



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

NÉLY THATIANE BRANCO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ
POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS DE ENVIRA (*Bocageopsis multiflora*)**

ANANINDEUA – PA
2022

NÉLY THATIANE BRANCO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ
POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS DE ENVIRA (*Bocageopsis multiflora*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

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

NÉLY THATIANE BRANCO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ
POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS DE ENVIRA (*Bocageopsis multiflora*)**

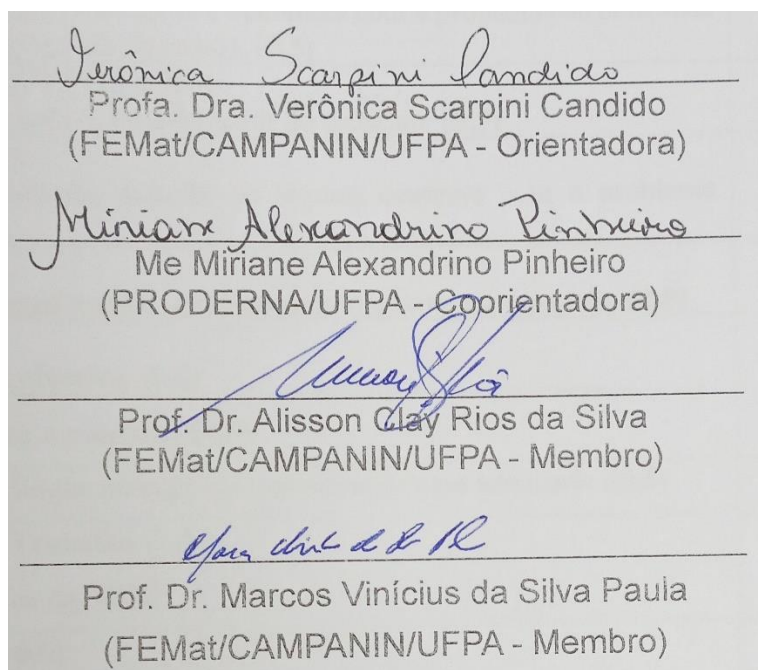
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

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

DATA DA AVALIAÇÃO: 08 / 07 / 2022

CONCEITO: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA:



ANANINDEUA – PA
2022

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

B816e Branco, Nély Thatiane.
ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORÇADOS
COM FIBRAS DE ENVIRA (*Bocageopsis multiflora*) / Nély
Thatiane Branco. — 2022.
72 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Verônica Scarpini Candido
Coorientador(a): Prof^a. MSc. Miriane Alexandrino
Pinheiro

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de
Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais,
Ananindeua, 2022.

1. Materiais compósitos. 2. Fibras de Envira. 3.
Caracterização mecânica. 4. Matriz poliéster. I. Título.

CDD 620.11

Aos meus filhos Ana Luiza, Tiago Miguel e Lino Gabriel, dedico a vocês o seu irmão mais novo de tinta e papel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me permitido chegar a esse tão sonhado momento. Só eu e ele sabemos as dificuldades que atravessei e de todos os momentos que pensei em desistir de tudo.

Agradeço em especial a minha mãe Marinelza Branco, pois foi seu colo, apoio, orações e amor incondicional que me permitiram lutar por esse objetivo. Obrigada aos meus irmãos Luiz Henrique e Matheus, e em especial a minha irmã Cássia Maria por ser meus olhos e coração para como meus filhos.

A meus filhos Ana Luiza, Tiago Miguel e Lino Gabriel, por compreender as minhas ausências e sempre me recompensar com amor e carinhos infinitos.

Ao meu melhor amigo Eimar Júnior meu agradecimento por tantas vezes que recorri a sua ajuda, seja numa palavra de consolo, num abraço demorado ou nas risadas que me faziam esquecer um pouco as preocupações, sem seu apoio aqui nada disso seria possível.

A meu amigo de caminhada Rodolfo Lima, obrigada por dividir comigo os momentos de felicidades e desafios. Aos meus amigos Edwin, Jéssica e Danny levarei vocês em meu coração não importa onde eu esteja.

Agradeço à minha coorientadora e amiga Miriane Pinheiro, por ter me incentivado a entrar na pesquisa com fibras, pelo carinho a cada conhecimento repassado.

A minha orientadora Prof. Dr^a. Verônica Scarpini, por toda, ajuda, paciência, dedicação e sabedoria transmitida.

Ao Grupo de Pesquisa de Materiais Compósitos, Damares Nascimento, Olívia Leite, Paulo Aranha e Avener Andrade, meu agradecimento por fazerem essa minha final de graduação mais leve.

A todos meus professores do curso que contribuíram para que minha formação acadêmica fosse possível.

Ao Laboratório de Práticas Tecnológicas da Universidade Federal do Pará (UFPA) Campus Ananindeua.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM), da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Meu agradecimento de todo coração.

“Nenhuma engenharia constrói caráter, mas com caráter se faz os melhores engenheiros”.

Jordan Lucas

RESUMO

A procura de novos materiais que englobam elevadas propriedades mecânicas, essas aliadas à sustentabilidade vem crescendo de forma exponencial. Nesse sentido, destacam-se os materiais compósitos, dentre eles os de matriz polimérica com a utilização de fibras vegetais, como a Envira (*Bocageopsis multiflora*), uma espécie abundante na região Amazônica. Desta forma, este trabalho tem por objetivo caracterizar a fibra de Envira por microscopia óptica para qual apresentou uma superfície lisa, determinar a massa específica, analisar a termogravimetria e produzir compósitos com reforço de fibras de Envira. Para o processo de confecção dos compósitos foram produzidos de forma individual em molde de silicone com a incorporação de 10, 20 e 30% de volume de fibra. O valor médio de densidade da fibra foi $0,23 \text{ g/cm}^3$ e o maior número de fibras se encontram no intervalo de 0,60 mm a 0,79 mm. A TG revelou que a fibra de Envira apresentou estabilidade em temperaturas de até $320 \text{ }^\circ\text{C}$. As propriedades mecânicas dos compósitos foram avaliadas por ensaio de tração, realizados de acordo com a norma ASTM D 638. Os resultados obtidos mostram que a incorporação das fibras em matriz poliéster, elevou a resistência à tração em relação à resina pura. Onde o melhor resultado obtido foi para incorporação de 30% em volume de fibra o valor obtido para essa propriedade foi de 51,41 MPa. Demonstrando que a adição de fibras de Envira revelou-se promissor para sua utilização em compósitos poliméricos de matriz termofixa.

Palavras – chave: Materiais compósitos, Fibras de Envira, Caracterização mecânica, Matriz poliéster.

ABSTRACT

The demand for new materials that encompass high mechanical properties, allied to sustainability, has been growing exponentially. In this sense, composite materials stand out, including those with a polymer matrix using plant fibers, such as Envira (*Bocageopsis multiflora*), an abundant species in the Amazon region. Thus, this work aims to characterize the Envira fiber by optical microscopy for which it presented a smooth surface, determine the specific mass, analyze the thermogravimetry and produce composites reinforced with Envira fibers. For the process of making the composites, they were produced individually in a silicone mold with the incorporation of 10, 20 and 30% by volume of fiber. The average fiber density value was 0.23 g/cm³ and the largest number of fibers are in the range of 0.60 mm to 0.79 mm. TG revealed that the Envira fiber showed stability at temperatures up to 320 °C. The mechanical properties of the composites were evaluated by tensile testing, performed according to ASTM D 638. The results obtained show that the incorporation of fibers in polyester matrix, increased the tensile strength in relation to the pure resin. Where the best result was for incorporation of 30% by volume of fiber, the value obtained for this property was 51.41 MPa. Demonstrating that the addition of Envira fibers proved to be promising for its use in thermosetting matrix polymeric composites.

Keywords: Composite materials, Envira fibers, Mechanical characterization, Polyester matrix.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fase de um material compósito	17
Figura 2 - Classificação dos materiais compósitos.	18
Figura 3 - Classificação de materiais compósitos conforme o tipo de matriz	19
Figura 4 - Estrutura molecular da resina poliéster ortoftálica (a), isoftálica (b) e teraftálica (c).	22
Figura 5 - Estrutura molecular da celulose	27
Figura 6 - Estrutura molecular da hemicelulose	27
Figura 7 - Estrutura química da lignina e respectivas unidades	28
Figura 8 - Estrutura de uma fibra vegetal	29
Figura 9 - Árvore de Envira	31
Figura 10 - Utilização da FLNS	32
Figura 11 – (a) Extração das tiras de fibra; (b) Árvore 18 meses após extração	32
Figura 12 - Influência da orientação da fibra e sua concentração	33
Figura 13 - Extração da fita de fibras de Envira	37
Figura 14 - Resina poliéster e catalisador	37
Figura 15 - Fibras de Envira desfiadas	38
Figura 16 - Microscópio ótico e software Future Winjoe®	39
Figura 17 - Balança analítica	39
Figura 18 - Envira imersa em água destilada	41
Figura 19 - Molde de silicone	43
Figura 20 - Dimensões (mm) dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração	42
Figura 21 - Processo de preparação dos corpos de prova	43
Figura 22 - Máquina de ensaio: (a) Vista total frontal da máquina; (b) vista frontal da máquina no engate do corpo de prova (c) área de engate do corpo de prova	44
Figura 23 - Fibra de Envira	48
Figura 24 - Relação entre o número de fibras e o comprimento	49
Figura 25 - Relação entre densidade e intervalo de diâmetro	50
Figura 26 – Termograma da fibra de Envira	51
Figura 27 - Aspecto macroscópico da região da fratura dos corpos de prova após ensaio de tração	52
Figura 28 – Relação da resistência à tração dos compósitos de matriz poliéster reforçada com fibra de Envira	53
Figura 29 - Módulo de elasticidade dos compósitos de matriz poliéster reforçado com fibra de Envira	56
Figura 30 - Análise de variância da deformação dos compósitos reforçado com fibras de Envira	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Principais características e limitações das resinas termorrígidas	21
Tabela 4.2 - Propriedades físicas e mecânicas de típicos de resina poliésteres insaturados	24
Tabela 4.3 - Principais vantagens e desvantagens da fibra natural e sintética	25
Tabela 4.4 - Fibras vegetais brasileiras mais estudadas e utilizadas	30
Tabela 4.5 - Vantagens e desvantagens da utilização das fibras naturais em compósitos	30
Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados na análise de variância (ANOVA)	45
Tabela 6.1 - Resultados das propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração	53
Tabela 6.2 - Análise de variância da resistência à tração dos compósitos reforçados com fibras de Envira	54
Tabela 6.3 - Teste de Tukey da resistência à tração dos compósitos	55
Tabela 6.4 - Análise de variância do módulo de elasticidade dos compósitos reforçados com fibras de Envira	57
Tabela 6.5 - Teste de Tukey do módulo de elasticidade	58
Tabela 6.6 - Análise de variância da deformação dos compósitos reforçados com fibras de Envira	59
Tabela 6.7 - Teste de Tukey da deformação	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das fibras	24
Quadro 2 - Propriedade das fibras naturais e fibras sintéticas	26
Quadro 3 - Composições formuladas. P – Poliéster, FE - Fibra de Envira	43

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3.	JUSTIFICATIVA	16
4.	REFERENCIAL TEÓRICO	17
4.1	Materiais compósitos	17
4.2	Resinas poliméricas	20
4.2.1	Resina poliéster	22
4.3	Fibras naturais e sintéticas	24
4.4	Fibras lignocelulósicas	26
4.4.1	Fibras de Envira	31
4.5	Materiais compósitos reforçados com fibras	33
4.6	Materiais reforçados com fibras naturais	35
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	37
5.1	Materiais utilizados	37
5.1.1	Fibras de Envira	38
4.1.1.1	Beneficiamento da matéria-prima	38
5.2	Metodologia	38
5.2.1	Morfologia	38
5.2.1.1	Caracterização óptica e dimensional	38
5.3	Determinação da densidade	39
5.4	Análise Termogravimétrica	40
5.5	Compósitos	41
5.6	Ensaio mecânico	43
5.6.1	Análise estatística	45
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
6.1	Caracterização óptica e dimensional	48
6.2	Determinação da densidade	50
6.3	Análise Termogravimétrica	51
6.4	Compósitos	52
6.4.1	Ensaio mecânicos	52
6.4.1.1	Ensaio de tração	52
6.4.1.2	Módulo de elasticidade	56
6.4.1.3	Deformação	58
7.	CONCLUSÃO	61
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

A conscientização sobre as questões relacionadas ao desenvolvimento sustentável e redução de impactos ambientais serve como precursora para o desenvolvimento de novos materiais, que sejam provenientes de fontes naturais e renováveis que gerem menos impactos ambientais (TURKI *et al.*, 2018; LAUER *et al.*, 2019).

A busca por novos materiais que agreguem requisitos como: elevadas propriedades mecânicas e sustentabilidade vem crescendo de forma exponencial. Em vista disso, os materiais compósitos vêm ganhando lugar de destaque no campo da engenharia de materiais. Segundo CALLISTER (2021), um compósito é um material multifásico, que pode ser obtido através da melhor combinação das propriedades de ambas as fases constituintes, uma fase matriz e uma fase reforço.

Compósitos reforçados com fibras naturais são materiais ecologicamente corretos e de custos baixos, pois podem ser obtidos mediante o uso adequado dos recursos naturais, sem que haja degradação da floresta e aliando desenvolvimento econômico e social para regiões de cultivo dessas fibras (MARTINS, 2019).

A região Amazônica possui uma ampla variedade de fibras naturais que ainda são desconhecidas, pouco exploradas e estudadas. Dentre os estudos realizados na área de materiais compósitos, é possível constatar que, os compósitos reforçados com fibras naturais são alvo de constantes pesquisas, como em FERREIRA *et al.* (2018) ao estudar a fibra de piaçava mostrou sua eficácia como reforço em compósito. SOUZA *et al.* (2020) ao incorporar fibra de Caranã como reforço em matriz epóxi, observou um material mais resistente. NERY e JOSÉ (2020) ao estudarem a fibra de bananeira com tratamento alcalino constataram uma melhor adesão da fibra e matriz.

Nesse sentido, pode-se destacar a fibra da árvore de Envira ou Embira (*Bocageopsis multiflora*), nativa da mata de terra firme amazônica, onde do seu caule são retiradas as fibras de características longas e resistentes (LORENZI, 1998; LOPES 2020). Suas fibras são usadas tradicionalmente nas comunidades para a fabricação de barbantes, cordas e alguns utensílios para caça (COUTO, 2021).

Portanto, este trabalho tem como objetivo estudar as propriedades mecânicas em tração dos compósitos reforçados com fibras de Envira em matriz poliéster.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo estimar as propriedades mecânicas em tração do compósito reforçado com fibra de Envira com matriz de resina poliéster.

2.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar morfologicamente, fisicamente e termicamente a fibra de Envira;
- Estudar as propriedades mecânicas em ensaio de tração do compósito incorporado com fibra de Envira na composição de 10, 20 e 30% em volume de fibras;

3. JUSTIFICATIVA

As questões ambientais são objeto de muitos estudos e discussões na atualidade. Onde é cada vez maior a busca por materiais ecologicamente corretos, em consonância com as preocupações ambientais e o desenvolvimento sustentável, diante da destruição do meio ambiente causado pelas ações da sociedade.

Diante do panorama da sustentabilidade, a qual preconiza processos de produção que resultem em menos poluentes dispersos na natureza. Este trabalho pode ser justificado em quatro vertentes: ambiental, econômica, social e técnico-científica.

Considerando a abundância da planta Envira, encontrada na Amazônia, sua utilização para reforço em materiais, se faz assertivo. Colaborando para minimizar o impacto ambiental, já que a árvore não é ceifada no processo de coleta dessa fibra. Minimizando assim os impactos ambientais por conta da geração de resíduos.

No âmbito econômico pode-se destacar o baixo valor agregado para a obtenção da fibra. O aspecto social é contemplado pela geração de emprego e renda para as comunidades que realizam o processo de cultivo, coleta e venda desta matéria-prima.

No que tange o aspecto técnico-científico, os resultados gerados serão de suma importância para iniciar os estudos desse compósito reforçado com fibras de Envira, pois ainda não constam na literatura estudos voltados para a utilização da fibra como reforço de materiais compósitos. Justificando-se o presente trabalho para que haja um entendimento do comportamento mecânico deste tipo de material, assim como a interação da resina poliéster com a fibra lignocelulósicas de Envira.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

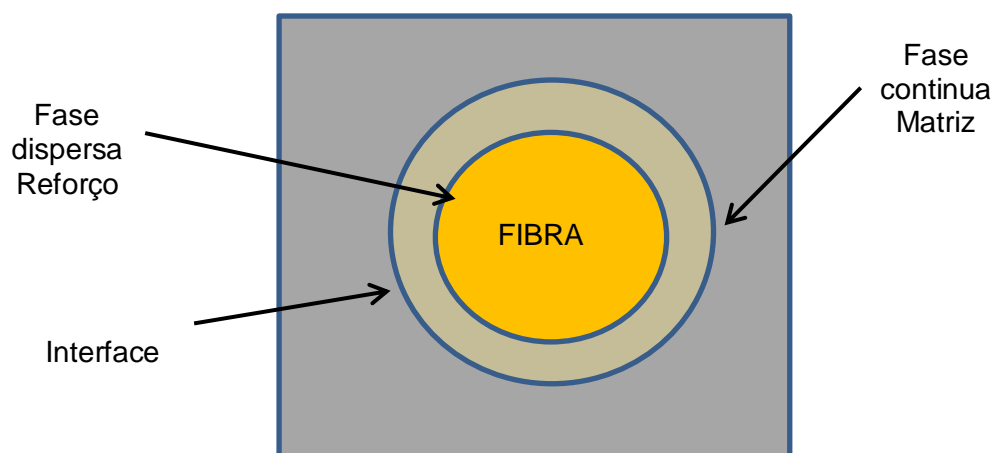
4.1 Materiais Compósitos

Um compósito é constituído por dois ou mais materiais com características físicas e/ou químicas diferentes. A sua estrutura é organizada por duas fases, a matriz e o reforço, separados por uma interface (FORNARI, 2017).

A junção de materiais que apresentam características distintas gera um material que adquire as particularidades de ambos os materiais. Assim a combinação de diferentes tipos de elementos resulta em uma variedade de produtos com melhores propriedades mecânicas, gerando interesses de para vários tipos de indústria como a aviação, automobilista e da construção civil, devido à versatilidade que um compósito pode apresentar (MEOLA *et al.*, 2016).

O material compósito consiste em uma fase dispersa e uma fase contínua. A fase dispersa é a que mantém sua identidade original após o manuseio e/ou durante a aplicação, funcionando como o reforço aditivo ou de carga de preenchimento, sendo distribuída na fase contínua também chamada de matriz como representada na Figura 1. As especificidades finais dos compósitos acontecem com o cruzamento direto das propriedades das fases constituintes, da proporção de cada uma e da interação e adesão das fases, assim como tamanho, formato, distribuição e orientação da fase dispersa (CALLISTER, 2021).

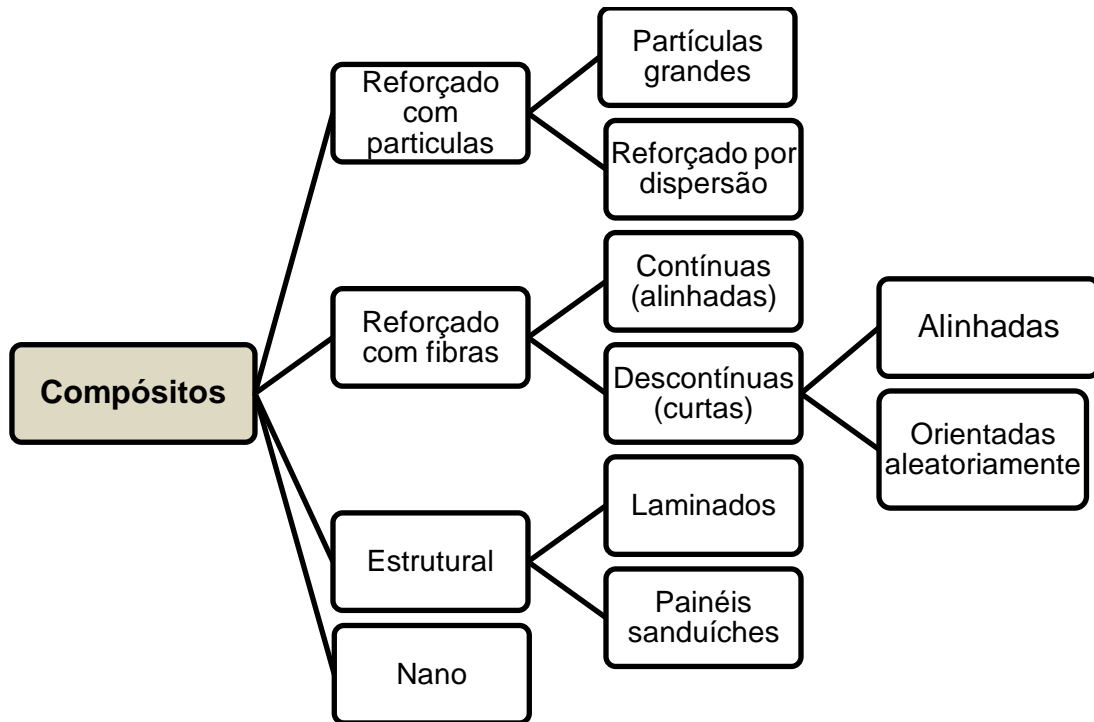
Figura 1- fase de um material compósito.



Fonte: adaptado ASKELAND, 2014.

Segundo Callister (2021) a classificação dos materiais compósitos está dividida em compósitos reforçados com partículas, com fibras, estrutural e nano. Como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Classificação dos materiais compósitos.



Fonte: adaptado CALLISTER, 2021.

A matriz do compósito tem como função sustentar o reforço, protegendo da abrasão e distribuindo a carga que será recebida pelo material. Há vários tipos de matrizes, dentre as mais utilizadas estão, as de matrizes poliméricas, metálicas e cerâmicas (ASKELAND, 2014).

As matrizes poliméricas (MP) são mais utilizadas na fabricação de um compósito. Esse tipo de matriz é constituído por resinas classificadas pelo seu comportamento térmico, podem ser termoplásticas ou termorrígidas, cujo processo de endurecimento ocorre pela secagem física devido a formação de ligações cruzadas, ocorrendo a evaporação dos solventes (NETO E PARDINI, 2016).

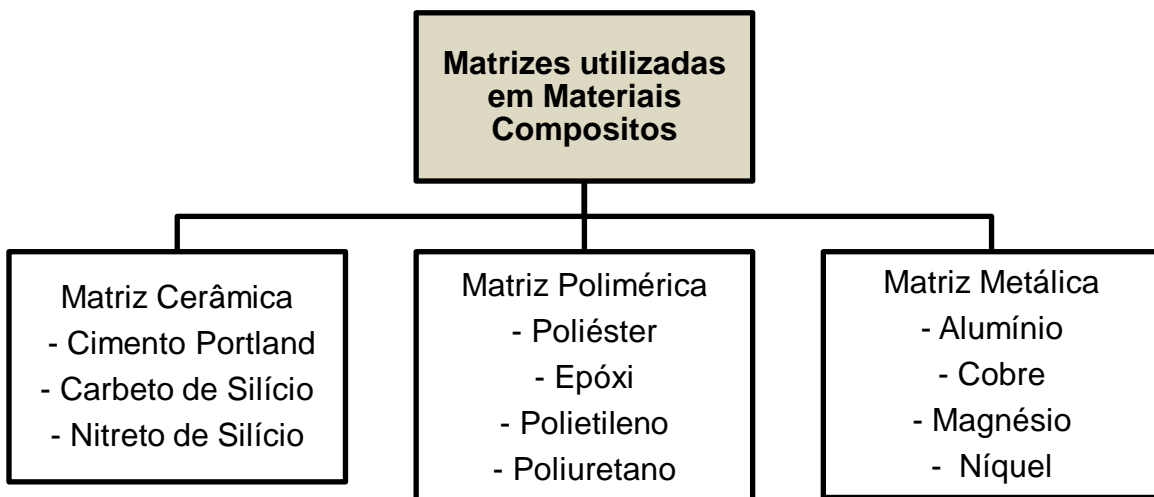
Os compósitos de matriz metálica (CMM) são uma alternativa para a substituição de matriz polimérica. Porém devido seu elevado custo, esse tipo de matriz ficou limitada a poucas áreas, como exemplo: aplicações militares e aeroespaciais.

A matriz metálica mais utilizada é o alumínio, devido a sua alta resistência específica e custo baixo, e o cobre pela sua boa condutividade térmica. Os CMMs

possuem alta resistência mecânica, alta condutividade térmica, melhor resistência à abrasão e a capacidade de serem utilizadas em altas temperaturas quando comparados aos compósitos MPs (NEWELL, 2010).

Outra variação de materiais compósitos são os compósitos de matriz cerâmica (CMC), quando fibras cerâmicas são acrescentadas em uma matriz cerâmica de diferente composição, a tenacidade à fratura do compósito aumenta consideravelmente, enquanto as propriedades de suportar altas temperaturas e ambientes corrosivos são mantidas. Os CMCs podem substituir cerâmicas comuns em aplicações nas quais a tenacidade à fratura seja um requisito importante no compósito (NEWELL, 2010).

Figura 3 - Classificação de materiais compósitos conforme o tipo de matriz.



Fonte: adaptado SOUZA, 2019.

No caso dos compósitos reforçados com fibras cada tipo de arranjo resulta em uma propriedade diferente, dependendo de como as fibras foram dispostas na matriz, que podem ser do tipo contínuo (fibras longas), descontínuas (fibras curtas), particulados, alinhados ou com distribuição aleatória (BRAGA NETO, 2020).

4.2 Resinas poliméricas

A descoberta da primeira resina polimérica ocorreu em 1907 pelo norte-americano Leo Hendrik Baekeland. Que desenvolveu uma resina fenólica em um processo controlado, chamado baquelite (ROSANE, 2018).

As resinas poliméricas mais utilizadas são obtidas a partir de fontes não renováveis, como o petróleo. Dentre essas podem ser citadas as resinas fenólicas, epóxi, poliéster e polipropileno (SILVA, 2020).

Essas resinas podem ser classificadas quanto ao seu comportamento térmico, pode ser termoplásticas e termorrígidas (termofixa). As resinas termoplásticas têm como característica de amolecer e fluir quando expostas condições de temperatura e pressão elevadas, sendo posteriormente solidificada quando essas condições são cessadas, resultando num produto com formas definidas (KNOW, 2021). Esta transformação física é reversível, fusível, solúvel e reciclável. Exemplo: Polietileno (PE), Poliestireno (PS), Poliamida (Náilon) (CANEVAROLO, 2010).

As resinas termorrígidas têm como principal característica a elevada dureza, característica essa adquirida após o seu processo de cura irreversível (CANEVAROLO, 2010; SILAEX, 2020). O processo de cura irreversível que as resinas termorrígidas apresentam está diretamente ligado à formação de ligações cruzadas, tornando-as rígidas, infusíveis e insolúveis (FERREIRA *et al.*, 2017). O baquelite, resina epóxi, alguns tipos de resina poliéster são exemplos dos termorrígidos (CANEVAROLO, 2010).

Na Tabela 4.1 estão ilustradas as principais características e limitações de algumas resinas termorrígidas mais utilizadas.

Tabela 4.1 – Principais características e limitações das resinas termorrígidas.

Resina	Características	Limitações
Epóxi	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente propriedade em compósitos - Boa resistência química e propriedades elétricas - Boas propriedades térmicas - Baixa contração na cura 	<ul style="list-style-type: none"> - Longos ciclos de cura - Melhores propriedades obtidas e altas temperaturas
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> - Amplamente utilizada - Fácil utilização 	<ul style="list-style-type: none"> - Emissão de estireno - Contração durante a cura
	<ul style="list-style-type: none"> - Cura à temperatura ambiente - Ótimas propriedades em compósitos - Boa resistência química 	<ul style="list-style-type: none"> - Inflamável
Fenólica	<ul style="list-style-type: none"> - Ótimas propriedades térmicas - Boa resistência ao fogo - Boas propriedades elétricas 	<ul style="list-style-type: none"> - Cor
Poliuretano	<ul style="list-style-type: none"> - Boas propriedades em compósitos - Boa resistência química - Alta dureza - Boa resistência à abrasão 	<ul style="list-style-type: none"> - Cor - Isocianetos como agentes de cura

Fonte: adaptado de AQUINO, 2003.

Os polímeros termorrígidos possuem algumas vantagens com relação os termoplásticos, essas vantagens vão depender da aplicação dada, como elevadas propriedades mecânicas, que são mantidas até em altas temperaturas, já os termoplásticos não possuem resistência suficiente para suportar altas temperaturas. As matrizes termofixas são as mais usadas em compósitos de matriz poliméricas, pois é mais fácil de realizar o processamento, devido a sua baixa viscosidade (BRAGA NETO, 2020).

4.2.1 Resina poliéster

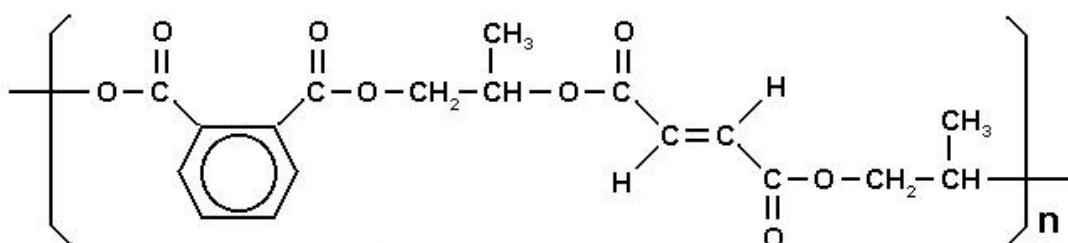
Poliéster é o nome designado a uma categoria de materiais obtidos através de uma reação de condensação entre o di álcool e um ácido policarboxílico (SILAEX, 2020). São polímeros sintéticos, encontrados comercialmente como plásticos, filmes e resinas. Podem ser classificados como saturados ou insaturados dependendo do tipo de ligação, ausência ou presença de duplas ligações entre seus átomos de carbono (insaturações) que formam sua cadeia molecular (SILVA, 201).

Os poliésteres são produzidos amplamente na indústria, pois possuem diversas vantagens se comparados às outras resinas termofixos, como a capacidade de cura a temperatura ambiente, ótimas propriedades mecânicas como resistência à tração, flexão e impacto (SILAEX, 2020). Poliésteres insaturados são versáteis em termos de propriedades e têm sido popularmente usados como matriz polimérica nos compósitos (COSTA *et al*, 2015).

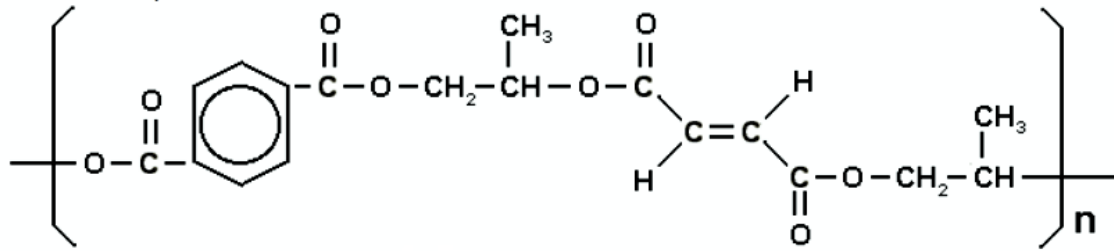
O poliéster é produzido através da reação química entre ácidos dicarboxílicos saturados e insaturados (anidrido, maleico ou ftálico), com álcoois que podem ser encontrados com diferentes composições para cada especificidade (NETO; PARDINI, 2016).

Essas resinas são comercializadas em grandes variedades tais como, ortoftálicas (Figura 4a), isoftálicas (Figura 4b) e tereftálica (Figura 4c). São diferenciadas pela adição de seus constituintes na reação de condensação para a obtenção das mesmas. A mais utilizada é do tipo ortoftálica, que é a mais simples e facilmente obtida (FINK, 2018).

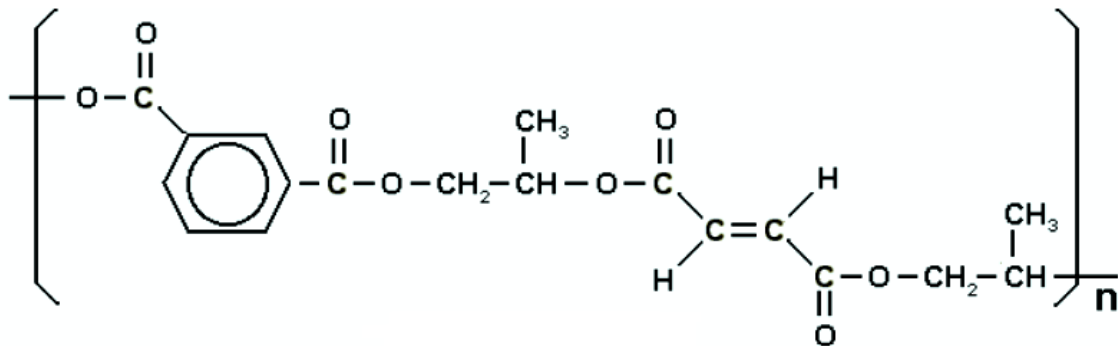
Figura 4 - Estrutura molecular da resina poliéster ortoftálica (a), isoftálica (b) e tereftálica (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: SILAEX, 2022

O processo de cura do poliéster é inicializado com catalisador do tipo peróxido. As duplas ligações serão quebradas pela ação de um catalisador (peróxido orgânico, calor ou radiação), para reagirem novamente entre si, dando origem a um polímero tridimensional de características termoestáveis, e, portanto, infusíveis e irreversíveis (SILAEX, 2020). Esse processo pode ser tanto em temperatura ambiente, quanto em temperatura elevada e também pode ocorrer com ou sem aplicação de pressão (MENDONÇA, 2018).

As propriedades mais relevantes dos poliésteres insaturados Tabela 4.2 são facilidade de manipulação, cura rápida, sem liberação de substâncias tóxicas, possui cores claras, estabilidade dimensional e boas respostas quando solicitados em ensaios mecânicos (BRAGA NETO, 2020).

Tabela 4.2 – Propriedades físicas e mecânicas de típicos de resina poliésteres insaturados.

Propriedades	Valor
Densidade (g/cm³)	1,2 – 1,5
Resistência à Tração (MPa)	40 – 90
Módulo de Young (GPa)	2,0 – 4,5
Alongamento (%)	2,0

Fonte: CALLISTER, 2021.

4.3 Fibras naturais e sintéticas

Os tipos de fibras existentes podem ser classificados de acordo com a sua origem natural ou sintética, como apresentado no Quadro 1 (CALEGARI, 2019).

Quadro 1 – Classificação das fibras.

	Origem	Classificação	Exemplos
Fibras	Natural	Mineral	Amianto
		Animais	Pêlos de animais
		Vegetais	Folhas: Sisal, Curauá e Banana
			Talo: Juta, Linho e Piaçava
			Caule: Bambu e Envira
			Fruto: Coco e Algodão
	Sintética	Metálicas	Aço e Alumínio
		Poliméricas	Aramida, Nylon e Boron
		Cerâmicas	Vidro

Fonte: adaptado de CALEGARI, 2019.

As fibras sintéticas são usadas como reforço em compósitos desde o século XX, quando foi criado o fenol polímero (VENTURA, 2009). Para a fabricação de compósitos de fibras sintéticas uma grande quantidade de matéria-prima química e

mineral é necessária, sendo em sua maioria de origem de fontes não renováveis, acarretando em problemas como geração de resíduos, como a liberação de dióxido de carbono (AUERSVALDT, 2019).

As fibras naturais de origem vegetal podem ser obtidas a partir de fontes renováveis, biodegradáveis e apresenta ainda como diferencial a facilidade de reciclagem (ASHBY *et al.* 2018). O avanço nas pesquisas das fibras naturais surgiu como uma alternativa mais viável sob a perspectiva do aumento da procura por indústrias que prezam por produtos mais sustentáveis, uma vez que esses novos materiais podem ser utilizados em diversas aplicações, tais como a produção de polímeros biodegradáveis e reforços em materiais compósitos (LAUER, 2019).

A Tabela 4.3 apresenta algumas vantagens e desvantagens em relação à origem das fibras.

Tabela 4.3 – Principais vantagens e desvantagens da fibra natural e sintética.

	Vantagens	Desvantagens
Fibra natural	<ul style="list-style-type: none"> • Fontes renováveis • Biodegradável • Economicamente acessível • Grande disponibilidade • Menor impacto ambiental • Produzem poucos resíduos • Baixo consumo de energia 	<ul style="list-style-type: none"> • Produção depende do clima • Grande variação nas propriedades • Higroscópicas – absorvem umidade • Baixa resistência a fungos e bactérias
Fibra sintética	<ul style="list-style-type: none"> • Alta tenacidade • Alta resistência mecânica • Resistência à variação de temperatura • Durabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Fonte não renovável • Maior consumo de energia para fabricação • Altas emissões de CO₂ • Maior impacto ambiental • Produção alta de resíduos

Fonte: adaptado de CARVALHO, 2003 e ZAKARIA *et al.*, 2017.

A escolha da fibra deve ser feita em observância a aplicação final do material compósito, pois as fibras assim como a matriz irão influenciar nas propriedades finais do material quando este for solicitado (SANJAY, 2016).

Quadro 2 – Propriedade das fibras naturais e fibras sintéticas.

Aspectos	Propriedades	Fibras naturais	Fibras sintéticas
Técnico	Propriedades mecânicas	Moderado	Alto
	Sensibilidade à umidade	Alto	Baixo
	Sensibilidade térmica	Alto	Baixo
De meio ambiente	Recurso	Infinito	Limitado
	Produção	Baixo	Alto
	Reciclável	Possível	Limitado (moderado)

Fonte: Adaptado de SANJAY *et al.*, 2016.

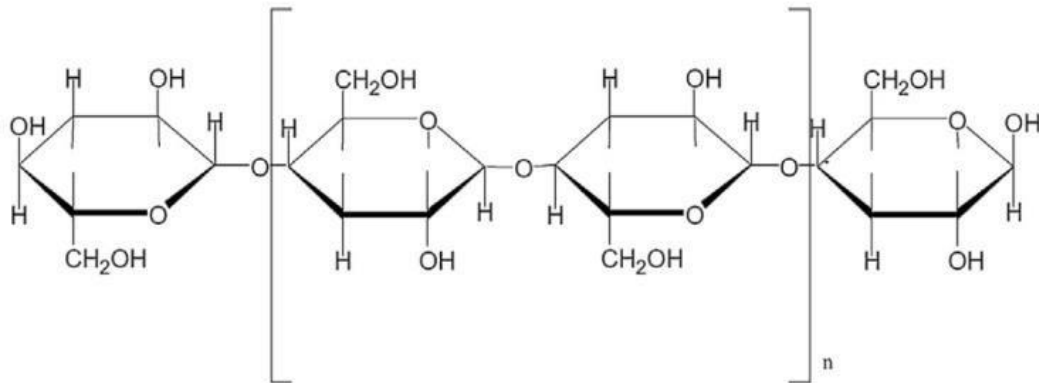
4.4 Fibras lignocelulósicas

Fibras lignocelulósicas (FLNS) são constituídas por fibrilas de celulose, mantidas unidas por uma matriz de hemicelulose e lignina, cuja principal função é agir como uma barreira natural à degradação de microorganismos e servir de proteção mecânica (JAYARAMAN, 2003).

As FLNS são constituídas por três componentes elementares: a celulose, hemicelulose e lignina, onde cada elemento da composição é responsável por fornecer determinadas propriedades às fibras (LUZ, 2014). O percentual de cada constituinte irá variar de acordo com o tipo de planta, das condições climáticas, do tempo que foi realizado a colheita e do tipo de solo (SINGH; MAHANTA; BORA, 2017).

O tipo de organização das cadeias lineares está fortemente relacionado com o grau de cristalinidade da celulose, que influencia diretamente nas suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e térmicas (FRENCH, 2015). A estrutura química da celulose é apresentada na Figura 5.

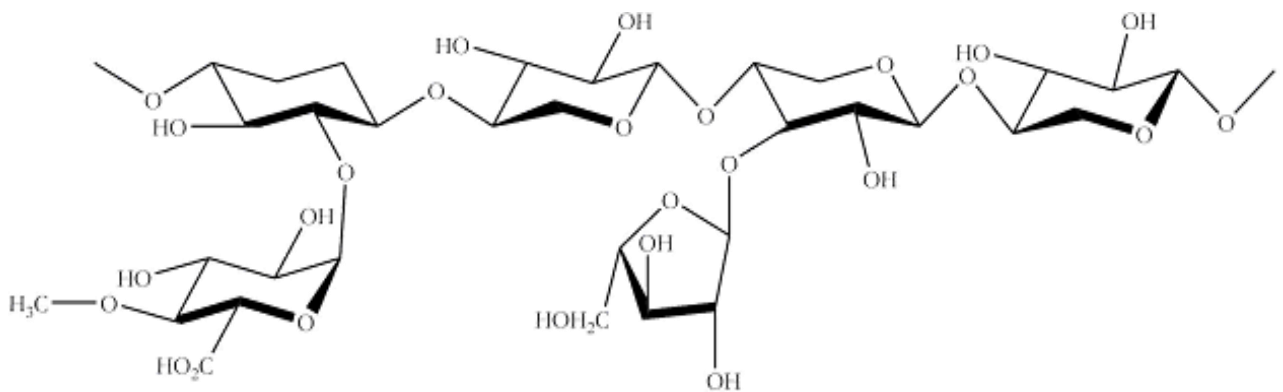
Figura 5- Estrutura molecular da celulose.



Fonte: Hon, 2000.

A Figura 6 representa uma molécula de hemicelulose que é o segundo polissacarídeo mais abundante que existe no interior de FLNS. Possui uma estrutura amorfa, heterogênea e composta por ramificações com cadeias laterais curtas (BAJPAI, 2016). A hemicelulose atua como elemento de ligação entre celulose e a lignina, não estando diretamente relacionada com a resistência das fibras (AGRAWAL *et al.*, 2000).

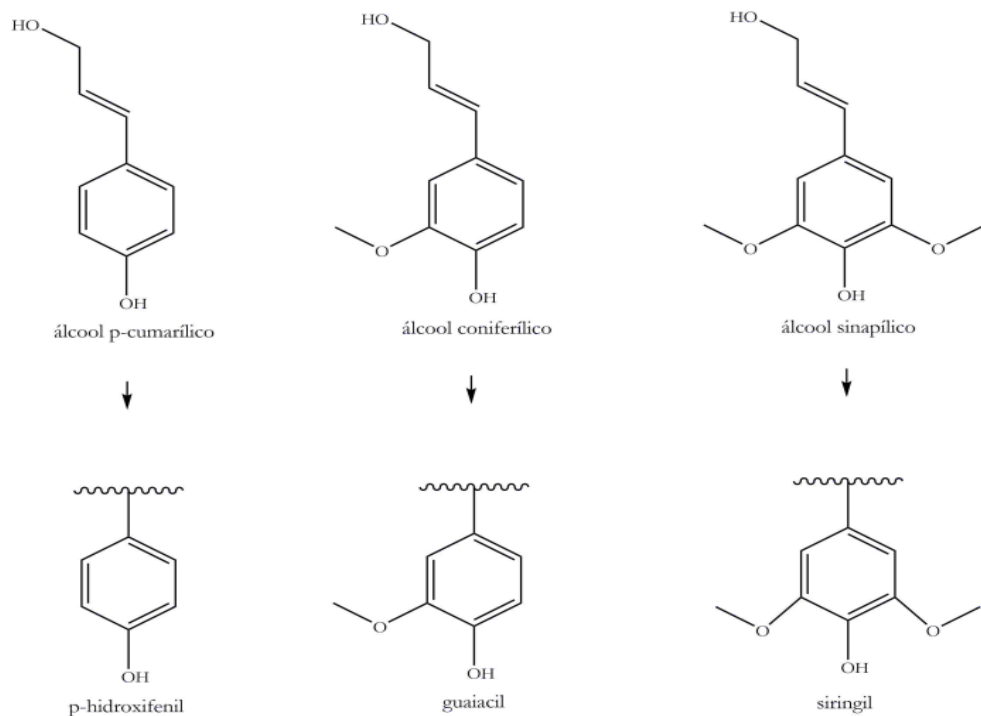
Figura 6- Estrutura molecular da hemicelulose.



Fonte: Hon, 2000.

Outro componente importante das FLNS é a lignina. Essa consiste em uma macromolécula sintetizada de estrutura amorfa, com constituintes aromáticos e alifáticos, que une as fibras celulósicas formando a parede celular (AGRAWAL *et al.*, 2000; BUZETZKI *et al.*, 2011). A Figura 7 apresenta a estrutura molecular da lignina e suas respectivas unidades.

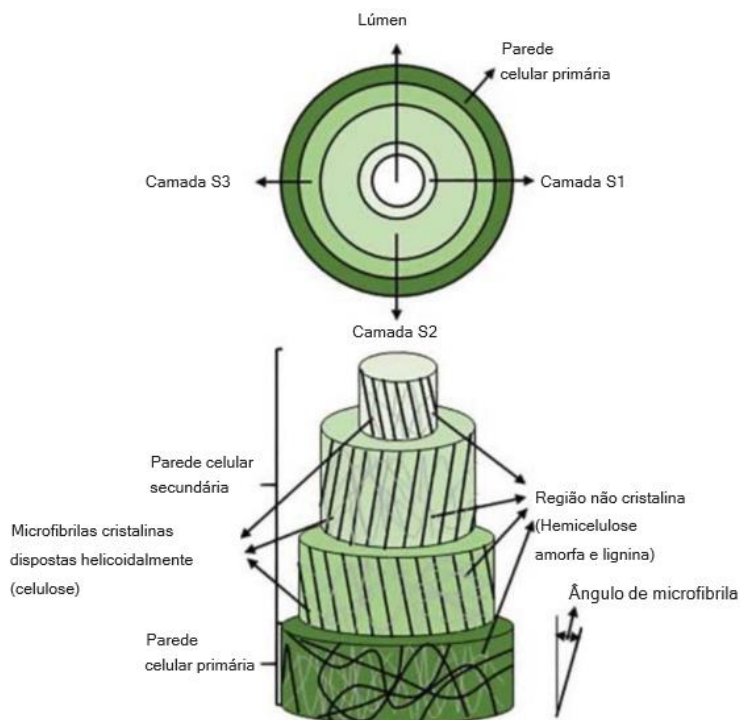
Figura 7 - Estrutura molecular da lignina e respectivas unidades.



Fonte: Hon, 2000.

Na Figura 8 demonstra a microestrutura da célula de fibra vegetal, onde a estrutura consiste em duas paredes celulares: a parede primária e a parede celular secundária.

Figura 8 – Estrutura de uma fibra vegetal.



Fonte: Wang, 2021.

Na parede primária, há uma rede de microfibras de celulose cristalina desordenadas, possui uma camada de 0,1 a 0,2 μm , e é composta por celulose que podem variar de 35-40%, hemicelulose cerca de 25-40%, pectina e proteína, todas revestidas por lignina dentre 10-20% (AMIN *et al.*, 2017).

A parede celular secundária, é responsável pela maior parte da resistência da fibra, consiste em três paredes celulares S1, S2 e S3 (MUKHTAR, 2016). A camada S2 é a mais espessa e tem o maior teor de celulose, na parede celular secundária, as microfibrilas cristalinas são coladas juntas pela hemicelulose amorfa (WANG *et al.*, 2021).

O Brasil possui uma diversidade de fibras com potencial para serem aplicadas na indústria e devido à imensidão territorial são cultivadas em diferentes regiões. A Tabela 4.4, apresenta algumas das FLNS que são estudadas com maior frequência (NETO E PARDINI, 2016).

Tabela 4.4 - Fibras vegetais brasileiras mais estudadas e utilizadas.

Fibra	Nome botânico	Parte da planta	Centros produtores
Algodão	<i>Gossypium hirsutum</i>	Semente	Campina Grande
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	Fruto	Recife e Aracaju
Eucalipto	<i>Eucalyptus grandis</i>	Caule	Aracruz, ES
Sisal	<i>Agave sisalana</i>	Folha	Bahia e Paraíba
Juta	<i>Corchorus capsularis</i>	Caule	Amazônia

Fonte: NETO E PARDINI, 2016.

A substituição das fibras sintéticas pelas fibras lignocelulósicas como reforço na confecção de compósitos vem ganhando destaque e atenção ao passar dos anos em diversas áreas de aplicação, desde indústrias automotivas e de embalagens (SABA *et al.*, 2016; TITA *et al.*, 2018). Devido as suas boas propriedades mecânicas, baixo custo, alta força específica, facilidade de fabricação, biodegradabilidade e boa rigidez estrutural, esses materiais compósitos podem ser usados diversas aplicações (ALKBIR *et al.*, 2016).

Na Tabela 4.5 apresentam algumas vantagens e desvantagens da utilização de fibras naturais.

Tabela 4.5 – Vantagens e desvantagens da utilização das fibras naturais em compósitos.

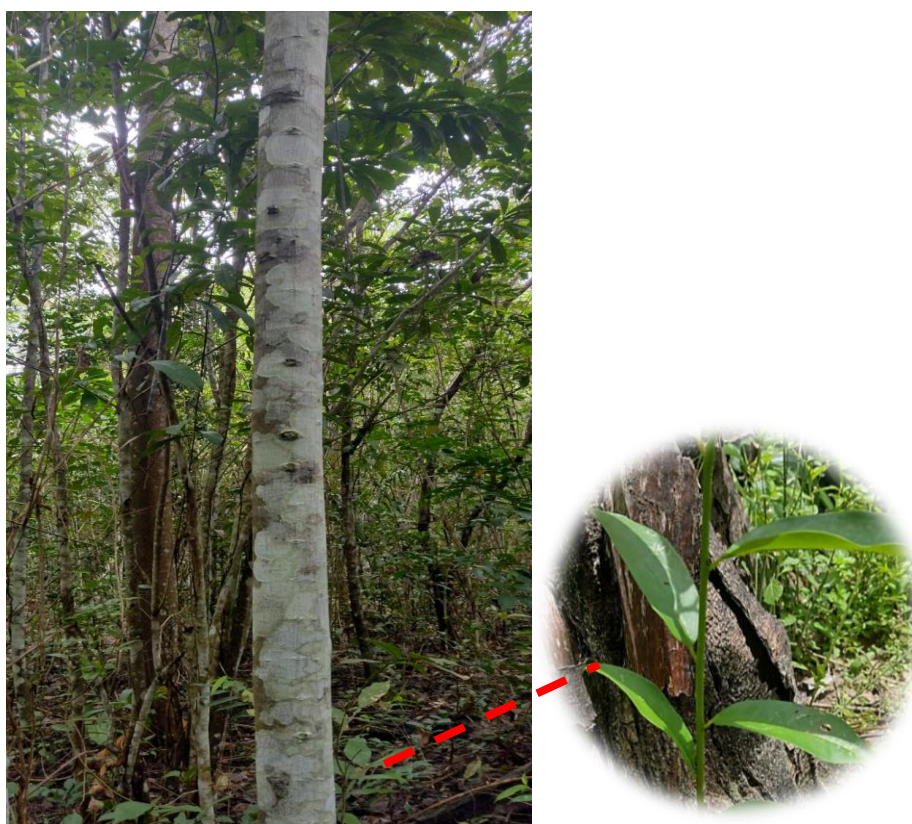
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Biodegradabilidade • Atoxicidade • Reciclabilidade • Baixo custo de produção • Menor abrasividade • Proveniente de fontes renováveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa temperatura de utilização • Grande variabilidade nas propriedades mecânicas • Baixa estabilidade dimensional • Seções transversais de geometria complexa e não uniforme

Fonte: Adaptado de RAMAMOORTHY, 2015 e SILVA, 2010.

4.4.1 Fibras de Envira

A Envira é uma planta encontrada em toda a Amazônia, nas regiões de terra firme, principalmente nos estados do Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia e Roraima (FLORA E FUNGO DO BRASIL, 2020). Pertencente à família das *Annonaceae*, espécie *Bocageopsis multiflora*, sendo em sua morfologia essa espécie pode alcançar até 12 metros de altura e possuir até 30 cm de diâmetro (LORENZI, 1998). A Figura 9 apresenta a copa da árvore de Envira.

Figura 9 – Árvore de Envira.



Fonte: autoria própria, 2022.

A fibra da Envira é utilizada por tribos indígenas e pequenas comunidades rurais, para a fabricação de cordas de amarração dos barracões e casas de palhas, amarrar fumo de rolo e enrolar as hastes de mandioca (LORENZI, 2002; COLARES E COUTO, 2021). A Figura 10 apresenta a utilização da FLNS de Envira.

Figura 10 – Utilização da FLNS.



Fonte: Filho, 2020.

A extração das fibras do caule se faz de modo artesanal, com auxílio de um “terçado”, conforme apresentado na Figura 11 (a) no momento da extração e a Figura 11 (b) 18 meses depois da extração. A remoção deve ser feita de forma minuciosa para que não degrade a árvore.

Figura 11 – (a) Extração das tiras de fibra; (b) Árvore 18 meses após extração.

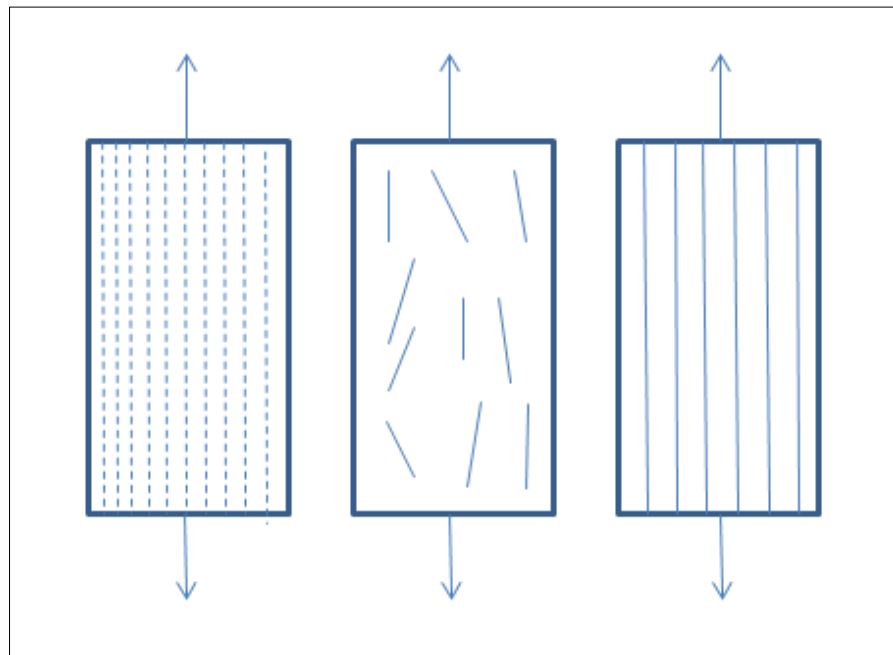


Fonte: autoria própria, 2022.

4.5 Materiais compósitos reforçados com fibras

O significado de compósito, segundo a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), é uma substância constituída por dois ou mais materiais insolúveis entre si, combinados para fabricação de um material de engenharia que possua propriedades não existentes nos materiais que o formam, atuando em sinergia (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016).

Figura 12 – Orientação da fibra dentro da matriz.



Fonte: CALLISTER, 2021.

Os compósitos reforçados com fibras longas ou fibras contínuas têm uma relação comprimento/diâmetro maior que as descontínuas. Nesses compósitos as fibras são orientadas de formas paralelas entre si, e em direções perpendiculares ou em várias direções (multidirecionais) (BOTELHO, 2017). Os materiais que apresentam uma das configurações de reforços citadas acima são conhecidos como anisotrópicos (DANIEL E ISHAI, 2006).

As fibras multidirecionais são utilizadas quando se tem por um objetivo produzir materiais que apresentem comportamento mecânico uniforme, melhor resistência ao impacto e bom acabamento superficial (ELKADER, 2014).

Quando um compósito recebe um reforço com fibras descontínuas ou curtas, as mesmas podem se dispersar de modo aleatório ou orientado dentro da matriz, assim o material compósito pode ser ortotrópico ou anisotrópico (DANIEL E ISHAI, 2006).

As fibras são classificadas como contínuas quando possuem um comprimento superior ao comprimento crítico, às fibras descontínuas apresentam comprimento inferior ao comprimento crítico (FLIEGENER *et al.*, 2017).

O comprimento fibrilar é uma das condições para promover o aumento efetivo da resistência e rigidez do compósito. Outras condições necessárias para obter-se este aumento são: a interação fibra x matriz, a adesão matriz x reforço e a resistência à tração do reforço (TIWARI *et al.*, 2012; ASKELAND, 2014).

O comprimento crítico pode ser calculado pela Equação 1.

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad (1)$$

Sendo:

l_c - comprimento crítico;

σ_f^* - limite de resistência à tração;

d - diâmetro da fibra;

τ_c - tensão de escoamento ou cisalhamento da matriz.

Vários estudos apresentam as FLNS como excelentes reforços quando inseridas em matriz polimérica. Os resultados obtidos por alguns autores reforçam a eficácia na utilização deste tipo de reforço.

Em seu estudo, BETELIE *et al.*,(2019), ao avaliarem a resistência mecânica de um material compósito incorporado com fibra de sisal em matriz epóxi, apresentou resultados que revelaram que a inserção de 30% de volume de fibra de sisal influenciou positivamente na resistência quando comparado ao epóxi puro, observando ainda que ao inserir maior quantidade de fibras na matriz maior seria sua resistência à tração.

O estudo apresentado por NGUYEN e NGUYEN (2021), onde se estudou as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras da casca da bananeira pré - tratadas em solução de NaOH 5% incorporadas em matriz epóxi, observaram o efeito significativo do carregamento de fibra nas propriedades mecânicas dos compósitos, os resultados experimentais demonstraram que a resistência à tração aumentou em 20% em comparação ao epóxi puro.

Em PEREIRA *et al.*, (2021), os autores apresentam resultados sobre a avaliação da resistência à tração da incorporação da fibra da folha de Buruti em matriz poliéster e epóxi, verificou-se que o compósito de matriz epóxi apresentou maior resistência média à tração em comparação a de matriz poliéster, conclui-se que a fibra da folha de buriti apresentou um bom potencial para a produção de compósitos leves e resistentes.

RIBEIRO *et al.* (2021) ao avaliarem a influência da inserção de tecido de cânhamo em matriz epóxi, concluíram que quanto maior a adição em porcentagem de tecido de cânhamo maiores são os valores de resistência encontrados, assim concluíram como uma alternativa viável para a substituição de compósitos com fibras sintéticas.

4.6 Materiais compósitos reforçados com fibras naturais

A utilização de fibras naturais como reforços em compósitos poliméricos institui um efeito positivo sobre o desempenho mecânico dos polímeros. Suas aplicações possuem um grande potencial nas indústrias como a automobilística, construção civil, esportes, aeroespacial dentre outras (MOHAMMED, 2015).

Esses compósitos reforçados com diversas fibras naturais vêm sendo estudados por diversos pesquisadores:

SANTOS JUNIOR (2017) ao caracterizar um compósito de matriz poliéster ortoftálico com reforço de fibra de Agave (*Angustifolia haw*) demonstrou a viabilidade da incorporação dessa fibra, onde apresentou resultados satisfatórios nos ensaios mecânicos realizados nos compósitos.

ZANCANELLA *et al.*, (2018) observaram o comportamento mecânico da fibra do epicarpo do coco em matriz poliéster, com fibras distribuídas de formas aleatórias, o compósito apresentou limite de tração máxima de 12,98 MPa. Os autores em sua conclusão recomendam avaliar a orientação e concentração das fibras do epicarpo do coco a fim de maximizar as propriedades mecânicas.

PINHEIRO *et al.* (2018) ao obter um compósito de matriz epóxi reforçados com fibra de guarumã e analisar a fibra com a microscopia eletrônica de varredura concluiu que as fibras de maior diâmetro apresentam maior quantidade de defeitos, na sua estrutura, sugerindo que as fibras mais grossas apresentam menor resistência. Após a realização dos testes mecânicos notou-se nos resultados obtidos que a adição das fibras aumentou a resistência à tração do compósito, e a composição com 30% em volume foi a que apresentou o melhor resultado com 57,17 MPa.

JESUS *et al.* (2019) observaram o comportamento térmico de compósitos de poliestireno reciclado e reforçado com celulose de bagaço de cana de açúcar, onde foi constatado que a lignina residual atuou como agente compatibilizante, possibilitando uma interação maior entre a matriz e a fibra, resultando em um aumento no valor da temperatura de deflexão, concluindo que a utilização de EPS como matriz é viável.

NEVES *et al.*, (2020) analisaram a incorporação da fibra de cânhamo em matriz epóxi e poliéster. Notou-se que os compósitos de matriz epóxi apresentaram resultados superiores quando comparados aos compósitos produzidos utilizando resina poliéster.

A partir da análise dos estudos apresentados foi possível observar o êxito na inserção das FLNS como reforço em materiais compósitos. A partir destes, foi possível levantar a hipótese da viabilidade da incorporação da fibra de Envira tendo em vista que não há na literatura registros de sua utilização como reforços em compósitos.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais utilizados

As fibras de Envira utilizadas neste trabalho foram retiradas do caule da planta de Envira, coletadas na região de Moju – Pa, no período de verão Amazônico. A Figura 13 demonstra a retirada da fita da fibra da casca da árvore de Envira.

Figura 13 – Retirada da fita de fibras da casca da árvore de Envira.



Fonte: autoria própria, 2022.

A resina polimérica utilizada como matriz foi o poliéster ortoftálico com proporção de catalisador MEK M – 50 (1,5%) adquirido na Empresa Confibras. A escolha da matriz deve-se ao fato do baixo custo do poliéster com relação a outros tipos de resina. A Figura 14 representa a resina e catalisador utilizados.

Figura 14 – Resina poliéster e catalisador.



Fonte: autoria própria, 2022.

5.1.1 Fibras de Envira

5.1.1.1 Beneficiamento da matéria-prima

Primeiramente, no Laboratório de Práticas Tecnológicas da Universidade Federal do Pará – Campus Ananindeua, as fitas de Envira foram higienizadas, e posteriormente, imersas em água potável por 24 horas, a fim de promover o amolecimento das fibras para posteriormente desfibrar. Em seguida foram desfiadas manualmente com o auxílio de uma pinça. A Figura 15 mostra as fibras já beneficiadas.

Figura 15 – Fibras de Envira desfiadas.



Fonte: autoria própria, 2022.

5.2 Metodologia

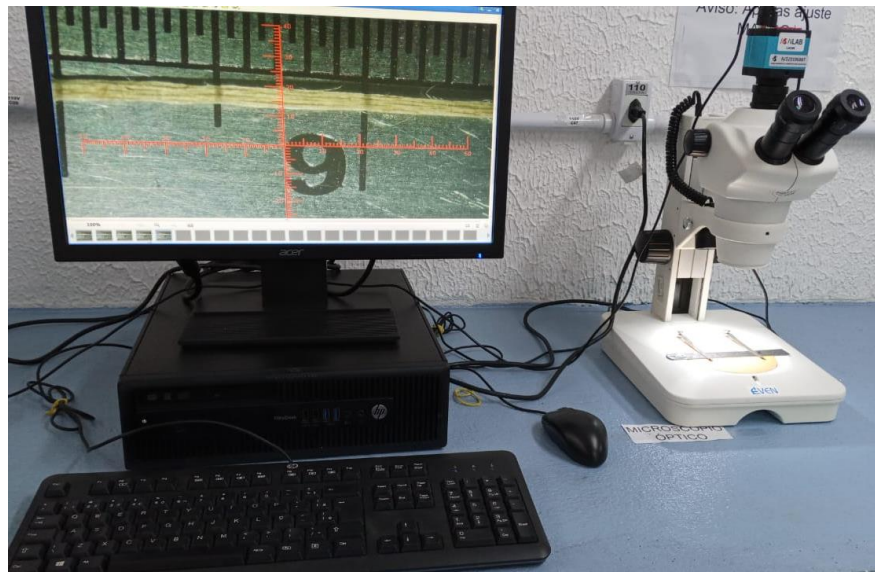
5.2.1 Morfologia

5.2.1.1 Caracterização óptica e dimensional

Para a medição do diâmetro e comprimento da fibra, 100 fibras individuais e aleatórias foram selecionadas e realizadas medidas foram realizadas em três posições no comprimento da fibra, em que para cada posição era obtido uma segunda medida girando a fibra em 90°. O diâmetro foi obtido considerando a média dos valores encontrados ao longo do comprimento da fibra.

O diâmetro da fibra foi verificado utilizando um microscópio óptico da marca EVEN e software Future Winjoe®, apresentado na Figura 16. A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Ananindeua. Após essa etapa as fibras foram divididas em 5 intervalos de diâmetro com o intuito de avaliar a distribuição diametral em relação ao número de fibras.

Figura 16 – Microscópio ótico e software Future Winjoe®.



Fonte: autoria própria, 2022.

5.3 Determinação da densidade

A densidade geométrica da fibra foi determinada através da relação massa e volume da fibra. A massa foi determinada com auxílio de uma balança analítica da marca CHYO modelo JK 200, Figura 17.

Figura 17 – Balança analítica.



Fonte: autoria própria, 2022.

A Equação 2 mostra a fórmula utilizada para o cálculo do volume médio da fibra.

$$V_m = \frac{\pi * d^2 * L_m}{4} \quad (2)$$

Assim:

V_m – Volume médio da fibra;

d – Diâmetro médio da fibra;

L_m – Comprimento médio.

De acordo com os valores obtidos de massa e volume médio, foi possível calcular a massa específica da fibra, de acordo com a Equação 3.

$$\rho = \frac{m}{V_m} \quad (3)$$

Assim:

ρ – Massa específica;

m – Massa;

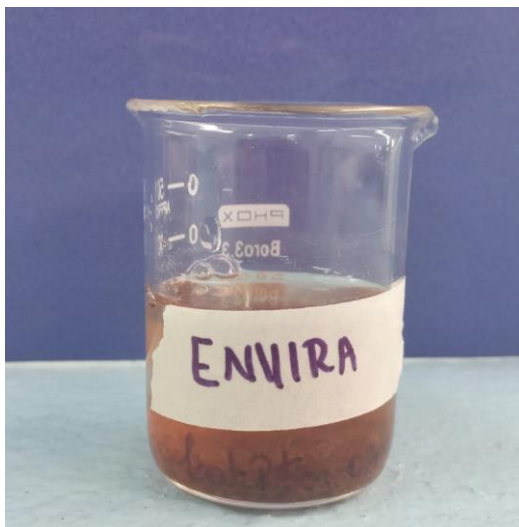
V_m – Volume médio da fibra.

5.4 Análise termogravimétrica

A caracterização térmica das fibras de Envira foi realizada através da análise termogravimétrica (TGA), no Laboratório de Física do Campus da Universidade Federal do Pará – UFPA. As fibras foram maceradas em almofariz e pistilo de porcelana com a finalidade de diminuir a sua granulometria.

Posteriormente, foi realizado um tratamento químico em 1 grama de fibras de Envira, utilizando Hidróxido de Sódio (NaOH) a 2%, diluído em água destilada na proporção de 1 molar por 2 horas. Após o tratamento as fibras foram lavadas com água destilada e filtradas. Após a filtragem foram imersas em água destilada por cerca de 12 horas, como mostra a Figura 18, por fim foram secas em estufa a 100 °C por 12 horas.

Figura 18 – Envira imersa em água destilada.



Fonte: autoria própria, 2022.

O processo de mercerização da fibra se faz necessário para que os óleos presentes na mesma sejam retirados para que não danifiquem o sensor do analisador.

A análise térmica foi realizada em um Analisador termogravimétrico NETZSCH STA 449F3, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera de nitrogênio. A análise foi realizada até a temperatura de 600 °C na fibra, a fim de determinar as temperaturas de degradação e a perda de massa em cada evento térmico.

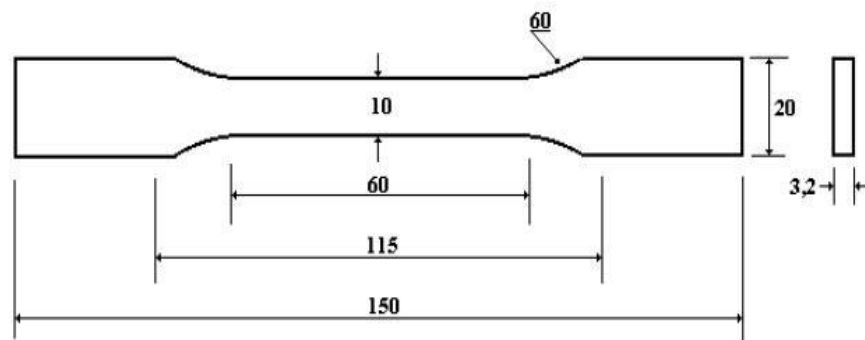
5.5 Compósitos

Os compósitos foram fabricados utilizando resina poliéster e fibras de Envira com fração volumétrica variando de 10, 20 e 30%, essas percentagens foram adotadas após pesquisas bibliográficas apontarem que essa percentagem é amplamente adota quando se utiliza FLNS como agente de reforço, como utilizadas por CANDIDO (2014), PINHEIRO (2018), NEVES *et al.* (2020), ao utilizarem fibras de bagaço da cana-de-açúcar, fibras de guarumã e fibras de cânhamo respectivamente, porém nas mesmas porcentagens. Foram fabricados de forma individual em molde de silicone apresentado na Figura 19. Foram fabricados 8 corpos de prova para cada formulação, seguindo a Norma ASTM D638.

Figura 19 – Molde de silicone.

Fonte: autoria própria, 2022.

A Figura 20 apresenta as dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração. O Quadro 3 apresenta a relação resina/fibra, utilizados na fabricação dos corpos de provas deste trabalho.

Figura 20 – Dimensões (mm) dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração.

Fonte: ASTM D 638, 2016

Quadro 3 – Composições formuladas. P – Poliéster, FE - Fibra de Envira.

Matérias – prima	Composições (% em volume)			
	P0FE	P10FE	P20FE	P30FE
Fibra	0	10	20	30
Resina	100	90	80	70

Fonte: autoria própria, 2022.

A quantidade de massa de fibra utilizada para cada corpo de prova foi determinada pela regra da mistura, de acordo com a Equação 4.

$$\%f = \frac{\frac{m_f}{\rho_f}}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_r}{\rho_r}} \quad (4)$$

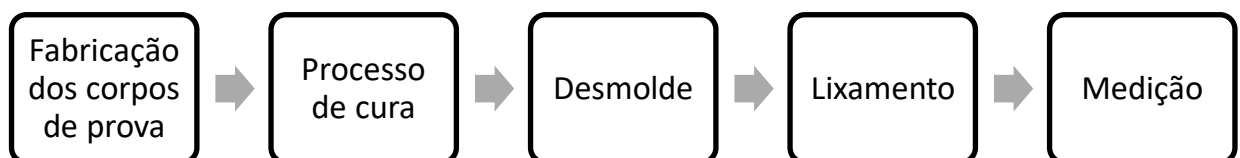
Sendo:

- $\%f$ - porcentagem de fibra;
- m_f - massa da fibra;
- ρ_f - massa específica da fibra;
- m_r - massa da resina;
- ρ_r - densidade da resina.

Para o início do processo de fabricação dos corpos de prova, pesou-se a resina poliéster para a proporção adequada de iniciador a ser utilizado. Após esse procedimento a resina e o catalisador foram misturados e despejados em molde de silicone, onde foram colocadas as fibras de forma contínua e alinhadas. Os corpos de prova permaneceram no molde por um período de 24 h, para que ocorresse o processo de cura do material.

Após essa etapa os corpos de prova foram lixados e medidos, para a retirada de superfície irregular. A Figura 21 apresenta o fluxograma do processo de confecção dos corpos de prova.

Figura 21 – Processo de confecção dos corpos de prova.



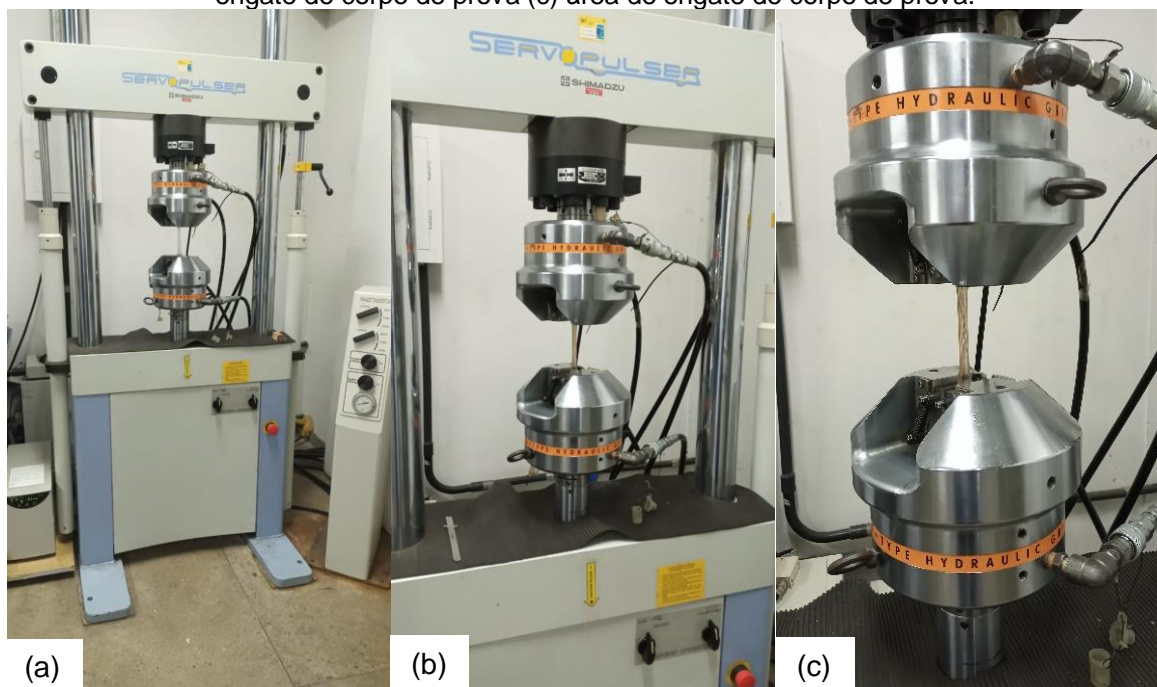
Fonte: autoria própria, 2022.

5.6 Ensaio mecânico

Para a caracterização mecânica em tração, os compósitos foram ensaiados no Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM), da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (UFPA).

A máquina utilizada para a realização desse ensaio foi do modelo SERVOPULSER, fabricada pela SHIMADZU, com uma célula de carga de 100 kN, a uma velocidade de 2 mm/min. A Figura 22, mostra a máquina: (a) vista frontal da máquina; (b) vista frontal da máquina no engate do corpo de prova (c) área de engate do corpo de prova.

Figura 22 - Máquina de ensaio: (a) Vista total frontal da máquina; (b) vista frontal da máquina no engate do corpo de prova (c) área de engate do corpo de prova.



Fonte: autoria própria, 2022.

A tensão máxima que os corpos de prova suportam, foi calculada pela Equação 5, que relaciona a força aplicada com a área útil do corpo de prova.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Sendo:

σ – força máxima;

F – força aplicada;

A – área da seção retangular do corpo de prova.

5.6.1 Análise estatística

Os resultados obtidos foram avaliados utilizando o método de Análise de Variância (ANOVA), através do teste F com nível de significância de 5%, para todos os testes. A ANOVA foi aplicada para verificar a existência de diferenças relevantes entre as médias dos resultados obtidos nas propriedades medidas durante o ensaio mecânico, que foi realizado variando a fração volumétrica de fibras de Envira.

A Tabela 5.1 demonstra os parâmetros estatísticos utilizados para a realização da variância.

Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados na análise de variância (ANOVA)

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F crítico
Tratamentos	SQTr	k-1	QMT	QMT/QMR	Tabela F
Resíduos	SQR	k(r-1)	QMR		(5% de significância)
Total	SQT	n-1			

Fonte: adaptado de PINHEIRO, 2020

Sendo:

SQ – Soma dos quadrados;

GL – Número de graus de liberdade;

MQ – Quadrado médio;

F – Estatística F (Fisher);

SQTr – Soma dos quadrados dos tratamentos;

SQR – Soma dos quadrados do resíduo

SQT – Soma dos quadrados totais;

k – Número de tratamentos (percentuais de reforço de fibras utilizados);

r – Número de repetições do tratamento;

n – Número total de observações;

n-1 – Número total de graus de liberdade;

QMT – Quadrado médio dos tratamentos;

QMR – Quadrado médio do resíduo.

Os valores das somas dos quadrados (SQTr, SQT e SQR) e os quadrados médios (QMT e QMR) podem ser obtidos pelas Equações 7, 8, 9, 10,11.

$$SQTr = \frac{\sum T^2}{r} - \frac{\sum y^2}{n} \quad (7)$$

$$SQT = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad (8)$$

$$SQR = SQT - SQTr \quad (9)$$

$$QMT = \frac{SQTr}{K-1} \quad (10)$$

$$QMR = \frac{SQR}{K(r-1)} \quad (11)$$

Sendo:

T – valor obtido para cada tratamento;

Y – valor obtido da propriedade.

Quando o valor de F calculado for inferior ao F crítico, pode-se concluir que as médias dos resultados obtidos para cada tratamento são iguais. Se não há essa igualdade entre as médias será necessário à verificação da existência de uma diferença significativa entre as médias dos resultados obtidos. Diferença essa a ser verificada por meio do Teste de TUKEY.

O Teste de TUKEY foi realizado a fim de identificar quais os tratamentos que apresentaram diferenças significativas a partir da ANOVA. Esta identificação foi realizada comparando quantitativamente, cada um dos tratamentos, dois a dois, com base na diferença mínima significativa (d.m.s), calculada pela equação 12 (NASCIMENTO, 2017).

$$dms = q \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (12)$$

Sendo:

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

QMR – Quadrado médio do resíduo;

r – Número de repetições para cada tratamento.

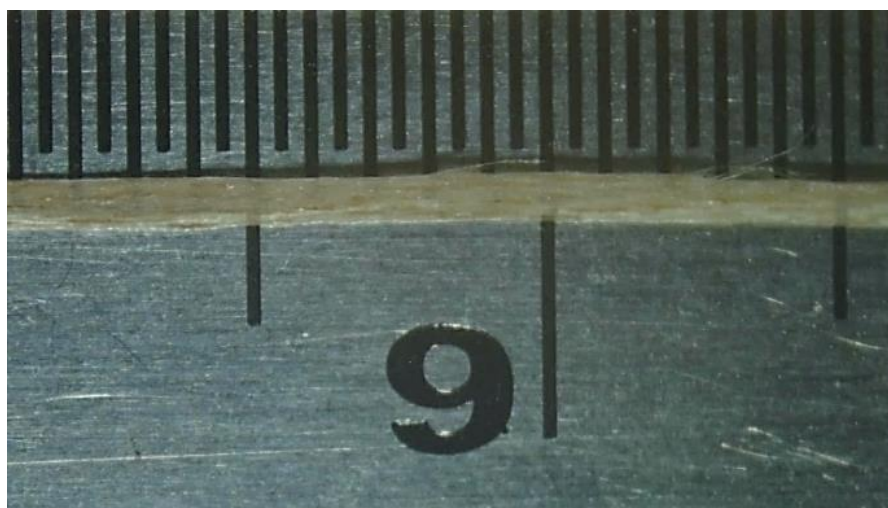
Assim, foi possível comparar a influência dos percentuais de fibra de Envira incorporados em matriz poliéster na resistência mecânica das amostras, e concluir qualitativamente e quantitativamente, quais resultados foram mais expressivos para as propriedades mecânicas.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterização Óptica e Dimensional.

Os resultados da microscopia das fibras de Envira demonstram que apresentam uma superfície lisa com desprendimento de fibrilas. A Figura 23 demonstra a fibra de Envira aumentada em 10x.

Figura 23 – Fibra de Envira.

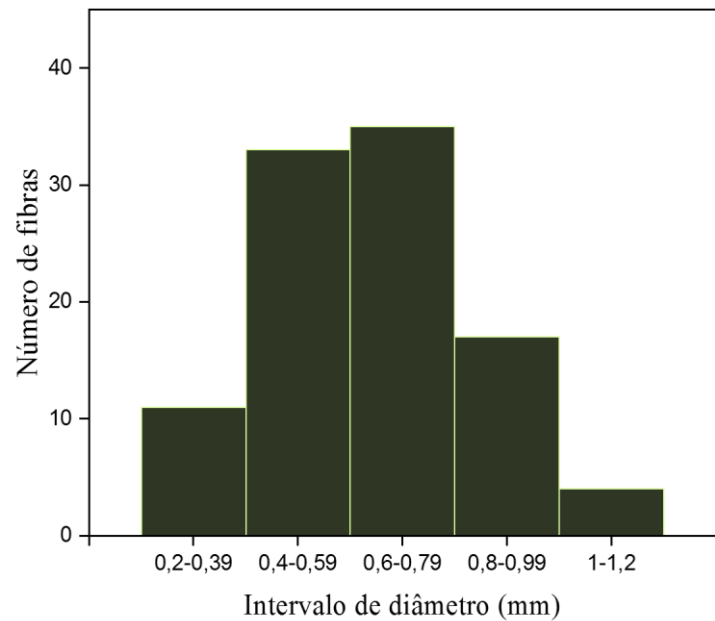


Fonte: autoria própria, 2022.

É possível observar que a fibra apresenta superfície lisa. Nota-se também, o desprendimento de fibras mais finas nas laterais da fibra analisada. Este desprendimento pode ter sido ocasionado no momento do desfiamento das fibras, comportamento esse observado por PENNAS (2019) ao caracterizar as fibras de Tucum e FURTADO et al., (2020) com as fibras de babaçu.

A Figura 24 apresenta o gráfico da relação entre o número de fibras e o intervalo de diâmetro.

Figura 24 – Relação entre o número de fibras e o intervalo de diâmetro.



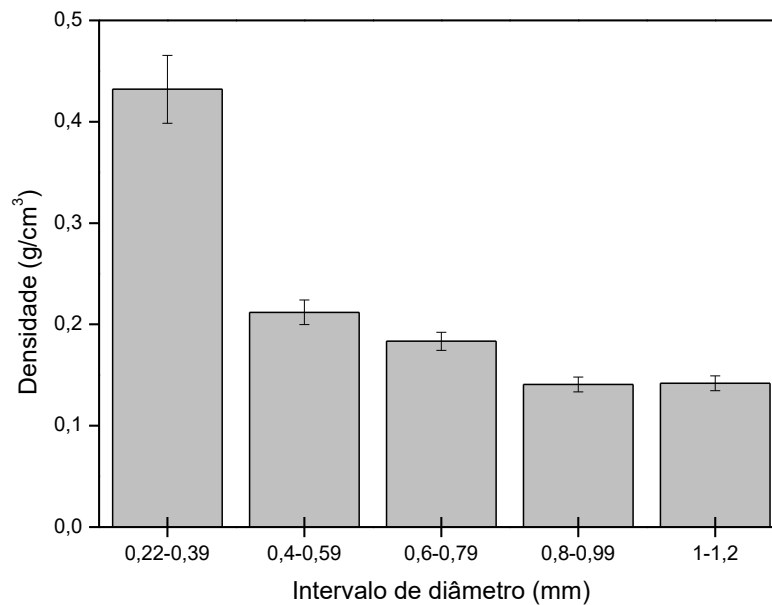
Fonte: autoria própria, 2022.

No gráfico é possível observar que há uma maior quantidade de fibras no intervalo de 0,60 mm a 0,79 mm e 0,40 mm a 0,59 mm respectivamente. Segundo PINHEIRO (2018), tal resultado pode estar correlacionado à natureza das fibras, que por serem compactas apresentam menores diâmetros.

6.2 Determinação da densidade

A Figura 25 apresenta a relação da densidade em relação ao intervalo de diâmetro da fibra de Envira.

Figura 25 – Relação entre densidade e intervalo de diâmetro.



Fonte: autoria própria, 2022.

A maior densidade das fibras de Envira está em $0,43 \text{ g/cm}^3$ para o intervalo de 0,22 a 0,39 mm. Observa-se que houve uma diminuição na densidade à medida que o diâmetro aumenta. MARCHI *et al.* (2022), constataram em seu estudo sobre a caracterização da fibra de Ubim, que as fibras que possuem menores diâmetros apresentam densidade maiores, enquanto as com diâmetro maior são menos densas.

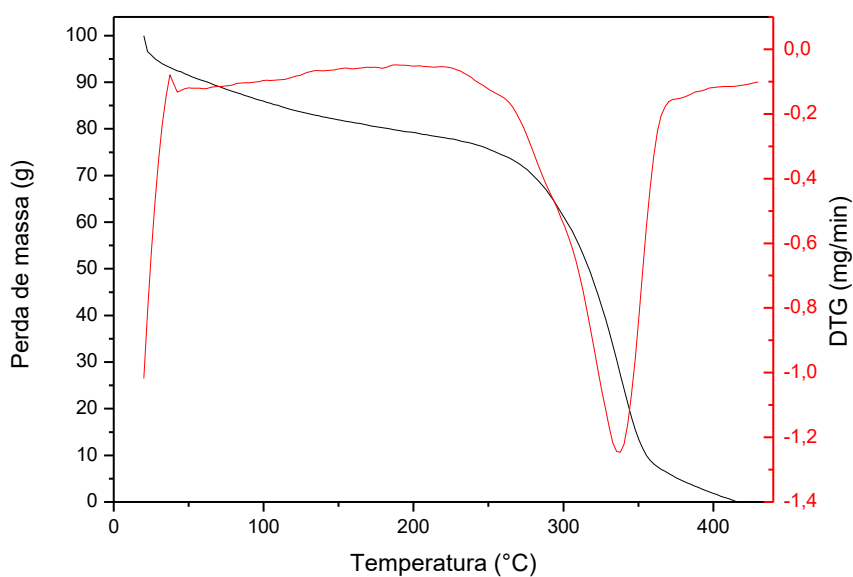
Valor esse inferior ao encontrado por RIBEIRO *et al.*, (2022) ao caracterizarem as fibras de Juta e fibras de Malta, onde obtiveram os resultados de $1,482 \text{ g/cm}^3$ para as fibras de Juta e $1,148 \text{ g/cm}^3$ para as fibras de Malva.

Assim a produção de compósitos com fibras de Envira torna-se vantajosa, com a possibilidade de produzir um compósito mais leve. Propriedade essa importante para a produção de um compósito cuja aplicação requer uma massa reduzido aliado a uma alta resistência (PEREIRA, 2021).

6.3 Análise Termogravimétrica

A termogravimetria foi utilizada para verificar a estabilidade térmica e degradação das fibras de Envira. Na Figura 26 apresenta a curva de TG da fibra de Envira, onde a linha vermelha faz referência à derivada da TG.

Figura 26 – Termograma da fibra de Envira.



Fonte: autoria própria, 2022.

Na curva TG da fibra de Envira, em aproximadamente 100 °C observou-se uma pequena perda de massa de aproximadamente 7%, atribuída à perda de água superficial. A estabilidade térmica da fibra ocorre em até aproximadamente 210 °C, desta temperatura até por volta de 320 °C nota-se uma expressiva perda de massa de aproximadamente 51%, que pode estar relacionada à decomposição da celulose.

FURTADO *et al.* (2020) ao analisarem o comportamento térmico da fibra de Babaçu, após tratamento alcalino de NaOH, observaram a que a degradação térmica da fibra ocorreu em duas etapas, a primeira em torno de 250 °C com a degradação da hemicelulose e a segunda entre as temperaturas de 200 – 350 °C atribuída à decomposição da celulose.

Resultados semelhantes encontrados por JESUS *et al.* (2019), ao analisarem a termogravimetria da fibra do bagaço da cana-de-açúcar, demonstraram uma estabilidade térmica de até aproximadamente 270 °C.

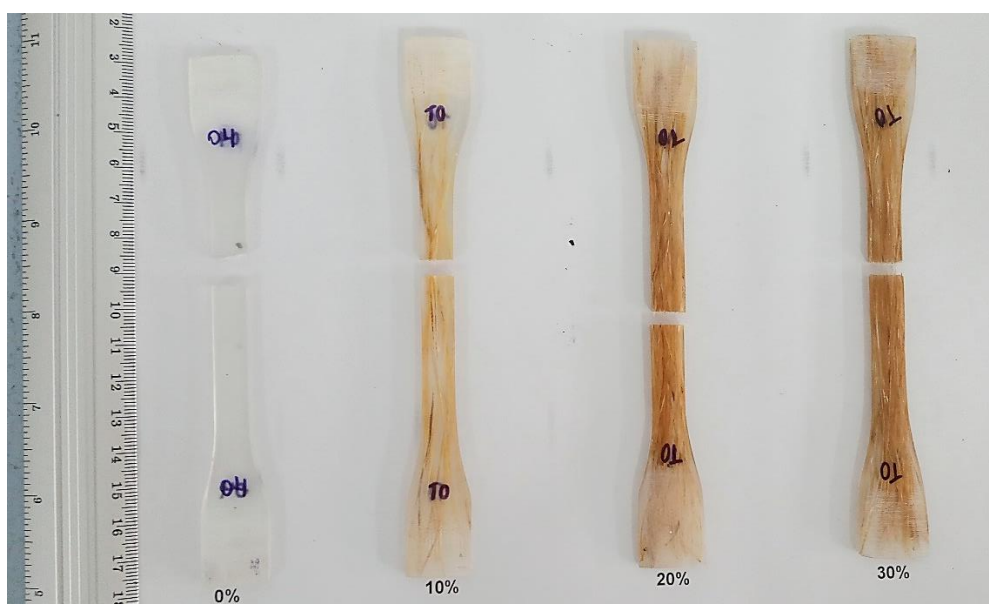
6.4 Compósitos

6.4.1 Ensaios Mecânicos

6.4.1.1 Ensaio de tração

A Figura 27 apresenta o aspecto macroscópico da região da fratura dos compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de Envira após ensaio de tração.

Figura 27 – Aspecto macroscópico da região da fratura dos corpos de prova após ensaio de tração.



Fonte: autoria própria, 2022.

Os corpos de prova exibiram fratura dentro do comprimento útil, apresentando fratura transversal, que é uma das características de um material frágil.

Na Tabela 6.1 é possível observar os valores referentes à resistência à tração, módulo de elasticidade e a deformação.

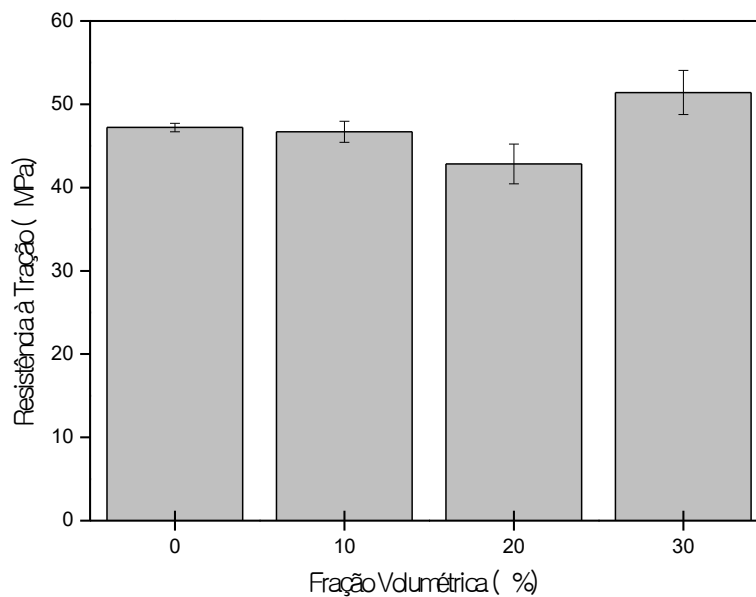
Tabela 6.1 – Resultados das propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração.

Composição (%)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (mm/mm)
P0FE	47,205 ± 0,512	1,141 ± 0,111	0,073 ± 0,012
P10FE	46,698 ± 1,258	2,025 ± 0,076	0,026 ± 0,002
P20FE	42,827 ± 2,392	2,193 ± 0,075	0,020 ± 0,001
P30FE	51,413 ± 2,662	2,101 ± 0,145	0,025 ± 0,002

Fonte: autoria própria, 2022.

A Figura 28 apresenta o gráfico de resistência à tração dos corpos de prova de matriz poliéster reforçado com fibras de Envira.

Figura 28 – Relação da resistência à tração dos compósitos de matriz poliéster reforçados com fibra de Envira.



Fonte: autoria própria, 2022.

Os resultados apresentados mostram que a incorporação das fibras de Envira proporcionou um aumento para essa propriedade de resistência à tração, e a composição com 30% em volume de fibra apresentou maior resistência. Este comportamento também foi observado por outros autores (SILVA, 2017; SANTOS

JUNIOR, 2017, BETELIE *et al.*, 2019; NEVES *et al.*, 2020) ao estudarem a incorporação de FLNS em matriz poliéster.

Observa-se que a resistência à tração foi reduzida para o compósito incorporado com 20% de volume em fibra. Isso pode ter ocorrido devido a defeitos na fabricação dos corpos de prova, aumentando assim as falhas na adesão fibra/matriz, comportamento este também observado por NEVES *et al.* (2020).

O valor obtido para a propriedade de resistência à tração foi de 51,41 MPa. Este valor é superior ao encontrado por NEVES *et al.*, (2020) que ao incorporar fibras de cânhamo contínuas e alinhadas em 30% de volume em matriz poliéster obteve o resultado de 31,46 MPa. Este resultado segundo os autores se deve ao fato da baixa adesão fibra/matriz, onde através da análise de fraturas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou trincas interfaciais que justificaram a dificuldade de fornecer um melhor reforço para o compósito.

De acordo com SINGH *et al.* (2020) o aumento da resistência à tração pode estar relacionado com a utilização de fibras contínuas e unidirecionais, que favorece a transferência de carga ao longo do comprimento da fibra, contribuindo assim para o ganho de resistência.

A Tabela 6.2 apresenta a análise de variância (ANOVA) dos compósitos reforçados com fibras de Envira.

Tabela 6.2 - Análise de variância da resistência à tração dos compósitos reforçados com fibras de Envira.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	222,1147	3	74,0382	3,3684	0,0389	3,0984
Dentro dos grupos	439,6108	20	21,9805			
Total	661,7255	23				

Fonte: autoria própria, 2022.

Os resultados da análise estatística (ANOVA) revelaram que o valor de F calculado (3,368) é superior ao F crítico (0,038) ao nível de significância de $\alpha=5\%$, rejeitando assim a hipótese H_0 . Portanto, a fração volumétrica de fibras de Envira têm efeitos diferentes na resistência à tração.

Para a comparação das médias aplicou-se o Teste de TUKEY, com o nível de confiança de 95%, que permite a comparação das médias, uma a uma, e assim identificar quais as diferenças entre os resultados. O d.m.s encontrado para essa propriedade é de 7,579. Na Tabela 6.3 estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 6.3 - Teste de TUKEY da resistência à tração dos compósitos.

COMPÓSITOS	P0FE	P10FE	P20FE	P30FE
P0FE	0	0,5070	4,3787	4,2077
P10FE	0,5070	0	3,8717	4,7146
P20FE	4,3787	3,8717	0	8,5863
P30FE	4,2077	4,7146	8,5863	0

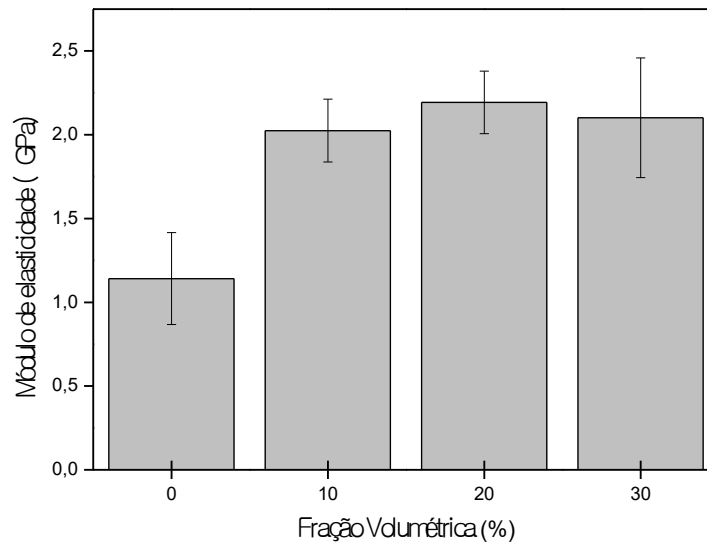
Fonte: autoria própria, 2022.

Com base nesses resultados, considerando o nível de significância de 5%, o compósito reforçado com 30% de volume de fibra de Envira apresenta uma diferença significativa em relação ao de 20% de volume de fibra, e apresentou melhor desempenho em tração. As demais composições não destacadas não apresentam diferenças significativas.

6.4.1.2 Módulo de elasticidade

Na Figura 29 apresenta o gráfico referente ao módulo de elasticidade.

Figura 29 - Módulo de elasticidade dos compósitos de matriz poliéster reforçados com fibra de Envira.



Fonte: autoria própria, 2022.

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade do material ensaiado mostraram que a matriz poliéster apresentou o menor valor para essa propriedade (1,14 GPa).

Segundo CALLISTER (2021), o módulo de elasticidade está diretamente relacionado com a rigidez do material, quanto maior for o módulo mais rígido é o material ou a deformação elástica é menor.

Assim, com base nos resultados, a inserção de fibras de Envira na matriz poliéster proporcionou um aumento na rigidez dos corpos de prova até a composição de 20% em volume de fibras, para qual apresentou o maior valor de módulo de elasticidade. É possível observar que quando comparadas as composições de 10 e 20% há um crescimento no módulo de elasticidade para compósitos produzidos com 20% em volume de fibra.

Contudo, quando comparadas as composições de 20 e 30% os valores para o módulo de elasticidade apresentam um decaimento para a composição de 30% em volume de fibra.

PINHEIRO *et al.* (2018), observaram que houve um aumento nos valores do módulo de elasticidade à medida que aumentava o volume de fibras de Guarumã incorporados a matriz epóxi.

Realizou-se a análise de variância (ANOVA) para verificação de diferença significativa entre as médias de deformação dos compósitos. Na Tabela 6.4 está apresentada a ANOVA da deformação.

Tabela 6.4 - Análise de variância do módulo de elasticidade dos compósitos reforçados com fibras de Envira.

Fonte da variação	Sq	GL	Mq	F	Valor-p	F crítico
Entre grupos	4,2773	3	1,4258	20,9278	2,21 E-06	3,0984
Dentro dos grupos	1,3625	20	0,0681			
Total	5,6398	23				

Fonte: autoria própria, 2022.

A partir da análise da tabela acima, observou-se que o F calculado (20,92) foi superior ao F crítico (2,21) para um nível de significância $\alpha = 5\%$. Indicando que houve diferença significativa no tratamento, rejeitando assim a hipótese H_0 .

Concluindo então, que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade de módulo de elasticidade.

O teste TUKEY foi realizado para a comparação das médias uma a uma de cada tratamento, e assim identificar quais as diferenças entre os resultados. O d.m.s encontrado para essa propriedade foi de 0,42. A Tabela 6.5 apresenta o TUKEY para o módulo de elasticidade.

Tabela 6.5 - Teste de TUKEY do módulo de elasticidade.

COMPÓSITOS	P0FE	P10FE	P20FE	P30FE
P0FE	0	0,8835	1,0518	0,9603
P10FE	0,8835	0	0,1683	0,0768
P20FE	1,0518	0,1683	0	0,0915
P30FE	0,9603	0,0768	0,0915	0

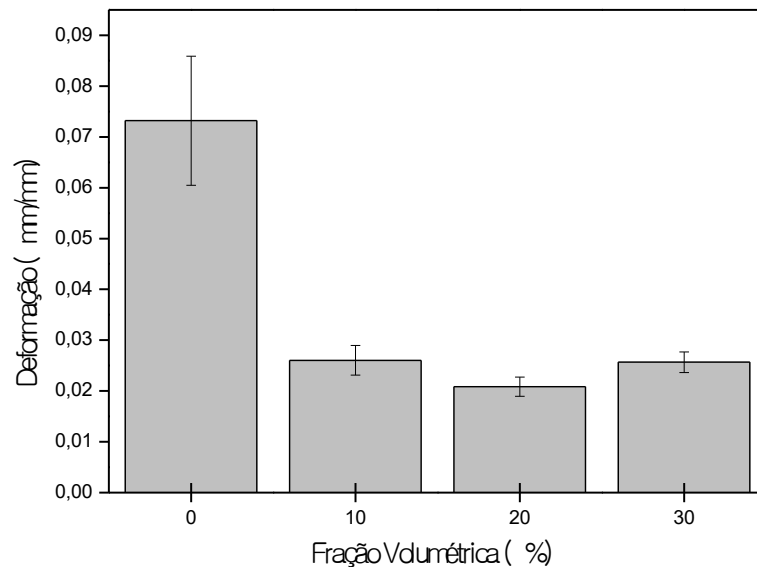
Fonte: autoria própria, 2022.

Considerando o nível de significância de 5%, observa-se que há uma diferença significativa entre as composições com reforço de fibras e a matriz poliéster, no entanto é possível observar que não há diferenças significativas entre as composições de 10, 20 e 30% em volume de fibras.

6.4.1.3 Deformação

A Figura 30 está apresentando a deformação ocorrida no ensaio de tração.

Figura 30 - Deformação dos compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de Envira.



Fonte: autoria própria, 2022.

Em relação à deformação média o maior valor está associado à matriz poliéster. À medida que as fibras foram adicionadas à matriz, a deformação diminui e quando comparados a composição de 10% em volume de fibra em relação a incorporação a composição de 20% em volume de fibra o valor da deformação diminui. E quando comparado a composição de 20% em volume de fibras com o de 30% de volume de fibra a deformação aumenta.

Os valores de deformação observados neste trabalho são menores se comparados com os resultados encontrados por SANTOS JÚNIOR (2017) ao incorporar fibras de Agave (*Angustifolia haw*) em matriz poliéster e por NEVES *et al.*, (2020) para a incorporação de fibra de Cânhamo em matriz poliéster, sugerindo que as fibras de Envira tendem a diminuir a capacidade de deformação do compósito.

A composição com 20% em volume de fibras foi a que apresentou menor deformação quando comparada a matriz poliéster e as composições de 10 e 30%. Confirmando assim, o resultado obtido na propriedade de módulo de elasticidade para o compósito de 20% em volume de fibra. Na qual foi possível constatar, por meio de análise gráfica, que quanto menor for à deformação maior será o valor do módulo de elasticidade. Como já apresentado na Figura 29.

Realizou-se a análise de variância (ANOVA) para verificação de diferença significativa entre as médias de deformação dos compósitos. Na Tabela 6.6 está apresentada a ANOVA da deformação.

Tabela 6.6 - Análise de variância da deformação dos compósitos reforçados com fibras de Envira.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0145	3	0,0048	13,6982	1,1E-05	2,9467
Dentro dos grupos	0,0099	28	0,0004			
Total	0,0245	31				

Fonte: autoria própria, 2022.

Como o F calculado (13,69) foi superior ao F crítico (1,1) ao nível de significância $\alpha=5\%$ com isso rejeita-se a hipótese H_0 . Podendo concluir que os tratamentos têm efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (deformação).

Aplicou-se o teste de TUKEY para a comparação de médias utilizando-se um nível de confiança de 95%. O d.m.s encontrado para essa propriedade foi de 0,025.

Na Tabela 6.7 estão apresentados os resultados obtidos para as diferenças entre valores médios de deformação entre fração volumétrica de fibras de Envira testadas.

Tabela 6.7 - Teste de TUKEY da deformação.

COMPÓSITOS	P0FE	P10FE	P20FE	P30FE
P0FE	0	0,0471	0,0523	0,0475
P10FE	0,0471	0	0,0052	0,0004
P20FE	0,0523	0,0052	0	0,0048
P30FE	0,0475	0,0004	0,0048	0

Fonte: autoria própria, 2022.

Considerando o nível de significância de 5%, observa-se que há uma diferença significativa entre os compósitos reforçados com fibras e a matriz poliéster. No entanto, é possível observar que não há diferenças significativas entre as composições de 10, 20 e 30% em volume de fibras.

Os resultados obtidos na caracterização mecânica revelaram que, os compósitos apresentaram um bom desempenho mecânico para todas as propriedades, sendo o compósito de 30% em volume de fibra o que apresentou o melhor reforço efetivo. Com base nesses resultados, a incorporação da fibra de Envira demonstrou ser um agente de reforço eficaz para a matriz poliéster, e sua utilização é uma alternativa ecologicamente correta e de baixo custo para reforço de compósitos poliméricos, com resultados compatíveis aos de outras FLNS, como o Buruti, Cânhamo, Malva e Agave.

7. CONCLUSÃO

A caracterização das fibras e dos compósitos reforçados com fibras de Envira revelou que:

A análise da microscopia óptica revelou que a fibra apresenta uma superfície lisa com desprendimento de fibras mais finas nas laterais.

O valor médio de densidade foi $0,23 \text{ g/cm}^3$, e o maior número de fibras encontram - se no intervalo de 0,60 mm a 0,79 mm.

Por conta da sua baixa densidade este material apresenta elevado potencial para produção de compósitos leves.

A análise da TGA da fibra de Envira apresentou perda de massa em aproximadamente 100° C , relacionado à perda de água, e a 320° C notou-se a maior perda de massa de aproximadamente 51% que pode estar relacionada à decomposição da celulose.

Desenvolveu-se um material compósito de matriz poliéster utilizando reforço de 10, 20 e 30% em volume de fibra com características e propriedades mecânicas em tração satisfatórias.

A incorporação da fibra de Envira como reforço em compósitos de matriz polimérica mostrou-se eficaz. Quando observados os resultados obtidos para os compósitos reforçados 30% em volume de fibra, a resistência à tração obtida foi de 51,41 MPa, um aumento de aproximadamente 8% em relação a matriz poliéster no valor médio.

Além disso, observou-se um aumento no módulo de elasticidade, e diminuição na deformação para a composição de 30% em volume de fibra.

A análise de variância confirmou que as frações volumétricas de fibras interferem diretamente nas propriedades finais dos compósitos.

Os resultados alcançados para tal formulação estão de acordo com outros resultados existentes na literatura quando observados trabalhos que realizam a incorporação de reforço de FLNS.

A incorporação da fibra de Envira apresentou forte potencial para produzir compósitos com boa resistência quando solicitados em tração, o que abre uma vasta gama de aplicações para este material.

A Envira é uma planta amazônica ainda pouco conhecida e explorada. Onde não há relatos na literatura da sua utilização em materiais compósitos. Assim, esta pesquisa pode ser considerada uma precursora na utilização dessa fibra, possibilitando que a mesma seja estudada como possível reforço em outras matrizes poliméricas.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo como base o presente estudo, a seguir são apresentadas algumas sugestões para dar continuação a esse trabalho:

- Estudar a relação entre a resistência mecânica e a distribuição diametral das fibras de Envira;
- Produzir compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de Envira finas, médias e grossas;
- Produzir compósitos de fibras de Envira com outras proporções de volume de fibras;
- Caracterizar mecanicamente através de ensaios de flexão e impacto, os compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de Envira;
- Avaliar a adesão fibra/matriz através da microscopia eletrônica de varredura na região da fratura dos compósitos;
- Investigar o desempenho mecânico de outras matrizes poliméricas, quando reforçados com fibras de Envira.

REFERÊNCIA

ADHIKARI, K. R, e Keerthi B. S. G., **“Exploration of Mechanical Properties of Banana/Jute Hybrid Polyester Composite”**. *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no 8, 2017, p.7171–76 DOI. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.043>.

AGRAWAL, B.D.; BROUTMAN, L.J., **Analysis and Performance of Fiber Composites**, Nova York: John Wiley & Sons. ISBN: 978-81-265-3636-8, 2000.

ALARCÓN J.G.S., **Levantamento florístico e etnobotânico em um hectare de floresta de terra firme na região do médio Rio Negro**, Roraima. Brasil. Me. Dissertação, Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2005).

ALKBIR, M.F.M.; SAPUAN, S.M.; NURAINI, A.A.; ISHAK, M.R. **Fiber properties and crashworthiness parameters of natural fiber-reinforced composite structure: a literature review**. *Composite Structures*, vol. 148, pp. 59-73. 2016.

AMIN, F.R, Khalid, H., Zhang, H. *et al.* **Métodos de pré-tratamento de biomassa lignocelulósica para digestão anaeróbica**. *AMB* 7 de Abril de 72 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4>.

AQUINO, R.C.M.P. *et al.*, **“Evaluation of The Critical Fiber Length of Piassava (*Attalea funifera*) Fibers Using the Pullout Test”**, *Journal of Materials Science Letters*, 2003, v. 22, pp. 1495-1497p.

ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materials: Engineering, Science, Processing and Design**. Butterworth-Heinemann, Oxford. 2018.

ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Cengage learning, 2014.

AUERSVALDT, B. L.; LAY, L. A.; MIRANDA, T. L.; **Incorporação de Fibras Vegetais de Bambu ao Concreto em Substituição à Fibras Sintéticas**. IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, 2019.

ASTM INTERNATIONAL. D 638 – 16: **Standard Terminology for Composite Materials**. West Conshohocken, 2016.

BAJPAI, P. **Structure of Lignocellulosic Biomass. Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production**, 7–12. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6_2. 2016

BRAGA NETO, J. L.. **Comportamento mecânico de materiais compósitos submetidos a impacto de baixa velocidade na presença de concentradores de tensão**. 99f. Tese (Doutorado Em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

BETELIE, A.; SINCLAIR, T.; KORTSCHOT, M.; LI, Y.; REDDA, D. **Mechanical properties of sisal-epoxy composites as functions of fiber-to-epoxy ratio**. AIMS Materials Science, 2019, 6, 985-996. 10.3934/matricsci.2019.6.985.

BUZETZKI, E.; SIDOROVÁ, K.; CVENGROŠOVÁ, Z.; CVENGROŠ, J., **Catalytic Role of Lignocellulosic Materials in Triacylglycerol Cracking**. J. Anal. Appl. Pyrolysis 2011, 92 (2), 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.07.005>.

CALEGARI, E.; OLIVEIRA, B. **Compósitos a partir de materiais de fontes renováveis como alternativa para o desenvolvimento de produtos**. Sustentabilidade em Debate. 7. 10.18472/SustDeb.v7n1.2019.17623.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CANDIDO, V. S. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**; orientado por Sergio Neves Monteiro – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2014.

CANEVAROLO Jr., Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. Sebastião V. Canevarolo Jr. -- São Paulo: Artliber Editora, 2010.

CARVALHO, L. H. de. **Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras Vegetais**. UFCG. 2003. Disponível no site: www.abpol.com.br/apostilacompositos.doc. Acessado em abril de 2022.

COSTA, D. S. *et al.* **Laminados de matriz polimérica e fibras de bambu contínuas e alinhadas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20, 2015, São Paulo. Anais... São Paulo: Blucher, 2015. p. 14234- 14241.

COUTO R. J. da C.; COLARES A. A.; **Programa de Pós-Graduação em Educação Universidade do Estado do Pará Belém-Pará- Brasil História de saberes amazônicos e emancipação política: o artesanato em Juruti-PA** Revista Cocar. V.15 N.33/2021 p.1-21 ISSN: 2237-0315.

DANIEL, I.M., ISHAI O., 2006. **Engineering Mechanics of Composite Materials. 2nd ed.** Nova Iorque: Oxford University Press.

FILHO, E. M. **Arquitetura popular**. Revista UFG, Goiânia, v. 20, n. 26, 2020. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/revistaufg/article/view/63271>. Acesso em: 15 jun. 2022

ELKADER, A.M.A. Abd. 2014. **“Investigation of the Mechanical and Tribological Properties of Polypropylene Matrix Composites Produced by Injection Method.”** Institute of Engineering and Technology Minia.

FERREIRA, M. V. F. *et al.* **Thermogravimetric characterization of polyester matrix composites reinforced with eucalyptus fibers**. Journal of Materials Research and Technology, 2017. Disponível em: Acesso em: 07 maio 2022.

FERREIRA, D. C. de O. N., *et al.* **“Weibull analysis of tensile tested piassava fibers with different diameters”**. Matéria (Rio de Janeiro), vol. 23, no 4, dezembro de 2018. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0588>.

FINK, J. K.; LEONBEN, M. **Reactive Polymers: Fundamentals and Applications - A Concise Guide to Industrial Polymers**. 3ª. Ed. Austria: Elsevier, 2018.

FORNARI J., CELSO C. M.; **Fibras vegetais para compósitos poliméricos** / Celso Carlino Maria Fornari Junior. – Ilhéus, BA: Editus, 2017.

FOWLER, PAULO A.; HUGHES, J. MARK; ELIAS, ROBERT M. **Biocompósitos: tecnologia, credenciais ambientais e forças de mercado**. Revista da Ciência da Alimentação e Agricultura, v. 86, n. 12, pág. 1781-1789, 2006.

FURTADO, J. B. de M., *et al.* **“Caracterização Química da Fibra do Caule da Palmeira de Babaçu Natural e Após Tratamento”**. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, vol. 5, no 3, maio de 2020, p. 56–64. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.25286/rep.v5i3.1254>.

FRENCH, A. D. 2015. **Idealized powder diffraction patterns for cellulose polymorphs**. Cellulose, 21, 885-896.

HON, D. N. S **Pragmatic aproceres to utilization of natural polymers: challengens and opportunities**. In: FROLLINE, E.; LEÃO A.; MATTOSO L. H. C. Natural polymers and agrofibers based composites. São Carlos: EMBRAPA Instrumentação Agropecuária, 2000. p. 1-14.

JAYARAMAN, K. **“Fabricação de Compósitos de Sisal-Polipropileno com Mínima Degradação da Fibra”**. *Compósitos Ciência e Tecnologia*, vol. 63, n.º 3–4, fevereiro de 2003, p. 367-74. DOI.org (Crossref), [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00217-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00217-8).

JESUS, L.C.C. de *et al.* **Comportamento térmico de compósitos de poliestireno reciclado reforçado com celulose de bagaço de cana**. *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 24, n. 3, 2019, p. e12421. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0736>

JOHN, M. J.; THOMAS, S. **Biofibres and Biocomposites**. *Carbohydrate Polymers*. 71, 343-364, 2008.

KWON, D.; KIM, N.; JANG, Y.; *et al.* **“Impacts of thermoplastics content on mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites”**. *Composites Part B: Engineering*, [S.L.], v. 216, p. 108859, jul. 2021.

LAUER, M.L.; RIBEIRO, K.C.; AMADEI, E.; CARVALHO, B.M. 2019. **Masterbatch de nanocelulose para a produção de nanocompósitos de matrizes termoplásticas**. *Brazilian Journal of Development*, 6, 5369-5382.

LIMA, A. M. de *et al.* **“Characterization of Polyester Resin Nanocomposite with Curauá Fibers and Graphene Oxide”**. *Revista Ciências Técnicas Agropecuárias*, vol. 28, no 2. www.redalyc.org, <https://www.redalyc.org/journal/932/93259288005/html/>. Acessado 23 de junho de 2022.

FLORA E FUNGO DO BRASIL. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB110273>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

FLIEGENER, S., KENNERKNECHT, T., KABEL, M., **Investigations into the Damage Mechanisms of Glass Fiber Reinforced Polypropylene based on Micro Specimens and Precise models of their Microstructure**, *Composites Part B*, 112, 327-343, 2017.

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

LUZ, F. S. **Avaliação do comportamento balístico de blindagem multicamada com compósito de epóxi reforçado com fibra de Juta**. 119p. Dissertação de mestrado – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro 2014.

MARCHI, B. Z., OLIVEIRA, M. S., BEZERRA, W. B. A., DE SOUSA, T. G., CANDIDO, V. S., DA SILVA, A. C. R., & MONTEIRO, S. N. **Ubim Fiber (*Geonoma baculífera*)**:

A Less Known Brazilian Amazon Natural Fiber for Engineering Applications. Sustainability. V. 14, n. 1, p. 421, 2022.

MARGEM F.M., J. BRAVO NETO, S.N. MONTEIRO “**Ramie fibers mechanical properties evaluation by the Weibull analysis**” (in Portuguese). In: Proceedings of the 19th Brazilian Congress on Materials Science and Engineering. Campos do Jordão, Brazil, 2010, pp. 1-

MARGEM, J.I. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva.** 2013. 130f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.

MARTINS, J. A. N.; **Obtenção, Caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRN – Natal, 2016.

MENDONÇA, R. M., **Pericarpo de Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) como aditivo retardante de cura do poliéster,** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais – UFRN - Natal, 2018.

MEOLA, C. *et al.* **New perspectives on impact damaging of thermoset- and thermoplastic-matrix composites from thermographic images.** Composite Structures, v. 152, p. 746–754, 2016.

MOHAMMED, L.; ANSARI, M. N.; PUA, G.; JAWAID, M.; ISLAM, M. S. **A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications.** International Journal of Polymer Science, v. 2015, pp.1-15, 2015.

NEWELL, J., **Fundamentos da moderna engenharia e ciência dos materiais.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 2010, ISBN 978-85-216-1759-4.

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

NERY B. R. T., JOSÉ N. M. “**Study of Treated and in Natural Banana Fibers as a Possible Material for Reinforcement in Polymeric Composites**”. Revista Virtual de Química, 2018, p. 313–22. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180024>.

NETO, F. L., & PARDINI, L. C. (2016). **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** Editora Blucher.

NEVES, A. C. C., *et al.* “**Propriedades Mecânicas Comparativas entre Biocompósitos de Matrizes Epóxi e Poliéster Reforçadas por Fibra de Cânhamo**”. *Jornal de Pesquisa e Tecnologia de Materiais*, vol. 9, n.º 2, março de 2020, p. 1296-304. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.056>.

MUKHTAR, I., Leman, Z., Ishak, MR e Zainudin, ES (2016). **Fibra de palma de açúcar e seus compósitos: uma revisão dos desenvolvimentos recentes**. *BioResources* 11 (4) <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10756-10782>.

NGUYEN, A.; NGUYEN, T. **Banana Fiber-Reinforced Epoxy Composites: Mechanical Properties and Fire Retardancy**. *International Journal of Chemical Engineering*, 2021, 1-9. [10.1155/2021/1973644](https://doi.org/10.1155/2021/1973644)

PEREIRA, W. A., *et al.* “**Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti**”. *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 26, no 1, 2021, p. e12932. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1232>.

PENNAS, L. G. de A. **Caracterização têxtil da fibra do Tucum** (>/i< Burret). Universidade de São Paulo, 8 de novembro de 2019. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.11606/D.100.2019.tde-15102019-181552>.

PINHEIRO, M.A., MONTEIRO, S.N., GOME, L.G., DA SILVA, A.C.R., & CANDIDO, V. S. **ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRAS DE GUARUMÃ**. 73º Congresso Anual da ABM – Internacional, parte integrante da ABM Week, 2018, São Paulo, SP, Brasil.

RIBEIRO, M. P., *et al.* “**Mechanical, Thermal and Ballistic Performance of Epoxy Composites Reinforced with Cannabis Sativa Hemp Fabric**”. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 12, maio de 2021, p. 221–33. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.064>

RIBEIRO, M. M.; PINHEIRO, M. A; RODRIGUES, J. D. S; RAMOS, R. P. B; CORRÊA, A. D. C; MONTEIRO, S. N; DA SILVA, A. C. R; CANDIDO, V. S **Comparação do Módulo de Young de Compósitos de Poliéster Reforçados com Fibras Lignocelulósicas Contínuas e Alinhadas de Juta e Malva Determinados Experimentalmente e a partir de Modelos Teóricos de Predição**. *Polímeros* 2022, 14, 401. <https://doi.org/10.3390/polym14030401>

RAMAMOORTHY, S. K., *et al.* “**A Review of Natural Fibers Used in Biocomposites: Plant, Animal and Regenerated Cellulose Fibers**”. *Polymer Reviews*, vol. 55, no 1, janeiro de 2015, p. 107–62. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1080/15583724.2014.971124>.

ROSANE, O., 2018. **Plastics: the History of an Ecological Crisis**. **EcoWatch Daily Newsletter**; <https://www.ecowatch.com/plastics-history-ecological-crisis-2560978473.html>. Acesso em: 02 janeiro – 2022.

SABA, N., JAWAID, M., ALOTHMAN, O. Y., et al, “**Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications**”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 35, n. 6, pp. 447–470, 24 Mar. 2016.

SANCHEZ, E.; CAVANI, C.S.; LEAL, C.V.; SANCHEZ, C.G: “**Compósito de resina poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento nas propriedades das fibras**”, *Polímeros* , 20 (3): 194-200, 2010, ISSN: 0104-1428.

SANJAY, M. R., MADHU, P., JAWAID, M., et al, “**Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review**”, *Journal of Cleaner Production*, v. 172, pp. 566–581, Jan. 2018.

SANTOS JÚNIOR, Z. J. D. **Fabricação e caracterização de um compósito com matriz de resina poliéster ortoftálica e carga de fibras de agave *Angustifolia haw.*** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica, Natal, RN, 2017.

SETHURAMAN, B., et al. “**Experimental Investigation on Dynamic Mechanical and Thermal Characteristics of Coccinia indica Fiber Reinforced Polyester Composites**”. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 15, janeiro de 2020, p. 155892502090583. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1177/1558925020905831>.

SILAEX. **Poliéster insaturado**. SILAEX, 2020. Disponível em <http://www.silaex.com.br>, Acesso em: 17 de fevereiro de 2022.

SILVA, H. S. P.; **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós- Graduação em Minas, Metalúrgica e de Materiais- PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SILVA, L. C da; MORAES, Y. M De; RIBEIRO, C; SOUZA, D; LOPES, F. P. D; MARGEM, J. I; MARGEM, F. M. M; MONTEIRO, S. N. **Avaliação Da Resistência À Tração Em Compositos De Matriz De Poliester Reforçados Com Fibras De Malva** , p. 1869-1874. In: 72nd ABM Annual Congress, São Paulo, 2017.

SINGH, Y. D.; MAHANTA, P.; BORA. U. **Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass through proximate, ultimate and compositional analysis for bioenergy production**. *Renewable Energy*, v. 103, p 490-500. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.039>.

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

SOUZA, A. T., et al. **“Caranan Fiber from Mauritiella Armata Palm Tree as Novel Reinforcement for Epoxy Composites”**. *Polymers*, vol. 12, no 9, setembro de 2020, p. 2037. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/polym12092037>.

SUN, R. C, **Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels: Chemistry, Extractives, Lignins, Hemicelluloses and Cellulose**, 1º Ed. Netherlands: 18 de janeiro de 2010.

TIWARI, S., *et al.* **“Optimization of Surface Treatment to Enhance Fiber–Matrix Interface and Performance of Composites”**. *Wear*, vol. 274–275, janeiro de 2012, p. 326–34. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.09.014>.

TITA, S. P. D. S; MEDEIROS, R; TARPANI, J. R.; FROLLINI E.; TITA V. **Chemical modification of sugarcane bagasse and sisal fibers using hydroxymethylated lignin: Influence on impact strength and water absorption of phenolic composites**. *Journal of Composite Materials*, London, V. 52, n. 20, p. 2743 – 2753, 2018. <https://doi.org/10.1177%2F0021998317753886>.

TURKI, A.; EL OUDIANI, A.; MSAHLI, S.; SAKLI, F. 2018. **Investigation of OH bond energy for chemically treated alfa fibers**. *Carbohydrate Polymers*, 186, 226-235.

WANG, B., *et al.* **“Natural/Synthetic Fiber-Reinforced Bioepoxy Composites”**. **Bio-Based Epoxy Polymers, Blends and Composites, organizado por Jyotishkumar Parames waranpillai et al.**, 1o ed, Wiley, 2021, p. 73–116. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1002/9783527823604.ch2>.

ZANCANELLA, A.A.; BARROS D.; CAMARGO A.; SILVA D.; LEÃO L.R.; NATALÍCIO M.A.N.. (2018). **Avaliação mecânica do compósito resina poliéster com fibra do epicarpo do coco**. 10.26678/ABCM. CONEM 2018. CON18-1326.

ZAKARIA, M.; Ahmed, M.; Hoque, MM et al. **Escopo de uso de fibra de juta para o reforço de material de concreto**. *Text Cloth Sustain* 2, 11 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40689-016-0022-5>