engenharia Química
FL	Fibra Longa
FL 1%	1% de Fibra Longa
FL 3%	3% de Fibra Longa
FL 5%	5% de Fibra Longa
GPMMAC	Grupo de Pesquisa em Materiais, Modelagem, Adsorção e Catálise
HB	<i>Horizontal Burning</i>
LABCAT	Laboratório de Catálise e Biocatálise
LABMIC	Laboratório de Microscopia
LAMPS	Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados
LEM	Laboratório de Ensaios de Mecânica
LEQ	Laboratórios de Engenharia Química
MEA	Massa Específica Aparente
MEK-P	Peróxido de Metil Etil Cetona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mi	Massa Imersa
Ms	Massa Seca
Mu	Massa Úmida
MP	Matriz Plena

MPa	Mega Pascal
MTR	Modelagem por Transferência de Resina
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PA	Porosidade Aparente
PE	Polietileno
PEEK	Polieteretercetona
PMC	<i>Polymer-matrix composites</i>
PP	Polipropileno
Si ₃ N ₄	Nitreto de Silício
SiC	Carbeto de Silício
TRT	Tensão de Resistencia a Tração
UFPA	Universidade Federal do Pará
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>
USIMAT	Usina de Materiais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivo Geral.....	18
1.2.1 Objetivos Específicos	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Materiais Compósitos.....	19
2.1.1 Fase Matriz	21
2.1.1.1 Matrizes Poliméricas	22
2.1.1.1.1 Resinas Poliéster.....	23
2.1.2 Fase Reforço	24
2.1.2.1 Compósitos Reforçados com Fibras	25
2.1.3 Compósitos Poliméricos	26
2.2 Métodos de Fabricação de Compósitos	27
2.2.1 Método de Fabricação Manual (<i>Hand Lay Up</i>).....	28
2.3 Fibras de Envira Cheirosa (<i>Annona paludosa</i> Aubl.).....	29
2.4 Caracterização dos Materiais	31
2.4.1 Ensaio Físicos	32
2.4.2 Ensaio de Flamabilidade.....	32
2.4.3 Ensaio de Tração	33
2.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Materiais.....	35
3.1.1 Matriz.....	36
3.1.2 Fibra de Envira Cheirosa	37
3.2 Métodos.....	39
3.2.1 Caracterização da Fibra de Envira.....	39
3.2.1.1 Morfologia das Fibras.....	39
3.2.1.2 Massa Específica da Fibra	40
3.2.2 Fabricação dos Compósitos	41
3.2.3 Caracterização dos Compósitos.....	42
3.2.3.1 Ensaio Físicos	42
3.2.3.2 Ensaio de Flamabilidade Horizontal.....	43

3.2.3.3 Ensaio de Resistência à Tração	44
3.2.4 Análise de Variância (ANOVA).....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 Caracterização da Fibra	47
4.1.1 Caracterização Morfológica das Fibras de Envira.....	47
4.1.2 Massa Específica da Fibra	48
4.2 Caracterização dos Compósitos	49
4.2.1 Ensaio Físicos	49
4.2.2 Ensaio de Flamabilidade (horizontal).....	52
4.2.3 Propriedade Mecânica dos Compósitos - Ensaio de Tração.....	55
4.2.3.1 Análise Fractográfica dos Compósitos.....	60
5 CONCLUSÕES.....	63
5.1 Sugestão para trabalhos futuros	64
REFERÊNCIAS.....	65

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve uma concentração de pesquisas no desenvolvimento de materiais sustentáveis com o objetivo de mitigar os impactos ambientais, como a redução de resíduos sólidos provenientes da indústria, assim como a utilização de matérias-primas renováveis. Nesse sentido, dentre os tipos de materiais, os compósitos têm sido objeto de diversos estudos, resultando em avanços no desenvolvimento de compósitos recicláveis. Esses fatores contribuem para a percepção desses materiais como uma alternativa ecologicamente viável, uma vez que, colabora com a sustentabilidade ao longo de todo o ciclo de vida do produto (Vieira, 2023).

Os compósitos são materiais formados pela combinação de duas ou mais fases distintas, que, ao serem integradas, apresentam propriedades mecânicas e físicas aprimoradas em relação às características individuais de seus componentes. Esses materiais, são constituídos de uma matriz (fase contínua) como cerâmica, metálica ou polimérica e um reforço (fase dispersa), como fibras e/ou partículas, e combinam as características de ambas as fases (Callister Jr. e Rethwisch, 2021).

Compósitos reforçados com fibras naturais são ecologicamente viáveis e de menor custo, proporcionando benefícios econômicos e sociais às regiões de produção. Eles têm sido amplamente estudados devido às vastas aplicações, como: Painéis internos do veículo, placas de isolamento térmico e acústico, luminárias decorativas etc.; que não requerem grandes esforços mecânicos, especialmente os compósitos de matriz de polímero termofixo, como os de poliéster, que são reconhecidos pela sua durabilidade (Thomas e Pothan, 2016).

O Brasil, especialmente a região amazônica, apresenta um vasto potencial em fibras naturais pouco exploradas e conhecidas, como as fibras de envira cheirosa, conhecida cientificamente como *Annona paludosa* Aubl., pertencente à família das *Annonaceae*. Estas fibras são extraídas em camadas do caule da planta e têm sido tradicionalmente utilizadas na construção de habitações de taipa na microrregião do Salgado, no estado do Pará (Potiguara *et al.*, 1987).

A incorporação de fibras vegetais em produtos comerciais promove a geração de riqueza e, simultaneamente, a mitigação de danos ao meio ambiente associados aos setores produtivos. Essas fibras, provenientes de fontes renováveis e abundantes, podem contribuir para alavancar ainda mais o potencial agrícola no país onde se encontram (Thomas; Pothan, 2016).

Dessa forma, a utilização de compósitos reforçados com fibras naturais se apresenta como uma solução promissora no campo da ciência e engenharia de materiais, dado que, a

utilização desses materiais não apenas contribui para a redução dos danos ambientais associados à produção convencional, mas também oferece uma alternativa de menor custo. Nesse contexto, este estudo objetivou caracterizar as fibras de envira cheirosa, a produção de materiais compósitos de matriz poliéster com fibras de envira e a avaliação do seu desempenho quanto as propriedades físicas, mecânicas de tração e flamabilidade.

1.1 Justificativa

As fibras vegetais, como sisal, coco, abacaxi e juta, desempenham um papel importante no cenário nacional, sendo amplamente utilizadas em materiais compósitos, nesse sentido, a envira cheirosa emerge como uma alternativa sustentável e econômica para fabricação de materiais compósitos. Portanto, este trabalho representa uma contribuição relevante para o avanço científico, tecnológico e econômico, ao fornecer alternativas sustentáveis que reduzem o impacto ambiental e favorecem práticas de preservação. Estudos recentes, como de Nunes (2024), indicam que o uso de compósitos reforçados com fibras naturais pode reduzir a pegada de carbono em até 30% em comparação com materiais convencionais, como compósitos sintéticos.

Essas fibras não apenas oferecem uma alternativa renovável aos materiais sintéticos, mas também são frequentemente mais acessíveis economicamente, promovendo, assim, a inclusão social e o desenvolvimento econômico nas áreas rurais (Thomas e Pothan, 2016). Ademais, estudos como de Costa (2016) demonstram que a utilização de fibras naturais como reforço estrutural em compósitos poliméricos pode resultar em materiais mais leves, com propriedades mecânicas adequadas para diversas aplicações, desde a construção civil até a indústria automotiva.

Diante disso, a necessidade de pesquisas mais aprofundadas sobre as vantagens do uso de fibras naturais como reforço em compósitos poliméricos justifica a introdução deste trabalho no meio científico e tecnológico. A análise das propriedades físicas e mecânicas desses materiais, bem como a avaliação de seu comportamento em condições de uso, é fundamental para validar sua viabilidade em aplicações comerciais. Assim, esta pesquisa não só avança o conhecimento científico, mas também pode influenciar práticas industriais, incentivando um desenvolvimento mais sustentável que traga benefícios para a sociedade e o meio ambiente.

1.2 Objetivo Geral

O trabalho visou a caracterização da fibra de envira cheirosa e sua aplicação em compósitos de matriz poliéster, avaliando o desempenho quanto às propriedades físicas, mecânicas de tração e resistência à chama.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar as propriedades físicas e morfológicas das fibras de envira cheirosa e comparar com fibras naturais.
- Fabricar compósitos de matriz polimérica com diferentes frações mássicas (1%, 3% e 5%) e tamanhos (curta e longa) com fibras de envira cheirosa.
- Avaliar o comportamento dos compósitos quanto a resistência à chama.
- Analisar o desempenho dos compósitos quanto a resistência à tração e analisar a fractografia dos compósitos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta uma revisão da literatura, referente a materiais compósitos, suas fases constitutivas, composições, técnicas de manufatura e principais aplicações industriais. São discutidas as propriedades das fibras vegetais, os processos de extração, além de suas possíveis utilizações no setor industrial. Por fim, é apresentada uma abordagem específica sobre a fibra de envira cheirosa (*Annona paludosa* Aubl.), destacando suas características, propriedades mecânicas e aplicações práticas já documentadas.

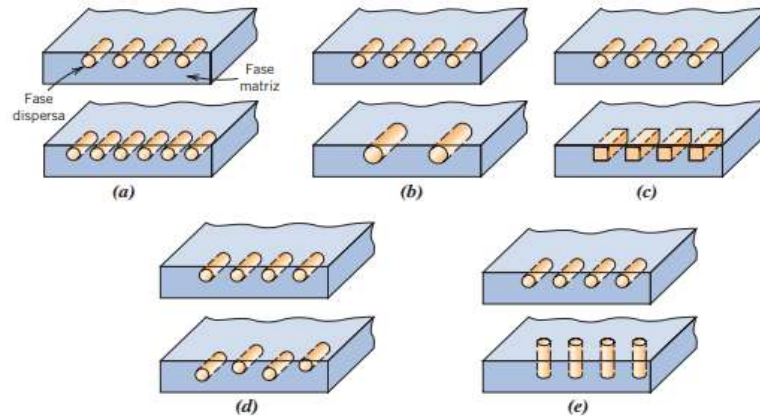
2.1 Materiais Compósitos

O surgimento dos compósitos como uma classe de materiais distintos ocorreu na metade do século XX, com a produção deliberada de compósitos multifásicos, como os polímeros reforçados com fibras de vidro. Embora materiais multifásicos, como madeira, tijolos de argila reforçada com palha e até mesmo ligas como o aço, fossem conhecidos há milênios, a percepção desse novo conceito de combinação de materiais durante o processo de fabricação conduziu à identificação dos compósitos como uma nova classe separada dos metais, cerâmicas e polímeros convencionais (Callister Jr.; Rethwisch, 2021).

As fases de um material compósito são designadas como matriz, uma fase contínua envolvendo outra fase, chamada de reforço ou fase dispersa. As propriedades dos compósitos dependem das características específicas das fases constituintes, de suas proporções relativas e da geometria da fase de reforço, como: concentração, tamanho, forma, distribuição e orientação do material, influenciando diretamente nas propriedades dos compósitos. Essas características são ilustradas na Figura 1, que representa o esquema das fases matriz e reforço (Callister Jr.; Rethwisch, 2021; Van Vlack, 1970).

Além disso, a utilização de aditivos e agentes de compatibilização em alguns tipos de compósitos, como os poliméricos com fibras naturais, pode melhorar a interface entre a matriz e as fibras, aumentando assim a resistência e a durabilidade dos compósitos. Essas inovações tecnológicas não apenas expandem as possibilidades de aplicação dos materiais compósitos, mas também abrem caminho para a exploração de materiais mais sustentáveis e de menor impacto ambiental (Singh; Govindarajan, 2016).

Figura 1 - Representação esquemática das geometrias da fase reforço: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação

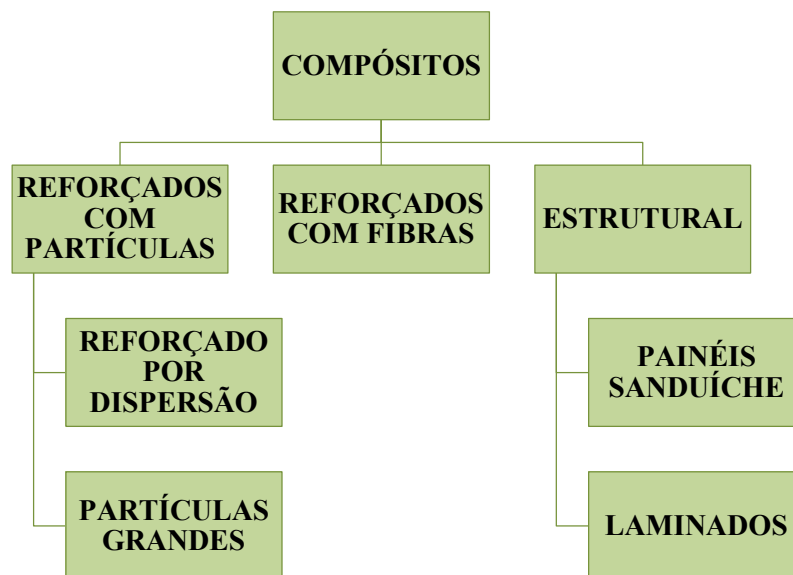


Fonte: Callister Jr.; Rethwisch, 2021.

A interação nos compósitos na região interfacial é influenciada por fatores inter-relacionados, como o nível de contato (molhabilidade) e as forças coesivas (adesão), gerando melhores propriedades no material. Há desafios em harmonizar as características químicas diversas dos compósitos, devido às variações nas ligações químicas e nos coeficientes de expansão térmica entre os materiais envolvidos (Martins Neto, 2010).

Diversos fatores devem ser considerados no projeto de um compósito, incluindo o tipo de matriz (metálica, cerâmica ou polimérica), o tipo de reforço (fibras ou partículas) e a possibilidade de ser um compósito híbrido (Peixoto, 2019). Na Figura 2 tem-se uma classificação parcial dos compósitos.

Figura 2 - Fluxograma parcial de classificação dos compósitos



Fonte: Adaptado de Callister Jr.; Rethwisch, 2021.

Os compósitos estruturais laminados são formados por camadas sobrepostas (lâminas), unidas de modo que as fibras em cada camada sejam orientadas em diferentes direções. A qualidade da interface entre a fibra e a matriz é crítica para o desempenho mecânico do compósito. Uma interface ideal ocorre quando toda a superfície da fibra está completamente impregnada pela matriz, garantindo uma transferência eficiente de tensões e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas do material produzido (Ratna, 2009).

No caso dos compósitos de estrutura sanduíche, estes constituem uma classe particular de materiais compósitos, formados por duas superfícies externas rígidas e um núcleo de baixa densidade. O núcleo tem a função de aumentar o momento de inércia, ao afastar as superfícies, e de transmitir as cargas aplicadas de uma face para outra. A ligação entre o núcleo e as superfícies é realizada por um adesivo, cuja função é transmitir as tensões de cisalhamento. Essa estrutura pode ser comparada a uma viga em I, onde o núcleo corresponde à alma, e as superfícies externas equivalem aos flanges (Freitas; Lima; Oliveira, 2014).

Os compósitos reforçados com partículas são materiais que incorporam partículas sólidas à matriz. A distribuição homogênea das partículas na matriz é fundamental, pois garante a transferência eficiente de cargas e a maximização do desempenho do compósito. Além disso, a escolha do tamanho, forma e concentração das partículas pode influenciar as propriedades mecânicas e térmicas do material, tornando os compósitos reforçados com partículas uma opção versátil para aplicações que exigem durabilidade (Almeida; Silva; Barbosa, 2018).

Por outro lado, os compósitos reforçados com fibras, sintéticas ou naturais, oferecem uma resistência superior e rigidez em comparação com a matriz isolada, resultando em materiais com desempenho mecânico aprimorado. A eficiência do reforço com fibras depende da orientação, tamanho e arranjo das fibras na matriz, bem como da aderência entre as fibras e a matriz (Almeida; Silva; Barbosa, 2018).

Nos últimos anos, os compósitos poliméricos têm sido amplamente adotados em diversos setores de engenharia, incluindo automotivo, aeroespacial, marítimo, construção avançada, dispositivo de armazenamento de energia e até mesmo em materiais biomédicos (Saha *et al.*, 2022).

2.1.1 Fase Matriz

Os materiais compósitos são formados por uma fase contínua, chamada matriz, que incorpora a fase dispersa, que funciona como reforço. As matrizes utilizadas em materiais compósitos podem ser categorizadas em três tipos principais: matrizes poliméricas, matrizes

metálicas e matrizes cerâmicas. Cada tipo possui características específicas que influenciam diretamente as propriedades e aplicações dos compósitos (Lee *et al.*, 2018).

De acordo com Souza (2022), as matrizes cerâmicas são compostas por materiais como carbetos de silício (SiC), óxido de alumínio (Al_2O_3) e nitreto de silício (Si_3N_4), essas matrizes são conhecidas por sua alta resistência a temperaturas extremas, excelente resistência ao desgaste e à corrosão e baixa densidade em comparação com matrizes metálicas.

As matrizes metálicas, por outro lado, são compostas por metais como alumínio, magnésio, titânio e suas ligas, destacam-se pela alta resistência e rigidez, além de oferecerem boa condutividade térmica e elétrica. Estas propriedades tornam as matrizes metálicas ideais para aplicações na indústria aeroespacial, automotiva e de defesa, onde são utilizadas em componentes de motores, pistões e blindagens (Faruk; Tjong; Sain, 2019).

As matrizes poliméricas são compostas por resinas poliméricas, como epóxi, poliéster, viniléster e vários termoplásticos, incluindo, Polieteretercetona (PEEK), Polipropileno (PP) e Polietileno (PE). Estas matrizes são leves e fáceis de processar, oferecendo uma boa resistência à corrosão e à fadiga, além de baixa condutividade térmica e elétrica (Boaretto, 2023).

As propriedades das matrizes poliméricas, como alta relação resistência/peso e boa resistência ao impacto, tornam-nas ideais para aplicações que requerem flexibilidade no design e baixa densidade (Boaretto, 2023). A evolução das matrizes em materiais compósitos tem permitido o desenvolvimento de materiais cada vez mais avançados, capazes de atender a requisitos específicos de desempenho em diversas indústrias. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de novas matrizes e compósitos tendem a contribuir para a inovação e a melhoria dos produtos e tecnologias (Martins *et al.*, 2022).

2.1.1.1 Matrizes Poliméricas

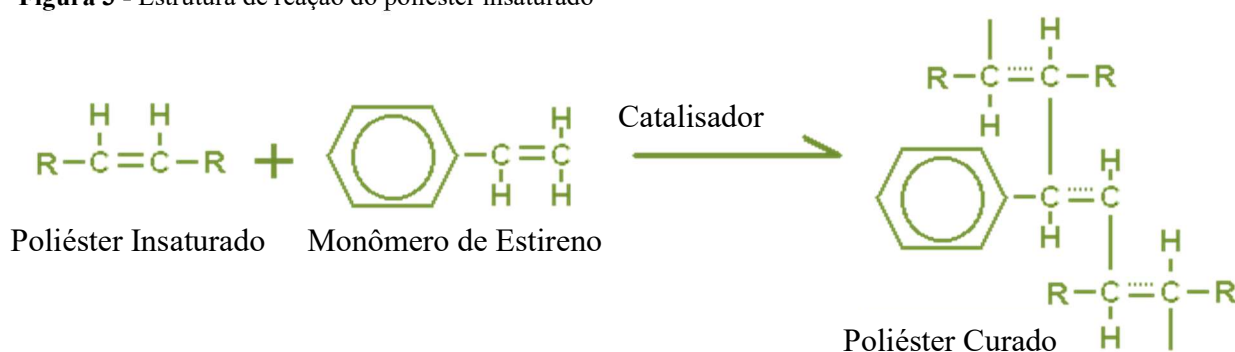
De acordo com França (2010), as resinas têm sido utilizadas pelo homem há séculos, inicialmente derivadas de fontes vegetais. Até o início do século XX, a estrutura química dessas resinas não era bem compreendida. Com o avanço industrial, houve um foco crescente no desenvolvimento de produtos com diversas aplicações, conhecidos como plásticos. Entre esses produtos estavam algumas resinas sintetizadas a partir de resinas naturais.

Em compósitos, geralmente são utilizadas resinas termofixas. As mais usadas são as resinas de poliéster, epóxi, éster-vinílicas e fenólicas (Ribeiro, 2005). Os polímeros termofixos constituem uma classe de polímeros que sofrem uma transformação química ao serem

aquecidos, resultando na formação de uma estrutura reticulada tridimensional (Canevarolo, 2006; Yurdanova, 2013).

O poliéster insaturado é um dos polímeros mais utilizados em compósitos de matriz polimérica. Este é um termofixo cuja estrutura química difere dos termoplásticos, pois, além das típicas ligações éster, possui ligações duplas clivadas pela ação de um catalisador (peróxido orgânico, calor ou radiação), permitindo que as moléculas reajam entre si para formar um polímero tridimensional com características termoestáveis, tornando-o, assim, infusível e irreversível (Canevarolo, 2006; Sakamoto, 2018), sendo este processo descrito Figura 3.

Figura 3 - Estrutura de reação do poliéster insaturado



Fonte: Silaex.ind.br, 2018.

2.1.1.1.1 Resinas Poliéster

As resinas poliésteres, são polímeros termofixos, utilizadas como matriz que, em conjunto com fibras, foram utilizados na fabricação de peças aplicadas em embarcações, automóveis, bancadas, painéis e como material de revestimento (ASM handbook, 2001). A produção de materiais em poliéster é economicamente viável devido aos baixos custos de instalação, à facilidade de moldagem em diversas formas e à possibilidade de ajustar suas propriedades físicas para aplicações específicas. A síntese do poliéster ocorre em reatores aquecidos a uma temperatura de 170 °C a 190 °C, onde ocorre a reação de esterificação. A atmosfera deve ser neutra para evitar a contaminação por oxigênio ou ferro, que podem afetar a coloração da resina (Gilbert, 2016; Ribeiro, 2005).

No caso das resinas insaturadas ortoftálicas, são utilizadas como ácidos modificadores, o ftálico ou seu anidrido. Suas propriedades mecânicas e químicas são inferiores às demais, devido à dificuldade de se obter polímeros de alto peso molecular. A anidrido ftálico tem forte tendência de se regenerar a partir dos meios ésteres do ácido ftálico (reação reversível), fato que incrementa a presença de espécies de baixo peso molecular, altamente sensíveis ao ataque

químico (Sakamoto, 2018). A Figura 4 apresenta a estrutura química da resina poliéster ortoftálica.

Figura 4 - Estrutura molecular da resina ortoftálica



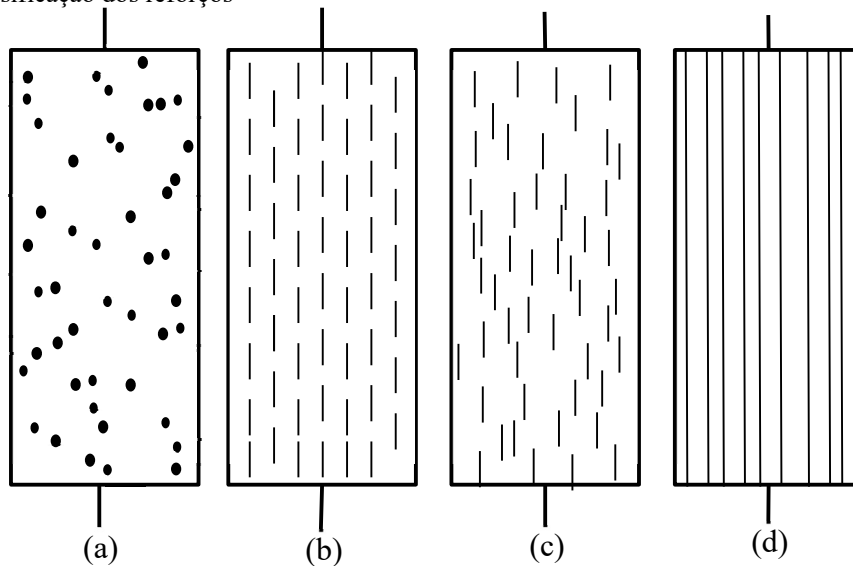
Fonte: Silaex.ind.br, 2018.

A cura da resina de poliéster ocorre por intermédio de interligações de monômero com poliéster. O processamento começa com o surgimento dos radicais livres, que são átomos ou grupos de átomos, com elétrons desemparelhados muito reativos. A geração de radicais livres pode ocorrer por meio de aquecimento ou por decomposição de catalisadores (Domingos, 2017).

O uso de catalisadores fornece um caminho de reação alternativo com uma menor energia de ativação, facilitando a formação do estado de transição. Esse processo diminui o tempo necessário para que os reagentes se transformem nos produtos, aumentando a taxa de reação. No entanto, os catalisadores não alteram a posição do equilíbrio químico, apenas aceleram o tempo para atingi-lo. É o processo mais comum de cura da resina de poliéster, sendo os catalisadores mais usados são: peróxido metil etil cetona - MEKP e o peróxido de benzoíla - BPO (Domingos, 2017).

2.1.2 Fase Reforço

A fase reforço, também chamada de fase dispersa, é normalmente composta por materiais fibrosos ou particulados. A escolha dessas combinações depende das técnicas de processamento e da compatibilidade entre os componentes utilizados (Callister Jr.; Rethwisch, 2021). O reforço pode ser dividido em grupos: (a) particulados aleatoriamente distribuídos, (b) fibras descontínuas unidirecionais, (c) fibras descontínuas aleatórias e (d) fibras contínuas unidirecionais, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Classificação dos reforços

Fonte: Autor, 2025.

Com base no tamanho médio dessas partículas, o compósito pode ser classificado como reforçado por partículas grandes ou por dispersão. O termo "compósito particulado" refere-se especificamente a sistemas em que as partículas dispersas são relativamente pequenas (com dimensões típicas entre $0,1 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}$) e estão presentes em concentrações relativamente altas. Por outro lado, os compósitos reforçados com fibras, são amplamente utilizados no mercado devido às suas excelentes propriedades mecânicas, como elevada resistência e/ou rigidez em relação ao peso (Furukava, 2007; Silva, 2018).

2.1.2.1 Compósitos Reforçados com Fibras

As fibras que atuam como reforço em compósitos poliméricos são divididas em três grupos principais: fibras contínuas/longas alinhadas, fibras descontínuas/curtas alinhadas, e fibras descontínuas orientadas aleatoriamente (Callister Jr.; Rethwisch, 2021), conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Classificação dos reforços fibrosos

Fonte: Adaptado de Callister Jr.; Rethwisch, 2021.

O desempenho dos compósitos reforçados com fibras está diretamente relacionado às propriedades dos elementos constituintes do material, como as propriedades da fibra e da matriz, a concentração ou fração de volume, a interface e a adesão fibra/matriz, o alinhamento e a orientação da camada, e a geometria da fibra, incluindo forma e tamanho (Marinucci, 2011).

Dessa forma, a fração volumétrica de fibras, matriz e a presença de vazios é um fator determinante para as propriedades exigidas dos compósitos dos mais diversos tipos. Esses parâmetros quantificam o volume percentual de cada componente (fibras, matriz e vazios, respectivamente) em relação ao volume total do compósito. Os valores da fração volumétrica das fibras e da matriz em qualquer tipo de material compósito são determinados pelo processo de fabricação utilizado (Levy Neto; Pardini, 2016).

2.1.3 Compósitos Poliméricos

Os compósitos de matriz polimérica (CMP ou PMC – *polymer-matrix composites*) são formados por uma resina polimérica que atua como a fase contínua ou matriz. Essa matriz polimérica, composta por plásticos de alto peso molecular, é responsável por manter a integridade estrutural do material. Além disso, a matriz é reforçada por uma segunda fase dispersa, que pode ser composta por partículas ou outros elementos de reforço, como as fibras,

conferindo ao material maior resistência mecânica e estabilidade dimensional (Callister Jr.; Rethwisch, 2021).

A escolha da matriz é fundamental pois determina a processabilidade, a resistência química e a estabilidade térmica do compósito. Para compósitos de matriz polimérica, tem-se que os polímeros são macromoléculas formadas por várias unidades de repetição chamadas mero, as quais são unidas por ligações covalentes por meio do processo de polimerização, no qual os monômeros formam as cadeias através de reações químicas (Canevarolo, 2006).

Dentre as possíveis aplicações, os compósitos poliméricos avançados não se restringem somente ao setor aeronáutico, podendo-se mencionar aplicações nas áreas espacial, automobilística, náutica e biomédica. Como exemplos podem ser citados: estruturas de satélites e de veículos, lançadores de satélites, protetores de carter, suportes de assentos, cascos de embarcações e próteses ortopédicas, entre outros (Nogueira; Marlet; Rezende, 2009).

2.2 Métodos de Fabricação de Compósitos

Existem diversas formas para aglutinar fibras e/ou resíduos em uma matriz polimérica, como pulverização (*spray-up*), moldagem por autoclave, moldagem por transferência de resina, enrolamento de fibras e a moldagem manual (*hand-lay-up*). Os métodos de fabricação de compósitos poliméricos variam em termos de complexidade, custo e adequação para diferentes aplicações (Chawla, 2001).

O método de pulverização (*spray-up*) envolve a aplicação simultânea de fibras e/ou particulados e resina sobre um molde através de um spray. No processo, utiliza-se uma pistola de spray para aplicar a mistura de maneira uniforme, garantindo que todas as áreas do molde sejam cobertas. Este método é rápido e relativamente barato, tornando-se ideal para a produção de peças grandes e de geometria simples, como piscinas, painéis e cascos de barcos (Marinucci, 2011).

O processo de fabricação em autoclave envolve a cura de laminados impregnados com resina sob alta pressão e temperatura em uma câmara chamada autoclave. Os laminados são colocados em moldes e cobertos com sacos de vácuo para assegurar uma distribuição uniforme da pressão. A combinação de alta pressão e temperatura durante o ciclo de cura melhora a compactação do laminado e elimina defeitos como bolhas de ar, resultando em compósitos com propriedades mecânicas superiores e excelente qualidade superficial. O uso de autoclaves é comum na fabricação de componentes aeroespaciais de alta performance, como partes de

fuselagem, asas e estabilizadores, onde as exigências de qualidade e desempenho são extremamente rigorosas (Gibson, 2016).

A Moldagem por Transferência de Resina (MTR) é um processo em que a resina é injetada sob pressão em um molde fechado contendo o reforço seco. Este método envolve a utilização de moldes rígidos, geralmente de metal, que são fechados e selados antes da injeção da resina. A resina flui através do reforço, impregnando-o completamente e, uma vez que a cura é concluída, o molde é aberto para remover a peça acabada. Este método oferece alta reprodutibilidade e controle de qualidade, sendo adequado para produção em médio a grande volume, o qual é comumente aplicado na indústria de energia, especificamente na construção de pás eólicas (Ferreira, 2016).

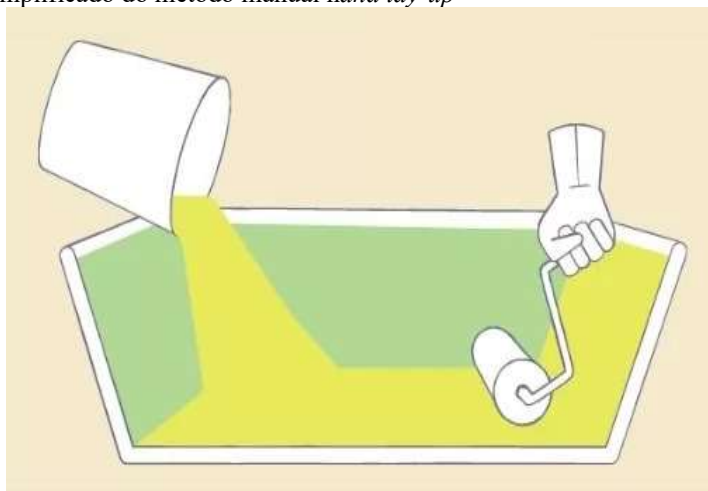
O Enrolamento de fibras é uma técnica de fabricação de compósitos onde fibras contínuas, impregnadas com resina, são enroladas em torno de um mandril para formar estruturas cilíndricas ou esféricas. Este método é ideal para a produção de componentes como tubos, tanques de armazenamento, carcaças de foguetes e outros recipientes de pressão. Este processo permite a fabricação de peças com alta resistência e rigidez em direções específicas, devido ao controle preciso do ângulo de enrolamento das fibras, podendo ser aplicada na indústria naval, na construção de cascos das embarcações (Callister Jr.; Rethwisch, 2021; Marinucci, 2011).

No método de fabricação manual, conhecido como *Hand Lay-Up*, a impregnação da resina pode ser feita com o auxílio de pincéis, rolos ou espátulas, assegurando que todo o reforço esteja envolvido pela matriz (Silva, 2015).

2.2.1 Método de Fabricação Manual (*Hand Lay Up*)

O método de fabricação manual, conhecido como *Hand Lay-Up*, é uma técnica amplamente utilizada na fabricação de compósitos de matriz polimérica. Esta técnica é valorizada por sua baixa complexidade, baixo custo de investimento inicial e flexibilidade na produção de peças de grandes dimensões e formas complexas. O processo envolve a aplicação manual de resina e reforço em camadas sobre um molde (Nunes, 2015). A Figura 7 apresenta um esquema simples de funcionamento do método *hand lay-up*.

Figura 7 - Esquema simplificado do método manual *hand lay-up*



Fonte: FCI.ind.br, 2024.

Segundo Ribeiro (2005), um aspecto crítico deste método é o controle de qualidade durante o processo de fabricação, ou seja, é essencial garantir que a resina esteja uniformemente distribuída e que não haja bolhas de ar ou áreas secas dentro da matriz, o ambiente de trabalho deve ser controlado em termos de temperatura e umidade, pois essas condições podem influenciar a cura da resina e na qualidade final do compósito.

O método *Hand Lay-Up* é amplamente utilizado em diversas indústrias, incluindo a aeroespacial, para a fabricação de partes de aeronaves como carenagens e estruturas secundárias; marítima, na produção de cascos de barcos e componentes de iates; automotiva, para fabricar peças personalizadas e protótipos e de energia eólica, a técnica é aplicada na fabricação de pás de turbinas (Hasnain *et al.*, 2021),

2.3 Fibras de Envira Cheirosa (*Annona paludosa* Aubl.)

As *Annonaceae* possuem distribuição pantropical e são constituídas por cerca de 130 gêneros e 2500 espécies. São árvores, arbustos, ervas lenhosas ou raramente escandentes. A família é caracterizada por apresentar folhas simples, dísticas, inteiras, e ausência de estípulas (Gonçalves; Oliveira, 2001).

A planta de Envira Cheirosa (*Annona paludosa* Aubl.), é uma espécie pertencente à família *Annonaceae*, tipicamente da Floresta Amazônica e Cerrado. Sendo possível encontrá-la nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil, abrangendo os estados do Acre, Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia, Tocantins, Ceará, Maranhão, Goiás e Mato Grosso, em destaque na Figura 8, nas áreas de florestas de terra firme e igapó (Silva *et al.*, 2020).

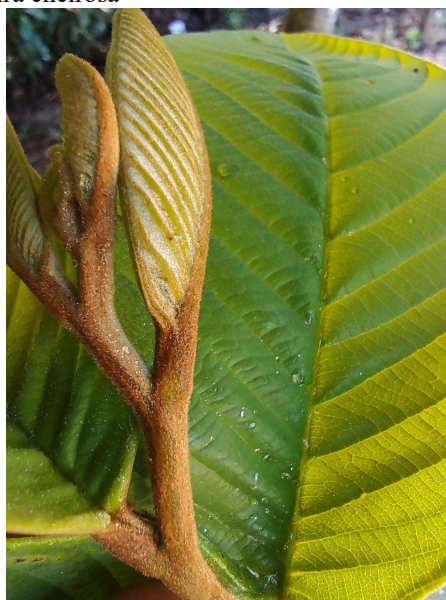
Figura 8 - Mapa dos estados com presença da envira cheirosa



Fonte: Floradobrasil.gov.br, 2020.

Segundo Potiguara *et al.*, (1987), a árvore de envira cheirosa pode chegar até 20 m de altura; folhas simples, alternas, oblongo-lanceoladas, ápice-acuminado, base aguda, pecíolo e ramos revestidos de pelos ferrugíneos podendo ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Folhas da planta de envira cheirosa



Fonte: Autor, 2025.

Na retirada de suas fibras das árvores, esta é cortada na altura da primeira ramificação da copa. A haste, em sua extremidade superior, é batida com a costa do terçado destacando os feixes de fibras que, posteriormente, são retirados manualmente com cuidado para evitar o rompimento. Apresentam-se de cor creme esbranquiçada e brilhante e são usadas ainda verdes,

pois, quando secas, tornam-se rígidas, precisando imergi-las em água para voltar à maleabilidade.

Os feixes de fibras são constituídos de várias camadas, sendo as primeiras, de fora para dentro, são usadas como cordas rústicas, por serem grosseiras e possuírem pouca flexibilidade; as mais internas são delgadas, gomosas, maleáveis, usadas na fabricação de cordas de menor espessura e objetos decorativos com vários trançados (Potiguara *et al.*, 1987).

As plantas produtoras de fibras constituem assunto de interesse pela sua abundância e utilização entre as populações do meio rural, sendo a envira cheirosa aplicada em amarrilho de cerca, caibro, corda para boia de pesca e paredes de habitação rústicas, como casas de taipa presente na Figura 10.

Figura 10 - Casa antiga de taipa



Fonte: Panorama coletivo, 2019.

Em aspectos científicos, poucos estudos mostram o potencial de reforço da fibra de envira cheirosa, abordando a possibilidade de substituição das fibras sintéticas. Branco (2022), investigou a caracterização microestrutural e mecânica da fibra de Envira preta (*Bocageopsis multiflora*), esta também da família das *Annonaceae*, na utilização como reforço em compósitos poliméricos.

2.4 Caracterização dos Materiais

Nesta seção, são abordadas as caracterizações dos materiais presentes neste trabalho, entre elas, os ensaios físicos, que permitem uma compreensão abrangente de seu comportamento e desempenho. Entre os métodos destaca-se ainda a análise de flamabilidade,

que avalia a resistência do material a chamas e sua segurança em aplicações práticas; os ensaios de tração, que fornecem informações sobre a resistência mecânica; e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que oferece uma visão detalhada da microestrutura do material, permitindo a observação de características como a distribuição das fibras e a adesão entre as fases.

2.4.1 Ensaios Físicos

Os ensaios físicos, incluindo Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA), são importantes para a caracterização e correlação das propriedades dos materiais compósitos, principalmente aqueles com matriz polimérica reforçada por resíduos ou fibras, pois esses testes podem influenciar diretamente suas propriedades mecânicas (Santos *et al.*, 2019).

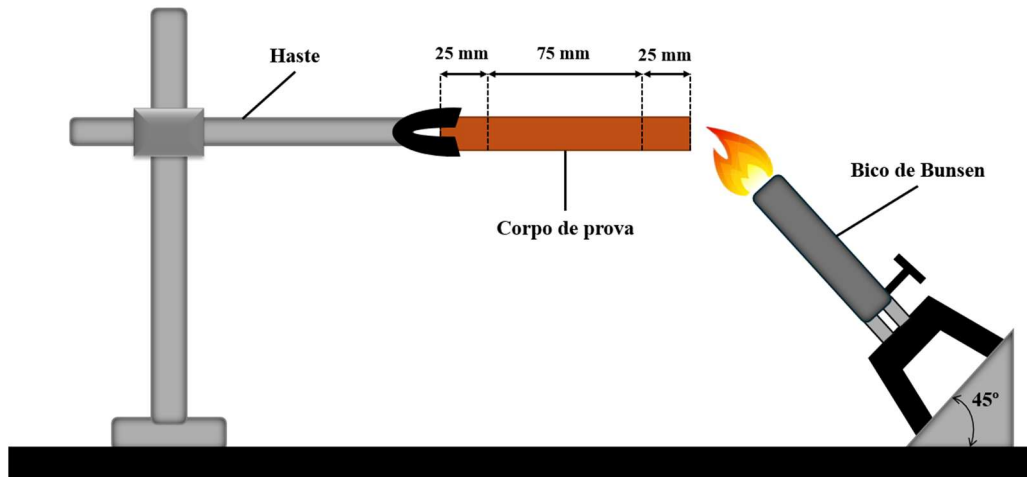
A absorção de água em compósitos está associada à degradação precoce resultante da penetração de líquidos, o que pode provocar aumento de volume, deterioração da estrutura molecular e redução gradual das propriedades mecânicas (Santos *et al.*, 2019). Assim, a partir dos dados de Massa Úmida (Mu), Massa Seca (Ms) e Massa Imersa (Mi) obtidos do material em questão, e seguindo as diretrizes estabelecidas pelas normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792, é possível realizar os ensaios em questão.

2.4.2 Ensaio de Flamabilidade

A flamabilidade dos materiais é uma característica importante, especialmente quando se refere aos materiais poliméricos e compósitos de matriz polimérica, visto que grande parte dos polímeros, em sua forma pura, são inflamáveis e, devido a isso, existe uma grande preocupação com a redução da inflamabilidade desses materiais (Callister Jr.; Rethwisch, 2021).

Após a conclusão do teste, calcula-se a taxa de propagação de chama, classificando-se como materiais inflamáveis aqueles que sustentam a chama e apresentam uma maior velocidade de propagação (Garbin, 2020). Para o ensaio horizontal, os corpos de prova são marcados em três regiões: uma de 25 mm onde a chama deve permanecer para promover o aquecimento do polímero, outra de 75 mm para medir a propagação da chama, e uma de 25 mm para que o corpo de prova seja fixado na garra (Santos, 2020). A Figura 11 ilustra o esquema necessário para a execução do ensaio de queima horizontal.

Figura 11 - Esquema do aparato utilizado para o ensaio de flamabilidade horizontal

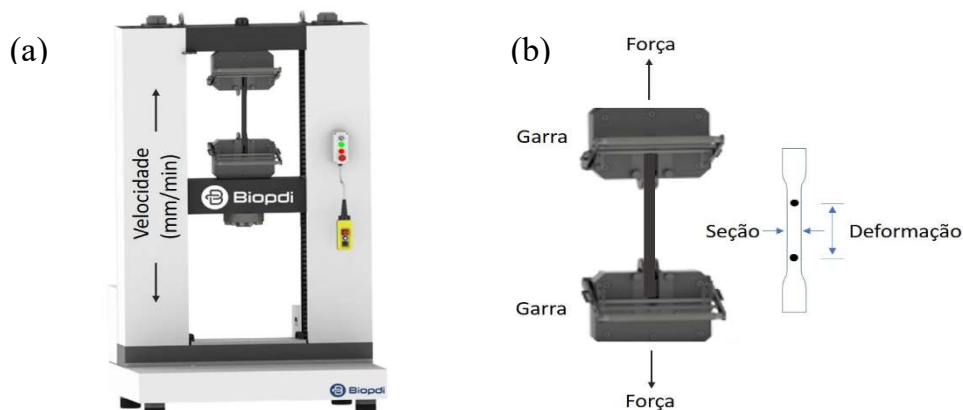


Fonte: Adaptado de *Underwriters Laboratories (UL)*, 2023.

2.4.3 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é fundamental para a caracterização de materiais compósitos poliméricos, fornecendo dados essenciais sobre suas propriedades mecânicas. Este consiste na aplicação de uma força de tração axial a um corpo de prova padronizado, promovendo a deformação do material na direção do esforço, que tende a alongá-lo até a fratura (Costa, 2022). A Figura 12 apresenta a máquina de ensaio universal (a); e o detalhe da garra com corpo de prova a ser ensaiado por tração (b).

Figura 12 - Máquina universal de ensaio



Fonte: Biopdi, 2023.

Devido à facilidade na execução e à reprodutibilidade dos resultados, este ensaio é amplamente utilizado. Através dele, é possível determinar o gráfico Tensão-Deformação e

medir as propriedades de resistência à tração, módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão de ruptura, deformação de escoamento e deformação de ruptura (Costa, 2022).

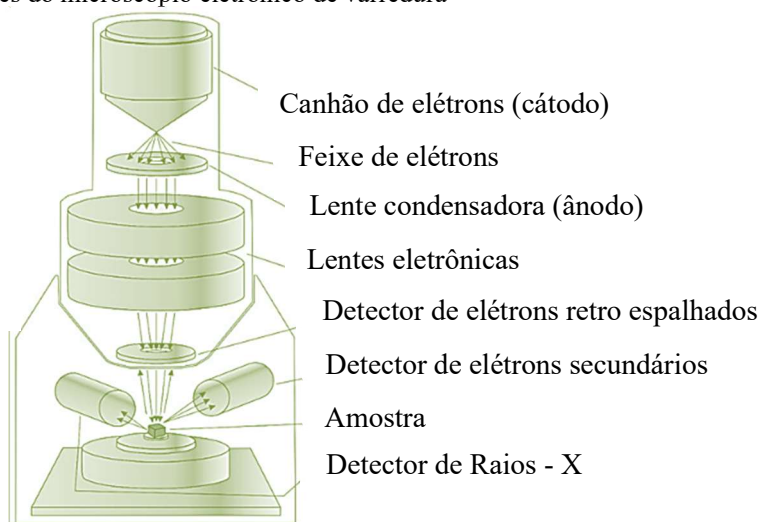
2.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Segundo Silva (2023), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica analítica de alta precisão utilizada na caracterização de materiais compósitos, devido à sua capacidade de fornecer imagens de alta resolução e informações detalhadas sobre a morfologia e composição dos materiais. Esta técnica é primordial para a análise de materiais compósitos, pois permite a visualização detalhada de microestruturas, defeitos e interfaces entre as fases da matriz e do reforço.

Para Lobo (2009), a análise de fraturas em materiais compósitos representa uma aplicação importante da microscopia eletrônica de varredura. A observação detalhada da superfície de fratura permite a identificação de mecanismos de falha, tais como, fissuras interfaciais e ruptura das fibras de reforço.

O funcionamento da MEV baseia-se na geração de elétrons em uma fonte, geralmente um filamento de tungstênio ou uma fonte de emissão de campo. Os elétrons são acelerados por uma diferença de potencial e focalizados em um feixe fino por meio de lentes eletromagnéticas. Este feixe de elétrons varre a superfície da amostra em um padrão raster, interagindo com os átomos na superfície e gerando vários sinais, incluindo elétrons secundários, elétrons retro espalhados e raios X característicos, que são coletados por detectores apropriados (Costa, 2023). A Figura 13 demonstra os principais componentes do MEV.

Figura 13 – Componentes do microscópio eletrônico de varredura

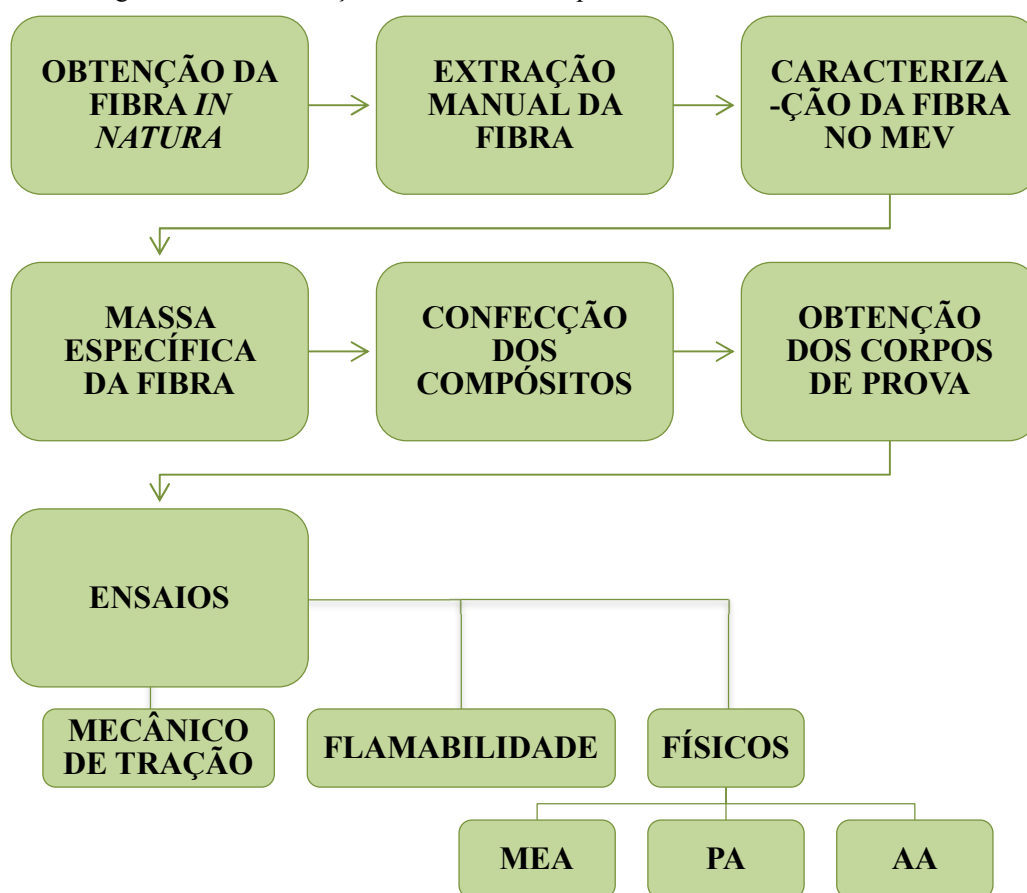


Fonte: Researchgate.net, 2023.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A extração da fibra e a fabricação dos compósitos foram realizadas nos Laboratórios de Engenharia Química - LEQ da Universidade Federal do Pará - UFPA. A Figura 14 apresenta um fluxograma que resume as principais etapas de toda a metodologia abordada para a fabricação e caracterização dos compósitos, partindo desde a obtenção da fibra *in natura*, a confecção dos compósitos pelo método *hand lay up* e os ensaios realizados.

Figura 14 - Fluxograma de caracterização da fibra e dos compósitos

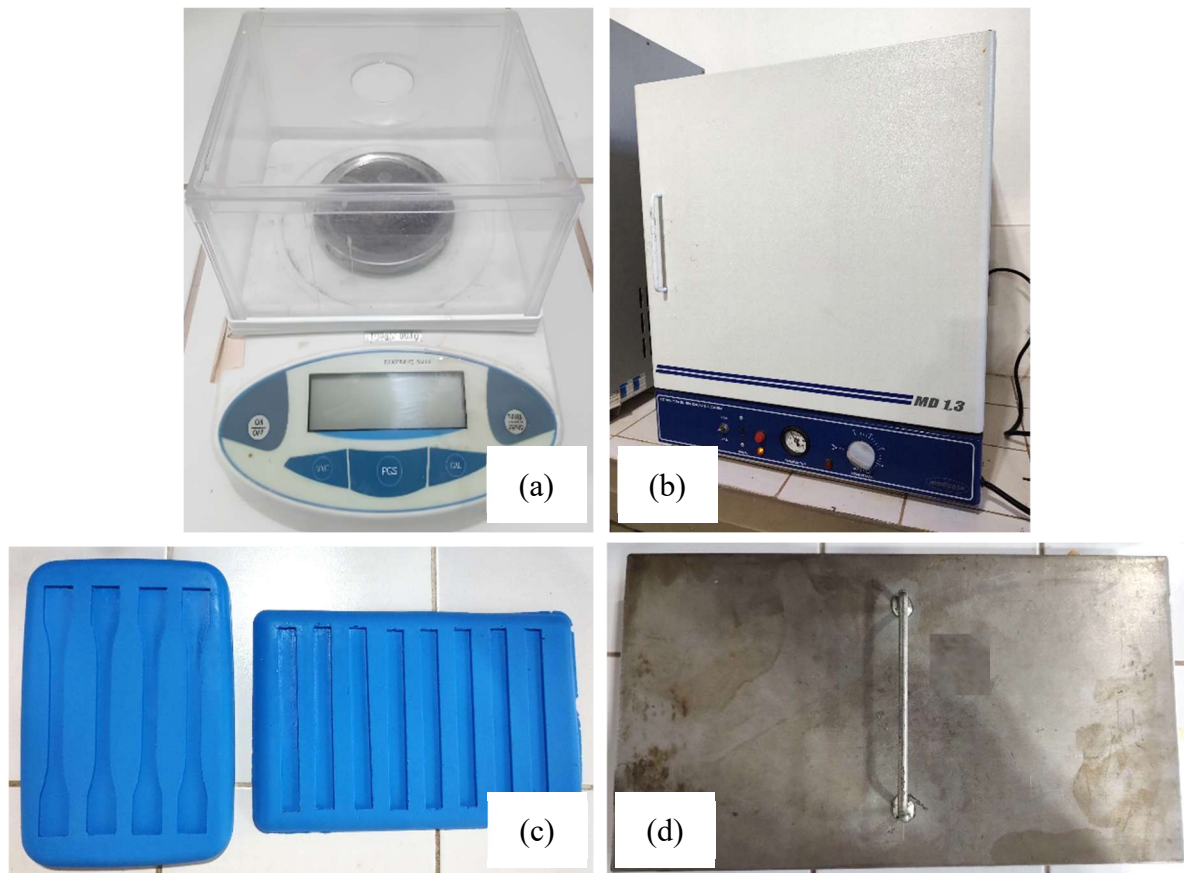


Fonte: Autor, 2025.

3.1 Materiais

A Figura 15 ilustra os materiais e equipamentos fundamentais empregados na realização deste estudo, os quais foram fornecidos pelo Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados - LAMPS e pelo Laboratório de Catálise e Biocatálise - LABCAT da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Figura 15 - Principais equipamentos e materiais utilizados na fabricação balança analítica (a), estufa (b), molde de silicone (c) e chapa metálica (d)



Fonte: Autor, 2025.

3.1.1 Matriz

Como matriz, foi empregada a resina poliéster ortoftálica insaturada, um polímero termofixo, juntamente com o iniciador de cura BUTANOX M-50 (MEK-P), utilizado na proporção de 1% (v/v). A seleção dessa matriz se deve ao seu custo reduzido em comparação com outras resinas disponíveis. A Figura 16 apresenta os materiais utilizados, sendo a resina e o iniciador.

Figura 16 - Resina poliéster e iniciador MEK-P



Fonte: Autor, 2025.

3.1.2 Fibra de Envira Cheirosa

A envira cheirosa, da espécie *Annona paludosa* Aubl., foi coletada na agrovila de Jarandeuá, zona rural do município de Marapanim, Nordeste do estado do Pará, área conhecida como microrregião do Salgado paraense abrangendo várias cidades, como é possível observar na Figura 17.

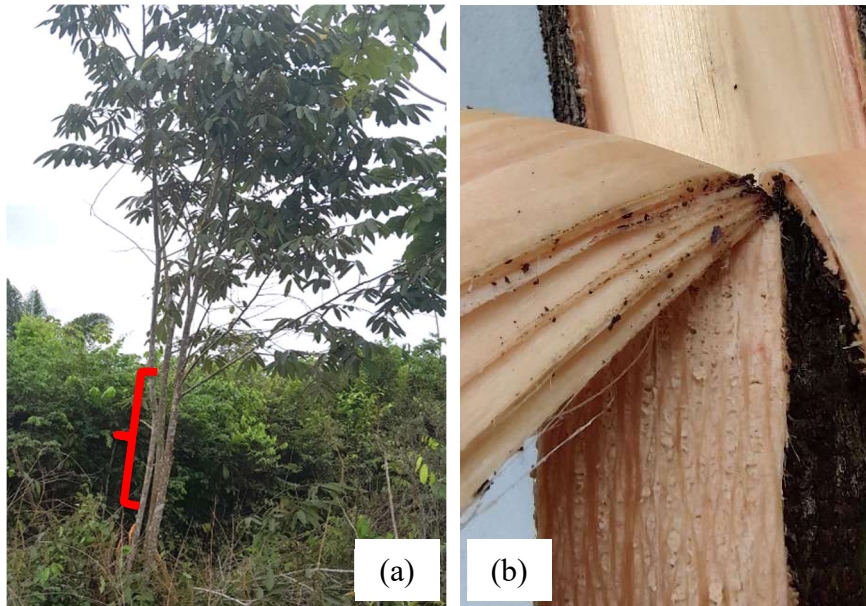
Figura 17 - Municípios do Nordeste paraense



Fonte: Adaptado de Google Maps, 2025.

As fibras foram extraídas manualmente do caule e utilizadas *in natura*. Na Figura 18 estão apresentadas, a planta da envira cheirosa.

Figura 18 - Planta de Envira Cheirosa indicando em vermelho a área utilizada para retirada das fibras (a), as camadas da fibra presentes no caule (b).



Fonte: Autor, 2025.

Inicialmente, foram cortadas em tamanhos de 250 mm e submetidas a um processo de imersão em água para facilitar a extração das fibras, a retirada do excesso de matéria orgânica e contribuir para o retardo da degradação, indicado na Figura 19.

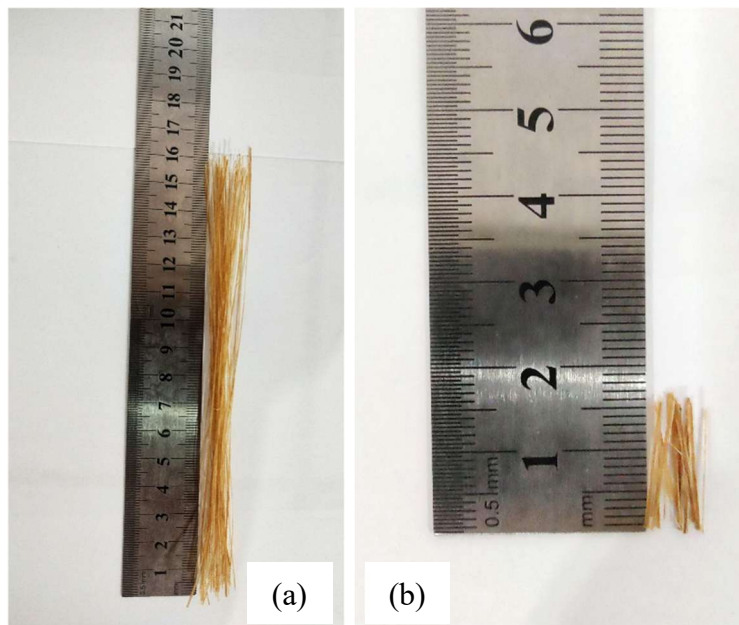
Figura 19 - Envira cheirosa imersa em água: Fibras imersas (a); destaque das fibras (b)



Fonte: Autor, 2025.

Posteriormente, as fibras foram armazenadas em um recipiente para uso neste estudo. Na Figura 20 estão apresentadas as fibras cortadas para tamanhos longos e curtos.

Figura 20 – Fibras de envira cheirosa cortada em 160 mm para fibras longas (a) e a fibra curta com corte de 15 mm (b).



Fonte: Autor, 2025.

3.2 Métodos

Os compósitos foram fabricados utilizando o método manual *hand lay-up* no Laboratório de Catálise e BioCatálise (LABCAT) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

3.2.1 Caracterização da Fibra de Envira

3.2.1.1 Morfologia das Fibras

A caracterização morfológica foi realizada utilizando-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), da marca Hitachi, modelo TM-3000, conforme apresentado na Figura 21 no Laboratório de Microscopia (LABMIC) da UFPA. As amostras foram inseridas em porta amostras com fita dupla de carbono, em seguida, foram metalizadas por meio de uma máquina de revestimento por pulverização catódica com carbono (C) por 2 minutos para aumentar a condutividade elétrica da superfície da amostra.

Figura 21 - Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Autor, 2025.

3.2.1.2 Massa Específica da Fibra

A massa específica das fibras *in natura* foi obtida por meio de ensaios de picnometria, utilizado também por El Banna (2017), usando água como não solvente (a fibra não reagirá com a água, ou seja, não haverá a dissolução da fibra), onde a fibra é imersa em água observando-se o volume que é deslocado, segundo a norma NBR NM 52. A Figura 22 ilustra os picnômetros preenchidos que foram utilizados para esse ensaio.

Figura 22 – Picnômetros utilizados no ensaio



Fonte: Autor, 2025.

Esse método consiste em medir a massa do picnômetro vazio (m_1), massa do picnômetro + fibra (m_2), massa do picnômetro + fibra + água destilada (m_3) e a massa do picnômetro + água destilada (m_4). Com isso, foi possível calcular a massa específica aparente por meio da

Equação 1. Para então calcular a massa dos constituintes da mistura para produção dos compósitos.

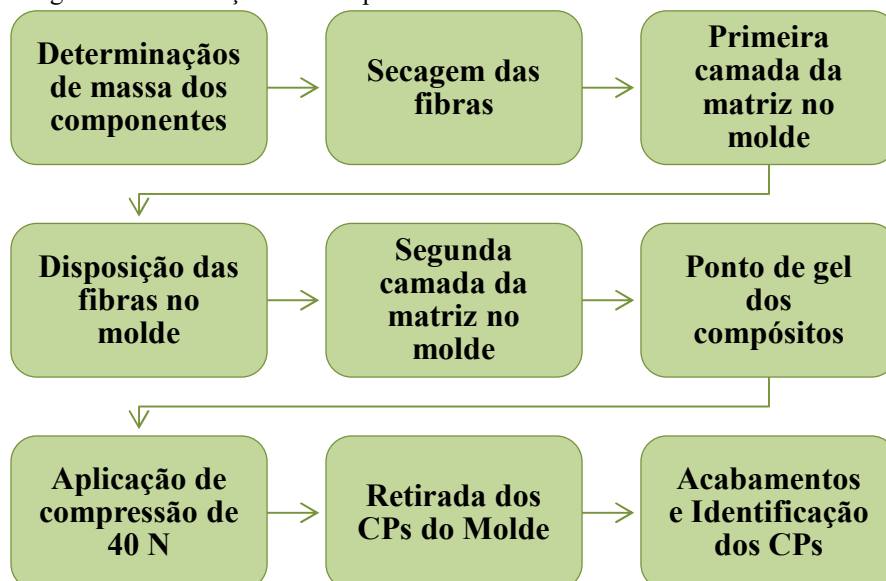
$$MEA = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 + m_2) - (m_1 + m_3)} \times \rho_{H_2O} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (1)$$

3.2.2 Fabricação dos Compósitos

A fabricação dos compósitos ocorreu de maneira manual pelo método *hand lay-up* e se deu por meio das seguintes etapas: inicialmente, foram estabelecidas as frações mássicas de 1%, 3% e 5% de fibras longas e curtas, com 160 mm e 15 mm de comprimento, respectivamente. Em seguida, mediu-se a resina, o ativador e as fibras, as quais foram então levadas à estufa a uma temperatura de aproximadamente 100 °C por 20 minutos para remoção da umidade superficial.

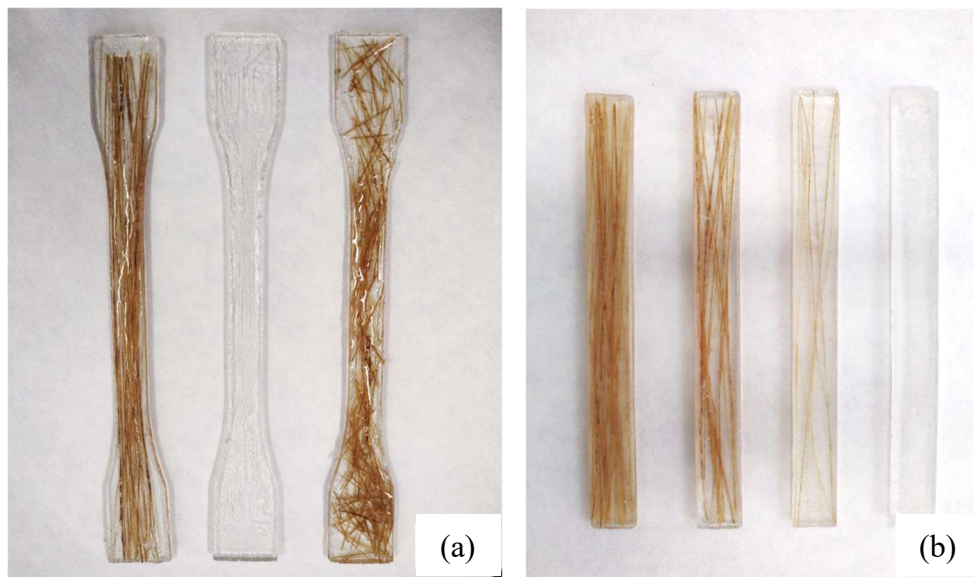
Posteriormente, a resina e o ativador foram misturados por aproximadamente 1 minuto; a primeira camada da mistura da matriz foi aplicada sob o molde de silicone, em seguida as fibras foram dispostas no molde, após isso, foi adicionada a segunda camada da mistura da matriz; esperou-se atingir o ponto de gel, em torno de 23 minutos, e uma compressão de aproximadamente 40 N foi aplicada durante 20 minutos para diminuir as imperfeições como bolhas, melhorar a adesão fibra/matriz e proporcionar um melhor acabamento aos compósitos. A Figura 23 apresenta um fluxograma simplificado com as principais etapas de fabricação dos compósitos em molde de silicone.

Figura 23 – Fluxograma da fabricação dos compósitos



Em seguida, aguardou-se 1 hora para retirada dos corpos de prova (CP's) do molde para armazenamento em local plano por 24 horas para polimerização completa. Após os CP's terem polimerizado por completo foram atribuídos acabamentos superficiais, com auxílio de lixas nas granulometrias de 80 e de 100 e identificações finais. A Figura 24 apresenta os corpos de prova para tração (a) e flamabilidade (b) nas diferentes frações e tamanhos de fibras.

Figura 24 – Confeção dos corpos de prova: tração (a) e flamabilidade (b)



Fonte: Autor, 2025.

3.2.3 Caracterização dos Compósitos

3.2.3.1 Ensaio Físicos

Os ensaios físicos de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) foram conduzidos de acordo com as normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792, respectivamente. Esses testes foram realizados no Laboratório de Catálise e Biocatálise (LABCAT) da Universidade Federal do Pará. Foram preparados cinco corpos de prova para cada proporção dos compósitos, para os ensaios em questão foram utilizadas as Equações 2, 3 e 4 para a obtenção da absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente, respectivamente.

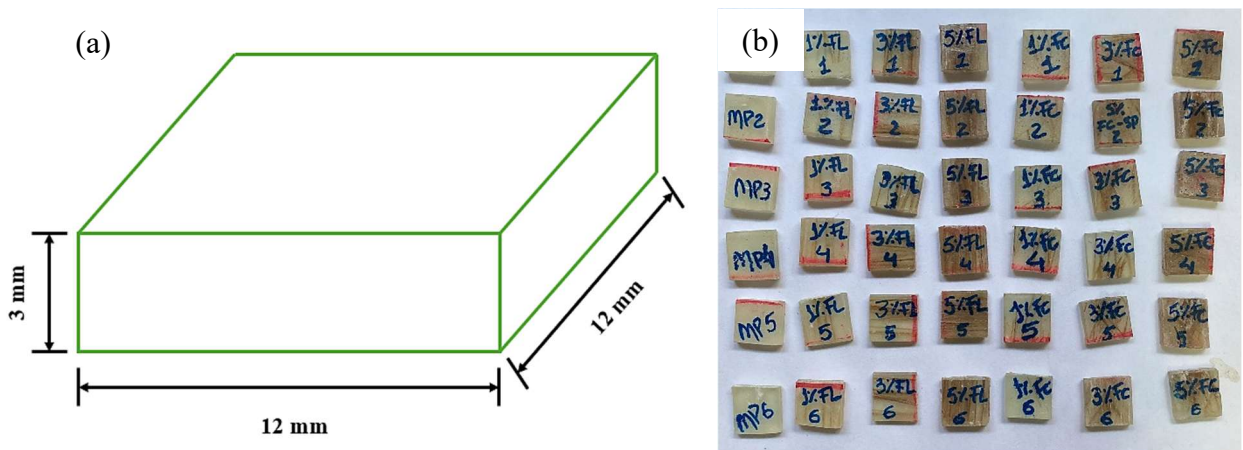
$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$PA = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} \times 100 (\%) \quad (3)$$

$$MEA = \frac{Ms}{Mu - Mi} \times \rho_{H_2O} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (4)$$

A Figura 25 ilustra as dimensões dos corpos de prova (a) e os CP's utilizados (b).

Figura 25 – Dimensões do CP do ensaio físico (a) e CP's pronto para ensaio (b)

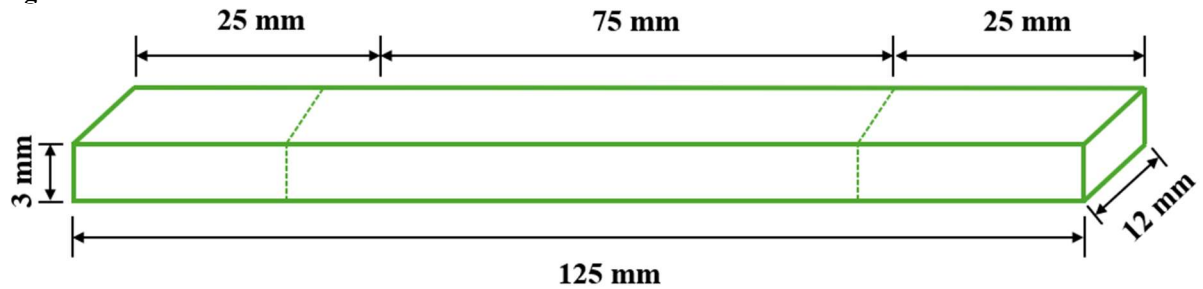


Fonte: Autor, 2025.

3.2.3.2 Ensaio de Flamabilidade Horizontal

O ensaio de flamabilidade horizontal foi conduzido na Usina de Materiais - USIMAT da UFPA, seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM D 635, no qual, foram produzidos cinco corpos de prova para cada proporção de fibras. A Figura 26 ilustra as dimensões dos corpos de prova utilizados.

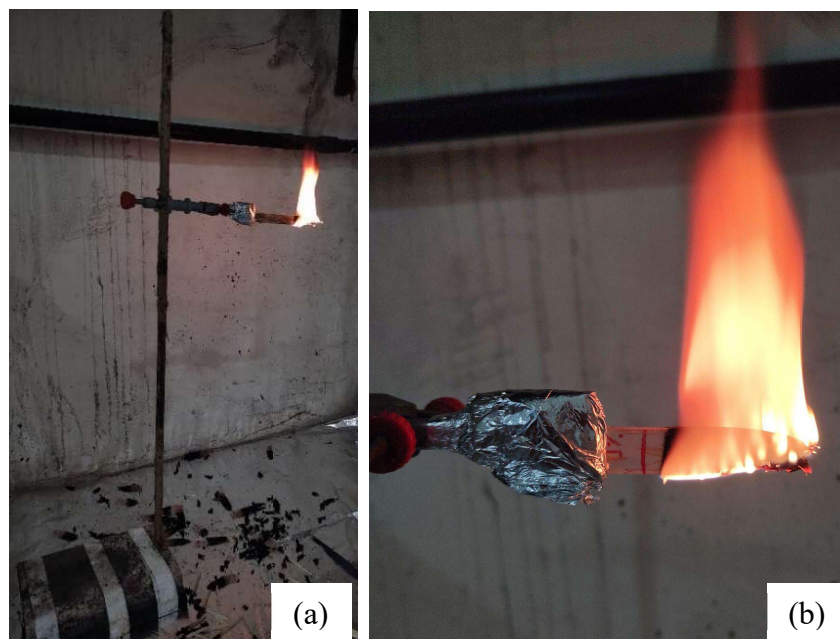
Figura 26 – Dimensões do CP do ensaio de flamabilidade



Fonte: Autor, 2025.

No ensaio, foi utilizado um aparato de estrutura metálica, Figura 27 (a), para acoplar a uma garra sustentar o corpo de prova, conforme mostrado na Figura 27 (b). Um bico de Bunsen, posicionado a 45°, foi empregado para conduzir a chama pelo corpo de prova. Onde, foram registrados o tempo necessário para a combustão atingir a marca de 25 mm e o tempo necessário para alcançar a marca de 75 mm.

Figura 27 - Realização do ensaio de flamabilidade no compósito



Fonte: Autor, 2025.

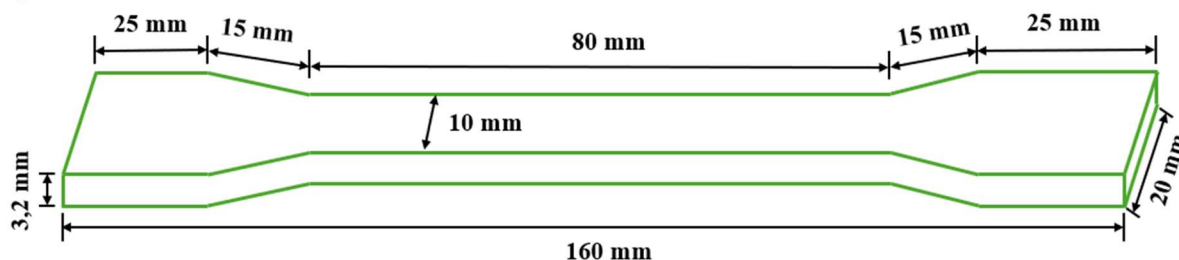
Neste ensaio a taxa de propagação de chama é determinada utilizando a Equação 5, onde T representa a taxa de queima, L é o comprimento útil do corpo de prova em milímetros, e t é o tempo em segundos que a chama leva para percorrer esse comprimento útil.

$$T = \frac{L}{t} \text{ (mm/min)} \quad (5)$$

3.2.3.3 Ensaio de Resistência à Tração

O ensaio de tração foi conduzido no Laboratório de Ensaios de Mecânica (LEM) da Universidade Federal do Pará, conforme os padrões estabelecidos pela norma ASTM D 638. Doze corpos de prova foram fabricados para cada proporção de fibras, sendo as dimensões apresentadas na Figura 28.

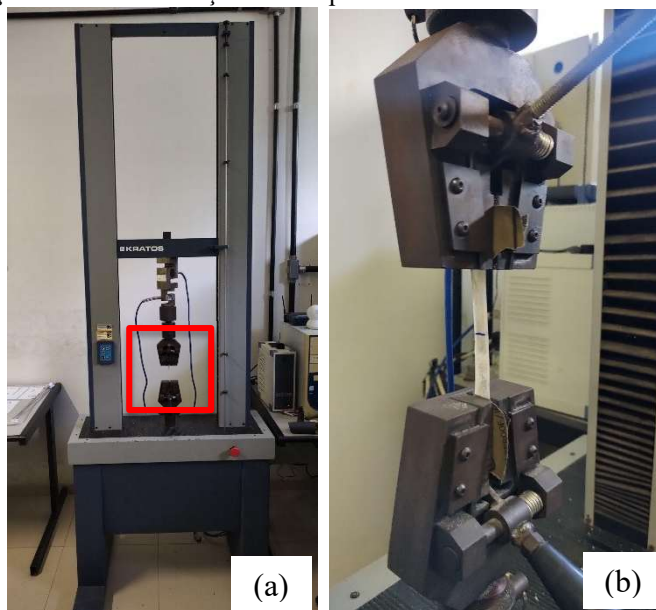
Figura 28 – Dimensões do CP do ensaio de tração



Fonte: Autor, 2025.

O ensaio de tração foi conduzido em uma máquina universal de ensaios da marca Kratos, modelo KE-3000 MP, equipada com uma célula de carga de 5 kN e uma velocidade de 5 mm/min conforme estabelece a norma ASTM D 638, no Laboratório de Ensaio de Mecânica (LEM) da Universidade Federal do Pará (UFPA). A Figura 29, apresenta a máquina universal (a) e o CPs sendo ensaiados (b).

Figura 29 - Realização do ensaio de tração no compósito



Fonte: Autor, 2025.

Na norma utilizada neste ensaio, ASTM D 638; a tensão de resistência à tração (TRT), é expressa em mega pascal (MPa), Newton por milímetro quadrado (N/mm²) é calculada dividindo a força F ou carga aplicada, pela área da seção inicial da parte útil do corpo de prova, conforme indicado pela Equação 6.

$$TRT = \frac{F}{A} (MPa) \quad (6)$$

3.2.4 Análise de Variância (ANOVA)

Os dados das propriedades físicas, os testes de flamabilidade e tração dos compósitos foram submetidos à análise de variância de fator único (ANOVA) utilizando o software Statistica 10, com um nível de confiança de 95%.

O valor de P vai indicar a rejeição ou não da hipótese nula, ou seja, indica se as médias têm diferenças significativas. Se o valor de P for alto em relação ao F crítico, indica que pelo menos uma das médias tem diferença significativa e se for baixo significa que todas as médias são iguais. A diferença entre as médias é atribuída à variação nas frações mássicas de fibras de envira cheirosa e seu tipo, fibras curtas e fibras longas, que foram incorporadas na matriz.

Quando os resultados são estatisticamente significantes ($p\text{-Valor} > 0,05$), a hipótese nula (H_0) é rejeitada, indicando que os diferentes grupos testados influenciam de forma significativa na variável em questão. Para as situações em que a hipótese nula foi rejeitada, foi conduzido o teste de Tukey (TSD) para comparação das médias para a par.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

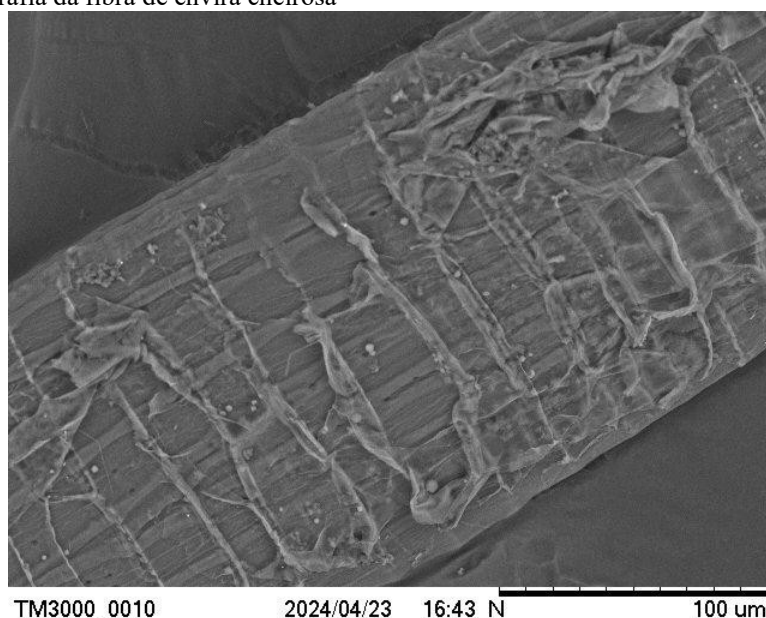
Os resultados apresentados referem-se à caracterização da fibra de envira cheirosa e dos compósitos poliméricos produzidos com essa fibra. Em seguida, são discutidos os efeitos da variação no tamanho da fibra sobre o desempenho mecânico dos compósitos, ao mesmo tempo em que se aplicam análises estatísticas de variância (ANOVA) para verificar se as diferenças observadas entre os dados são estatisticamente significativas, além de análises de fratura realizadas nos mesmos.

4.1 Caracterização da Fibra

4.1.1 Caracterização Morfológica das Fibras de Envira

A análise realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura para a caracterização morfológica das fibras de envira revelou, conforme mostrado na Figura 30, que estas apresentam uma superfície levemente rugosa.

Figura 30 - Micrografia da fibra de envira cheirosa

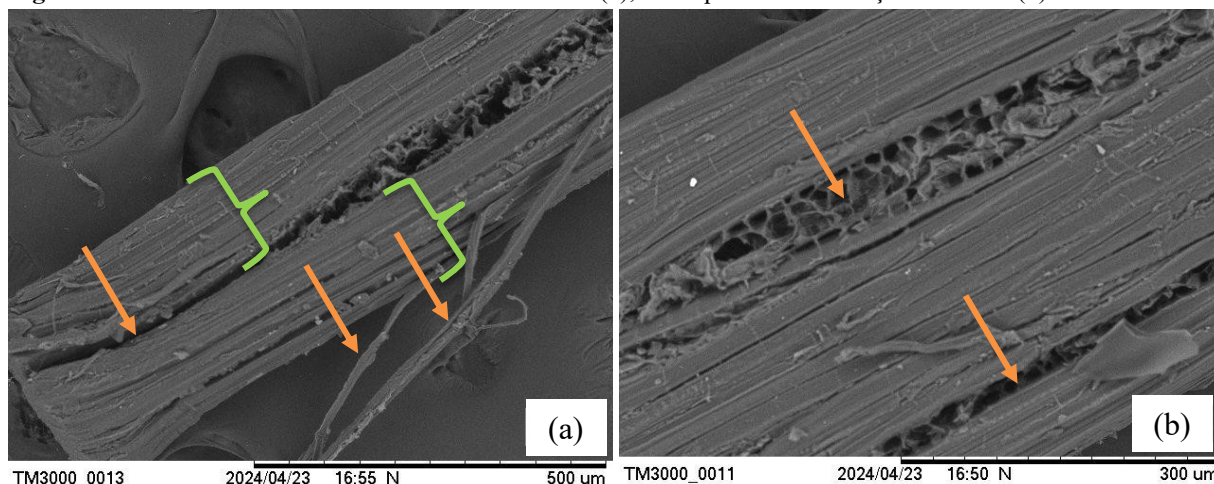


Fonte: Autor, 2025.

Adicionalmente, foram identificados numerosos feixes de fibras (chaves verdes), juntamente com algumas deformações (setas laranjas) que possivelmente se originaram durante

a remoção manual do excesso de matéria orgânica. A micrografia correspondente pode ser visualizada na Figura 31.

Figura 31 – Características da fibra de envira cheirosa (a); destaque das deformações na fibra (b)



Fonte: Autor, 2025.

Segundo Margem (2013), os feixes de fibras podem atuar como concentradores de tensão em materiais compósitos, comprometendo a distribuição uniforme dos esforços mecânicos. Esse fenômeno é comum em diversas fibras vegetais, como as de malva, onde a presença de feixes estruturados pode resultar em tensões localizadas na interface matriz/reforço, prejudicando o desempenho do compósito.

Adicionalmente, observam-se algumas deformações (setas laranjas), que provavelmente se originam na etapa de extração da fibra, onde tem-se um processo de raspagem para a remoção da matéria orgânica superficial. Esse processo, influencia em um fluxo de abertura de canais para a passagem da resina, possibilitando uma melhor impregnação do material. Como resultado, essa melhor distribuição da resina pode impactar diretamente as propriedades mecânicas do compósito, proporcionando assim, um bom desempenho (Francucci *et al.* 2011).

4.1.2 Massa Específica da Fibra

Conforme apresentado na Tabela 1, as fibras de envira cheirosa exibem valores de massa específica comparáveis aos de outras fibras naturais amplamente empregadas como materiais de reforço em compósitos.

Tabela 1 - Comparação da massa específica com outras fibras vegetais

Fibras	Massa Específica (g/cm³)	Fonte
Fibra de Envira cheirosa	1,154 ± 0.061 g/cm³	Este trabalho
Fibra de Malva	1,148 ± 0,068 g/cm ³	(Ribeiro <i>et al.</i> , 2022)
Fibra de Pindaíba	1,190 ± 0,130 g/cm ³	(Mafra, 2017)
Fibra de Juta	1,482 ± 0.055 g/cm ³	(Ribeiro <i>et al.</i> , 2022)
Fibra de Munguba	1,560 ± 0,001 g/cm ³	(Pinheiro, 2012)

Fonte: Autor, 2025.

A fibra de envira cheirosa apresentou uma massa específica 22% menor em comparação à fibra de juta (*Corchorus capsularis*) e 26% menor em relação à fibra de munguba (*Pseudobombax munguba*), conferindo uma vantagem importante na fabricação de compósitos, baixa densidade. Dessa forma, a envira cheirosa apresenta-se como uma alternativa para a produção de materiais compósitos de menor densidade que reduzem a utilização de combustível, uma vez que podem ser aplicados na indústria automotiva, aeronáutica e naval, melhorando a eficiência energética dos veículos e equipamentos (Faria Neto *et al.*, 2021).

Ressalta-se, no que tange à baixa densidade, fibras vegetais, como a de envira cheirosa, apresentam vantagem em relação a fibras sintéticas, como a de vidro (2,40 g/cm³). Embora as fibras vegetais, em geral, possuam menor resistência mecânica, elas podem proporcionar benefícios relacionados à sustentabilidade, uma vez que, sua obtenção é realizada de materiais renováveis e ao custo, em razão da disponibilidade abundante de matéria-prima e à simplicidade do processo de extração (Santana, 2016).

4.2 Caracterização dos Compósitos

4.2.1 Ensaio Físicos

Nas propriedades físicas dos compósitos obteve-se os dados da Massa Específica Aparente (MEA), dado em g/cm³, Porosidade Aparente (PA) e Absorção de Água (AA), sendo ambas retratadas em porcentagem para a Matriz Plena (MP) e para as diferentes composições com fibras curtas e longas, são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, com porcentagem de 1%, 3% e 5% de fibras.

Tabela 2 - Dados dos ensaios físicos para os compósitos com fibras curtas

Composições (%)	MEA (g/cm³)	PA (%)	AA (%)
MP - 0%	1,154 ± 0,02	4,865 ± 1,74	4,226 ± 1,58
FC - 1%	1,163 ± 0,01	3,356 ± 0,45	2,878 ± 0,39
FC - 3%	1,168 ± 0,02	4,173 ± 1,72	3,559 ± 1,55
FC - 5%	1,176 ± 0,02	4,541 ± 1,59	3,890 ± 1,41

Fonte: Autor, 2025.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que os compósitos com fibras curtas apresentam valores de MEA próximos, esse comportamento pode ser explicado pelo fato de a fibra de envira apresentar uma densidade similar à da resina, o que, conforme descrito por Callister Jr e Rethwisch (2021), é previsto pela regra da mistura.

Em relação à porosidade aparente, nota-se uma redução, assim como na absorção de água, em todas as composições contendo fibras. Essa redução pode ser atribuída à boa homogeneização da mistura entre fibra e matriz, resultando em menores quantidades de poros, bolhas e defeitos no material. Além disso, é importante destacar a correlação direta entre as propriedades de absorção de água e a porosidade aparente, uma vez que ambas estão relacionadas à quantidade de vazios no material. A inserção de fibras na matriz impacta diretamente essas propriedades (Barbosa, 2021; Santos, 2020).

Tabela 3 - Dados dos ensaios físicos para os compósitos com fibras longas

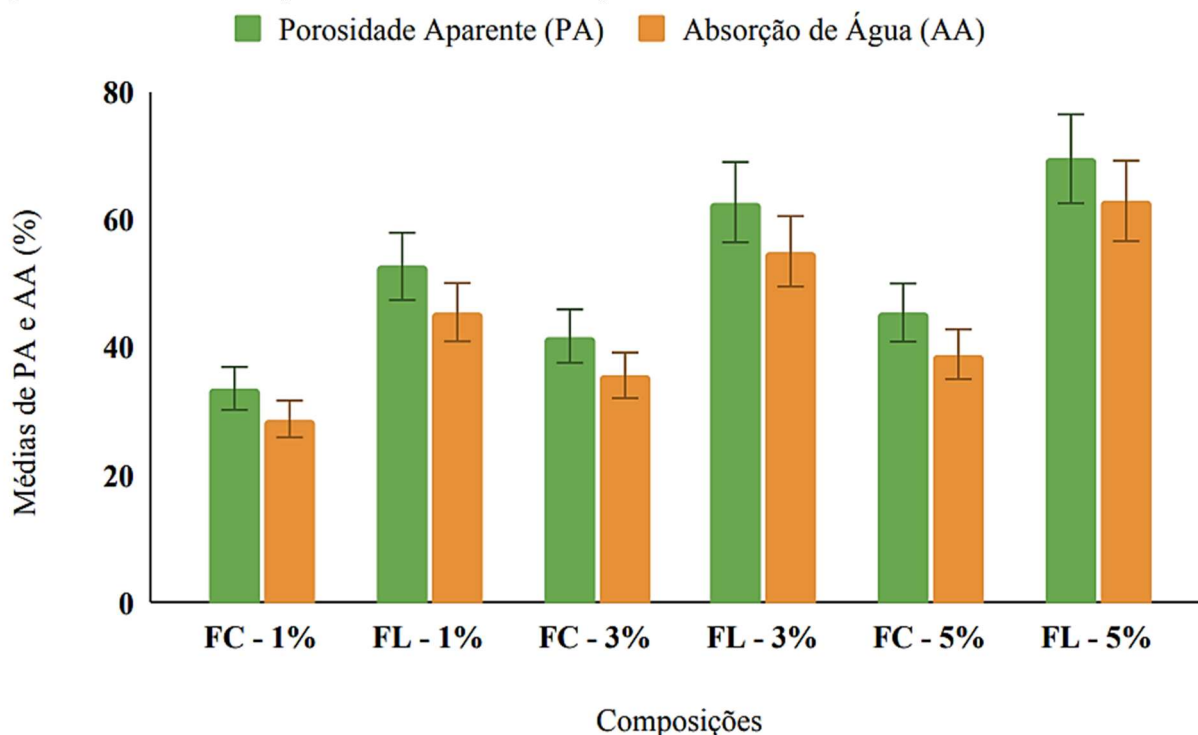
Composições (%)	MEA (g/cm³)	PA (%)	AA (%)
MP - 0%	1,154 ± 0,02	4,865 ± 1,74	4,226 ± 1,58
FL - 1%	1,160 ± 0,02	5,262 ± 1,76	4,546 ± 1,59
FL - 3%	1,146 ± 0,03	6,265 ± 2.12	5,497 ± 1,94
FL - 5%	1,133 ± 0,06	6,943 ± 4,23	6,285 ± 4,15

Fonte: Autor, 2025.

Considerando os valores presentes na Tabela 3 sobre os resultados de porosidade aparente e absorção de água para os compósitos fabricados com fibras longas, estes apresentaram um aumento em relação à matriz plena, com porcentagens variando entre 8% a 42% na PA e de 7% a 48% na AA. Segundo Tavares (2018), esse aumento pode ter ocorrido devido ao método de fabricação manual utilizado no processo de fabricação do material, uma

vez que, durante esse processo, o controle sobre a compactação e a remoção de bolhas de ar é menor, o que pode levar à formação de vazios na matriz do compósito. A Figura 32 apresenta uma comparação de PA e AA entre os compósitos fabricados com fibra de envira cheirosa.

Figura 32 - Gráfico de comparação de PA e AA dos compósitos



Fonte: Autor, 2025.

Segundo Tramontin *et al.* (2002), a medida que cresce o comprimento das fibras nos compósitos, crescem também as dificuldades de homogeneização e compactação nas etapas de mistura, prensagem e cura, resultando em amostras com maior tendência a formação de porosidade, ratificando o que ocorre nos compósitos fabricados com fibras longas de envira cheirosa.

Os resultados dos ensaios físicos foram analisados estatisticamente por meio da Análise de Variância (ANOVA) de fator único com confiança de 95% e complementou-se com a análise de Tukey (TSD) no intuito de comparar os possíveis pares de médias. A Tabela 4 apresenta a análise variância para os ensaios físicos.

Tabela 4 – Análise de Variância para os ensaios físicos

Fatores em comparação com a MP	MEA (g/cm)	PA (%)	AA (%)
MP - 1%	Não Difere	Não Difere	Não Difere
MP - 3%	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$
MP - 5%		Difere	Não Difere
FC - FL	Não Difere $p > 0,05$	$p = 0,037903$ $p < 0,05$	$p = 0,056431$ $p > 0,05$

Fonte: Autor, 2025.

De acordo com a análise de variância a inserção das fibras de envira cheirosa não apresentou efeito significativo para a massa específica aparente, tanto para as frações mássicas (1%, 3% e 5%) ($p = 0,189496$) quanto para o tipo (curtas e longas) ($p = 0,067733$), dessa forma ambos apresentam $p > 0,05$ não rejeitando a hipótese nula.

A análise de variância para a absorção de água e porosidade aparente para as frações mássicas não apresentaram significância com $p = 0,248782$ ($p > 0,05$) e $p = 0,250703$ ($p > 0,05$) respectivamente, não sendo rejeitada a hipótese nula. Considerando os tipos de fibras, os resultados indicaram uma tendência de diferença nos valores de absorção de água (AA), com $p = 0,056431$ ($p > 0,05$), embora essa diferença não seja estatisticamente significativa ao nível de 5% ($p < 0,05$).

Por outro lado, para a porosidade aparente (PA), a análise de Tukey demonstrou que os compósitos com fibras curtas (FC) e fibras longas (FL) apresentam diferenças estatisticamente significativas, com $p = 0,037903$ ($p < 0,05$). O aumento da porosidade aparente nos compósitos com fibras pode ser associado à formação de defeitos como vazios e bolhas. Esse efeito pode ter sido gerado segundo Costa (2016) pela dificuldade de impregnação da interface fibra/resina.

4.2.2 Ensaio de Flamabilidade (horizontal)

A Tabela 5 apresenta as taxas de queima dos compósitos com fibra de envira cheirosa, obtida por meio do ensaio de flamabilidade que atendeu a norma ASTM D 635.

Tabela 5 - Resultado do ensaio de flamabilidade dos compósitos

Composições (%)	Taxa de Queima (mm/min)
MP - 0%	24,09 ± 1,26
FC - 1%	25,51 ± 0,62
FC - 3%	28,77 ± 1,55
FC - 5%	28,32 ± 1,81
FL - 1%	25,48 ± 0,96
FL - 3%	26,19 ± 1,54
FL - 5%	25,45 ± 1,52

Fonte: Autor, 2025.

Em termos dos valores absolutos, apresentados na Tabela 5, observa-se que os compósitos reforçados com fibras de envira cheirosa, tanto na forma de fibras curtas quanto longas, exibiram um pequeno aumento na taxa de propagação da chama em relação à matriz plena. No entanto, é importante destacar que a incorporação de fibras nos compósitos não apenas resultou em uma diminuição na quantidade de resina utilizada, reduzindo os custos de fabricação, mas também promoveu benefícios ambientais.

Ao comparar os resultados da taxa de propagação da chama desses compósitos com os requisitos estipulados pela Resolução nº 498 de 2014 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) e pela norma ASTM D 635, verificou-se que tanto a matriz plena quanto os compósitos contendo fibras de envira apresentaram desempenho dentro dos parâmetros de segurança. A taxa de propagação da chama manteve-se abaixo dos limites máximos, presentes na Tabela 6, permitidos por ambas as normas, demonstrando conformidade com os critérios exigidos para aplicações que envolvem a resistência ao fogo. A Tabela 6 apresenta uma comparação do melhor resultado do ensaio de flamabilidade com os resultados presentes na literatura.

Tabela 6 - Comparativo do ensaio de flamabilidade deste trabalho com a literatura

Composições (%)	Taxa de Queima (mm/min)	Fonte
5% F. de Envira Cheirosa	25,45 ± 1,52	Este trabalho
5% F. de Bambu	33,4 ± 0,25	(Lima, 2022)
20% F. de Abacaxi	31,4 ± 1,40	(Ribeiro, <i>et al.</i> , 2013)
ASTM D 635	40,0	-
CONTRAN	100,0	-

Fonte: Autor, 2025.

O compósito fabricado com fibra de envira cheirosa se destaca, primeiramente, por não ter utilizado retardantes de chama em seu processo de fabricação, ao contrário do compósito feito com fibra de abacaxi, que também utiliza uma matriz de poliéster. Segundo Rocha (2015), os retardantes de chama são substâncias químicas empregadas para atrasar ou, quando possível, impedir a propagação de chamas em materiais. Contudo, essas substâncias podem ser prejudiciais à saúde humana, uma vez que partículas finas podem ser inaladas a partir dos produtos nos quais são aplicadas, além de causarem danos ao meio ambiente.

Assim, observa-se que a incorporação de fibras de envira cheirosa na matriz foi eficaz, dado que todos os valores obtidos ficaram abaixo dos limites estabelecidos pela norma ASTM D 635, classificando-se como HB (*Horizontal Burning*), o que indica taxas de queima inferiores a 40 mm/min. Além disso, conforme a resolução do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), é recomendado que os revestimentos internos na indústria automobilística apresentem uma taxa máxima de propagação de chama de 100 mm/min. Nesse sentido, os compósitos desenvolvidos neste estudo estão em conformidade com essas exigências, pois suas taxas de propagação de chama permaneceram abaixo do limite estabelecido pelas normas.

Por meio do Software Statistica, realizou-se a análise de variância para as frações que apresentaram valores na taxa de queima, a probabilidade de significância encontrada foi de $p = 0,004822$, indicando que $p < 0,05$. Isso indica que pelo menos uma das médias apresentam diferença significativa, sugerindo, assim o teste de Tukey. A Tabela 7 apresenta a análise variância para o ensaio de flamabilidade.

Tabela 7 – Análise de Variância para o ensaio de flamabilidade

Fatores em comparação com a MP	Taxa de Queima (mm/min)	Fatores em comparação com a MP	Taxa de Queima (mm/min)
MP - 1%	Não Difere $p > 0,05$	MP - FC	Difere $p = 0,000946$ $p < 0,05$
MP - 3%	Difere $p = 0,008076$ $p < 0,05$	MP - FL	Não Difere $p > 0,05$
MP - 5%	Difere $p = 0,020304$ $p < 0,05$	FC - FL	Difere $p = 0,014823$ $p < 0,05$

Fonte: Autor, 2025.

O teste indicou duas diferenças estatisticamente significativas no retardo à chama, ocorrendo entre a matriz e a fração de 3% $p = 0,008076$ ($p < 0,05$) e entre a matriz e a fração de 5% $p = 0,020304$ ($p < 0,05$). Isso evidencia que as frações de 3% e 5% têm uma resistência à chama consideravelmente diferente em relação a matriz, sendo menos resistente.

Quanto a análise de variância sobre a significância do tipo da fibra avaliada (longas e curtas) na flamabilidade, os resultados do teste de Tukey indicaram uma diferença significativa entre MP e FC ($p = 0,000946$) e FC e FL ($p = 0,014823$), ou seja, ambas alcançaram uma significância estatística ao nível de 5% ($p < 0,05$).

4.2.3 Propriedade Mecânica dos Compósitos - Ensaio de Tração

Nas propriedades mecânicas dos compósitos, os valores médios de resistência à tração, que atendeu a norma ASTM D 638, para a matriz plena (MP) e as diferentes composições com fibras curtas e longas, são apresentados nas Tabelas 8 e 9, respectivamente.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos com fibras curtas

Composições (%)	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
MP - 0%	34,83 ± 1,24	15,71 ± 5,12
FC - 1%	22,60 ± 1,95	5,63 ± 0,42
FC - 3%	23,10 ± 1,53	5,04 ± 1,62
FC - 5%	27,89 ± 1,11	8,68 ± 2,46

Fonte: Autor, 2025.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 8, observou-se que os compósitos com fibras curtas apresentaram um aumento progressivo de resistência à medida que o percentual de fibras na matriz aumentou. No entanto, as três proporções avaliadas (1%, 3% e 5%) resultaram em uma perda de resistência em comparação à matriz plena. Isso indica que a fibra curta de envira cheirosa atuou predominantemente como material de enchimento no compósito.

Esse comportamento pode ser atribuído à má distribuição das fibras na matriz, à baixa adesão interfacial ou à presença de vazios no material. Entretanto, do ponto de vista sustentável, o uso de fibras vegetais em compósitos é vantajoso por serem recursos renováveis e biodegradáveis, contribuindo para a sustentabilidade ambiental dos produtos nos quais são aplicadas, além de serem uma alternativa mais econômica em comparação com reforços sintéticos (Joseph, 2002; Tavares; Aquino, 2009).

Tabela 9 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos com fibras longas

Composições (%)	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
MP - 0%	34,83 ± 1,24	15,71 ± 5,12
FL - 1%	30,89 ± 1,39	7,24 ± 1,48
FL - 3%	45,69 ± 3,40	5,10 ± 0,85
FL - 5%	62,69 ± 3,67	10,06 ± 0,62

Fonte: Autor, 2025.

Com base na análise dos dados apresentados na Tabela 9, observa-se que o compósito contendo 1% de fibra manteve uma resistência próxima à da matriz plena, considerando o desvio padrão, o que sugere uma redução não significativa na resistência. Além disso, destaca-se um aumento substancial na resistência dos compósitos com 3% e 5% de fibra, com

incrementos superiores a 20% e 40%, respectivamente, em relação à matriz sem reforço. Esse aumento de resistência indica que as fibras desempenharam um papel eficaz como elemento de reforço na matriz. Os resultados são consistentes com os estudos de Cândido (2014) e Souza (2021), que demonstram que as fibras naturais contribuem para a melhoria da resistência dos compósitos devido ao seu alinhamento durante o processo de fabricação, o que aumenta a área de interface entre fibra e matriz, resultando em uma maior resistência aos esforços mecânicos.

Com base na análise de variância (ANOVA de fator único) realizada no software Statistica, com um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), a probabilidade de significância encontrada foi de $p = 0,035274$, indicando que $p < 0,05$. Isso revela uma diferença estatisticamente significativa entre as frações de fibras analisadas. Com esse resultado, foi possível realizar o teste de Tukey HSD para comparações par a par. A Tabela 10 apresenta a análise variância para o ensaio de tração.

Tabela 10 – Análise de Variância para o ensaio de tração

Fatores em comparação com a MP	Resistência à Tração (MPa)	Fatores em comparação com a MP	Resistência à Tração (MPa)
MP - 1%	Não Difere $p > 0,05$	MP - FC	Não Difere $p > 0,05$
MP - 3%	Não Difere $p > 0,05$	MP - FL	Não Difere $p = 0,055385$ $p > 0,05$
1% - 5%	Difere $p = 0,021328$ $p < 0,05$	FC - FL	Difere $p = 0,000193$ $p < 0,05$

Fonte: Autor, 2025.

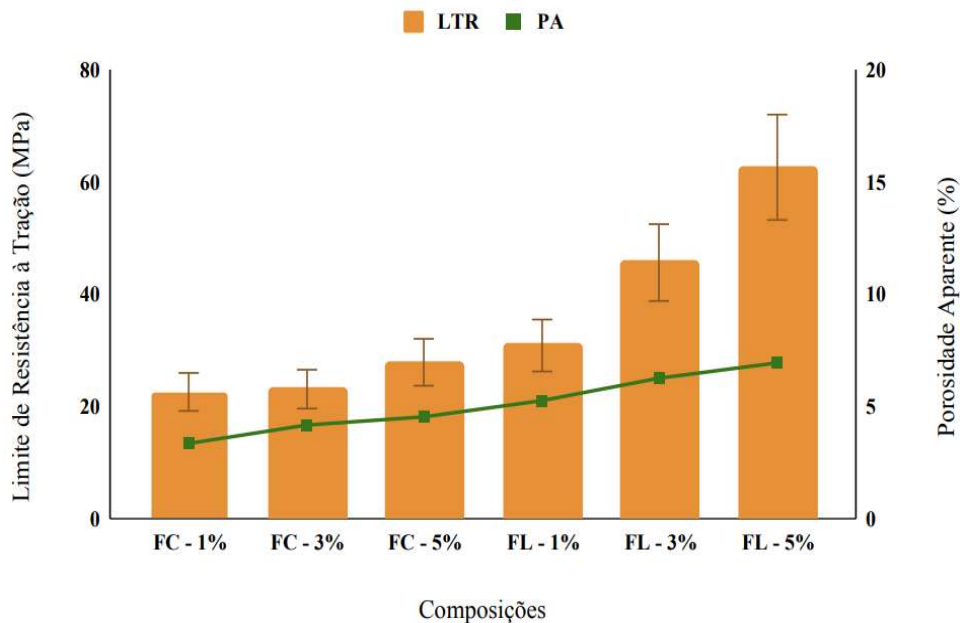
Os resultados do teste de Tukey indicaram que a única diferença significativa na resistência ocorre entre as frações 1% e 5% $p = 0,021328$ ($p < 0,05$). Isso significa que a fração 5% possui uma resistência à tração consideravelmente diferente da fração 1%, sendo mais resistente.

Essa diferença pode ser atribuída a mudanças estruturais ou de composição nas diferentes frações, influenciando diretamente a resistência do material. As demais comparações entre frações não apresentaram diferenças significativas. Isso sugere que, embora as médias de

resistência entre as frações sejam diferentes, essas variações podem estar relacionadas à dispersão dos dados, representada pelo desvio padrão.

No que tange a análise de variância sobre a significância dos tipos de fibras avaliadas (longas e curtas), os resultados do teste de Tukey indicam que, apesar de haver uma tendência de diferença na resistência entre MP e FL $p = 0,055385$ ($p > 0,05$), essa diferença não alcança significância estatística ao nível de 5% ($p < 0,05$). Por outro lado, a diferença entre FC e FL é significativa $p = 0,000193$ ($p < 0,05$), sugerindo que esses dois grupos apresentam resistências diferentes. Uma comparação dos resultados de resistência à tração das fibras curtas e longas em relação à porosidade aparente está ilustrada no gráfico da Figura 33.

Figura 33 - Gráfico de comparação do resultado de tração com a porosidade aparente dos compósitos



Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 32, observa-se um aumento progressivo na resistência mecânica à tração à medida que se eleva a porcentagem de fibras na matriz, o que é acompanhado por um incremento na porosidade dos compósitos, tanto com fibras curtas quanto longas. Nota-se, no entanto, que apesar da maior porosidade nos compósitos com fibras longas, foram obtidos excelentes resultados de resistência à tração, especialmente nas concentrações de 3% e 5% de fibras, indicando que a porosidade não exerceu grande influência sobre o desempenho mecânico desses materiais. A Tabela 11 apresenta uma comparação dos resultados com dados da literatura sobre compósitos poliméricos de mesma matriz contendo diferentes proporções de fibras longas.

Tabela 11 - Comparação dos resultados de tração com a literatura

Composições (%)	Resistência à Tração (MPa)	Fonte
5% F. de Envira Cheirosa	62,69 ± 3,67	Este trabalho
30% F. de Juta	56,58 ± 18,08	(Silva, 2014)
20% F. de Envira Preta	42,83 ± 2,39	(Branco, 2022)
10% F. de Malva	33,70 ± 9,10	(Margem, 2013)
10% F. de Babaçu	23,00 ± 1,10	(Guimarães Filho, 2011)

Fonte: Autor, 2025.

Conforme evidenciado na Tabela 11, observa-se que os diferentes tipos de fibras exibiram interações diferenciadas com a matriz polimérica, resultando em comportamentos mecânicos distintos nos ensaios de tração. Ressalta-se que, o compósito contendo 5% de fibra de envira cheirosa apresentou desempenho mecânico superior em relação aos demais, com uma resistência à tração de 62,69 MPa. Esse aumento na resistência pode ser atribuído à eficiente dispersão da fibra na matriz polimérica e ao aprimoramento das condições do processo de fabricação, por meio da compressão, que favoreceram a adequada interface fibra-matriz e a transferência de carga.

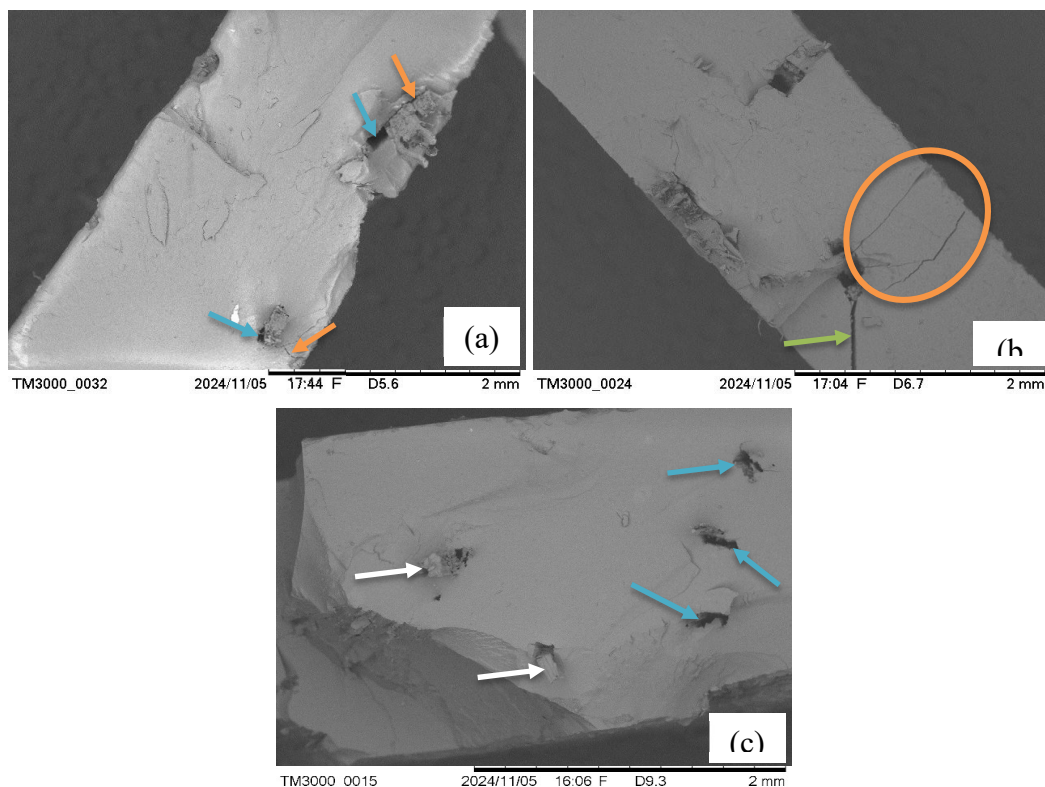
É importante destacar que, apesar de estar presente em menor proporção, a fibra de envira cheirosa demonstrou um aumento relevante na resistência à tração, variando entre 10% e 45% de aumento em comparação com fibras convencionais, como malva (*Urena Lobbata* Linn.) e juta (*Corchorus capsularis*). Quando comparada a fibras de características similares, seja em termos de aparência ou método de extração, como a envira preta (*Bocageopsis multiflora*), a fibra de envira cheirosa apresentou superioridade, com um incremento superior a 30% em resistência à tração.

Além disso, o compósito contendo fibra de envira cheirosa demonstrou desempenho superior em relação ao compósito reforçado com fibra de babaçu (*Attalea speciosa*), mesmo após este ter sido submetido a tratamentos químicos, como a mercerização, que geralmente é realizado para promover o aumento da resistência mecânica. Ainda assim, a fibra de envira cheirosa superou a de babaçu em mais de 60% em termos de resistência à tração, evidenciando seu excelente desempenho sem a necessidade de tratamentos químicos adicionais.

4.2.3.1 Análise Fractográfica dos Compósitos

Por meio da análise da superfície de fratura de um material, utilizando o MEV, foi possível observar e caracterizar a presença de imperfeições, como vazios, bolhas e trincas, e correlacioná-las aos mecanismos de falha e suas possíveis causas. A Figura 34 apresenta a microscopia da superfície de fratura dos compósitos de fibras curtas de envira cheirosa após o ensaio de tração.

Figura 34 - Análise fractográfica do compósito com fibras curtas com 1% (a), 3% (b) e 5% (c)



Fonte: Autor, 2025.

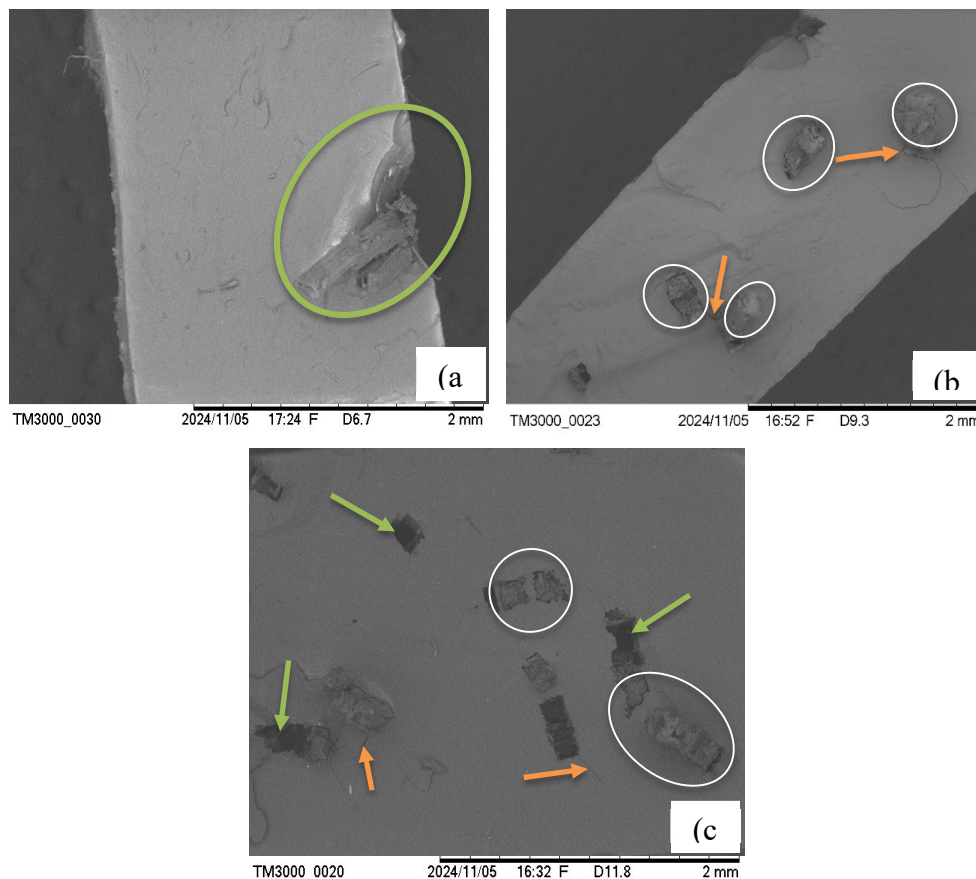
Na superfície de fratura do compósito com 1% de fibras curtas, Figura 34 (a), observam-se pequenas trincas (setas laranjas) e vazios (setas azuis), que podem indicar fragilidades no material. Esses defeitos sugerem que o compósito apresenta pontos de concentração de tensão, os quais reduzem a resistência mecânica e facilitam a propagação de trincas quando solicitados mecanicamente (Bezerra, 2022).

No compósito com 3% de fibras curtas, Figura 34 (b), a fratura é mais acentuada (seta verde), com evidências de microtrincas e falhas que seguem uma direção preferencial (círculo laranja). Esse padrão indica que o material sofreu uma fratura frágil, caracterizada pela rápida propagação das falhas ao longo do plano de fratura. Embora as trincas sejam um mecanismo

natural de falha em materiais submetidos a cargas, a presença de imperfeições, como microtrincas e falhas direcionais, influencia negativamente a resistência mecânica do compósito. Essas imperfeições podem estar associadas ao método de fabricação, especialmente à distribuição das fibras na matriz durante o processo de fabricação (Campos, 2020). Na fratura do compósito com 5% de fibras, Figura 34 (c), observa-se a presença de vazios (setas azuis) além de fibras sacadas (setas brancas), possivelmente indicativos do fenômeno “*pull-out*”.

No entanto, nota-se o aparecimento de fibras fraturadas (círculos brancos), o que sugere que essas fibras, embora parcialmente, apresentaram boa interface fibra/matriz, aumentando a resistência à tração à medida que se incrementa a fração mássica de fibras na matriz. Quando a fenda se propaga na direção normal da fibra, estas se separam da matriz, resultando na ruptura completa do compósito. Esse processo ocorre sob carregamento de tração quando a tensão ou a deformação aplicada excede o limite máximo suportado pelas fibras. Em outras palavras, as fibras fraturam ao atingir sua capacidade máxima de resistência ou alongamento (Veiga, 2019). A Figura 35 demonstra a microscopia da superfície de fratura dos compósitos de fibras longas de envira cheirosa após o ensaio de tração.

Figura 35 - Análise fractográfica do compósito com fibras longas com 1% (a), 3% (b) e 5% (c)



Na Figura 35 (a), com 1% de fibra longa, observa-se uma superfície de fratura com presença de cavidades e regiões onde a fibra se deslocou na matriz (círculo verde), rompendo-se parcialmente. Durante a fratura, pode ocorrer a separação entre a matriz e as fibras devido à propagação de fendas paralelas às fibras. Nesse processo, as ligações químicas ou secundárias entre as fibras e a matriz são rompidas. Esse tipo de fratura é comum quando as fibras são fortes e a matriz é relativamente frágil (Cordeiro, 2021).

Nas fraturas dos compósitos com 3% e 5% de fibra longa, mostradas nas Figuras 35 (b) e (c), respectivamente, observa-se a presença de pequenas trincas (setas laranjas) e um melhor acabamento e compactação das fibras na superfície de fratura, com predominância de fibras rompidas (círculos brancos) e aderidas à matriz, além de baixa ocorrência de defeitos e vazios. Esse comportamento indica uma boa adesão entre fibra e matriz, o que contribui para um desempenho mecânico superior em tração (Lazarini, 2020).

Por fim, na Figura 35 (c), são visíveis crateras resultantes do arranque parcial ou total das fibras da matriz (setas verdes), caracterizando o fenômeno “*pull-out*”. Esse tipo de fratura é comum em materiais de fibras contínuas e é um dos mecanismos de fratura mais recorrentes em compósitos de fibras com desempenho significativo (Veiga, 2019).

5 CONCLUSÕES

A análise morfológica das fibras demonstrou uma superfície predominantemente lisa, feixes de fibrilas e algumas deformações. Quanto à massa específica da fibra, o valor obtido foi de $1,154 \text{ g/cm}^3$, consistente com dados da literatura para fibras vegetais, reforçando sua aplicabilidade em materiais de menor densidade.

Nos ensaios físicos, foi observada uma relação direta entre o aumento da fração mássica de fibras e o incremento da porosidade aparente e da absorção de água. Esses resultados indicam a necessidade de um controle das condições de fabricação para evitar impactos na durabilidade dos compósitos.

Na flamabilidade, os compósitos com 5% de fibras longas apresentaram o melhor desempenho, mostrando maior resistência à propagação de chama. Já no ensaio de tração, os compósitos com 5% de fibras longas também registraram a maior tensão de ruptura, destacando a eficiência da orientação das fibras e a adesão matriz/reforço como fatores críticos para maximizar as propriedades mecânicas, a análise estatística por ANOVA validou a significância dos resultados experimentais, consolidando a eficácia da metodologia empregada e destacando a influência positiva do aumento da fração mássica de fibras na maioria das propriedades avaliadas.

Por fim, a análise fractográfica evidenciou diferentes mecanismos de falha, como trincas, fraturas, porém com ausência de bolhas resultante da compressão no processo fabricação.

Conclui-se que as fibras de envira cheirosa são uma alternativa promissora para o desenvolvimento de compósitos poliméricos, proporcionando uma combinação atraente de eficiência e desempenho mecânicos. Dessa forma, tais resultados abrem caminho para aplicações comerciais da fibra de envira cheirosa em compósitos bem como para estudos que possam explorar ainda mais as características deste material.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

- Analisar o comportamento mecânico de compressão e flexão de compósitos reforçados com fibra de envira cheirosa, comparando-os a compósitos com fibras sintéticas e vegetais.
- Investigar o comportamento de outras frações mássicas de fibras de envira cheirosa buscando analisar a saturação da matriz poliéster.
- Investigar o efeito da mistura de fibras de envira cheirosa com resíduos industriais em compósitos híbridos, buscando equilibrar propriedades mecânicas com sustentabilidade.
- Avaliar a tração da fibra de envira cheirosa a fim de analisar suas propriedades mecânicas, como a resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Nelson D. N. S.; SILVA, I. G. F.; BARBOSA, M. A. **Materiais Compósitos: Análise e Propriedades**. São Paulo: **Editora Blucher**, 2018.

ASM handbook, 10th edition., vol. 21. **Materials Park**, Ohio: ASM International, 2001.

ASTM D 2734 – Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2009.

ASTM D 570 – Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1998.

ASTM D 635 – “Standard Test Method for Rate of Burnin or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position”. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2022.

ASTM D 792 – Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2008.

BARBOSA, K. S. L. **Influência granulométrica de partículas de rejeito mineral e adição de fibras vegetais nas propriedades dos compósitos poliméricos**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

BEZERRA, Ana Flávia Câmara. **Desenvolvimento de compósito poliéster insaturado/fibras vegetais (caroá e coco)**. 2022.160 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2022.

BIOPDI. **Máquina Universal de Ensaios**. Disponível em: <https://biopdi.com.br/ensaios-mecanicos/maquina-universal-de-ensaios/>. Acesso em: 29 Jun. 2024.

BOARETTO, Joel. **Reforço termomecânico em compósitos de matriz epóxi por nanoestruturação causada pela incorporação de ppm em nanopartículas de Nb₂O₅: evidência experimental e modelamento da interação partícula-matriz**. 2023. 126f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

BRANCO, Nély Thatiane. **Estudo do comportamento em tração de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de envira (Bocageopsis multiflora)**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2022.

CAMPOS, Kamila Amato de. **Fractografia quantitativa: análise do comportamento fractal de fratura em compósitos carbono/epóxi, por processamento digital de imagens**. 2020. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.

CALLISTER, JR. W.; RETHWISCH, D. **Ciência e tecnologia de materiais: Uma introdução**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CANDIDO, Verônica Scarpini. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. 2014. 188f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

CANEVAROLO, S. V. JR. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos engenheiros**. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CHAWLA, K. K. **Composite materials: science engineering**. Berlim: Springer Nature, 2001. v. 2. DOI: <https://doi.org/10.9773/sosei.48.213>.

Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). **Resolução nº. 675** - "Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos e dá outras providências." Diário Oficial da União, Seção 1, página 13534.

CORDEIRO, Luciano. **Filmes compósitos dúcteis de polietileno e folhas celulósicas obtidos por termoprensagem - sem aditivos/compatibilizantes/modificações**. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75134/tde-11012022-104253/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

COSTA, João Paulo de Campos da. **Desenvolvimento de sistema de irradiação por feixe de elétrons e sua aplicação na modificação de materiais semicondutores e não-metálicos**. 2023. 95f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

COSTA, Mardoqueu Martins da. Técnicas de Caracterização de Polímeros. **Nanotecnologia Aplicada a Polímeros**. p. 532, 2022.

COSTA, Deibson Silva da. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais**. 2016. 227f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

DIAS, Raimundo Otávio Nogueira. **Desenvolvimento de um autoclave para cura de materiais compósitos**. 2017. 98f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

DOMINGOS, Yldeney Silva. **Avaliação do envelhecimento ambiental do compósito polimérico na estação de tratamento de efluentes do sistema central de Natal - RN - Brasil**. 2017. 122f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Instituto Federal de Educação Ciência E Tecnologia Do Rio Grande Do Norte, Natal, 2017.

EL BANNA, W. R., **Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (Musa Sapientum, Musacae)**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais - PRODERNA) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

FARIA NETO, A. R. F.; FREITAS, F. H. C.; FURTADO, A. E. FUKUGUACHI, C. S.; PEREIRA, M. S.; ABDALLA, A. J. **Desenvolvimento de aços avançados de alta resistência na indústria automobilística: importante alternativa para uma maior eficiência energética**. 2021. EDITORA Científica, cap. 13, p. 194-215. DOI: 10.37885/210705258.

FARUK, O.; TJONG, J.; SAIN, M. **Lightweight Materials: High-Performance Applications**. 2019.

FCI, Chemical Industry. **O que é HAND LAY-UP e Suas Vantagens**, 09 Fev. 2024. Disponível em: <https://fci.ind.br/sem-categoria/oque-e-hand-lay-up-e-suas-vantagens/>. Acesso em: 27 Jun. 2024.

FERREIRA, Décio. **Projeto e desenvolvimento de peça em compósito obtida em moldagem por transferência de resina para aplicação em telescópios**. 2016. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

FLORA E FUNGO DO BRASIL. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: <https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/FB117263>. Acesso em: 27 jun. 2024.

FRANCUCCI, G., RODRÍGUEZ, E. S., VÁSQUEZ, A. Experimental study of the compaction response of jute fabrics in liquid composite molding processes. **Journal of Composite Materials**. n. 46, p.155-167, 2011.

FRANÇA, Conceição Linda de. **Acervos de obras de arte em plástico: perfil das coleções e propostas para conservação destes bens**. 2010. 153f. Dissertação (Mestrado em Artes Visuais) - Escola de Artes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FREITAS, A. C. P.; LIMA, G. F. O.; OLIVEIRA, J. D. D. V. **Compósitos: Fundamentos e Aplicações**. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

FURUKAVA, Marciano. **Sinterização de aço inoxidável reforçado com partículas nanométricas dispersa de carbetto de nióbio - NbC**. 2007. 163f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

GARBIN, Paula Libardi. **Avaliação do uso de aditivos antichama halogenados e não halogenados na flamabilidade e nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster/fibra de vidro**. 2020. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2020.

GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

GILBERT M. **Brydsoy's plastics waterials**. Boston, MA: Elsevier, 2016.

GOOGLE, INC. **Google Maps**. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/search/nordeste+paraense/>. Acesso em: setembro de 2024.

GONÇALVES, Raul Furtado; OLIVEIRA, Jorge. **Aspectos taxonômicos e etnobotânicos da família Annonaceae no município de Barcarena, Pará.** 2001.

GUIMARÃES FILHO, M. A. S. **Avaliação mecânica de compósitos de resina poliéster reforçada com fibras longas de babaçu antes e após a Mercerização.** [Trabalho de Conclusão de Curso]. Pará: Universidade Federal do Pará; 2011.

HASNAIN, Md; NAYAK, A.; ALKAHTANI, S.. **Polymeric and Natural Composites: Materials, Manufacturing and Biomedical Applications.** Springer, 2021.
JOSEPH P.V. **Composites Science and Technology**, 62, pp. 1357–1372, 2002.

LAZARINI, Rafael Gouveia. **Pré-tratamento de fibras de bagaço de cana-de-açúcar e seu uso em altos teores em compósitos com polipropileno via mistura termocinética.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12656>.

LEE, Jeremy Kong Yoong *et al.* Polymer-based composites by electrospinning: Preparation & functionalization with nanocarbons. **Progress in Polymer Science**, [S.L.], v. 86, p. 40-84, 2018.

LEVY NETO, F.; PARDINI L.C., 2016. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia.** 2ª ed. São Paulo: Blucher.

LIMA, Haianny Beatriz Saraiva. **Avaliação da resistência à chamas de compósitos poliéster isoftálico insaturado com resíduo de lama vermelha e fibra de bambu.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2022.

LINS NETO, João Tertuliano de Almeida *et al.* **1912 – 2012 Cem anos da crise da borracha: do retrospecto ao prospecto.** Belém: CORECON-PA, 2013.
LOBO, Raquel de Moraes. **Reconstrução tridimensional de superfícies de fraturas de materiais compósitos do tipo CFRP.** 2009. 87f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear de Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MAFRA, M. P. A. **Caracterização em tração e impacto de compósitos de fibras de Pente de Macaco (Apeiba tibourbou aubl.), Mutamba (Guazuma ulmifolia) e Pindaíba (Guatteria poeppigiana) confeccionados em matriz poliéster.** [Dissertação de Mestrado]. Pará: Universidade Federal do Pará; 2017.

MARGEM, J. I. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva.** [Tese de Doutorado]. Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense; 2013.

MARINUCCI, G., 2011, **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia.** 1. ed. São Paulo: Artliber Editora.

MARTINS NETO, José Antônio. **Desempenho mecânico de compósitos híbridos de fibras naturais e poliéster não saturado.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MARTINS, Danilo; MIGLIORINI, Lanzoni Fernanda; TEODORO, Ricardo Bruna Kelcilene; FACURE, Moreira Henrique Murilo; SOUZA, Daniel. Nanocompósitos poliméricos. In: SANFELICE, R. C; PAVINATTO, A.; CORRÊA, D. S. (org.). **Nanotecnologia aplicada a polímeros. 1 ed.** São Paulo: Blucher, 2022. 133-169.

NOGUEIRA, C. L.; MARLET, J. M. F.; REZENDE, M. C. Processo de Obtenção de Pré-impregnados Poliméricos Termoplásticos Via Moldagem por Compressão a Quente. 2009. Divisão de Materiais - Instituto de Aeronáutica e Espaço - Centro Técnico Aeroespacial. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, P. 18-27. 2009.

NUNES, Felipe Affonso. **Caracterização e fabricação de compósito com re-sina epóxi verde reforçados com fibras de coco.** 2024. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Federal do Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2024.

NUNES, Kamila Silva. **Influência da lama vermelha e fibra de curauá *Ananas lucidus*, Mill, nas propriedades físicas e mecânicas em compósitos de poliéster isofitálico.** 2015. 194f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

PANORAMA COLETIVO. **A Romantização Da Pobreza e a Casa De Taipa.** Disponível em: <https://panoramacoletivo.com/2019/08/09/a-romantizacao-da-pobreza-e-a-casa-de-taipa/>. Acesso em: 29 Jun. 2024.

PEIXOTO, Daniel Lourenço. **Tipos de materiais compósitos.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

PINHEIRO, I. F. **Biocompósitos poliméricos de poli (butileno adipato-co-tereftalato): PBAT e fibra natural de Munguba, nativa da Amazônia (*Pseudobombax munguba*).** [Dissertação de Mestrado]. São Paulo: Universidade Federal do Campinas; 2012.

POTIGUARA, Raimunda Conceição de Vilhena *et al.* **Plantas fibrosas:** levantamento botânico na microrregião do Salgado. Belém: MPEG-PA, 1987.

QUINTÃO, Vinícius de Oliveira. **Análise estatística do comportamento mecânico de um compósito de matriz metálica de alumínio reforçado com resíduo de minério de manganês.** 2022. 40f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

RIBEIRO, Miguel da Fonseca Amaral. **Desenvolvimento de placa de sinalização em plástico reforçado com fibras de sisal e carga de rejeito de corte de pedras ornamentais.** 2005. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2005.

RIBEIRO, M. M.; PINHEIRO, M. A.; RODRIGUES, J. D. S.; RAMOS, R. P. B.; CORREA, A. D. C.; MONTEIRO, S. N. **Comparison of Young's Modulus of Continuous and Aligned Lignocellulosic Jute and Mallow Fibers Reinforced Polyester Composites**

Determined Both Experimentally and from Theoretical Prediction Models. 2022. Acesso em 7 mai. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/3/401>.

RIBEIRO, L. M. *et al.* **Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (palf).** *Holos*, v. 1, p. 115-126, 2013.

RATNA, D. **Handbook of Thermoset Resins.** Smithers. Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, United Kingdom. 2009.

ROCHA, I. G. **Influência do retardante de chamas nas propriedades mecânicas e flamabilidade em compósitos poliméricos de epóxi/fibra de curauá.** 2015. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SAHA, Prosenjit *et al.* A brief review on the chemical modifications of lignocellulosic fibers for durable engineering composites. **Polymer Bulletin**, Pune, v. 73, p. 587-620, ago. 2022.

SAKAMOTO, C.. Poliéster insaturado. **Silaex**, 23 Mar. 2018. Disponível em: <https://silaex.ind.br/resina-poliester>. Acesso em: 27 Jun. 2024.

SANTANA, Patricia das Neves de Alameida. **Estudo de matriz cimentícia reforçada com curauá (*Ananas comosus var. erectifolius*) e submetida à cura em atmosfera com excesso de dióxido de carbono (CO₂).** 2016. 127f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

SANTOS, E. E. S., FERREIRA V. H., DANIEL, B.T., MENDES, B.H.A, COSTA D. S. Análise da variação da granulometria da lama vermelha nas propriedades dos compósitos. **XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, 2019.

SANTOS, A. J. G. **Caracterização de material compósito incorporado com fibras de bambu (*bambusa vulgaris*) e resíduos sólidos industriais para utilização como componente estrutural para a construção civil.** 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

SILVA, Fernanda Monique da. **Caracterização mecânica de um compósito de matriz poliéster insaturado reforçado com fibras de sisal em diferentes orientações utilizando correlação digital de imagens.** 2018. 112f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de ciências exatas e naturais, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2018.

SILVA, I. M.; Lopes, J.C.; Silva, L.V.; Bazante, M.L. 2020. **Annona in Flora do Brasil 2020.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB117263>>. Acesso em: 06 jul. 2024.

SILVA, Lucas Rafael de Oliveira. **Desenvolvimento de sistemas microparticulados contendo extrato de própolis marrom da região de União dos Palmares (Alagoas).** 2023. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Farmácia) - Instituto de Ciências Farmacêuticas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

SILVA, Márcio Marques da. **Desenvolvimento e implementação de um sistema integrado para o projeto, otimização e fabricação de peças através do processo de filamento winding**. 2015. 213f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SILVA, I. L. A. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. [Tese de Doutorado]. Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense; 2014.

SINGH, A.; GOVINDARAJAN, T. R. G. **Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2016.

SOUZA, Vinícius Zancanelli Bôsko. **Desenvolvimento de compósito cerâmico à base de Al_2O_3 - Y_2O_3 com gradiente composicional**. 2022. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2022.

SOUZA, Y. G. **Obtenção e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com bagaço de cana-de-açúcar**. [Trabalho de Conclusão de Curso]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2021.

TAVARES, Arthur Ruan Dias. **Caracterização mecânica e morfológica de compósitos com fibras de vidro e palha da costa (*raphia taedigera mart*)**. 2018. 73f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

TAVARES, R. N.; AQUINO, E. M.. F. **Controle da moldagem a vácuo melhora a qualidade das peças de plásticos reforçado**. Plástico Industrial. Vol 04, 2009.

THOMAS, S.; POTHAN, Laly A. **Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: From Macro to Nanoscale**. Philadelphia: Elsevier, 2016.

TRAMONTIN, S. M. K.; VUROBI JUNIOR, S.; GRANADO, C. J. F.; PIANARO, S. A.; SILVA, J. L. G.; DELARCO, A. P.; BERG, E. A. T. **Influência da razão de aspecto das fibras de pan estabilizadas oxidativamente nos compósitos de fricção**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciencia dos Materiais - CBECIMAT. Natal, 2002. Disponível em: Acesso em: 23 jul. 2024.

UNDERWRITERS LABORATORIES. **UL 94 - Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances**. 7th ed. Northbrook: UL Standards, 2023.

VAN VLACK, Lawrence Hall. **Corrosão dos metais. Princípios de Ciências e Tecnologia dos Materiais**, 1970. Rio de Janeiro, RJ, p.465-494.

VEIGA, Natália Ariceira. **Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras de juta**. 2019. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2019.

VIEIRA, Carlos Eduardo Fernandes. **Ecocompósitos multiescala para componentes de automóveis**. 2023. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2023.

YURDANOVA, V. N. **Is Plastic the Problem, or Recycling.** 2013. Universidade Federal da Sibéria.