

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais

Gislane Nunes de Andrade

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PARTICULADOS DE EXOCARPO DE LICURI NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS
COM MANTA DE VIDRO**

SALVADOR

2024

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PARTICULADOS DE EXOCARPO DE
LICURI NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM MANTA DE VIDRO**

Gislane Nunes de Andrade

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal da Bahia (IFBA), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Mirtânia Antunes Leão
Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Camila Cruz da Silva

SALVADOR – BA

2024

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

A553i Andrade, Gislane Nunes de

Influência da adição de particulados de exocarpo de licuri nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com manta de vidro / Gislane Nunes de Andrade; orientadora Mirtânia Antunes Leão; coorientadora Camila Cruz da Silva -- Salvador, 2024.

92 p.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) -- Instituto Federal da Bahia, 2024.

1. Compósitos poliméricos. 2. Particulados do exocarpo do licuri. 3. Manta de vidro. 4. Ensaios mecânicos e físicos. I. Leão, Mirtânia Antunes, orient. II. Silva, Camila Cruz da, coorient. III. TÍTULO.

CDU 666.15

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGEM

**“INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PARTICULADOS DE EXOCARPO DE LICURI NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS
COM MANTA DE VIDRO”**

GISLANE NUNES DE ANDRADE

Produto Gerado: Dissertação

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Mirtânia Antunes Leão – PPGEM/IFBA

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Camila Cruz da Silva – IFBA (Vitória da Conquista)

Banca examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Mirtânia Antunes Leão

Orientadora do PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Prof. Dr. Luiz Antonio Pimentel Cavalcanti

Examinador Interno ao PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Prof. Dr. Aldemiro José Rocha Palma

Examinador Externo ao PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Prof^ª. Dr^ª. Jayna Kátia Dionísio dos Santos

Examinador(a) Externo(a) – Instituto Federal do Piauí – IFPI

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca examinadora em 24/07/2024.

AGRADECIMENTOS

Na maioria dos momentos de nossas vidas, nós só costumamos pedir, principalmente nos momentos difíceis; no entanto, nos momentos bons, quase sempre nos esquecemos de agradecer. Por isso, com uma imensa satisfação, quero deixar aqui registrado meu agradecimento a todos aqueles que me ajudaram nesta nova etapa da minha vida, a qual representa uma qualificação a mais e que, com certeza, implica em me tornar uma profissional melhor.

Inicialmente não poderia deixar de agradecer a DEUS, pois mesmo quando eu não acreditei em mim, ele acreditou. Ele me guarda, me ergue, me sustenta e me faz todos os dias encontrar força onde não tenho.

A minha mãe que me motivou me mostrando que além das minhas dificuldades, medos, ansiedades, tristezas o quão capaz eu sou.

Entre os maiores agradecimentos, eu dedico a mulher cheia de garra e parceira, a minha orientadora, professora Mirtânia, que mesmo eu não conhecendo praticamente quase nada do mundo dos materiais, ela teve muita paciência comigo, me acolheu, brigou, puxou minhas orelhas. Desde a infância, enfrento medos que são difíceis de superar, inclusive aqueles que geram inseguranças; no entanto, ela me reergueu como a guerreira que sou. Agradeço por compreender à minha maneira de pensar e agir, fornecendo-me apoio durante minha orientação e na realização deste trabalho.

Agradeço a professora Camila Cruz, que acreditou no meu potencial e me ajudou a findar este trabalho, desde a graduação até o mestrado.

Agradeço imensamente ao meu colega Rafael Evangelista, que não mediu esforços para me ajudar, incentivar, me aguentar e chorar junto comigo.

À coordenação e ao departamento do curso, que sempre esteve à disposição quando precisei. Ao professor Pimentel, por sempre me incentivar e me apoiar com as demandas do Instituto.

À Carina Soares do Nascimento, do Laboratório de Caracterização de Materiais (IFBA), pela disponibilidade e fundamental contribuição nos ensaios microestruturas.

À Yuri Martins Campos (IFBA), pela ajuda e apoio nos ensaios de caracterização mecânica dos corpos de prova.

Ao meu grupo de pesquisa, pois cada um dos componentes me incentivou, me explicou, me apoiou nas mínimas incertezas. Junto a eles, construí conhecimento e aprendi a lidar com as diferenças principalmente nessa reta final de curso.

"Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito debaixo do céu".

Eclesiastes 3:1

RESUMO

Diante do cenário de sustentabilidade ambiental, é crescente a procura pelo aproveitamento dos resíduos sólidos gerados nos diversos processos industriais. Dessa forma, o reaproveitamento de diversos tipos de resíduos, sobretudo aqueles de origem vegetal, tem se tornado relevante para a criação de compósitos poliméricos. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi analisar a influência do particulado do exocarpo do licuri (*Syagrus coronata* (Mart.) Beccari) no comportamento mecânico e físico de compósitos poliméricos reforçados com manta de vidro. Para isso, foram produzidas três placas de compósito de matriz polimérica (resina poliéster ortoftálica) com dimensões de 45x65 cm processados manualmente (*hand lay up*), em porcentagens de peso de 0%, 2,5% e 5% do resíduo. Os corpos de prova foram ensaiados para determinação das suas propriedades mecânicas e físicas através dos ensaios de tração uniaxial, flexão de três pontos, absorção de água e densidade aparente conforme as normas técnicas específicas. Os compósitos foram caracterizados através das análises microscópicas óptica e de varredura. Dessa forma, através da análise dos resultados, concluiu-se que os compósitos laminados tiveram uma perda nas propriedades mecânicas e físicas ao serem adicionados os particulados do exocarpo do licuri, podendo estes serem utilizados apenas como carga e não como reforço.

Palavras-chave: Compósitos Poliméricos. Particulados do Exocarpo do Licuri. Manta de vidro. Ensaios mecânicos e físicos.

ABSTRACT

Given the environmental sustainability scenario, there is a growing demand for the use of solid waste generated in various industrial processes. Therefore, the reuse of different types of waste, especially those of plant origin, has become relevant for the creation of polymer composites. In this sense, the objective of this work was to analyze the influence of particulate matter from the exocarp of the licuri (*Syagrus coronata* (Mart.) Beccari) on the mechanical and physical behavior of polymer composites reinforced with a glass blanket. For this, three polymer matrix composite plates (orthophthalic polyester resin) with dimensions of 45x65 cm were produced and processed manually (*hand lay up*), in weight percentages of 0%, 2.5% and 5% of the waste. The specimens were tested to determine their mechanical and physical properties through uniaxial traction, three-point bending, water absorption and apparent density tests in accordance with specific technical standards. The composites were characterized through optical and scanning microscopic analyses. Therefore, through analysis of the results, it was concluded that the laminated composites had a loss in mechanical and physical properties when the licuri exocarp particles were added, and these could only be used as filler and not as reinforcement.

Key-words: Polymeric Composites. Particulates from the Licuri Exocarp. Glass blanket. Mechanical and physical tests.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Representação de um compósito | 17 |
| Figura 2 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos..... | 19 |
| Figura 3 - Laminação manual..... | 22 |
| Figura 4 - Exemplos de matrizes poliméricas termoplásticas e termoendurecíveis. | 24 |
| Figura 5 - Etapas da cura do polímero termofixo. | 27 |
| Figura 6 – Fases do material compósito. | 29 |
| Figura 7 - Ligação interfacial formada | 30 |
| Figura 8 - Ângulo de contato e energia de superfície..... | 31 |
| Figura 9 - Compósitos de fibras naturais utilizados em automóveis..... | 34 |
| Figura 10 - Estrutura típica da parede celular de uma fibra vegetal. | 36 |
| Figura 11– Distribuição geográfica do licuri. | 39 |
| Figura 12- Corte vertical do fruto do licurizeiro..... | 40 |
| Figura 13 - Casca do Licuri. | 40 |
| Figura 14 - Licurizeiro..... | 41 |
| Figura 15 - Produtos gerados a partir do licurizeiro..... | 41 |
| Figura 16 - Modos de falha da interfase | 47 |
| Figura 17 - Modos de falha para o ensaio de tração uniaxial..... | 48 |
| Figura 18- Desenho esquemático dos mecanismos de falha em compósitos poliméricos reforçados com fibra..... | 49 |
| Figura 19 - Tipos de fraturas. | 50 |
| Figura 20 - Mecanismo de danos causados pela absorção de água | 52 |
| Figura 21 - Obtenção do Particulado do Licuri. | 53 |
| Figura 22- Peneirador eletromecânico. | 54 |
| Figura 23- Manta de vidro. | 55 |
| Figura 24- Fabricação dos laminados. | 56 |
| Figura 25- Esquemática dos ensaios realizados. | 58 |
| Figura 26 - Corpos de prova cortados..... | 58 |
| Figura 27-Dimensões dos CPs para o ensaio de absorção de umidade..... | 59 |
| Figura 28-Dimensões dos CP's para o ensaio de tração uniaxial. | 59 |
| Figura 29 - Dimensões dos CPs para o ensaio de flexão em três pontos..... | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 30 - Polimentos dos laminados. | 60 |
| Figura 31- Corpos de prova imersos em água destilada. | 60 |
| Figura 32 – Máquina de Tração Uniaxial. | 63 |
| Figura 33 - Ensaio de tração uniaxial. | 63 |
| Figura 34 - Ensaio de Flexão em Três Pontos. | 64 |
| Figura 35-Ensaio de densidade volumétrica. | 66 |
| Figura 36 - Metalizador Q150R e o MEV. | 67 |
| Figura 37 - Microscópio óptico. | 68 |
| Figura 38 – Análise microscópica dos laminados 0%,2,5% e 5%. | 69 |
| Figura 39 - Análise microscópica dos laminados. | 69 |
| Figura 40 - Corpo de prova fraturado na tração uniaxial – LAT. | 70 |
| Figura 41- Corpo de prova fraturado na tração uniaxial – LAT. | 71 |
| Figura 42 - Resultados densidade. | 71 |
| Figura 43 - Comparativo entre os valores da resistência à flexão dos laminados compósitos. | 74 |
| Figura 44 - Comparativo entre os valores da deflexão dos laminados compósitos. | 75 |
| Figura 45 - Comparativo entre os valores de módulo de elasticidade dos laminados compósitos. | 76 |
| Figura 46 - Análise comparativa da tensão máxima dos laminados. | 77 |
| Figura 47 - Comparativo entre os valores da deformação de ruptura dos laminados. | 78 |
| Figura 48 - Comparativo entre os valores do módulo de elasticidade à tração dos laminados. | 79 |
| Figura 49- Curva de absorção de água dos compósitos pela raiz quadrada do tempo. | 80 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Características do Poliéster. | 26 |
| Tabela 2 - Composição química fibras vegetais..... | 37 |
| Tabela 3- Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais. | 38 |
| Tabela 4- Composição química da fibra de licuri..... | 42 |
| Tabela 5 - Comparação do teor de ceras de algumas fibras vegetais e da fibra de licuri. | 42 |
| Tabela 6- Composição da fibra de licuri comparada às diversas fibras vegetais. | 42 |
| Tabela 7 - Propriedades físico-mecânicas das fibras de licuri. | 43 |
| Tabela 8- Tipos de Manta e teor de vidro e espessura do laminado. | 44 |
| Tabela 9- Propriedades típicas de PRFV formado por diferentes tipos de fibra de vidro. | 45 |
| Tabela 10 -Tipos de fratura. | 48 |
| Tabela 11- Propriedades físico-químicas da resina poliéster ortoftálica. | 54 |
| Tabela 12 - Quantidade de corpo de prova..... | 57 |
| Tabela 13 - Propriedades mecânicas à Flexão em Três Pontos dos laminados compósitos. | 73 |
| Tabela 14 - Propriedades mecânicas à tração uniaxial dos laminados compósitos. | 77 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|------|---|
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| CMC | <i>Ceramic-matrix composite</i> |
| CPs | Corpos de prova |
| FRCs | Compósitos reforçados com fibras sintéticas ou naturais |
| MEKP | Peróxido de metil-etil-cetona |
| MEV | Microscopia eletrônica de Varredura |
| MMC | <i>Metal-matrix composite</i> |
| P.A. | Padrão Analítico |
| PMC | <i>Polymer-matrix composite</i> |
| ST | Laminado Sem Tratamento |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO | 14 |
| OBJETIVOS | 15 |
| Objetivo Geral..... | 15 |
| Objetivos Específicos | 15 |
| 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 1.1 Materiais compósitos | 16 |
| 1.2 Classificação dos materiais compósitos..... | 18 |
| 1.3 Compósitos poliméricos particulados | 19 |
| 1.4 Laminação manual (<i>hand-lay-up</i>)..... | 21 |
| 1.5 Matriz polimérica | 23 |
| 1.5.1 Poliéster..... | 25 |
| 1.6 Fase de reforço (carga ou fase inorgânica)..... | 27 |
| 1.7 Interface..... | 29 |
| 1.8 Mecanismos da Interface..... | 30 |
| 1.8 Fibras | 32 |
| 1.8.1 Fibras Vegetais | 33 |
| 1.8.2 Exocarpo da Fibra do Licuri | 38 |
| 1.8.3 Manta de vidro..... | 44 |
| 1.9 Mecanismos de danos | 46 |
| 1.10 Análise da fatura | 48 |
| 1.11 Influência da umidade em compósitos poliméricos..... | 51 |
| 2 MATERIAIS E MÉTODOS | 52 |
| 2.1 Materiais | 53 |
| 2.1.1 Particulado do Exocarpo do Licuri | 53 |
| 2.1.2 Peneiras | 53 |
| 2.1.3 Resina Poliéster Cristal..... | 54 |
| 2.1.4 Desmoldante..... | 55 |
| 2.1.5 Manta de vidro..... | 55 |
| 2.2 Método | 56 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.2.1 | Fabricação dos Laminados | 56 |
| 2.2.2 | Corte corpo de prova..... | 57 |
| 2.2.3 | Polimento dos Laminados | 60 |
| 2.2.4 | Ensaio de Absorção | 60 |
| 2.2.5 | Ensaio de Tração Uniaxial | 62 |
| 2.2.6 | Ensaio de Flexão em Três Pontos..... | 64 |
| 2.2.7 | Ensaio de Densidade Volumétrica..... | 66 |
| 2.2.8 | Análise Microestrutural | 67 |
| 2.2.8 | Microscopia Óptica | 68 |
| 3. | RESULTADO E DISCUSSÃO | 68 |
| 3.1 | Análise microscópica | 69 |
| 3.2 | Análise Macroscópica da Fratura | 70 |
| 3.3 | Densidade Volumétrica | 71 |
| 3.3 | Ensaio mecânicos dos laminados compósitos..... | 72 |
| 3.3.1 | Ensaio de Flexão em Três pontos | 72 |
| 3.3.2 | Ensaio de Tração Uniaxial | 76 |
| 3.3.3 | Absorção de água..... | 80 |
| 3.3.4 | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) – 0%, 2,5% e 5% | 82 |
| 4. | CONCLUSÃO | 84 |
| 5. | SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS | 85 |
| 6. | REFERÊNCIAS..... | 87 |

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, percebe-se o interesse crescente nas áreas de pesquisas e inovação por materiais alternativos que reduzam o consumo energético global, bem como o impacto ambiental.

A utilização de fibras vegetais como reforço em matrizes poliméricas se enquadra nesses aspectos, uma vez que são recursos renováveis, biodegradáveis que apresentam baixo custo, baixa densidade, fácil manuseio e reduz o desgaste dos equipamentos em comparação às fibras sintéticas (Mcgregor, 2017).

O uso de materiais lignocelulósicos no desenvolvimento de compósitos particulados atrai a atenção de pesquisadores por ser um recurso renovável e contribuir com um menor impacto em problemas ambientais, como mudanças climáticas e ameaças à biodiversidade.

Entre muitas fibras de origem vegetal, uma das espécies florestais pouco explorada na literatura, e, que surge como carga promissor em matriz polimérica é o pó do exocarpo do licuri, o qual é extraído da fibra do exocarpo (camada externa do fruto) da palmeira de licuri (*Syagrus coronata* (Mart.) Beccari), abundante na Bahia e nos estados de Sergipe e de Alagoas. As suas características despontam como uma alternativa socioeconômica e ecologicamente viável para ser utilizada como carga em matriz polimérica, além de melhorar a economia dos agricultores locais em regiões isoladas, representando uma importante fonte de renda (Leão et al., 2013).

Diante do exposto, a motivação principal deste trabalho é atribuída às possíveis alterações que esses particulados podem proporcionar ao serem inseridos no compósito polimérico. Para tal, serão analisadas as propriedades mecânicas, físicas e microestruturais dos compósitos confeccionados, assim como seus mecanismos de danos. As respostas a estas indagações possibilitarão o incremento das cadeias produtivas envolvidas com o uso destes materiais, visando a sustentabilidade socioambiental, viabilizando o compartilhamento tecnológico, que atualmente tem o uso de particulados na confecção de produtos de baixo valor agregado, como artesanato, e poderá permitir sua aplicação em diversas áreas da engenharia e afins, em substituição às fibras sintéticas.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O presente estudo visa analisar a influência da adição do particulado do exocarpo do licuri (*Syagrus coronata*) nas propriedades mecânicas dos laminados compósitos de matriz polimérica reforçados com manta de vidro.

Objetivos Específicos

- Confeccionar três placas de compósito polimérico com 45 cm de largura e 65 cm de comprimento, sendo uma apenas com manta de vidro e resina poliéster (0%) e as outras duas com percentuais de 2,5% e 5 % do particulado de licuri.
- Analisar os desempenhos mecânicos dos laminados compósitos (resistência, rigidez e fratura) mediante os ensaios mecânicos de tração uniaxial e flexão em três pontos;
- Avaliar as fraturas dos laminados compósitos através de ensaios macrográficos e micrográficos;
- Realizar ensaio de absorção segundo norma técnica;
- Realizar estudo comparativo das propriedades mecânicas e físicas dos compósitos com e sem a adição do pó do exocarpo do licuri.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Materiais compósitos

Segundo a norma ASTM D3878-98, que trata da Terminologia Padrão para Materiais Compósitos, o material compósito é uma substância constituída de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material útil à engenharia, com certas propriedades não encontradas nos materiais constituintes, isoladamente.

Recentemente, os compósitos reforçados com fibras sintéticas ou naturais vêm ganhando cada vez mais importância, à medida que aumenta a necessidade de materiais leves e de alta resistência para usos especiais, a exemplo das indústrias automobilísticas, aeroespaciais, biomédicas e de construção.

Os compósitos poliméricos apresentam inúmeras vantagens em relação aos compósitos que possuem outros tipos de matrizes (Leão, 2013), o que justifica não só sua ampla utilização no mercado, mas também o crescimento exponencial de pesquisas nesta área. Assim, é possível exemplificar algumas dessas características vantajosas, como segue:

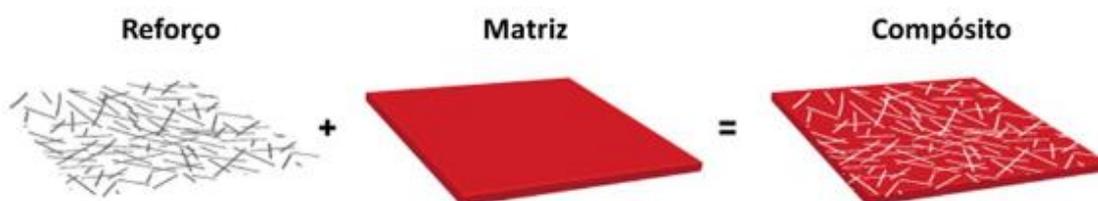
- Leveza – Devido ao peso específico das resinas e das fibras de reforço, os produtos fabricados a partir dos compósitos poliméricos apresentam um baixo peso específico;
- Resistência Química – Apresentam excepcional inércia química permitindo sua utilização em ambientes agressivos quimicamente;
- Durabilidade – Apresentam alta durabilidade graças a sua composição e as ligações cruzadas presentes nos polímeros formadas durante o processo de moldagem;
- Resistência Mecânica – Apresentam excelente resistência mecânica devido às suas características e a variedade de combinações que podem ser realizadas entre as resinas e os materiais de reforço;
- Resistência às Intempéries – Apresentam grande resistência aos efeitos do vento, da umidade, do sol e das oscilações térmicas. Além disso, quando

características não usuais são requeridas, aditivos como protetores de UV, agentes anti-dust e resinas especiais são amplamente utilizáveis;

- Facilidade na Manutenção – Apresentam fáceis e simples técnicas de reparo e manutenção;
- Flexibilidade Arquitetônica – Os compósitos têm uma grande vantagem sobre outros materiais estruturais, pois moldes com formas complexas são facilmente adaptáveis aos processos em utilização.

Em um material compósito polimérico uma fase é constituída por um polímero (chamado de matriz) e uma carga dispersa conhecida como reforço ou carga conforme Figura 1.

Figura 1-Representação de um compósito.



Fonte: Adaptado de Tanzi *et al.*, 2019.

A matriz funciona como um meio de ligação do reforço, mantendo a orientação e o espaçamento projetados e atua como um meio de transferência e de distribuição homogênea da carga para o reforço através do cisalhamento entre as camadas. Além disso, a matriz também é responsável por proteger o reforço de desgastes mecânicos, físicos e químicos (Tanzi *et al.*, 2019).

O reforço tem a finalidade de aumentar as propriedades mecânicas do compósito ao dificultar a propagação das fissuras na matriz. Com a transferência de parte dos esforços, a fratura do compósito tende a ser retardada, tornando o material mais resistente. A influência do reforço não depende apenas de suas propriedades, mas também de sua concentração, do tamanho, da forma, da disposição, da orientação e da interação deste com a matriz (Ali *et al.*, 2018).

A formação de uma boa interface entre matriz e reforço é essencial na concepção de um compósito, pois ela é a responsável pela transferência da carga no compósito. A adesão entre os componentes deve ser física e quimicamente

estável para que não haja a separação entre as fases durante a aplicação das cargas, bem como, para que não comprometa o desempenho mecânico do material. Problemas na interface podem gerar pontos de concentração de tensão, que contribuem para um comportamento mecânico inesperado e falha precoce do material (Tanzi *et al.*, 2019).

A adição de cargas é uma prática antiga na indústria de plásticos com o principal objetivo de redução de custos (Tanzi *et al.*, 2019). A possibilidade de alterações nas propriedades dos materiais com a adição de cargas corretas e em concentrações apropriadas podem proporcionar materiais muito resistentes.

Essa união além de intensificar as propriedades inerentes de cada componente, permite que certas características intermediárias desejáveis sejam enfatizadas e projetadas, de forma a obter excelentes combinações, como: resistência mecânica, tenacidade, densidade e rigidez, minimizando as propriedades indesejáveis (Callister Junior; Rethwisch, 2021).

1.2 Classificação dos materiais compósitos

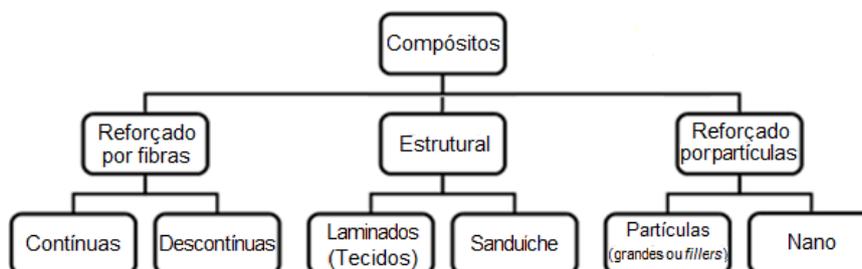
Os materiais compósitos podem ser classificados quanto a morfologia do reforço e pelo tipo de matriz. Segundo Kumar e Hiremath (2020), a classificação do reforço segundo a morfologia, mostra que os compósitos podem ser reforçados por fibras (contínuas ou descontínuas), estruturas (laminados ou sanduíches) ou partículas (grandes, fillers ou nanopartículas) conforme demonstrado na Figura 2.

Segundo Callister Junior e Rethwisch (2021), fibra é qualquer polímero, metal ou cerâmica que tenha sido estirado na forma de um filamento longo e delgado, com uma razão entre o comprimento e o diâmetro de pelo menos 100:1. Essa relação também é chamada de aspecto. Em geral, os objetivos de projeto dos compósitos reforçados com fibras incluem alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso.

Compósitos reforçados com partículas estão subdivididos em compósitos com partículas grandes e os compósitos reforçados por dispersão. A distinção entre eles está baseada no mecanismo de reforço ou de aumento da resistência. O termo

grande é usado para indicar que as interações partícula-matriz não podem ser tratadas a nível atômico ou molecular, devendo empregar a mecânica do contínuo.

Figura 2 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos.



Fonte: Adaptado de Kumar; Hiremath, 2020.

Para a maioria desses compósitos, a fase particulada é mais dura e mais rígida do que a matriz (Callister Junior; Rethwisch, 2018).

1.3 Compósitos poliméricos particulados

Os compósitos particulados são de grande importância em aplicações comuns e avançadas, pois combinam baixo custo e fabricação simples. O material particulado é misturado com a matriz durante a fabricação e não necessariamente melhora as propriedades mecânicas, mas satisfaz aspectos econômicos e ambientais. Os reforços particulados podem ser metálicos, poliméricos, óxidos, nitretos, carbetos ou materiais lignocelulósicos (Seretis et al., 2019).

O uso de materiais lignocelulósicos no desenvolvimento de compósitos particulados tem atraído a atenção de pesquisadores por ser um recurso renovável e contribuir com um menor impacto em problemas ambientais, como mudanças climáticas e ameaças a biodiversidade.

As propriedades mecânicas de compósitos particulados dependem de fatores como comportamento mecânico do particulado e da matriz, percentuais de reforço, distribuição e tamanho das partículas. Quanto ao comportamento mecânico do reforço na matriz, partículas duras dispersas em uma matriz mais dúctil aumentam a resistência ao desgaste e à abrasão do compósito. Quando as

partículas são menos rígidas do que a matriz, há uma melhoria na resistência ao impacto (Tanzi *et al.*, 2019).

Quanto ao volume de reforço na matriz, verifica-se um aumento na resistência mecânica do compósito até um percentual limite, em que o aumento de rigidez resultante da adição das partículas torna o material frágil e compromete o comportamento mecânico do compósito. Desta maneira, a resistência mecânica do compósito tende a reduzir a partir deste percentual limite (Nagarajan *et al.*, 2020).

Quanto ao tamanho das partículas, verifica-se que partículas maiores tendem a restringir o movimento da matriz quando submetido a cargas, o que não implica necessariamente em aumento da resistência mecânica, mas resulta em um aumento do módulo de elasticidade e diminuição da ductilidade. Partículas com menores dimensões (diâmetro menor que 0,25 μm) bem distribuídas na matriz impedem a deformação da matriz, pois impõem restrições ao movimento das cadeias carbônicas da matriz, verificando um aumento da resistência mecânica (Tanzi *et al.*, 2019).

O Quadro 1 mostra artigos publicados recentemente que trabalharam com resíduos lignocelulósicos, onde foram destacados a granulometria utilizada, percentual de substituição e método de fabricação.

Quadro 1 - Artigos de compósitos particulados com reforço natural.

| Resíduo | Granulometria | % | Método de fabricação | Referência |
|------------------------------|------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------------|
| Casca de Amendoim | 0,200 – 0,300 mm | 0, 5, 10 e 15% (peso) | Laminação manual | Prabhakar <i>et al.</i> (2015) |
| Casca de noz | < 0,200 mm | 0, 20, 30, 40 e 50% (peso) | Laminação manual | Salasinska <i>et al.</i> (2018) |
| Casca de arroz | < 0,425 mm | 10, 15 e 20% (peso) | Laminação manual | Jain <i>et al.</i> (2019) |
| Casca de semente de girassol | 0,1106 mm | 0, 15, 25 e 35% (peso) | Laminação manual | Barczewski <i>et al.</i> (2019) |
| Casca de avelã | 0,0476 mm | | | |
| Casca de noz | 0,0289 mm | | | |
| Resíduo de algodão | 0,020 e 0,100 mm | 40% (peso) | Infusão a vácuo | Müller <i>et al.</i> (2019) |

| Resíduo | Granulometria | % | Método de fabricação | Referência |
|---------------------------------|------------------|---------------------------------|---|--------------------------------|
| Casca de semente de borracheira | - | 5, 10, 15 e 20% (peso) | Moldagem a quente (90°C) | Lala <i>et al.</i> (2019) |
| Casca de limão | < 0,710 mm | 0, 5, 10 e 15% (peso) | Laminação manual | Sharma <i>et al.</i> (2019) |
| Casca de arroz | 0,202 mm (médio) | 10, 20, 30 e 40% (peso) | Laminação manual | Naik <i>et al.</i> (2020) |
| Casca de pistache | < 0,500 mm | 0, 10, 15 e 20% (peso) | Laminação manual | Gairola <i>et al.</i> (2020) |
| Casca de coco | 0,015 e 0,032 mm | 0, 3, 6, 9, 12, 15 e 18% (peso) | Moldagem por compressão (80°C e 17 MPa) | Nagarajan <i>et al.</i> (2020) |

Fonte: Baseado nos autores citados.

De acordo com os artigos, é possível analisar resíduos comuns encontrados em diversas partes do mundo, como a casca de arroz, o limão, o coco e as frutas secas oleaginosas (amendoim, noz, pistache e avelã), que podem ser originadas tanto da produção quanto do consumo desses alimentos. Quanto à granulometria do reforço, verifica-se uma opção por partículas em escala micrométrica, pois podem trazer um aumento da resistência mecânica do material. Quanto a substituição da matriz nestes compósitos, verifica-se um limite máximo de substituição de 50%, pois quanto maior a presença do reforço, mais viscoso e difícil de se trabalhar se torna o compósito, além de não favorecer o aumento do desempenho mecânico do material. Este aumento depende além da granulometria e percentual de reforço, da adesão na matriz, que está diretamente ligada a método de fabricação. Por conta da capacidade adesiva do poliéster, nota-se uma preferência pelo método de laminação manual para moldagem destes compósitos, devido à sua simples execução e baixo custo.

1.4 Laminação manual (*hand-lay-up*)

As principais dificuldades ao selecionar um método de fabricação de um material compósito incluem: o custo, a confiabilidade do processo, a geometria do

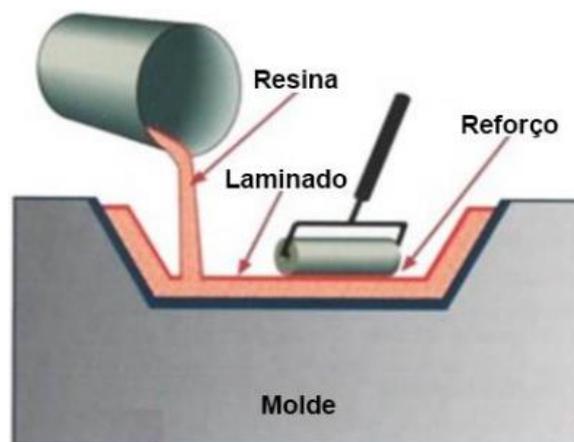
material, a qualidade da aderência interfacial fibra-matriz e a formação de bolhas e vazios durante o processo de fabricação (Oushabi *et al.*; 2017).

O processo de fabricação representa uma das fases mais importantes para a obtenção dos compósitos, considerando a reprodutibilidade do produto, possibilidade de produzir peças complexas, além da produção de peças com baixo custo (Lau *et al.*, 2018b).

Os critérios de seleção de um método dependem do volume de produção, complexidade do produto, tolerância dimensional e tempo de produção. Os principais métodos de fabricação de compósitos particulados são a laminação manual (*hand lay-up*), moldagem por injeção e moldagem por compressão. Dentre todos esses métodos, no trabalho foi utilizada a laminação manual.

A laminação manual, *hand lay-up*, se destaca entre os outros métodos de fabricação, por ter menor custo e utilizar qualquer tipo de reforço (tecidos, mantas, fibras contínuas) (Lotfi *et al.*, 2019). Este processo de fabricação envolve a colocação manual de camadas sucessivas de reforços sobre o molde e a resina é impregnada com o auxílio de escovas e rolos. A utilização de rolos garante a melhor distribuição da resina, além da remoção do ar aprisionado. O processo é repetido até que seja obtida a espessura desejada (Lotfi *et al.*, 2019). Em geral, o processo de laminação manual pode ser dividido em quatro partes: preparação do molde, revestimento, disposição e cura (Balasubramanian *et al.*, 2018). A Figura 3 ilustra o processo de laminação manual.

Figura 3 - Laminação manual.



Fonte: Adaptado de Callister; Rethwisch, 2021.

1.5 Matriz polimérica

A matriz tem a função de dispersar a fase de reforço e deformar o necessário para distribuir e transferir as tensões para o componente de reforço quando submetido a uma força, e ainda pode protegê-lo de qualquer efeito nocivo, de acordo com o grau de interações entre os componentes, essas características tendem a se torna mais eficiente (Callister; Rethwisch, 2021).

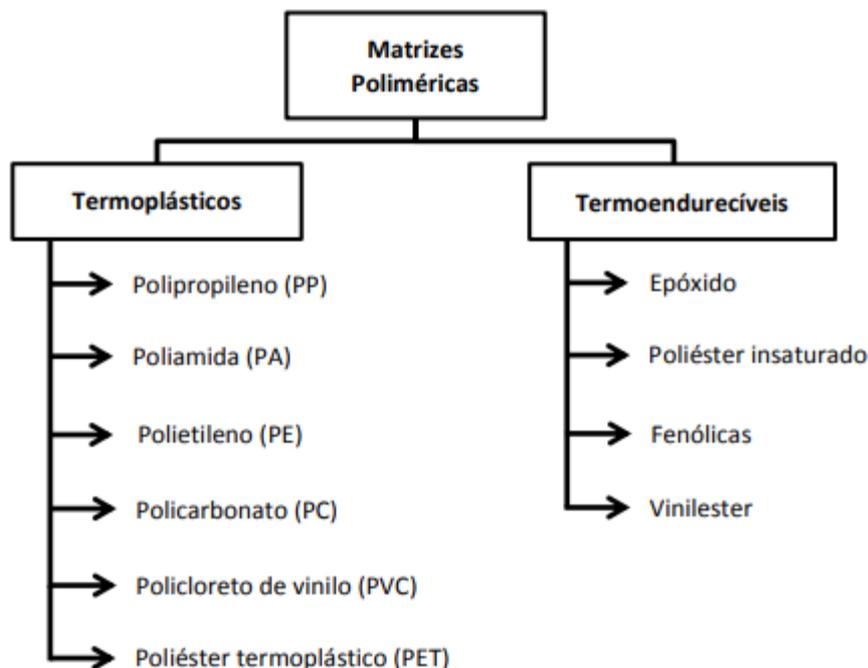
A matriz pode ser de três tipos: metálica, cerâmica e polimérica que serão descritos abaixo.

- Matriz polimérica (CMP ou PMC – polymer-matrix composite) consistem em uma resina polimérica como fase matriz, com fibras como o meio de reforço. Essa resina por sua vez é um plástico reforçado com alto peso molecular (Callister; Rethwisch, 2021).
- Matriz cerâmica - Os compósitos com matriz cerâmica (CMC – ceramic-matrix composite) são a base de cerâmicas geralmente associadas ao carboneto de silício (SiC), óxido de alumínio (Al₂O₃), fibras de nitreto de silício (SiN), dentre outros. Devido à deformação de ruptura da matriz ser menor do que a deformação de ruptura das fibras, os CMCs são chamados de compósitos inversos, enquanto na maioria dos compósitos poliméricos e metálicos, o fenômeno é exatamente o inverso. Portanto, em condições de carregamento, é a matriz que falha primeiro, a fim de evitar uma falha precoce das fibras quebradiças (Rajak *et al.*, 2019).
- Matriz metálica - Os compósitos com matriz metálica (CMM ou MMC – metal-matrix composite) constituem uma classe de material cuja matriz é um metal dúctil. Esses materiais podem ser usados em temperaturas de serviço mais elevadas que seus respectivos metais de base; além disso, o reforço pode melhorar a rigidez específica, a resistência específica, a resistência à abrasão, a resistência à fluência, a condutividade térmica e a estabilidade dimensional (Callister; Rethwisch, 2021).

Dessa forma, devido ao fato de o objeto de estudo desse trabalho estar baseado em matriz polimérica, especial atenção será dada a mesma.

A classificação das matrizes poliméricas se dá de acordo com o tipo de polímero aplicado, podendo ser termoplásticos ou termofixos, conforme Figura 4.

Figura 4 - Exemplos de matrizes poliméricas termoplásticas e termoendurecíveis.



Fonte: Pascault; Williams, 2018.

Os polímeros termoplásticos possuem cadeias lineares que não formam ligações entre cadeias carbônicas, e por isso tem a capacidade de serem moldadas diversas vezes com o acréscimo de temperatura. As termofixas não apresentam este comportamento, pois o processo de cura exotérmico faz com que ocorra a formação de cadeias carbônicas ramificadas, tornando-o mais rígido, infusível e insolúvel (Pascault; Williams, 2018).

A utilização de matrizes termoplásticas traz melhor tenacidade, resistência ao dano, estabilidade química e durabilidade ao compósito. A matriz termorrígida é mais aplicada na engenharia devido ao baixo custo, boa resistência à umidade, fácil manuseio e processamento. Em relação às termoplásticas, as matrizes termofixas são mais resistentes, rígidas e apresentam melhor estabilidade dimensional. As resinas termofixas mais utilizadas são a epóxi, vinil éster, fenólica e a poliéster insaturado (Tanzi *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019).

Os termoplásticos, como matrizes em materiais compósitos, vêm crescendo gradativamente devido à sua capacidade de reciclagem e rápido ciclo de produção

(Armentia *et al.*, 2019). Não oxidam, possuem alta resistência à corrosão e são excelentes isolantes térmicos e elétricos. Por sua leveza, alta resistência mecânica e resistência aos efeitos do meio ambiente, os termoplásticos são um material ideal para diversas aplicações (Hsissou *et al.*, 2021).

Já os termofixos são geralmente líquidos à temperatura ambiente, e se solidificam durante sua aplicação sob a influência do calor e de um aditivo denominado catalisador. Eles são, então, transformados pelo cozimento, que é uma modificação química que consiste em uma ligação muito forte entre as moléculas em três dimensões. Este processo é irreversível e o material tratado torna-se infusível e insolúvel na maioria dos solventes (álcoois, cetonas e hidrocarbonetos). Em geral, são mais rígidas que as matrizes termoplásticas, resistem melhor à fluência e são adequadas para moldar peças grandes com fibras curtas, longas ou em forma de tecidos (Saba; Jawaid, 2018).

As estruturas reticuladas fornecem a estabilidade térmica do polímero, assim como prendem as cadeias entre si para resistir aos movimentos vibracionais e rotacionais da cadeia a temperaturas elevadas, sendo que o rompimento destas ligações só ocorrerá em temperaturas muito elevadas (Dhakar; Ismail, 2021A).

1.5.1 Poliéster

Segundo o Instituto de Estudos e Marketing Industrial - IEMI (2022) nos últimos 70 anos, a produção de fibras sintéticas aumentou gradativamente, chegando em 2021 com 88,3 milhões de toneladas de fibras sintéticas e 33,3 milhões de toneladas de fibras naturais, sendo o poliéster responsável por 51% de toda produção de fibras sintética (Biver *et al.*, 2021).

Poliéster é o nome dado a uma classe de materiais adquiridos por meio de uma reação de condensação entre um poli álcool e um ácido poli carboxílico. O tipo de ácido influencia nas características finais das resinas poliésteres, podendo ser ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas. Se um ou ambos os componentes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla relativa entre os átomos de carbono, a resina resultante é insaturada (Mota, 2017).

O poliéster insaturado tem resistência adequada à água e a uma variedade de produtos químicos, intempéries, envelhecimento e, por último, mas não menos importante, é muito barato. Ele pode suportar temperaturas de até cerca de 80 °C e encolhem em média de 4 a 8% na cura.

De acordo com Mota (2017), as composições químicas do poliéster sólido determinam algumas características, tais como a flexibilidade, dureza, resistência mecânica, resistência química e resistência térmica. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades da resina de poliéster insaturada ortoftálica, a mesma utilizada no trabalho.

Tabela 1- Características do Poliéster.

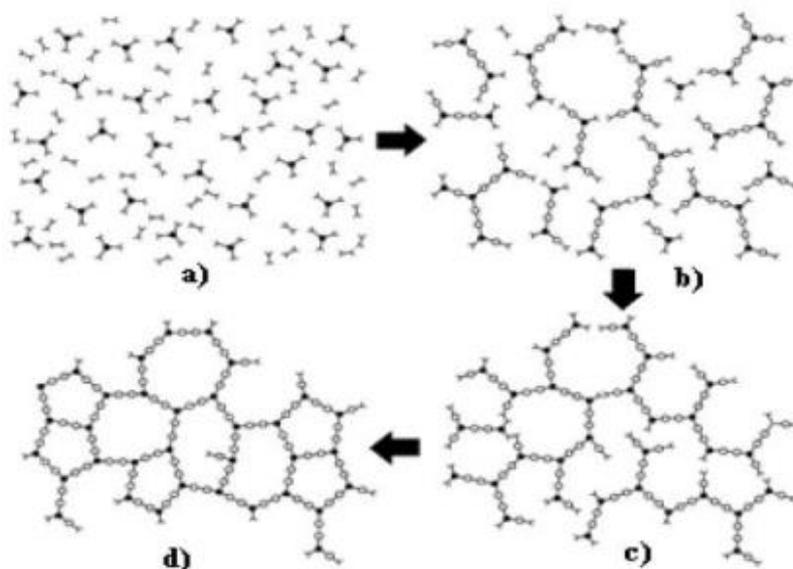
| PROPRIEDADES | VALORES | UNIDADES |
|------------------------|---------|----------|
| Tração | | |
| Resistência Máxima | 57 | MPa |
| Módulo de Elasticidade | 1,97 | GPa |
| Alongamento | 3,2 | % |
| Flexão | | |
| Resistência Máxima | 84,4 | MPa |
| Módulo de Elasticidade | 2,81 | GPa |

Fonte: Adaptado Mota, 2017.

O poliéster insaturado é uma resina termofixa comumente usada como material de matriz em compósitos poliméricos. Normalmente referido apenas como poliéster, este é muito diferente do poliéster saturado, que é termoplástico (Santos, 2022). Para uso em compósitos, sua aplicação inicia-se na forma de um líquido muito viscoso.

O estireno é usado para controlar a viscosidade da resina, e, então, a resina sofre uma reação de cura envolvendo uma cadeia de ligações cruzadas que leva ao endurecimento (Chawla *et al.*, 2019). Um catalisador (comumente, peróxido de metiletilcetona, MEKP) é usado para iniciar a reação de cura. Na Figura 5, tem-se as etapas da cura do polímero termofixo, onde na etapa (a) os monômeros apresentam com baixa massa molecular, (b) o início das ligações entrecruzadas, (c) as ligações entrecruzadas incompletas, mas após o ponto de gel, (d) as ligações entrecruzadas são completadas.

Figura 5 - Etapas da cura do polímero termofixo.



Fonte: Chawla *et al.*, 2019.

As resinas de poliéster apresentam como vantagens, entre elas:

- Boa estabilidade dimensional;
- Ótima resistência a ambientes quimicamente agressivos;
- Excelentes propriedades elétricas;
- Fácil pigmentação;
- Cura a frio;
- Utilização de moldes simples e baratos.

1.6 Fase de reforço (carga ou fase inorgânica)

As cargas (fillers) podem ser definidas como materiais sólidos, não solúveis, que são adicionadas com a finalidade de modificar uma ou mais propriedades do polímero puro. Sendo assim, as propriedades do compósito dependem tanto do reforço utilizada como da concentração, tamanho, forma, distribuição e orientação da mesma (Medeiro, 2016). As, as cargas podem ser classificadas de acordo com a sua capacidade de reforço como: ativas ou reforçantes, inerte ou de enchimento.

Quando os materiais poliméricos não possuem adições de reforços ou cargas, suas características nem sempre são satisfatórias frente às necessidades

exigidas para uma determinada aplicação ou fabricação de uma estrutura. As fibras recicladas vêm sendo estudadas para serem incorporadas como cargas em materiais compósitos, pois, além de diminuir os impactos ambientais causados pelo descarte incorreto, podem agregar propriedades mecânicas (módulo, alongamento, resistência à tração) ao material compósito (Ferdinánd *et al.*, 2023).

A carga de reforço se constitui na fase dispersa que está envolvida pela matriz, onde causa modificações nas estruturas do material, dependendo da forma como a incorporação é realizada, pode ocorrer um ganho ou perda nas propriedades mecânicas, em se tratando de materiais com maior grau de dureza e dispersão alta, são propensos a gerar aglomerados dentro do corpo da matriz (Mohammad, 2019).

Os compósitos com melhores propriedades são expressos em termos de parâmetros como: resistência máxima, módulo específico, módulo de elasticidade alongamento, resistência ao impacto dentre outros, esses parâmetros apresentam resultados superiores ao polímero sem a inserção da carga. Esse tipo de processo tem sido amplamente utilizado, empregando materiais de baixo peso específico tanto para a fibra quanto para a matriz (Herega, 2018).

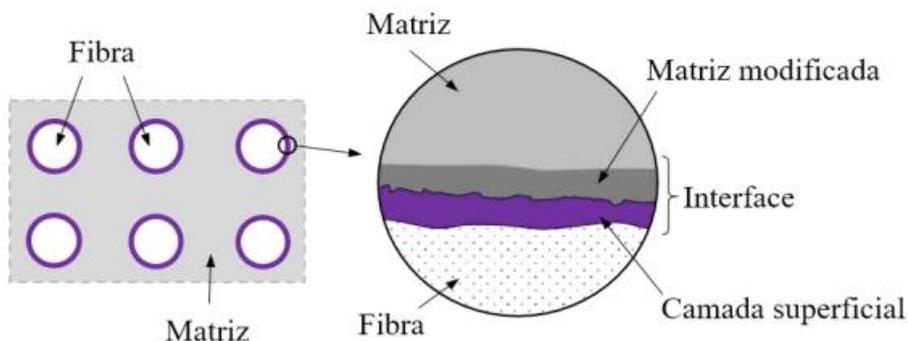
Os reforços podem ser classificados como, carga de enchimento, se reduzem o custo do material; carga de reforço, se modificam as propriedades mecânicas do produto ou cargas funcionais, quando se modificam as propriedades específicas do produto como condutividade elétrica ou condutividade térmica.

As cargas celulósicas e lignocelulósicas apresentam, dentre outras, as seguintes vantagens: possuem baixa densidade e baixa abrasão o que resulta em redução da densidade dos compósitos produzidos e reduz os gastos com manutenção dos equipamentos utilizados no processamento, devido a menores desgastes de ferramentas; baixas temperaturas de processamento; quanto às propriedades mecânicas geralmente provocam aumento do módulo elástico, como resultado do aumento da rigidez; não são nocivas saúde como as fibras de vidro e ainda em termos socioeconômicos e ambientais apresentam baixo custo, são amplamente disponíveis, além de serem biodegradáveis (Poletto, 2017).

1.7 Interface

Em escala macro, a interface é o limite comum entre o reforço e a matriz polimérica, por meio da qual a carga é transferida da matriz para as fibras com base na compatibilidade entre ambas as fases, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Fases do material compósito.



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

A natureza da adesão é dependente de características das superfícies envolvidas, como a composição química, arranjo atômico e energia interfacial, uma forma de quantificar as forças intermoleculares. Além da energia interfacial, que é a energia superficial presente na região de interação, parâmetros como ângulo de contato e quantidade de vazios também podem ser utilizados como estimadores da adesão no material (Hull, 2019).

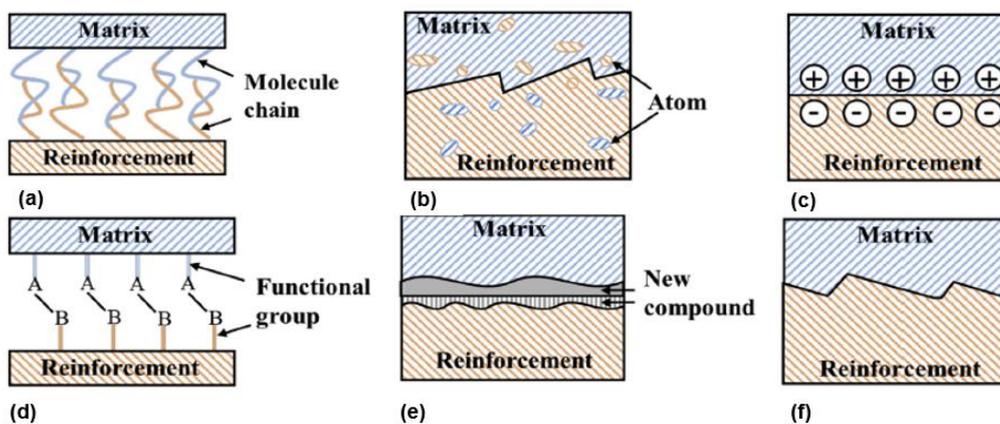
Dessa forma, quanto maior a adesão entre fibra-matriz, maior será o reforço do compósito e, conseqüentemente, um aumento da sua resistência. A qualidade dessa interfase depende de alguns fatores como: umidade, reação química, tensões residuais, morfologia da superfície e a rugosidade dos materiais. Quando essa interação não ocorre com a intensidade necessária, pode-se recorrer ao uso de modificadores (Azammi *et al.*, 2020).

Assim, compósitos com interface fraca têm resistência e rigidez baixas, e ductilidade alta, enquanto compósitos com interface forte têm resistência e rigidez altas, e são frágeis (Callister; Rethwisch, 2018).

1.8 Mecanismos da Interface

Os mecanismos de formação da interface em materiais compósitos incluem atração física entre corpos eletricamente neutros; entrelaçamento molecular; interdifusão; atração eletrostática; ligação química; ligação de reação; e ligação mecânica (DRZAL et al., 1983), como mostrado na Figura 7. Além disso, existem também algumas forças de baixa energia, como ligações de hidrogênio e forças de Van der Waal.

Figura 7 - Ligação interfacial formada por (a) entrelaçamento molecular; (b) Inter difusão de elementos; (c) atração eletrostática; (d) reação química entre grupos nas superfícies de reforço e matriz; (e) formação por reação química de um novo composto; (f) intertravamento mecânico.



Fonte: (HUANG *et al.*, 2021)

No processo de formação da ligação interfacial, antes que o reforço e a matriz entrem em contato um com o outro, as atrações físicas (incluindo atração eletrostática e atração física entre corpos eletricamente neutros) tendem a ocorrer primeiro. Após o contato do reforço e da matriz, outros mecanismos como o entrelaçamento molecular e a Inter difusão começam a operar. A ligação final entre o reforço e a matriz pode ser formada tanto por todos os mecanismos trabalhando separadamente ou de forma colaborativa (KIM & MAI, 1998b).

A atração física entre corpos eletricamente neutros forma a ligação interfacial por meio das interações de elétrons em escala atômica, sendo a molhabilidade – capacidade dos líquidos de se espalharem na superfície sólida – normalmente usada para caracterizar esta atração física (KIM & MAI, 1998b).

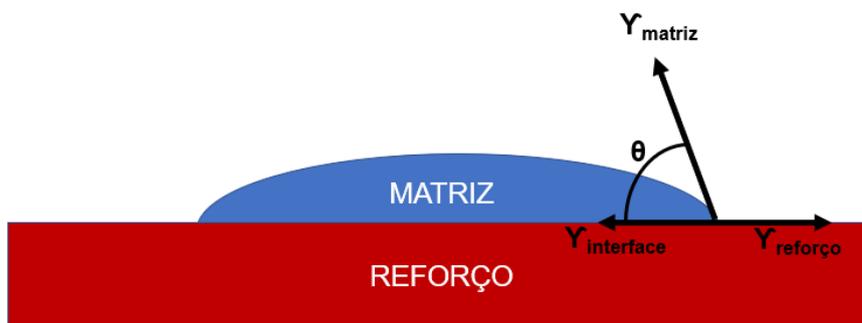
Com base na equação de Dupré, o trabalho termodinâmico é usado para descrever a molhabilidade da matriz (líquida) ao reforço (sólido). A relação entre a energia da interface ($\gamma_{interface}$), a energia da superfície do reforço ($\gamma_{reforço}$), a energia da superfície da matriz (γ_{matriz}) e a energia de adesão entre o reforço e a matriz ($\beta_{interface}$) é dada pela Equação XX (HUANG et al., 2021):

$$\gamma_{interface} = \gamma_{reforço} + \gamma_{matriz} - \beta_{interface} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

De acordo com a equação de Young, para uma gota de líquido em um sólido, como mostrado na Figura XX, as energias de superfície e interface também estão relacionadas ao ângulo de contato na interface θ , conforme mostrado na Equação 5.2:

$$\gamma_{reforço} = \gamma_{interface} + \gamma_{matriz} * \cos \theta \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Figura 8 - Ângulo de contato e energia de superfície.



Fonte: (HUANG et al., 2021)

Substituindo a Equação 5.3 na Equação 5.4 a energia de adesão pode ser calculada através da Equação 5.3, também conhecida como equação Young–Dupré (HUANG et al., 2021).

$$\beta_{interface} = \gamma_{matriz} * (1 + \cos \theta) \quad (\text{Eq. 5.3})$$

A equação de Young–Dupré pode ser modificada inserindo o fator de rugosidade (r) com base na suposição de que as ranhuras na superfície rugosa são completamente preenchidas por líquido (HUANG et al., 2021). O fator de rugosidade é definido como a relação entre a área da superfície rugosa real e a superfície lisa. A equação de Young–Dupré modificada é apresentada como:

$$\gamma_{\text{reforço}} * r = \gamma_{\text{interface}} * r + \gamma_{\text{matriz}} * \cos \theta_r \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Onde θ_r é o ângulo de contato na superfície rugosa.

A Inter difusão na interface indica que os átomos e moléculas do material fibroso se difundem no material polimérico, com base no equilíbrio termodinâmico entre as fibras e a matriz. Essas moléculas difundidas por sua vez, podem ser entrelaçadas com outras moléculas, sendo diretamente influenciada pela temperatura ambiente (KIM & MAI, 1998b).

A atração eletrostática ocorre quando há uma diferença na carga eletrostática entre as superfícies da fibra e da matriz devido a um desequilíbrio de elétrons ou íons, conforme mostrado na Figura xxx(c). A força da interface é dependente da densidade de carga (HUANG et al., 2021).

A ligação química na interface é formada pela conexão de grupos químicos compatíveis entre o reforço e a matriz. Uma maneira comum de melhorar a ligação química é utilizar agentes de acoplamento, a exemplo do silano. Nas moléculas do silano, uma extremidade pode reagir com grupos hidroxila (grupos hidrofílicos) da fibra vegetal; a outra extremidade reage com os grupos hidrofóbicos da matriz (PICKERING et al., 2016).

E por fim, o intertravamento mecânico ocorre entre a matriz e a superfície rugosa da fibra. A rugosidade da superfície da fibra podem ser os vales regulares ou irregulares, protuberâncias e fendas da superfície da fibra (LIU et al., 2012). Quando a superfície é mais áspera, a área de ligação entre a matriz e a fibra aumenta e, portanto, a resistência da ligação tende a ser maior.

1.8 Fibras

As fibras são utilizadas como reforço nos compósitos, caracterizadas por serem finas, flexíveis e por apresentarem um comprimento maior que a dimensão da sua seção transversal. As fibras são, normalmente, constituídas por macromoléculas ou polímeros, podendo ser de origem orgânica ou inorgânica (Alencar, 2022). As fibras são classificadas em naturais ou sintéticas.

As fibras sintéticas não são encontradas na natureza na forma de fibras, mas são sintetizadas pelo homem a partir de polímeros sintéticos. Sendo que, as fibras sintéticas apresentam um elevado desempenho em relação à resistência química, térmica e à rigidez, podendo ser aplicadas em diversas áreas, porém não são renováveis e são prejudiciais ao meio ambiente, além do elevado custo (Santos, 2017).

Dessa forma, as fibras naturais são bastante utilizadas para a substituição das fibras sintéticas, como a fibra de vidro. As fibras naturais são extraídas de fontes renováveis, são encontradas com abundância, são biodegradáveis, apresentam um baixo custo, possuem baixa densidade e alta deformabilidade, além de serem menos abrasivas que as sintéticas, gerando menores desgastes nos equipamentos envolvidos nos processamentos (Pereira *et al.*, 2021).

1.8.1 Fibras Vegetais

As fibras vegetais são uma das mais proeminentes alternativas aos materiais sintéticos devido à afinidade com a natureza, baixo custo, por serem biodegradáveis, recicláveis, não tóxicos, renováveis e não contribuir com a poluição ambiental (Kumar; Mohamed, 2018). As fibras vegetais podem ser extraídas de diferentes partes da planta, como caule (juta, linho e cânhamo), folha (sisal, piaçava e curauá), sementes (algodão) e frutos (coco e babaçu). As fibras provenientes do caule ou das folhas são denominadas de “fibras duras” e são as mais comumente utilizadas como reforço em compósitos poliméricos (Bandeira *et al.*, 2021).

As fibras vegetais são aquelas obtidas de plantas e árvores, ou seja, possuem como constituintes bases a celulose (cristalina e amorfa), hemicelulose e lignina, com estruturas químicas, além de pequenas quantidades de cera, sais inorgânicos, pectina, corantes naturais e substâncias nitrogenadas (Sanjay *et al.*,

2018). A aplicação de compósitos poliméricos à base de fibras vegetais pode ser uma alternativa econômica para as seguintes aplicações (Elanchezhian *et al.*, 2018):

- Construção civil: divisórias, pisos, portas, telhas, habitações pré-fabricadas que podem ser utilizadas em tempos de calamidades naturais (tais como inundações, ciclones, terremotos);
- Dispositivos de armazenamento: caixas de correios, silos de grãos, vasos de biogás etc.;
- Móveis: cadeira, mesa, prateleiras, estantes;
- Aplicações cotidianas: abajures, malas, capacetes;
- Indústrias automobilísticas: confecção de peças internas, painéis de portas e peças de acabamento, como almofadas dos assentos, encostos, tampas internas de porta-malas, porta-luvas, apoio de braço e forros.

Para aumentar a eficiência diminuindo o consumo de combustível, diminuir o peso do automóvel, diminuir o custo de componentes e ainda aplicando a ideologia de carros —verdes, os engenheiros utilizam as fibras naturais como reforço ou até mesmo em substituição completa de componentes automotivos, Figura 9. Podemos citar algumas delas, como o rami, a cana-de-açúcar, o sisal, o linho, a juta e o cânhamo (SATYANARAYANA *et al.*, 2017). Empresas como Mercedes Benz, Toyota e Daimler Chrysler utilizam compósitos em seus automóveis e visam expandir o seu emprego nos seus produtos.

Figura 9 - Compósitos de fibras naturais utilizados em automóveis.



(Fonte: Adaptado do O Globo, 2018).

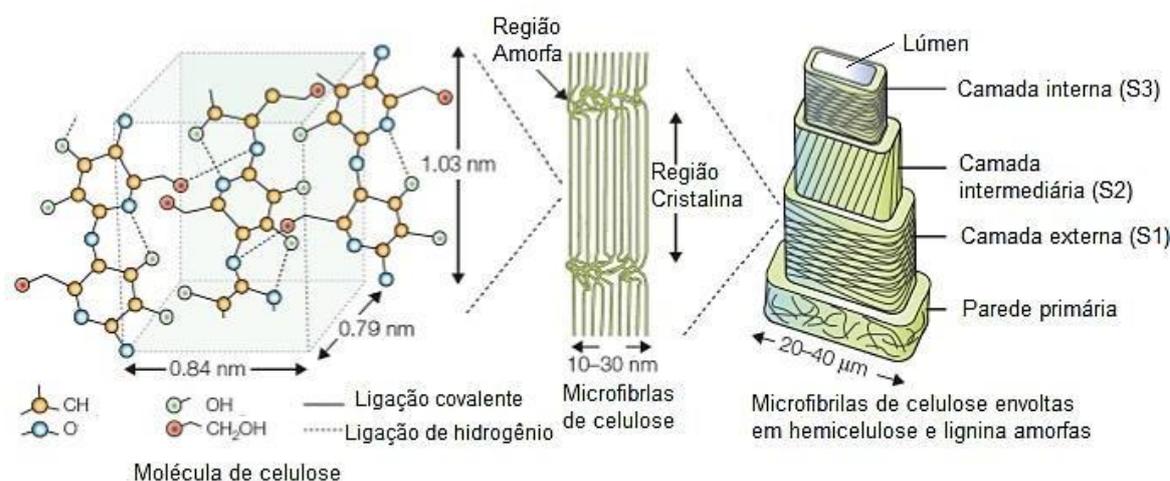
As fibras vegetais são basicamente constituídas de celulose, hemicelulose, lignina, além de pectina, cera, sais inorgânicos e substâncias nitrogenadas (Oliveira *et al.*, 2017).

A celulose é um polissacarídeo natural, homopolímero linear mais abundante e é o principal constituinte das fibras vegetais. Tem uma grande importância tecnológica por ser base de uma gama de produtos, como papel, fibras e aditivos (Reddy *et al.*, 2020). Além disso, este constituinte possui grande influência na alta resistência mecânica das fibras, devido ao seu alto grau de polimerização e orientação molecular.

A hemicelulose é composta de polissacarídeos altamente ramificados, possuindo um baixo grau de polimerização, de 10 a 100 vezes, menor que a celulose. A estrutura ramificada das hemiceluloses diminui a energia das ligações e a sua cristalinidade, tornando-a mais facilmente hidrolisada, quando comparada com a celulose (Reddy *et al.*, 2020). As hemiceluloses conferem a compatibilidade entre a celulose e a lignina, devido à sua natureza amorfa. Sendo o componente responsável pela biodegradação, alta absorção de umidade e degradação térmica das fibras (Leão, 2013).

A lignina é um polímero natural, insolúvel em água, composto por hidrocarbonetos complexos altamente aromático, reticulado e com ligações cruzadas do tipo tridimensional. Devido ao seu caráter hidrofóbico, é insolúvel também na maioria dos solventes e proporciona impermeabilização, reforço estrutural e resistência a ataques biológicos e físicos nas paredes celulares (Pickering *et al.*, 2016). A lignina está associada à hemicelulose, formando uma matriz que envolve as microfibrilas da celulose (Ouarhim *et al.*, 2019). A Figura 10, mostra a estrutura típica da parede celular de uma fibra vegetal.

Figura 10 - Estrutura típica da parede celular de uma fibra vegetal.



Fonte: Adaptado de Lau *et al.*, 2018.

As limitações associadas ao uso das fibras vegetais incluem a variabilidade de suas propriedades intrínsecas, alta sensibilidade a efeitos ambientais, como umidade e altas temperaturas, que exercem grande influência nas suas propriedades, enquanto a elevação da temperatura aumenta a plasticidade da lignina (Srisvatava *et al.*, 2017).

Por outro lado, a principal desvantagem associada à utilização das fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos diz respeito a sua elevada absorção de umidade (Ouarhim *et al.*, 2019). As fibras vegetais são hidrofílicas por natureza, os grupos hidroxila (OH) presentes em suas fibras reagem com as moléculas de água formando ligações de hidrogênio permitindo que absorvam grandes quantidades de água (Azwa *et al.*, 2013). Além disso, a matriz polimérica também absorve umidade, em quantidades menores em comparação com as fibras

vegetais, por difusão. As moléculas de água atuam como plastificante ao longo das cadeias poliméricas, prejudicando a integridade estrutural do material compósito (Sari *et al.*, 2018).

As limitações associadas ao uso das fibras vegetais incluem a variabilidade de suas propriedades intrínsecas, alta sensibilidade a efeitos ambientais, como umidade e altas temperaturas, que exercem grande influência nas suas propriedades, enquanto a elevação da temperatura aumenta a plasticidade da lignina (Daud *et al.*, 2018). A Tabela 2, apresenta a composição química de algumas fibras vegetais.

Tabela 2 - Composição química fibras vegetais.

| Nome da Fibra | Celulose (Wt. %) | Lignina (Wt. %) | Hemicelulose (Wt. %) |
|---------------|------------------|-----------------|----------------------|
| Abacá | 56 – 63 | 7 – 13 | 20 - 25 |
| Algodão | 82,7 | 0,7 – 1,6 | 5,7 |
| Banana | 62 – 64 | 5 | 19 |
| Bambú | 26 – 65 | 5 – 31 | 30 |
| Cana | 45,0 | 23 | 20 |
| Cânhamo | 70,2 – 74,4 | 3,7 – 5,7 | 17,9 – 22,4 |
| Curauá | 70,7 – 73,6 | 7,5 – 11,1 | 9,9 |
| Coco | 37 | 42 | 20,0 |
| Juta | 61 – 71,5 | 12 – 13 | 13,6 – 20,4 |
| Kenaf | 45 – 57 | 21,5 | 8 – 13 |
| Linho | 71 | 2,2 | 18,6 – 20,6 |
| Palma | 70 – 82 | 5 – 12 | – |
| Piaçava | 29 | 45 | 11 |
| Rami | 68,6 – 76,2 | 0,6 – 0,7 | 13,1 – 16,7 |
| Sisal | 67 – 78 | 8 – 11 | 10 – 14,2 |

Fonte: Reddy *et al.*, 2020.

No geral, as fibras vegetais possuem elevada resistência específica, devido aos seus altos valores de resistência à tração e baixo peso. Quanto a forma e diâmetro, não apresentam homogeneidade, o que gera uma grande variação em suas propriedades. Além disso, possuem natureza polar, alta capacidade de absorção de água e susceptibilidade a ataques de fungos e bactérias (Halip *et al.*, 2019).

Quando aplicadas como reforço em compósitos, as fibras vegetais conferem bom isolamento térmico e acústico, maior tenacidade e leveza. Em termos de fabricação, requerem menor energia e são menos tóxicas (Mahboob; Bougherara, 2018). Por essas razões, as fibras vegetais vêm substituindo fibras sintéticas, apresentando grande potencial de aplicação na indústria na construção civil.

Os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados por fibras vegetais, são a geometria (diâmetro, comprimento e forma), orientação da fibra na matriz, absorção de umidade, molhabilidade em relação a matriz, estabilidade dimensional (efeito do inchaço da fibra) e porosidade (Lau *et al.*, 2018b). As condições de processo de fabricação (método de mistura, temperatura, pressão) também interferem nas propriedades finais dos compósitos poliméricos, pois influenciam na dispersão e distribuição da fibra na matriz e na adesão entre as fases. As propriedades mecânicas de algumas fibras vegetais são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3- Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais.

| Propriedades | Massa espec. real (g/m ³) | Absorção máxima (%) | Alongamento na ruptura (%) | Resistência à tração (MPa) | Módulo de elastic. (GPa) |
|---|---------------------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Coco (<i>Cocos Nucifera</i>) | 1177 | 93,8 | 23,9 - 51,4 | 95 - 118 | 2,8 |
| Sisal (<i>Agave sisalana</i>) | 1370 | 110,0 | 4,9 - 5,4 | 347 - 378 | 15,2 |
| Malva (<i>Urena lobata</i>) | 1409 | 182,2 | 5,2 | 160 | 17,4 |
| Celulose para papel imprensa (<i>Pinus elliottii</i> - princ.) | 1200 - 1500 | 400 | nd | 300 - 500 | 10 - 40 |
| Bambu (<i>Bambusa vulgaris</i>) | 1158 | 145 | 3,2 | 73 - 505 | 5,1 - 4,6 |
| Piaçava (<i>Attalea funifera</i>) | 1054 | 34,4 - 108 | 6 | 143 | 5,6 |

Fonte: Aquino (2019).

1.8.2 Exocarpo da Fibra do Licuri

O licuri é uma das principais palmeiras nativas do Semiárido Brasileiro. A Bahia é o estado que detém as maiores concentrações de licuri, especificamente os municípios de Itiúba, Maracás, Milagres, Monte Santo, Santa Teresinha e Senhor do Bonfim (Bondar, 1942).

A espécie é predominante nas regiões secas e áridas do bioma Caatinga, com uma área de distribuição que vai desde o norte de Minas Gerais, ocupando toda a porção oriental e central da Bahia, até o sul de Pernambuco, abrangendo ainda os Estados de Sergipe e Alagoas (Noblick, 1986). A Figura 11 mostra essa distribuição geográfica.

Figura 11– Distribuição geográfica do licuri.



Fonte: Oliveira, 2015.

O licuri, (*Syagrus coronata* (Mart.) Beccari), constitui uma espécie de grande importância social, econômica e ecológica nas suas áreas de ocorrência, uma vez que desta palmeira aproveita-se quase tudo (Leão *et al.*, 2013). Das suas folhas são extraídas as fibras que são muito utilizadas para confecção de artesanatos, tais como sacolas, chapéus, vassouras e espanadores. A polpa e as amêndoas são consumidas in natura, sendo usadas para fabricação de cocadas. Delas extrai-se um óleo usado na culinária (BONDAR, 1938).

Os coquinhos possuem formato oval. A casca é formada por fibras e a polpa é amarela, coberta por uma camada densa de pelos macios, que tem coloração do amarelo-esverdeada até o marrom. A epiderme ou exocarpo caracteriza-se pela superfície externa, lisa e cêrea, que comumente chamamos de “casca”. O exocarpo envolve o fruto e sua cor varia dependendo da variedade e maturidade do fruto. O mesocarpo trata-se da parte intermediária, caracterizado como a polpa fibrosa, mucilaginoso e geralmente apresenta a cor castanha. O endocarpo, trata-se do envoltório da amêndoa, demonstra a coloração negra, apresenta-se duro, espesso e resistente. Já o albúmen ou amêndoa é geralmente de cor branca brilhante e

apresenta-se revestido por uma película chamada de tegumento Figura 12 (GUIMARÃES *et.al.*; 2021).

Figura 12- Corte vertical do fruto do licurizeiro.



Fonte: Santos et al. (2011).

Os resíduos ou casca do licuri só tem utilidade em queima de fornos artesanais (Figura 13), pois as cinzas petrificam dificultando a limpeza (Mota, 2017).

Figura 13 - Casca do Licuri.



Fonte: Razera,2021.

Apesar da dificuldade de reutilização da casca do licuri, o licurizeiro (Figura 14) apresenta grande importância nos municípios onde se encontra, por representar fonte de renda para a população, no entanto, a sua exploração ainda se dá de forma extrativista. Os cachos de licuri, com 30 a 40 cm de comprimento,

têm em média 1.350 coquinhos, cada um deles com 2 a 3 centímetros de comprimento e aproximadamente 1,5 cm de diâmetro.

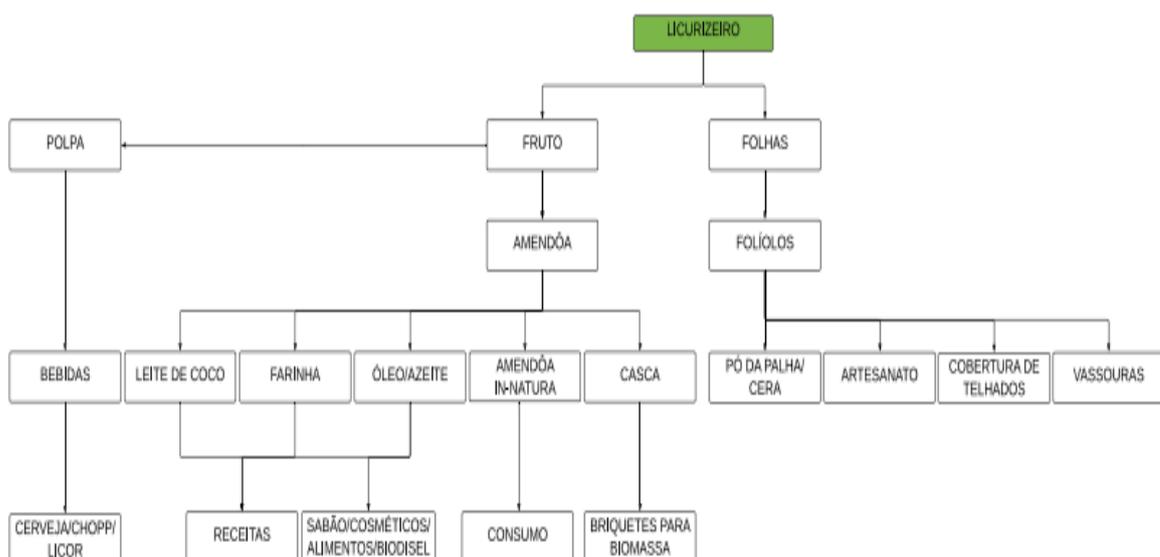
Figura 14 – Fruto do Licuri.



Fonte: Site Cerratinga (2022).

Dentre suas características o licurizeiro é resistente a pragas e doenças, estima-se que resista, produzindo por mais de 100 anos. Possui em média de 3 a 10 metros de altura e 15 a 25 cm de diâmetro (Michel, 2021). O licuri é essencial na região agreste, pois seus frutos e sementes são comestíveis e além de ser utilizado para inúmeros fins e produtos, conforme é observado na Figura 15.

Figura 15 - Produtos gerados a partir do licurizeiro.



Fonte: Razera, 2021.

Segundo a literatura, a composição das fibras varia de planta para planta da mesma espécie e conseqüentemente, também suas propriedades. A Tabela 4, mostra a composição química da fibra de licuri.

Tabela 4- Composição química da fibra de licuri.

| Componente | Valor médio (%) |
|-----------------------|------------------------|
| α-Celulose | 53,21 ± 4,08 |
| Hemicelulose | 11,61 ± 1,07 |
| Lignina | 20,69 ± 0,14 |
| Extrativos | 20,86 ± 1,30 |
| Solúveis em água fria | 17,60 ± 0,66 |
| Cinzas | 2,86 ± 0,02 |
| Umidade | 8,08 ± 0,00 |
| Cera | 12,72 ± 0,38 |

Fonte: Michel, 2021.

As fibras de licuri possuem alto teor de cera quando comparadas com outras fibras discutidas na literatura – vide Tabela 5.

Tabela 5 - Comparação do teor de ceras de algumas fibras vegetais e da fibra de licuri.

| Fibras | Ceras (%) |
|----------------------------|------------------|
| Algodão ^a | 0,6 |
| Juta ^a | 0,5 |
| Sisal ^a | 0,3 |
| Rami ^a | 0,3 |
| Linho ^a | 1,5 |
| Paina ^b | 1,5 |
| Licuri ^c | 12,716 |

Fonte: Leão, 2008.

Em comparação com outras fibras naturais comumente encontradas na literatura – Tabela 6 – o licuri tem menor teor de celulose que o sisal, algodão, curauá e juta, porém superando em concentração as fibras de coco.

Tabela 6- Composição da fibra de licuri comparada às diversas fibras vegetais.

| Componente % | Licuri | Sisal | Côco | Algodão | Curauá | Juta |
|-------------------------|---------------|--------------|-------------|----------------|---------------|-------------|
|-------------------------|---------------|--------------|-------------|----------------|---------------|-------------|

| | | | | | | |
|--------------------|-------|--------------------------------------|--|------------------|------------------|------------------|
| α -Celulose | 53,21 | 65,8 d 67,0 e 73,0 c 77,0 g | 36 – 43 e 43,4 k 46,0 j 47,0 i 47,7 l | 82,7 d 90,0 g | 70,7 – 73,6 b | 61 – 71,5 a |
| Hemicelulose | 11,61 | 10,1 c 12,0 d | 0,25k 15,0 i 21,0 j 25,9 l | 5,7 d | 9,9 b | 13,6 – 20,4 a |
| Lignina | 20,69 | 6,5 h 7,6 c 9,9 d 12,0 e | 17,8 l 27,2 – 33,8 h 31,0 (i) (j) 41 – 45 e 45,8 k | 0,2 h 1,0 g | 7,5 – 11,1 b | 12 – 13 a |
| Solúveis em água | 17,60 | 16,2 a | – | 1,0 a | – | 1,1 a |
| Umidade | 8,08 | 6,0 g 11,7 c | 12 g | 8,0 g | – | – |
| Cera | 12,72 | 2,0 a | – | 0,6 a | – | 0,5 a |

Fonte: Leão, 2009.

Quanto ao teor de solúveis em água, as fibras de licuri apresentaram maior percentual que todas as outras fibras, e as fibras de coco apresentam maior teor de umidade do que as demais fibras, que ficaram em uma faixa semelhante, sem variações significativas. As fibras de sisal e licuri apresentaram teores de cinzas, substancialmente, maiores do que as de coco e algodão.

Nos últimos anos, pesquisas relacionadas à utilização das fibras de licuri, como reforços em matrizes poliméricas, começaram a surgir na literatura (Michel, 2021), atribuído ao baixo custo, atóxicas, moderada resistência à tração e boa maleabilidade para ser tecida. A Tabela 7, apresenta as suas propriedades físico-mecânicas.

Tabela 7 - Propriedades físico-mecânicas das fibras de licuri.

| Diâmetro (μm) | Densidade (g/cm^3) | Resistência à tração (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) | Fonte |
|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 132 – 165 | 0,53 – 0,56 | 370 – 902 | 4,5 – 43,2 | Leão <i>et al.</i> , 2011 |
| 140 – 153 | 0,82 | 218 – 833 | 18 | Oliveira, 2010 |
| – | 1,24 | 420 – 536 | 14,8 – 20,1 | Thomas, 2011 |

Fonte: Autoria própria, 2024.

1.8.3 Manta de vidro

As mantas são arranjos aleatórios de fibra de vidro, cortadas de forma uniforme e agregadas na forma de um lençol por meio de ligantes. Elas são utilizadas no processo Handy Lay-up (laminação manual). Quando impregnadas com resina, as mantas apresentam praticamente as mesmas propriedades das mechas de roving picadas. Elas permitem um maior controle da espessura e possibilitam a fabricação de superfícies mais homogêneas (Rodrigues, 2018).

As mantas (mats) se subdividem em mantas de fios picados (chopped strand mats) e mantas de fios contínuos (continuous filament mats). Podem ser consideradas como a terceira categoria de fibras de vidro, possuindo dois processos de fabricação (Levy Neto, 2013).

No caso das mantas de fios picados (chopped strand mats) a espessura é obtida pela velocidade com que a esteira passa sob os picotadores, permitindo maior ou menor quantidade de fios picados por metro quadrado (Mukhtari et al.). As duas diferenças básicas nas mantas, quanto aos tipos, são:

- Fios contínuos dispersos aleatoriamente, em uma ou mais camadas;
- Fios descontínuos dispersos aleatoriamente numa única camada, com espessura obtida pelo tempo de deposição por área.

As mantas são subdivididas pela sua gramatura, isto é, pelo seu peso em relação à área. A comercialização é feita na forma de rolos com 1,10 m ou 1,30 m de largura e comprimento contínuo até atingir aproximadamente 90 kg. A Tabela 8 seguir mostra os diversos tipos de mantas e suas respectivas gramaturas.

As fibras curtas são obtidas pela distribuição de fibras contínuas com variação de comprimento entre 0,6 e 5,0 cm, podendo ser utilizadas em variadas técnicas de laminação, como a manual. Esse tipo de material possui distribuição relativamente constante da resistência em qualquer direção devido à distribuição aleatória das fibras, e é capaz de devolver a mesma tensão em qualquer direção (Teixeira, 2021).

Tabela 8- Tipos de Manta e teor de vidro e espessura do laminado.

| Tipo | Espessura por camada (mm) | Gramatur ag/m ² | Teor de vidro no laminado (por peso) | | |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------|--------|
| | | | Mínimo | Médio | Máximo |
| Manta 450 | 1,0 -1,1 | 450 | 25 | 30 | 45 |
| Manta 300 | 0,7 – 0,9 | 300 | 25 | 30 | 45 |
| Manta 225 | 0,5 -0,7 | 225 | 20 | 30 | 40 |

Fonte: Owens Corning, 1993.

Segundo Callister Jr. (2016), a fibra de vidro é uma fibra sintética, utilizada por meio da aglutinação de finíssimos filamentos flexíveis, que são estirados na forma de fibras de alta resistência. A fibra de vidro é um dos materiais de reforços mais utilizados para a fabricação de materiais compósitos, sendo que quando combinada com um material polimérico forma um compósito resistente e flexível.

Quando as fibras de vidro são aglutinadas por uma resina polimérica possui alta durabilidade e eficiência estrutural (relação resistência/peso) e baixo custo de produção (Abbood *et al.*, 2021).

As vantagens na sua utilização quando comparados com outros materiais, como a madeira ou metais, são o seu peso mais baixo, a inexistência de corrosão, a facilidade em obter formas complexas e o menor custo de fabricação.

Existem vários tipos de fibras de vidro, mas para a obtenção de compósitos, salientam-se as fibras dos tipos E, S e R. As fibras do tipo E apresentam boas propriedades elétricas, mecânicas e químicas e são as mais utilizadas devido ao seu custo reduzido. As fibras dos tipos S e R são produzidas a partir de vidros de alta resistência e muitos utilizados na indústria aeronáutica. Estas têm rigidez cerca de 35% superior e melhor retenção de propriedades mecânicas a temperaturas elevadas, quando comparadas com as fibras do tipo E (Marques, 2017).

A Tabela 9 exhibe informações sobre as propriedades do compósito PRFV de acordo com tipo de fibra utilizada.

Tabela 9- Propriedades típicas de PRFV formado por diferentes tipos de fibra de vidro.

| Tipo de fibra | Densidade [g/cmt] | Resistência a tração [MPa] | Módulo elástico de tração [GPa] | Deformação máxima [%] |
|---------------|-------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Vidro E | 2,50 | 3450 | 72,40 | 2,40 |
| Vidro S | 2,50 | 4580 | 85,50 | 3,30 |
| Vidro C | 2,50 | 3300 | 69,00 | 2,30 |
| Vidro AR | 2,27 | 1800-3500 | 70,00-76,00 | 2,00-3,00 |

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

1.9 Mecanismos de danos

Os danos em compósitos podem ser causados de diversas formas, tais como: descontinuidades das fibras, porosidade, delaminações, áreas pobres ou ricas em resina, ou em operações que envolvam abrasão, erosão, exposição a agentes ambientais, como temperatura, umidade e/ou radiação ultravioleta. Os danos nem sempre são visíveis, mas, podem reduzir a resistência do material (Wang *et al.*, 2020).

O dano começa em um nível de nano ou microescala, que pode ser detectado apenas pelo uso de algumas técnicas não destrutivas, como por exemplo microscopia eletrônica de varredura, testes termográficos, eletromagnéticos e ultrassônicos, dentre outros. Neste primeiro estágio, há uma mudança nas estruturas moleculares, cristalinas ou reticuladas como resultado do escoamento inicial e falha. Logo após esta fase, danos como fissuração da matriz, desaderência interfacial, flambagem e ondulação ocorrem progressivamente à medida que o material compósito falha em serviço, variando entre a escala de nível micro (mm) à escala dos milímetros (mm), enquanto carrega cargas. A fratura da fibra e arrancamento (pull-out) estão associados no estágio da magnitude dos milímetros. Sem controle, essas falhas continuam e posteriormente se desenvolvem em danos na escala macro (metros), a exemplo da delaminação. É necessário observar que a ruptura da matriz antecede a ruptura/trinca da fibra.

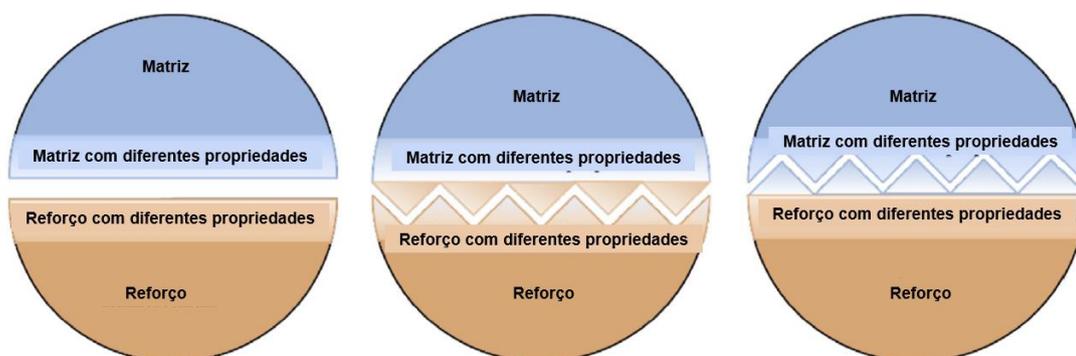
Nesse sentido são observadas três escalas para a descrição dos danos (Filho, 2019):

- a) macroescala – Considera o comportamento global do compósito laminado avaliado;
- b) mesoescala – define a lâmina e interface associada;
- c) microescala – Considera a estrutura heterogênea.

Os modos de falha podem ser estudados de duas formas. Existem os modos da interfase e as falhas abrangendo o compósito como um todo.

Em se tratando dos modos de falha na interfase, Huang et al. (2021) sugeriram a existência três tipos principais. São eles: falha na matriz; falha na fibra e falha por desaderência/descolamento. Essas falhas são ilustradas na Figura 16. Esses modos de falha podem ocorrer individualmente ou simultaneamente, dependendo da resistência de ligação, resistência crítica das fibras (por exemplo, resistência à tração no teste de pull-out e resistência à compressão no teste de push-out) e resistência ao cisalhamento da matriz polimérica.

Figura 16 - Modos de falha da interfase: (a) falha de descolamento, (b) falha no reforço, (c) falha na matriz.



Fonte: Adaptado de (Huang *et al.*, 2021).

Já em se tratando do compósito como um todo os mecanismos de falha seguem quatro estágios distintos (LEÃO, 2013; DHAKAL & ISMAIL, 2021c):

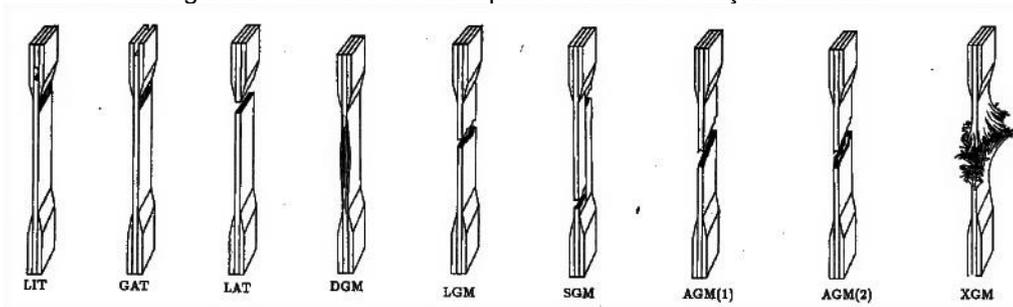
- Falha da matriz - Ocorrência de trinca na matriz paralelamente ou transversalmente às fibras sob os efeitos combinados de compressão, cisalhamento e tração;
- Falha da fibra - Ocorrência da ruptura transversal ou longitudinal da fibra pela combinação de ações de tração e compressão;
- Penetração - Isso é peculiar aos tipos de resposta ao impacto de balística ou hipervelocidade, onde o penetrador penetra e perfura completamente os compósitos poliméricos reforçados por fibras (Ismail, 2021C);
- Delaminação - Ocorre por tensões Inter laminares. Delaminação significa a separação de camadas individuais e geralmente resulta da interface fraca entre a fibra e a matriz. É uma fenda Inter laminar entre a área rica em resina

e as camadas de fibra. A delaminação nas camadas de interface pode causar a falha final. Danos de delaminação são comumente relatados quando os compósitos reforçados por fibras são submetidos à carga de compressão.

1.10 Análise da fatura

A análise da fratura tem como objetivo identificar os danos ocorridos após o carregamento mecânico nos compósitos, e podem ser avaliados por macroscopia (observação visual) seguida de microscopia óptica ou microscopia eletrônica de varredura (MEV), a Figura 17 mostra os tipos de falhas que podem ocorrer no ensaio de tração.

Figura 17 - Modos de falha para o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Adaptado da norma ASTM D3039, 2017.

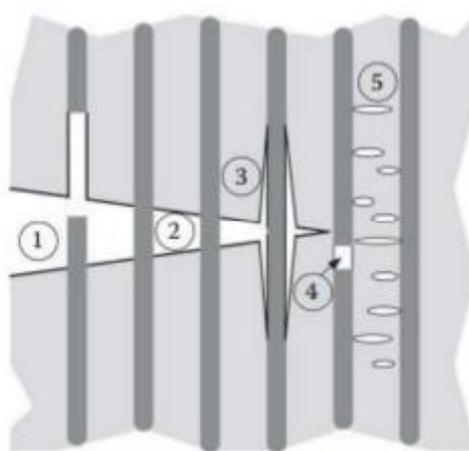
Para fraturas sob carregamento de tração, os tipos de fraturas possíveis estão mostrados na Figura 17. A tabela 10 descreve os tipos de fraturas. (ASTM D 3039-17).

Tabela 10 – Tipos de fratura.

| CÓDIGO | Definição do Código (normativo) | DEFINIÇÃO DO CÓDIGO |
|--------|---|---|
| LIT | <i>Lateral-inside-top</i> | Lateral dentro da lingueta da garra superior |
| GAT | <i>Grip/Tab - at grip/tab-top</i> | Desaderência da lingueta na garra superior |
| LAT | <i>Lateral-at grip-top</i> | Lateral na base da lingueta da garra superior |
| DGM | <i>Edge delamination-gage-middle</i> | Delaminação na borda do corpo de prova e no meio do galgo |
| LGM | <i>Lateral-gage-middle</i> | Lateral e no meio do galgo |
| SGM | <i>Longitudinal splitting-gage-middle</i> | No meio do galgo com fendas longitudinais |
| AGM | <i>Angled-gage-middle</i> | Angular e no meio do galgo |
| XGM | <i>Explosive-gage-middle</i> | Explosiva e no meio do galgo |

A análise microscópica dos danos tem como objetivo identificar as características de fratura em um material compósito, por meio da microscopia ótica e/ou MEV. A Figura 18, ilustra os principais tipos de fratura encontrados nos materiais compósitos.

Figura 18- Desenho esquemático dos mecanismos de falha em compósitos poliméricos reforçados com fibra: (1) ruptura de fibras, (2) pontes de fibra, (3) descolagem, (4) pull-out e (5) ruptura da matriz.



Fonte: Adaptado de Anderson, 2017.

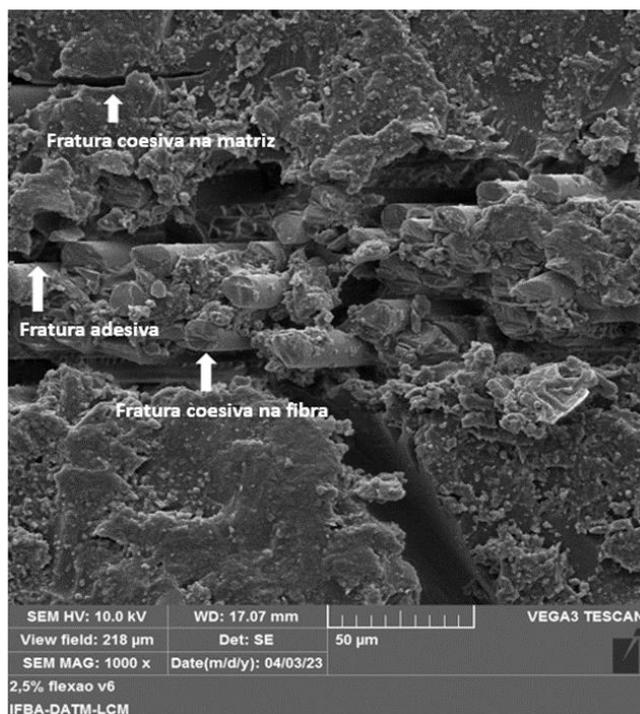
A ruptura de fibras (mecanismo 4) é causada quando o carregamento aplicado é superior ao suportado pela fibra. Naturalmente, este tipo de dano depende do material, das características geométricas da fibra e da fração volumétrica dos constituintes. Os defeitos ou danos na matriz (mecanismo 5) podem ocorrer devido a dois fatores: a) devido à baixa interação fibra/matriz. Neste caso, a matriz, geralmente de natureza frágil, não consegue transmitir a carga para as fibras e, em consequência deste fenômeno, a própria matriz se torna responsável por suportar o carregamento, fazendo com que trincas surjam nesta fase. b) o segundo fator pode ser explicado analisando regiões vizinhas a fibras rompidas ou bolhas de ar causadas por processos de moldagem. Essas regiões, que atuam como concentradores de tensão, tendem a redistribuir os carregamentos para o volume de resina mais próximo, levando à ruptura da matriz (Anderson, 2017).

A descolagem (mecanismo 3) ocorre quando existe uma falha na região de interface ou uma fraca adesão matriz/fibra. Neste caso, ocorre a separação das fases do compósito (fibra e matriz). Contudo, uma forte adesão matriz/fibra pode gerar o arrancamento abrupto das fibras, mecanismo conhecido como *pull-out* (mecanismo 1). As pontes de fibra ocorrem quando o compósito é constituído por fibras frágeis, matrizes dúcteis e uma interface forte. Neste mecanismo de falha (mecanismo 2), a trinca se propaga através da matriz sem romper as fibras, que são responsáveis por interligar as superfícies fraturadas (Callister, 2016).

Quando observadas por MEV, os danos nos materiais compósitos podem gerar três tipos de fraturas diferentes, conforme Figura 19. Segundo Leão (2013) os tipos de fraturas são:

- Coesiva na matriz – Corresponde a ocorrência de uma ou mais fissuras na matriz;
- Coesiva na fibra – Caracterizada pela ruptura de fibras ao longo do seu eixo, ou seja, na região longitudinal da fibra;
- Fratura do tipo adesiva – Ocorre devido ao descolamento interfacial entre fibra e a matriz, em alguns casos percebe-se a formação de sulcos na matriz devido a retirada das fibras.

Figura 19 - Tipos de fraturas.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

1.11 Influência da umidade em compósitos poliméricos

A capacidade de absorção de umidade das fibras naturais em compósitos poliméricos particulados se constitui como um ponto negativo na aplicação deste tipo de material, devido à característica hidrofílica das fibras naturais. A matriz, no entanto, tende a formar uma barreira, que protege a fibra contra a umidade e atividades biológicas, como a formação de mofo. A matriz também tende a reduzir problemas como inchaços e degradação da fibra, que geram defeitos nas interfaces e podem inviabilizar o uso das fibras naturais em compósitos nestas aplicações (Yingji *et al.*, 2018).

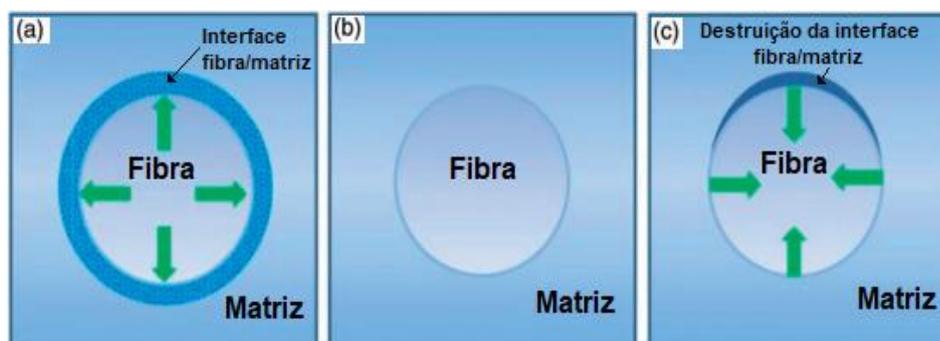
A absorção de água pela fibra vegetal ocorre em razão da interação específica entre a água e a superfície celulósica da fibra. A água penetra na celulose causando o inchamento da mesma, e, reduzindo assim a energia livre da superfície (Pisanu, 2018). A aplicação de tratamentos físicos e químicos podem aumentar ou reduzir a absorção de água, pois influenciam nos percentuais de celulose, lignina e hemicelulose da fibra (Chandrasekar *et al.*, 2017).

Em compósitos poliméricos, a difusão da água ocorre através da fibra e da matriz. Ela ocorre através de quatro mecanismos: difusão na celulose por

capilaridade; entre as cadeias poliméricas da matriz, pelas microtrincas e vazios da matriz; e pelos defeitos da interface formados após o inchamento das fibras (Khanlou *et al.*, 2017).

Através da absorção de água pela celulose, ocorre o inchamento da fibra, Figura 20a. Ao absorver água, as fibras naturais expandem até chegar ao seu ponto de saturação, Figura 20b. A água absorvida até este ponto está quimicamente ligada as hidroxilas da celulose e provoca variações dimensionais. A água absorvida acima do ponto de saturação da fibra é denominada água livre e não interfere nas dimensões das fibras. As mudanças dimensionais geradas pela absorção da água pela celulose, implicam na formação de trincas e microtrincas na matriz e destruição da interface fibra/matriz, Figura 20c. Além disso, o contato prolongado com a água provoca também a degradação das fibras através da destruição de seus constituintes, o que prejudica o seu comportamento mecânico (Mrad *et al.*, 2018).

Figura 20 - Mecanismo de danos causados pela absorção de água: (a) expansão da fibra úmida, (b) compósito saturado (c) contração da fibra durante a secagem.



Fonte: Adaptado de Khanlou *et al.*, 2017.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta todos os materiais utilizados para a confecção dos compósitos, bem como a metodologia utilizada para o processamento e caracterização.

2.1 Materiais

2.1.1 Particulado do Exocarpo do Licuri

O material utilizado como particulado foi o exocarpo do licuri, extraído da fibra de licuri (*Syagrus coronata*), oriundo dos municípios de Caldeirão Grande e Mairi, no semiárido baiano. As fibras não receberam tratamento prévio, e a fragmentação do exocarpo do licuri foi obtida através do uso de um moinho de facas. O objetivo da moagem do exocarpo do licuri foi obter uma redução da granulometria por meio de um processo de baixo custo, conforme Figura 21.

Após esse procedimento, o particulado foi pesado e separado para a composição do compósito nas porcentagens 0%, 25 % e 5%.

Figura 21 - Obtenção do Particulado do Licuri.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

2.1.2 Peneiras

A análise granulométrica foi conduzida conforme a norma ABNT NBR 7181 para análises granulométricas de solo. Para este ensaio, foram empregadas peneiras de 100, 200 e 270 mesh, com aberturas de 0,149 mm, 0,074 mm e 0,053 mm, respectivamente.

Para o peneiramento, adotou-se um aparelho agitador elétrico que dispõe de um único conjunto de seis peneiras com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, como demonstrado na Figura 22, o qual foi colocado 10 gramas de licuri agitados por aproximadamente 2 minutos separando as partículas grossas das finas. Foi utilizada a granulometria mais fina, pois a mesma apresenta uma melhor homogeneização ao misturar-se com a resina.

Figura 22- Peneirador eletromecânico.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Para os laminados adotou-se os resultados concentrados no fundo. Desta forma, o particulado utilizado foi de granulometria com abertura de 0,074 e o material grosseiro retido foi descartado. Foi utilizada a granulometria mais fina pois a mesma apresenta uma melhor homogeneização ao misturar-se com a resina.

2.1.3 Resina Poliéster Cristal

A resina utilizada como matriz foi a poliéster ortoftálica insaturada diluída em monômero de estireno, e suas propriedades físico-químicas são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11-Propriedades físico-químicas da resina poliéster ortoftálica.

| Descrição | Especificações |
|---|--|
| Ponto de Fulgor | 38 °C |
| Temperatura de Autoignição | 490 °C |
| Ponto de Ebulição | 145,2 °C |
| Pressão do Vapor | < 5mm Hg (à 15 °C) - solvente |
| Densidade relativa (H ₂ O = 1) | 1,1 – 1,15 g/cm ³ |
| Limites de Inflamabilidade | Inferior: 1,1 (% volume de ar) Superior: 6,1 (% volume de ar) |

Fonte: Autoria Própria, 2024.

2.1.4 Desmoldante

Para se obter um melhor acabamento de superfície e facilitar a retirada dos corpos de prova dos moldes utilizou uma cera desmoldante. Para garantir um bom resultado na aplicação da cera devemos ter uma atenção especial aos cantos e lado de contato da resina, sendo necessárias três demãos seguido de polimentos, respeitando o tempo de secagem, de aproximadamente quinze minutos, entre demão.

2.1.5 Manta de vidro

Foram utilizadas como reforço para a confecção do laminado, mantas de fibras curtas de vidro-E, com uma gramatura de 450 g/m² e medidas 45 x 65 cm. Escolheu-se esse tecido porque as fibras de vidro tipo E são as de menor custo e apresentam boas propriedades de rigidez e de desgaste. A Figura 23 mostra a manta de fibra de vidro utilizada na pesquisa.

Figura 23-Manta de vidro.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

2.2 Método

2.2.1 Fabricação dos Laminados

Para a confecção dos compósitos, inicialmente foram determinados os percentuais de carga que seriam estudados no trabalho. Os percentuais escolhidos foram 2,5% e 5% em peso de substituição da matriz pelo particulado do exocarpo licuri, baseados em literaturas que utilizaram os mesmos percentuais (Silva, 2019 e Cabral, 2016). Estes percentuais foram escolhidos visando estudar a maior substituição da resina poliéster pelo pó do licuri sem prejudicar a trabalhabilidade da mistura poliéster/licuri antes da moldagem.

Após a determinação dos percentuais, o particulado de licuri foi impregnado na resina poliéster com o endurecedor, na proporção de 1% em peso do metil-etil-cetona (MEKP), em uma mistura manual e aleatória por 10 minutos até a homogeneização, com intervalo de descanso após a mistura de 5 minutos para a dispersão das bolhas formadas durante o processo. Ao passar esse tempo, aplicou-se novamente a cera desmoldante no molde, seguido por uma quantidade de resina, conforme Figura 24.

Logo depois, utilizou-se o rolete para remoção de bolhas entre as camadas do laminado, que podem interferir nas propriedades finais do compósito obtido. Realizada a confecção, esperou-se o processo de cura do compósito em temperatura ambiente (25 ± 2 °C) por um período de 72 horas.

Figura 24- Fabricação dos laminados.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

2.2.2 Corte corpo de prova

A precisão dimensional na obtenção dos corpos de prova é fundamental para o êxito na determinação das propriedades mecânicas de um laminado compósito. As dimensões dos corpos de prova e as especificações foram determinadas conforme as normas ASTM D3039-00, ASTM D790-96 e ASTM D570-98 para os ensaios de tração uniaxial, flexão em três pontos e absorção de umidade.

Para o corte dos corpos de prova, foi utilizado um disco de corte diamantado (DIFER D252), a seco, para evitar um possível “arranque” de fibras ou quaisquer outros tipos de danos. Para uma melhor obtenção deles, foi retirada uma rebarba de aproximadamente 2,0 cm, nas laterais do painel, com intuito de eliminar possíveis descontinuidades e mau acabamento, como, por exemplo, variações da espessura e maiores percentuais de defeitos internos provenientes do processo de fabricação.

Todos os ensaios totalizaram 60 CPs, conforme Tabela 12 abaixo. Ressaltando que as normas técnicas recomendam um mínimo de 05 (cinco) ensaios válidos.

Tabela 12 - Quantidade de corpo de prova.

| Corpo de prova | Ensaio Mecânicos | | Ensaio Físicos | |
|----------------|------------------|--------|-----------------------|----------|
| | Tração | Flexão | Densidade Volumétrica | Absorção |
| | | | | |

| | | | | |
|------|---|---|---|---|
| 0% | 7 | 7 | 3 | 3 |
| 2,5% | 7 | 7 | 3 | 3 |
| 5% | 7 | 7 | 3 | 3 |

Fonte: Autoria Própria, 2024.

A Figura 25 sintetiza esquematicamente os ensaios realizados e a Figura 26 apresenta os corpos de prova cortados.

Figura 25- Esquematização dos ensaios realizados.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Figura 26 - Corpos de prova cortados.

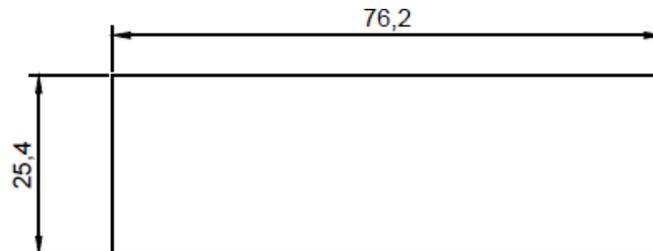


Fonte: Autoria Própria, 2024.

Sabendo-se que cada ensaio exige dimensões de acordo com suas respectivas normas, os CPs para o ensaio de umidade seguiram as

recomendações da norma ASTM D 570-98. As dimensões desses corpos de prova (em milímetros) são mostradas na Figura 27 (tolerâncias de 0,8 mm).

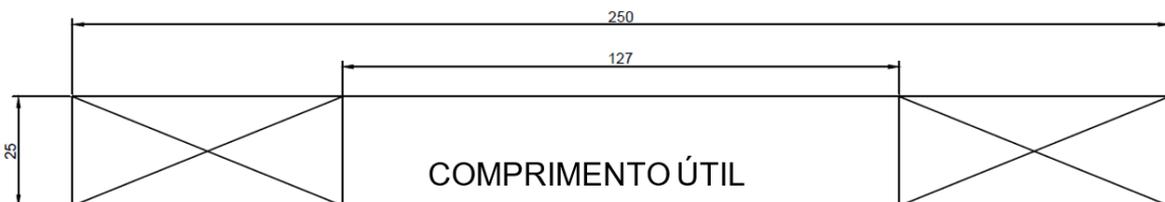
Figura 27-Dimensões dos CPs para o ensaio de absorção de umidade.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Os corpos de prova para o ensaio de tração seguiram as recomendações da norma ASTM D 3039-08. As dimensões desses corpos de prova (em milímetros) são mostradas na Figura 28 (tolerâncias de $\pm 1\%$).

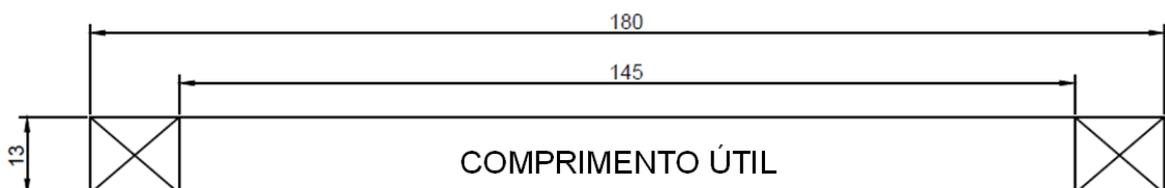
Figura 28-Dimensões dos CPs para o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Os corpos de prova para o ensaio de flexão em três pontos seguiram as recomendações da norma ASTM D 790-10. As dimensões desses corpos de prova (em milímetros) são mostradas na Figura 29 (tolerâncias de $\pm 1\%$).

Figura 29 - Dimensões dos CPs para o ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

2.2.3 Polimento dos Laminados

Após a obtenção das dimensões apropriadas dos corpos de prova, foram realizados os procedimentos de lixamento e polimento metalográfico nas faces cortadas pelo disco de corte. Para tanto, foram utilizadas lixas d'água de números 320 e 600, e o polimento foi feito em uma politriz motorizada, utilizando como abrasivo a alumina de 0,01 μm , conforme Figura 30.

Figura 30 - Polimentos dos laminados.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

2.2.4 Ensaio de Absorção

O ensaio de absorção de umidade ocorreu segundo a norma ASTM D570-18: *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*. Inicialmente, os três corpos de prova com percentuais de 0%, 2,5% e 5% e dimensões 76,2 mm x 25,4 mm foram pesados antes e após a secagem em estufa a 80 °C por 24 horas para retirada total de umidade, e então resfriados em um dessecador. A seguir, os corpos de prova foram imersos em água destilada à temperatura ambiente, como mostra a Figura 31.

Figura 31- Corpos de prova imersos em água destilada.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão ($\pm 0,001$ g), no qual as medições do ensaio foram realizadas em três fases: antes do início do ensaio de absorção (0h), em seguida com 2 horas e 24h e por último, as medidas passaram a ter intervalos de duas semanas, ou seja, de 14 dias, até ocorrer o estado de saturação deles.

Segundo a norma ASTM D570-98, a média no incremento no peso entre três pesagens consecutivas seria menor que 1% do total de incremento no peso, ou 5,0 mg de incremento (o que acontecer primeiro), para que se considere atingido o estado de saturação.

O percentual de água absorvido foi determinado em cada intervalo usando a Equação 1.

$$M_t = \frac{m_i - m_o}{m_o} \times 100 \quad (1)$$

Onde M_t corresponde ao percentual relativo de umidade (%), m_i é a massa da amostra em cada intervalo de tempo (g) e m_o é a massa seca (inicial) da amostra (g). Ao final do ensaio, foi plotada a curva percentual de absorção de água (M_t) em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}), conforme Equação 2.

$$k = \frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \quad (2)$$

Segunda Lei de Difusão de Fick e a partir do seu modelo teórico (Equação 6), é possível verificar os parâmetros que determinam se o material em estudo segue o modelo Fickiano.

Na Equação 3, o M_t corresponde a absorção de água em função do tempo t , M_m é a absorção de umidade no estado saturado, k é a taxa de difusão linear da água pelo compósito e n é a constante que determina o mecanismo de difusão da água no compósito. Se n for igual a 0,5, a difusão é Fickiana; se n for maior que 1, a difusão é anômala; se n estiver entre 0,5 e 1, a difusão é não Fickiana.

$$M_t / M_m = k \cdot t^n \quad (3)$$

Por fim, o coeficiente de difusão do compósito ou coeficiente de Fick mostra a capacidade de penetração das moléculas de água pela superfície do material compósito. O coeficiente de Fick (D , em mm^2/s) é calculado a partir Equação 4, onde h é a espessura média das amostras (mm), M_m é o percentual de absorção de água na saturação (%) e k é a taxa de difusão do compósito.

$$D = \pi \cdot \left(\frac{h}{4M_m} \right)^2 \cdot k^2 \quad (4)$$

2.2.5 Ensaio de Tração Uniaxial

O ensaio de tração uniaxial foi realizado conforme a norma ASTM D3039-17, com célula de carga de 200 KN e velocidade de 1 mm/min. As dimensões das amostras foram 250 x 25 x 4 mm, o comprimento útil foi 127 mm, conforme modelo da Figura 28.

Todos os ensaios mecânicos foram realizados na máquina de ensaio mecânico universal (EMIC, DL 30000 N) conforme demonstrado na Figura 32, as dimensões dos corpos de prova possuíam tolerâncias de $\pm 1\%$; e a temperatura ambiente durante os testes foi de 25 ± 2 °C.

Figura 32 – Máquina de Tração Uniaxial.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Durante a realização dos ensaios, foram tomados alguns cuidados, como ajustes dos corpos de prova na garra da máquina, para evitar problemas de deslizamento no início do carregamento, assim como a adição de linguetas (tabs) para melhor aderência das amostras às garras, conforme Figura 33.

Figura 33 - Ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

As propriedades mecânicas de tensão última, módulo de Young (ou módulo de elasticidade) e deformação na fratura foram calculados conforme Equação 5 (a), (b) e (c).

$$\sigma = \frac{F}{b.d} \quad (5a)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5b)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5c)$$

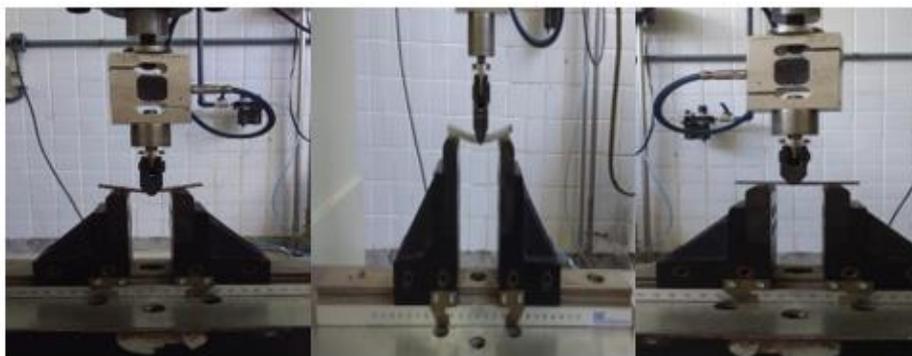
Onde, σ é a tensão última à tração (MPa), F é a carga aplicada durante o ensaio (N), b é a largura do comprimento útil do corpo de prova (mm), d é a espessura do corpo de prova (mm), E é o módulo de elasticidade (GPa), ε é a deformação na ruptura, Δl é a variação do comprimento (mm) e l_0 são o comprimento inicial do corpo de prova (mm).

Os tipos macroscópicos de falha também foram determinados segundo a norma ASTM D3039-17.

2.2.6 Ensaio de Flexão em Três Pontos

O ensaio de flexão em três pontos foi realizado segundo a norma ASTM D790-07, com célula de carga de 200 kN e velocidade de 2 mm/min, conforme a Figura 34. As dimensões das amostras foram de 100 × 13 × 4 mm, e a distância entre os apoios foi de 80 mm.

Figura 34 - Ensaio de Flexão em Três Pontos.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Foi determinado a curva tensão x deflexão, a resistência máxima na flexão, o módulo de elasticidade e a deformação de flexão máxima do compósito.

A resistência à flexão (σ_f) do compósito é calculada pela Equação 6, onde P é a força aplicada no centro do corpo de prova (em N), L é o vão entre os apoios (em mm), b é a largura e d é a espessura do corpo de prova (em mm).

$$\sigma_f = \frac{3P_{max} \cdot L}{2b \cdot d^2} \quad (6)$$

A deformação de flexão (ε_f) é obtida a partir da Equação 7, onde D é a deflexão máxima no centro do corpo de prova, d é a espessura e L o vão entre os apoios (todas em mm).

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot D \cdot d}{L^2} \quad (7)$$

O módulo de elasticidade na flexão (E_f) é obtido a partir da Equação 8, onde a tensão na flexão (σ_f) e a deformação de flexão (ε_f) obtidas através das Equações 6 e 7 são calculadas em diferentes pontos (1 e 2) na região elástica da curva tensão x deformação.

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (8)$$

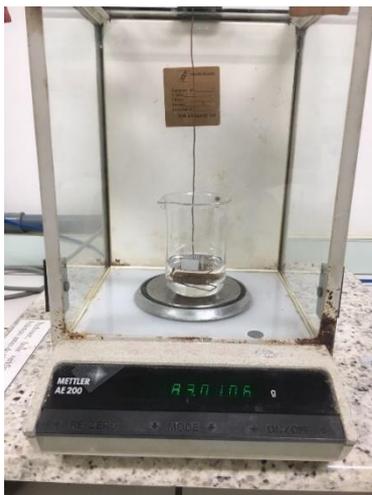
2.2.7 Ensaio de Densidade Volumétrica

A densidade volumétrica dos laminados foi determinada de acordo com a ASTM D792-08, utilizando três corpos de prova com dimensão de 25 x 25 mm, para cada tipo de laminado confeccionado, Figura 35. Os corpos de prova foram previamente pesados em balança digital com capacidade máxima de 210 g e resolução de $\pm 0,1$ mg. Posteriormente, um béquer com água a 21°C é posicionado sobre a balança e a amostra é fixada em um fio fino de cobre e suspensa em um suporte. Em seguida, a balança é tarada e a amostra é imersa na água, obtendo-se a massa aparente das amostras em água. Com esses dados, obteve-se a densidade volumétrica a partir da Equação (9).

$$D = \frac{0,9975c}{(c+w-d)} \quad (9)$$

Onde D é a densidade volumétrica do compósito (g/cm^3), c é o peso da amostra seca (g), w é o peso do fio parcialmente imerso em água (g), d é o peso da amostra e do fio imersos em água (g), e 0,9975 é o fator de correção da água a 23 °C, temperatura na qual foi realizado o ensaio.

Figura 35-Ensaio de densidade volumétrica.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

2.2.8 Análise Microestrutural

A análise microestrutural dos corpos de prova foi obtida através da microscopia ótica e eletrônica de varredura (MEV), e teve como objetivo avaliar a formação e propagação dos danos na seção de ruptura. Os ensaios foram feitos no MEV VEGA 3LMU da TESCAN.

Antes do ensaio do MEV todas as amostras foram mantidas em uma estufa a 60 °C durante 24 horas e após a retirada da estufa, colocada em um dessecador por mais 24 horas para redução de umidade, seguido de metalização com ouro, através do metalizador da Quorum, modelo Q150R. Na Figura 36, é mostrado o metalizador utilizado.

Figura 36 - Metalizador Q150R e o MEV.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

2.2.8 Microscopia Óptica

A técnica de microscopia óptica (Figura 37), permite o aumento de imagens através da luz que após incidir sobre a amostra, passa por um conjunto de lentes objetivas (que formam e aumentam a imagem) e oculares (que aumentam a imagem).

Justifica-se o uso do MEV e da microscopia para identificar os possíveis mecanismos de falha presentes nos corpos de prova, como delaminações, quebra e distorção de fibras e regiões ricas em resina.

Figura 37 - Microscópio óptico.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

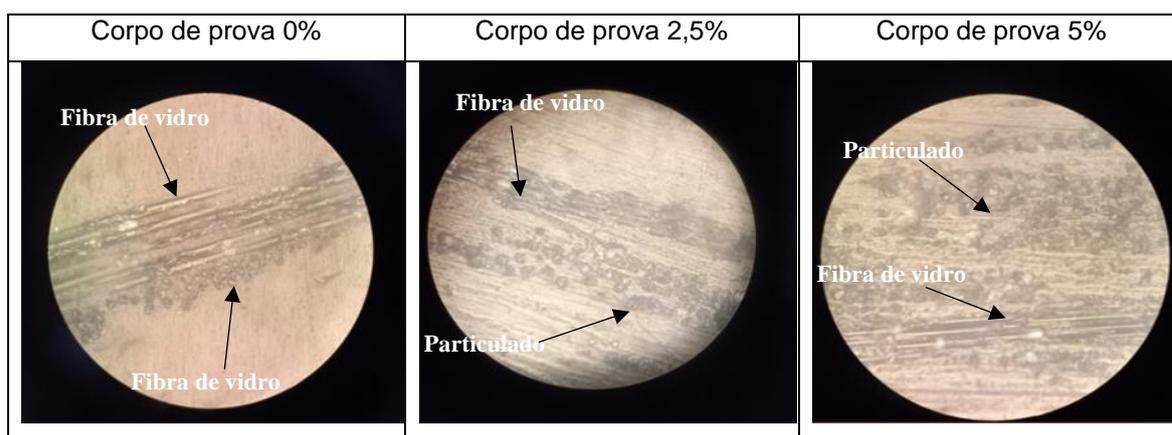
Neste capítulo é apresentado, inicialmente, o resultado da microscopia ótica dos corpos de prova antes dos ensaios mecânicos com a visualização da distribuição dos reforços, seguida da análise macroscópica das fraturas e densidade volumétrica, posteriormente são expostos e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios de absorção e dos ensaios mecânicos propostos para os compósitos reforçados com partículas de licuri. Por último, as características da

fratura final dos corpos de prova submetidos aos ensaios mecânicos são analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.1 Análise microscópica

Através das fotografias, obtidas no microscópio óptico, observou-se as fibras de vidro no sentido transversal e longitudinal da trama, bem como a distribuição do particulado de licuri na matriz polimérica, também como alguns defeitos oriundos do processo, como bolhas de tamanho considerável. A Figura 38 mostra a distribuição das fibras de vidro e dos particulados de licuri em diferentes percentuais, enquanto a 39 mostra um defeito no processo de fabricação (bolha).

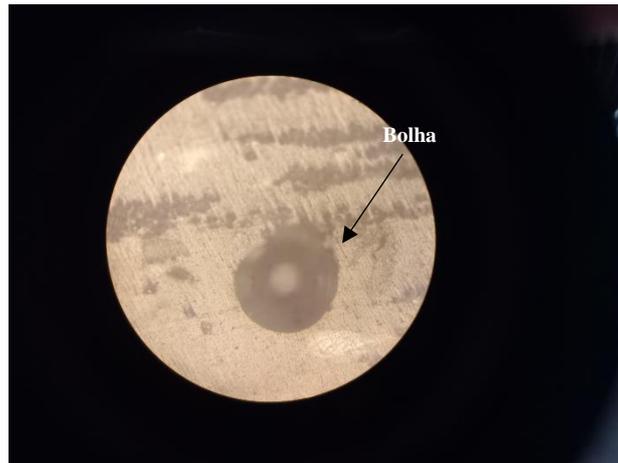
Figura 38 – Análise microscópica dos laminados 0%,2,5% e 5%.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

As microscopias desses materiais com diferentes percentuais de carga mostram uma distribuição homogênea das fibras dentro da matriz. No entanto, os particulados são de tamanhos diferentes e a distribuição das fibras dentro da matriz é aleatória. Percebe-se que, a maior concentração, em massa, de particulado altera significativamente o aspecto da amostra.

Figura 39 - Análise microscópica dos laminados.

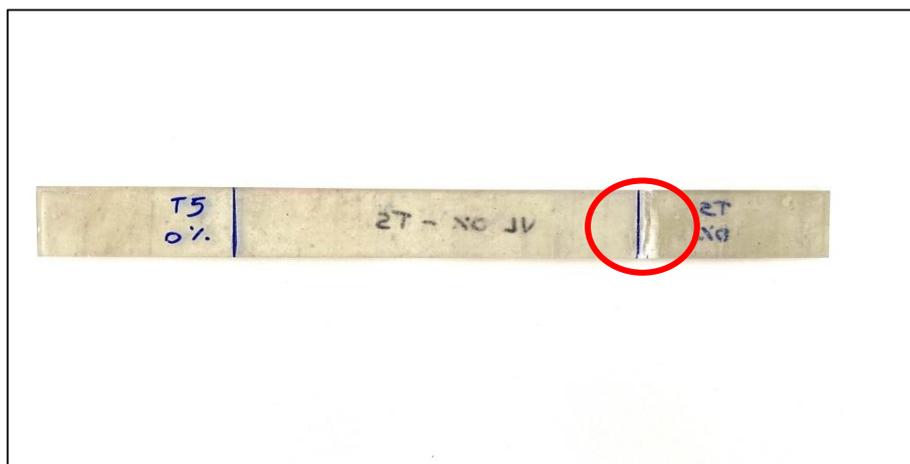


Fonte: Autoria Própria, 2024.

3.2 Análise Macroscópica da Fratura

As figuras 40 e 41 mostram as fraturas no ensaio de tração dos corpos de prova, com percentuais de 0%, 2,5% e 5% de particulados. As amostras apresentam, de acordo com a norma ASTM D 3039-17, dois tipos diferentes de fratura: tipo LIT (*Lateral / inside / top*) e tipo LAT (*Lateral / At Grip / Top*).

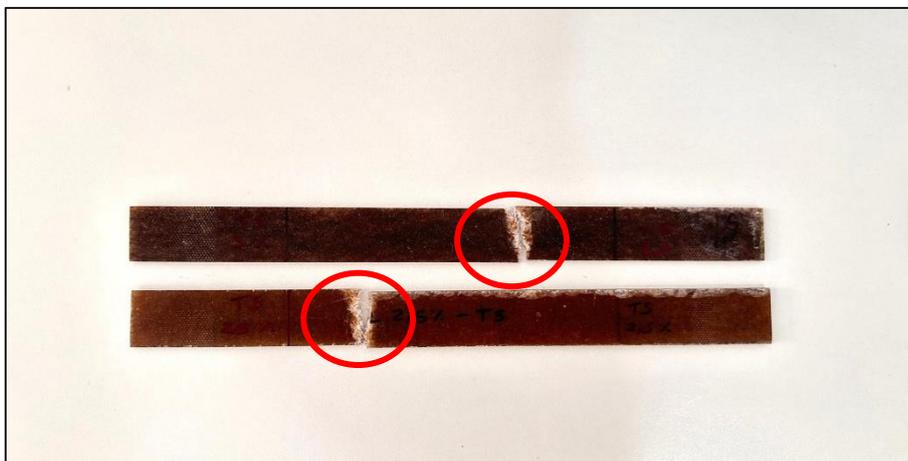
Figura 40 - Corpo de prova 0% fraturado na tração uniaxial – LIT



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Ressalva se faz para os modos de falha LIT que, se ocorrer, o ensaio não é considerado válido, conforme apresentado na Figura 40.

Figura 41- Corpo de prova fraturado 2,5% e 5% na tração uniaxial – LAT



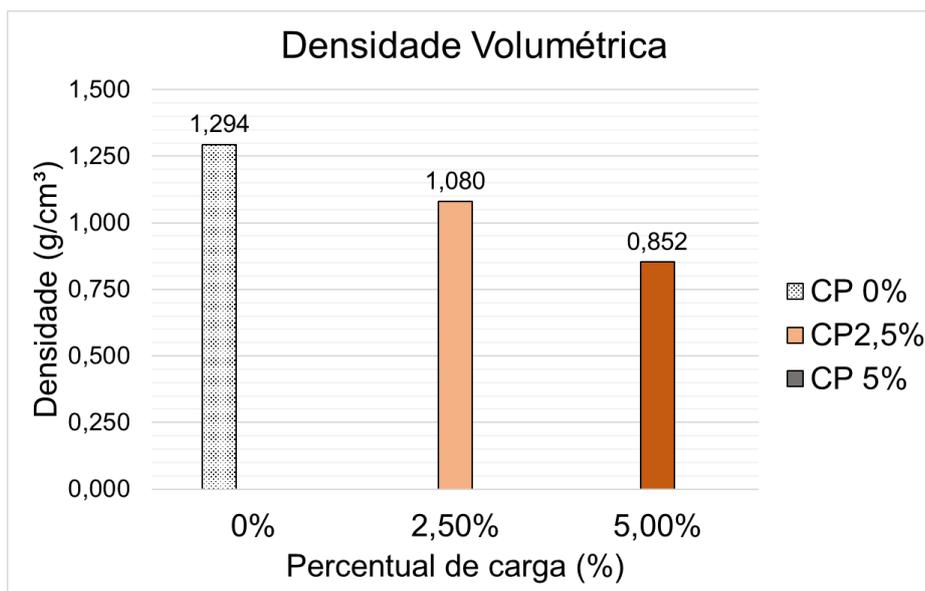
Fonte: Autoria Própria, 2024.

Como pode ser observado, na seção de fratura em vermelho na Figura 41 houve fratura total dos corpos de prova.

3.3 Densidade Volumétrica

Para avaliar a influência da incorporação do particulado do exocarpo do licuri nas propriedades físicas dos compósitos, executou-se o ensaio de densidade demonstrados na Figura 42. A média dos valores de densidade volumétrica encontrada para cada corpo de prova com 0% de adição foi de $(1,2940 \pm 0,0035 \text{ g/cm}^3)$, com 2,5% foi de $(1,180 \pm 0,1988 \text{ g/cm}^3)$ e 5% $(0,852 \pm 0,3489 \text{ g/cm}^3)$.

Figura 42 - Resultados densidade.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

De acordo com a densidade do poliéster e da carga do pó do licuri, esperava-se que quanto maior o percentual de reforço, maior a densidade do compósito, devido à maior massa específica do licuri em relação ao poliéster. No entanto, no experimento foi verificado o comportamento oposto, havendo uma redução na densidade à medida que aumenta o percentual de carga de licuri nos laminados.

Essa redução no valor da densidade entre os percentuais de 2,5% e 5% pode ser atribuída ao aumento da porosidade dos compósitos com o aumento da fração volumétrica de fibras. Uma vez que o aumento de resíduo na matriz pode auxiliar na formação de espaços vazios, resultando no aumento na absorção de água. Soma-se a isso a tendência o método de fabricação utilizado (*hand lay up*), o qual pode favorecer o surgimento de falhas nos materiais compósitos, como vazios e bolhas conforme a adição de resíduo na resina.

3.3 Ensaios mecânicos dos laminados compósitos

3.3.1 Ensaio de Flexão em Três pontos

Os resultados obtidos com os valores médios de resistência à flexão (MPa), módulo de elasticidade na flexão (GPa) e da deflexão máxima (%) dos laminados estudados, com suas respectivas dispersões são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 -Propriedades mecânicas à Flexão em Três Pontos dos laminados compósitos.

| PROPRIEDADES MECÂNICAS | LAMINADOS | | |
|--|--------------|---------------|---------------|
| | CP 0% | CP 2,5% | CP 5% |
| Resistência à Flexão (MPa) | 91,86± 21,64 | 66,40 ± 15,70 | 50,54 ± 29,00 |
| Módulo de Elasticidade na Flexão (GPa) | 6,17 ± 3,22 | 3,93 ± 1,35 | 3,21 ± 1,52 |
| Deflexão Máxima (%) | 1,40 ± 3,12 | 2,01 ± 4,46 | 2,85 ± 5,69 |

Fonte: Autoria Própria, 2024.

Pode-se observar que houve uma redução na resistência de 27,71% no compósito de 2,5% e 44,98% no de 5% em relação ao compósito de 0%. Quanto ao módulo de elasticidade a redução foi 63,69% para o compósito de 2,5% e 52,02% para o compósito de 5%. Estas reduções das propriedades mecânicas tanto no módulo de elasticidade quanto na deflexão certamente se relacionam com as porcentagens e o perfil granulométrico das partículas inseridas na matriz polimérica.

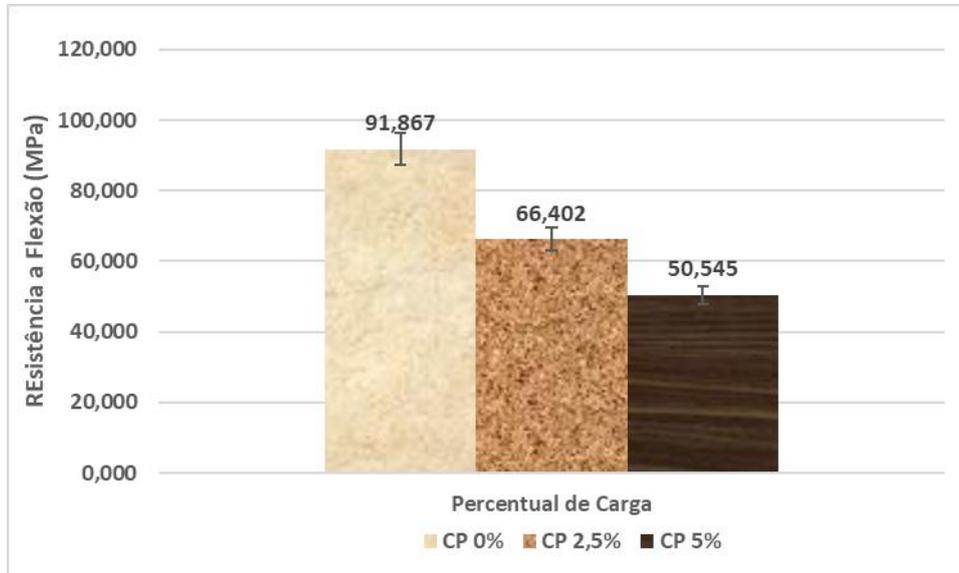
Da mesma maneira Gehlen (2014), encontrou nos compósitos resina de poliéster/fibra de açaí (RA), resina de poliéster/fibras de açaí e curauá (RAC), que possuem valores de resistência inferiores a resina de poliéster (R).

O processo de fabricação de laminação manual utilizado na obtenção dos compósitos produziu regiões ricas em resina e outras ricas em particulados de licuri, originando ondulações caracterizadas pelo desvio na orientação das fibras. Isto significa que a resposta à flexão dos compósitos sofre uma descontinuidade durante a aplicação da carga, gerando uma dispersão muito mais significativa dos resultados, quando comparado ao ensaio de tração.

No ensaio de flexão a carga aplicada é na forma de linha (cilindro aplicador) e dependendo se a região central do corpo de prova – seção de aplicação da carga – coincidir com uma região rica em resina ou em fibras, a carga de início do dano

pode variar e assim influenciar na tensão última do laminado. Isto pode ser evidenciado ao analisar as Figuras 43,44 e 45.

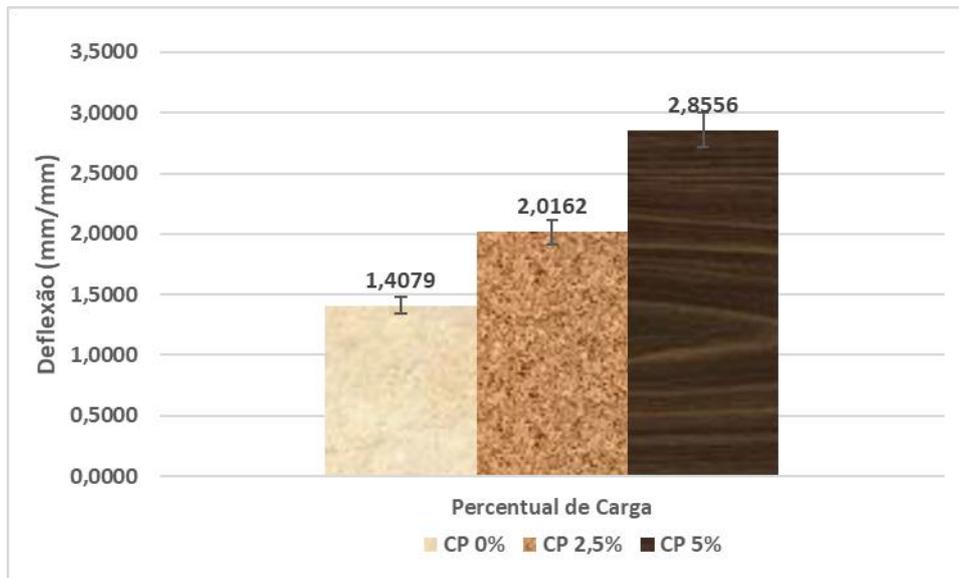
Figura 43 - Comparativo entre os valores da resistência à flexão dos laminados compósitos.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

A Figura 43 acima mostra que os compósitos nas formulações de 2,5% e 5% tiveram sua resistência à flexão inferior ao compósito de 0%. Esse resultado pode estar relacionado a baixa adesão das fibras à resina. Um dos inconvenientes na utilização de fibras lignocelulósicas, em matriz poliéster é a sua natureza hidrofílica, devido à água absorvida na superfície da fibra. Assim, as matrizes poliéster apresentam caráter hidrofóbico, formando uma fraca interação fibra/matriz. Sendo assim, quanto maior o percentual de partículas presentes na resina, menor a resistência à flexão e menor o módulo de elasticidade e deflexão (Gomes *et.al*; 2016).

Figura 44 - Comparativo entre os valores da deflexão dos laminados compósitos.

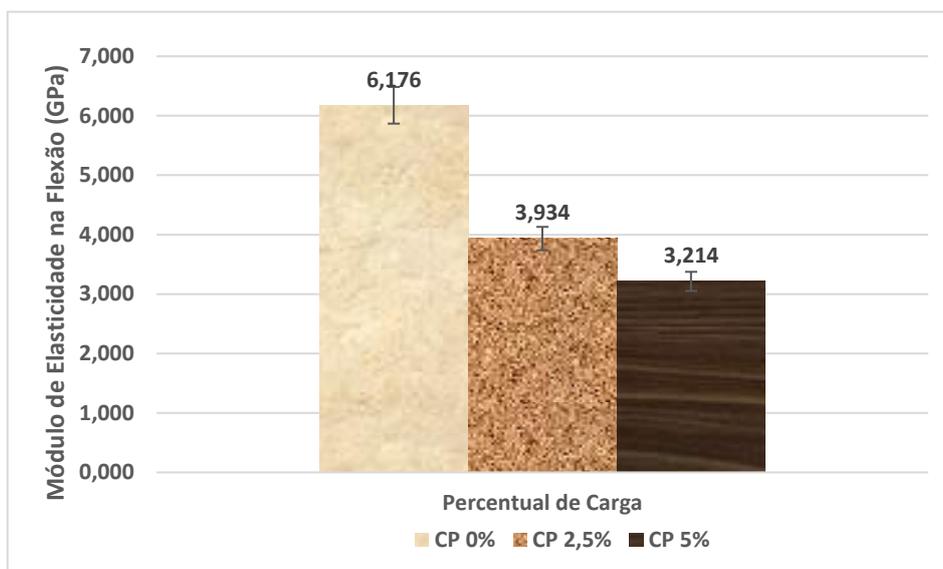


Fonte: Autoria Própria, 2024.

Quanto à deformação na flexão (Figura 44), o aumento de percentual de carga nos compósitos provocou um aumento na deflexão dos compósitos. Este aumento é corroborado pela redução do módulo de elasticidade em todos os percentuais, indicando menor rigidez do material à medida que o percentual de pó de licuri aumenta de 2,5% para 5%.

Ao observar o módulo de elasticidade (Figura 45), nota-se que a redução do alongamento no compósito de 0% é resultado da rigidez compósito. Portanto, quanto maior o módulo de elasticidade, mais rígido é o material. Contudo, no compósito de 2,5% e 5% quanto maior foi a inserção do teor de carga no compósito, menos rígido ele ficou.

Figura 45 - Comparativo entre os valores de módulo de elasticidade dos laminados compósitos.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Logo, as diferenças encontradas na resistência mecânica e no módulo de elasticidade dos compósitos sob flexão se dão apenas pela inclusão do particulado de licuri em diferentes percentuais. Esse fato é confirmado, pois a carga, inserida na matriz polimérica, pode atuar como pontos concentradores de tensão, nucleando trincas, reduzindo assim a resistência. Desta maneira, a incorporação do licuri trouxe redução significativo na rigidez do compósito nestes percentuais.

3.3.2 Ensaio de Tração Uniaxial

Na Tabela 14 são apresentados os resultados obtidos com os valores médios da tensão última à tração (MPa), módulo de elasticidade longitudinal (GPa) e deformação de ruptura (%) além dos valores de suas respectivas dispersões. Lembrando que em todos os ensaios realizados, os valores do módulo de elasticidade foram determinados na direção de aplicação da carga e antes que a carga de dano se tornasse preponderante.

Tabela 14 - Propriedades mecânicas à tração uniaxial dos laminados compósitos.

| PROPRIEDADES MECÂNICAS | LAMINADOS | | |
|------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| | CP 0% | CP 2,5% | CP 5% |
| Tensão Última (MPa) | 40,24± 4,30 | 9,76 ± 5,16 | 7,44 ± 0,96 |
| Módulo de Elasticidade (GPa) | 10,49 ± 2,31 | 7,57 ± 1,48 | 2,52 ± 1,16 |
| Deformação de Ruptura (%) | 1,25 ± 2,18 | 1,94 ± 4,30 | 2,59 ± 5,11 |

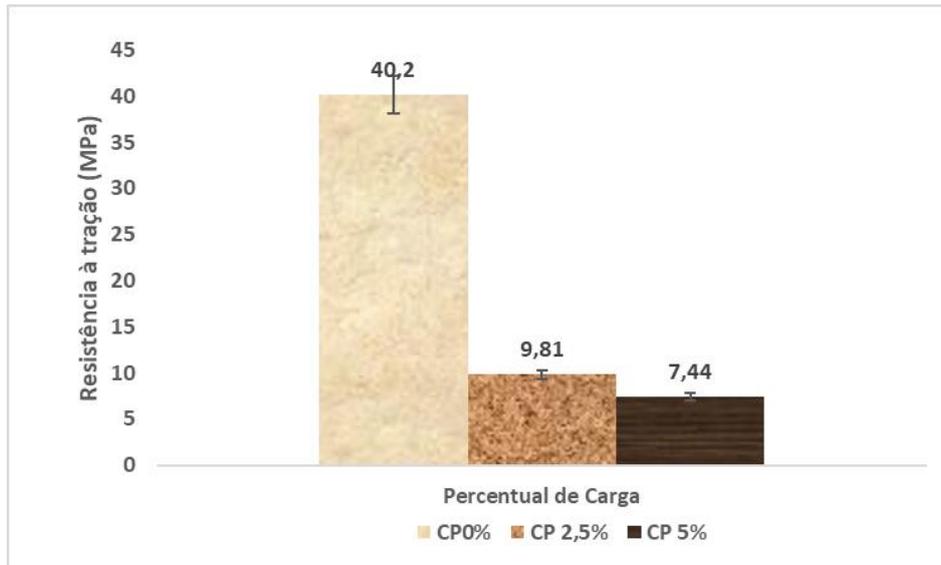
Fonte: Autoria Própria, 2024.

Os dados da Tabela 12 mostra que a tensão máxima e a deformação dos compósitos com a adição de 2,5%, e 5% de particulados de licuri comparado ao compósito de 0%, continua a sofrer redução. Este desempenho ineficaz pode estar relacionado com à fraca adesão entre matriz/fibra, ocorrendo o arrancamento (*pull-out*) das fibras na matriz isto foi observado nas análises por MEV.

De acordo com Callister (2017), é essencial que as forças de ligação adesivas entre a fibra e a matriz sejam grandes, para minimizar o arrancamento das fibras. De fato, a resistência da ligação é uma consideração importante na seleção da combinação matriz/fibra. A resistência do compósito depende em grande parte da boa eficiência dessa ligação.

Nas Figuras 46, 47 e 48, são comparadas as propriedades mecânicas de tração obtidas no ensaio mecânico, como tensão máxima, a deformação e módulo de elasticidade para todos os compósitos.

Figura 46 - Análise comparativa da tensão máxima dos laminados.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

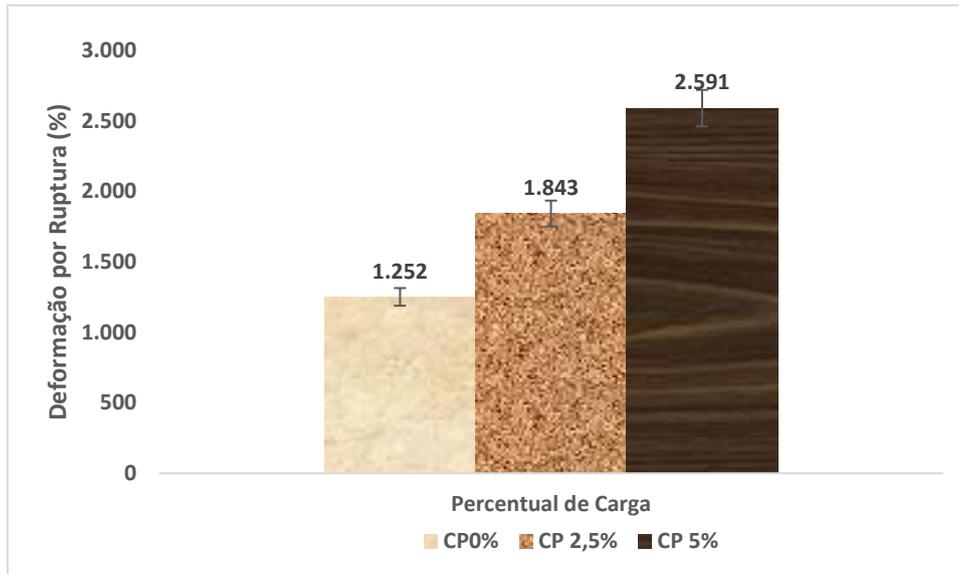
Na Figura 46, é possível observar que a incorporação carga de licuri reduziu a resistência mecânica do compósito para as proporções de 2,5% e 5%. Constatando-se que nesse caso as partículas não apresentaram comportamento de reforço, as mesmas agiram como material de enchimento (carga), não proporcionando melhorias nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Conforme o resultado pode-se observar que aumentando o volume das fibras nas composições e a granulometria das partículas, a resistência máxima decresce contribuindo negativamente para o desempenho do compósito.

A perda de resistência mecânica é decorrente da destruição da interface fibra/matriz, devido ao contato da água com o reforço ou carga, que tende a aumentar suas dimensões, enquanto a interferência na rigidez e ductilidade provém dos efeitos da quebra das ligações de hidrogênio das cadeias carbônicas da matriz (Mrad et al., 2018; Ma et al., 2018).

Conforme observado até aqui, Rosa (2017), a tensão máxima do compósito polipropileno com casca de arroz (PP/CA) diminui com o aumento do teor do material particulado (carga). Aumentando a proporção de reforço (carga), aumenta a área interfacial entre a matriz hidrofóbica e o reforço hidrofílico, produzindo um aumento da fragilidade, o que resulta na redução da tensão máxima suportada pelo compósito.

Figura 47 - Comparativo entre os valores da deformação de ruptura dos laminados.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Quanto a deformação (Figura 47), nota-se uma redução na ductilidade dos compósitos em relação 0%. Além disso, quanto maior o percentual de reforço no compósito, maior esta redução. Ao observar o módulo de elasticidade, nota-se que a redução da deformação é resultado de um aumento da rigidez dos compósitos.

Este desempenho ineficaz pode estar relacionado com a fraca adesão entre matriz/fibra, ocorrendo o arrancamento (*pull-out*) das fibras na matriz, isto foi observado nas análises por MEV.

Figura 48 - Comparativo entre os valores do módulo de elasticidade à tração dos laminados.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

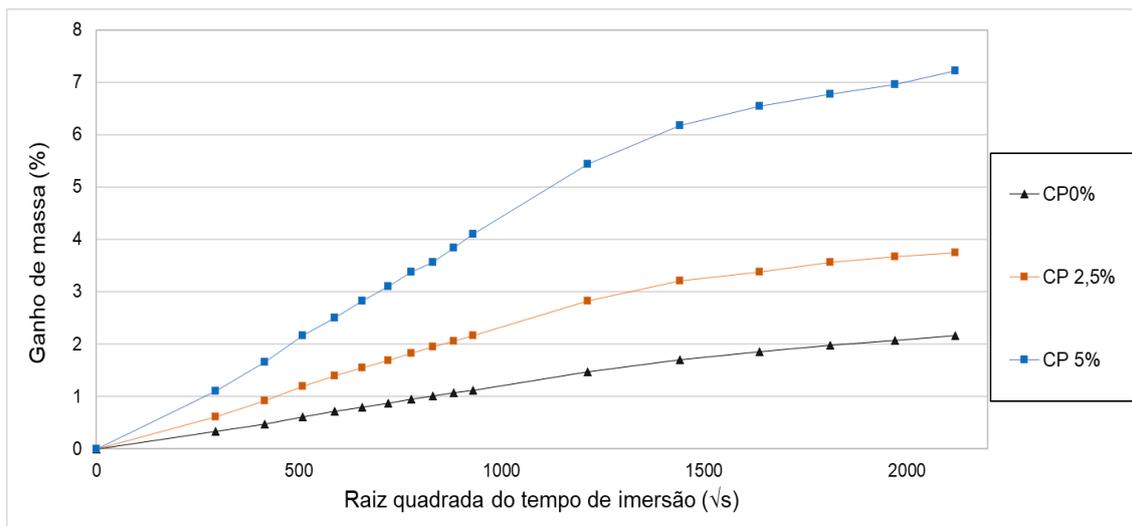
As quedas das propriedades mecânicas (Figura 48), certamente se relacionam com as porcentagens e características granulométricas das partículas agregadas na matriz polimérica. Ramos (2013) avaliou, através do ensaio de tração, aspectos mecânicos, tais como a resistência à tração, a deformação na ruptura e o módulo de elasticidade dos compósitos sob carga zero, 2,5% e 5%. Notou-se uma tendência de redução na tensão máxima e na deformação. Sendo assim, quanto maior o teor de partículas (carga) na composição, menor será a ductibilidade e o desempenho do compósito em relação à tensão normal aplicada no ensaio.

A redução do módulo de elasticidade (rigidez) nos compósitos de 2,5 % e 5% em relação ao de 0% está relacionada ao aumento da proporção de carga, uma vez que há um aumento da área interfacial entre a matriz hidrofóbica e o reforço hidrofílico.

3.3.3 Absorção de água

Após o ensaio de absorção de água, obteve-se a curva que relaciona o percentual de ganho de massa com o tempo de absorção, visto na Figura 49. Cada ponto da curva corresponde à média de três corpos de prova, para cada tipo de laminado, enquanto as linhas sólidas representam as curvas de tendência de ganho de massa.

Figura 49- Curva de absorção de água dos compósitos pela raiz quadrada do tempo.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

A partir da curva de do tempo (Figura 49) se verifica um rápido ganho linear de umidade no estágio inicial do compósito com 5% de carga do licuri, enquanto os de compósitos de 0% e 2,5% têm uma absorção linear.

Segundo Barcellos (2009), as propriedades da manta de vidro são levadas aos compósitos e uma delas é não absorver umidade. Assim, pode-se concluir que o particulado do exocarpo do licuri é composto por fibras hidrofílicas, a presença dele afetou a resistência à degradação por absorção de água da matriz, mesmo que os graus de absorção não tenham sido superiores a 5,0%. Uma maior inserção de carga, aumenta a absorção de água (característica hidrofílico do material), expandindo o particulado (aumentando seu volume) possibilitando o aparecimento de microfissuras na região da interface reforço/ matriz, resultando em uma redução significativa da capacidade de transferência de carga da matriz para o reforço, levando à redução das propriedades mecânicas.

A estabilização da umidade nos compósitos de 2,5% e 5% absorvida nos corpos de prova é atribuída ao modo de como as moléculas de água se movem nos laminados e principalmente nas fibras, podendo acontecer por três mecanismos diferentes: (1) Absorção através de micro fendas entre as cadeias poliméricas; (2) Absorção por capilaridade; e (3) Absorção devido ao inchaço das fibras.

A partir dos três caminhos acima citados é possível perceber que a interface fibra-matriz desempenha papel importante no que tange à entrada de umidade nos

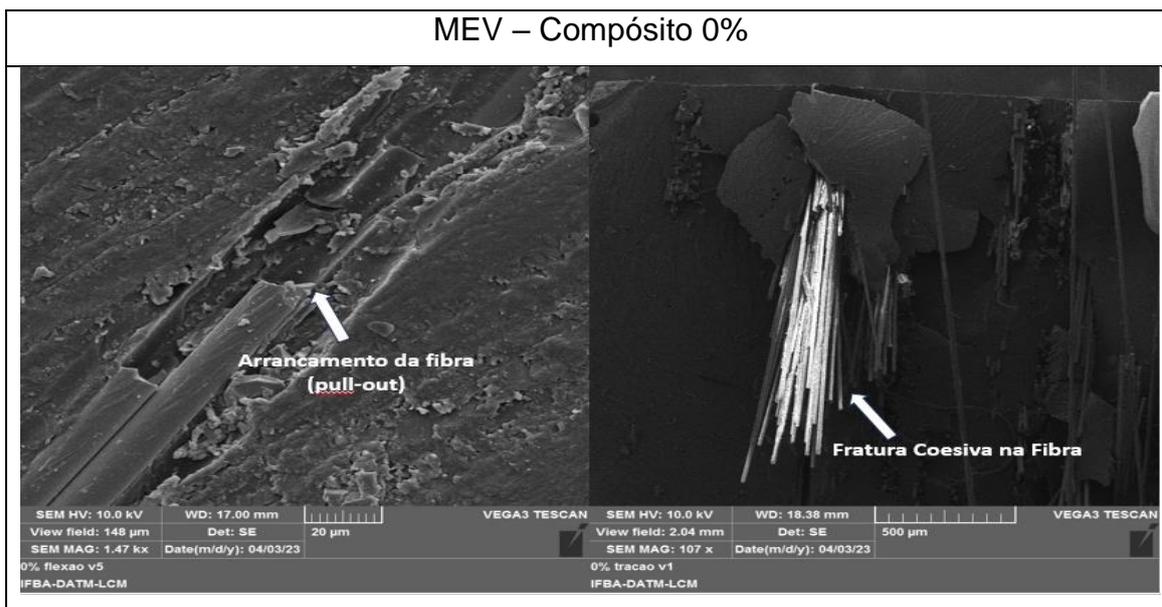
materiais compósitos. No caso de compósitos de fibras vegetais, a exemplo do licuri, o particulado é mais suscetível à absorção de umidade. Com a natureza polar das fibras, reforçadas em matrizes hidrofóbicas, a interface fibra-matriz e as regiões de interfase são sempre um ponto fraco onde a reação de hidrólise ocorre e causa danos interfaciais levando à deterioração geral de várias propriedades (Azwa *et al.*, 2013; Dhakal *et al.*, 2007).

3.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) – 0%, 2,5% e 5%

Através da análise dos compósitos por microscopia eletrônica de varredura (MEV) é possível avaliar a dispersão das fibras no compósito bem como a atuação dos agentes de acoplamento na superfície fibra/matriz.

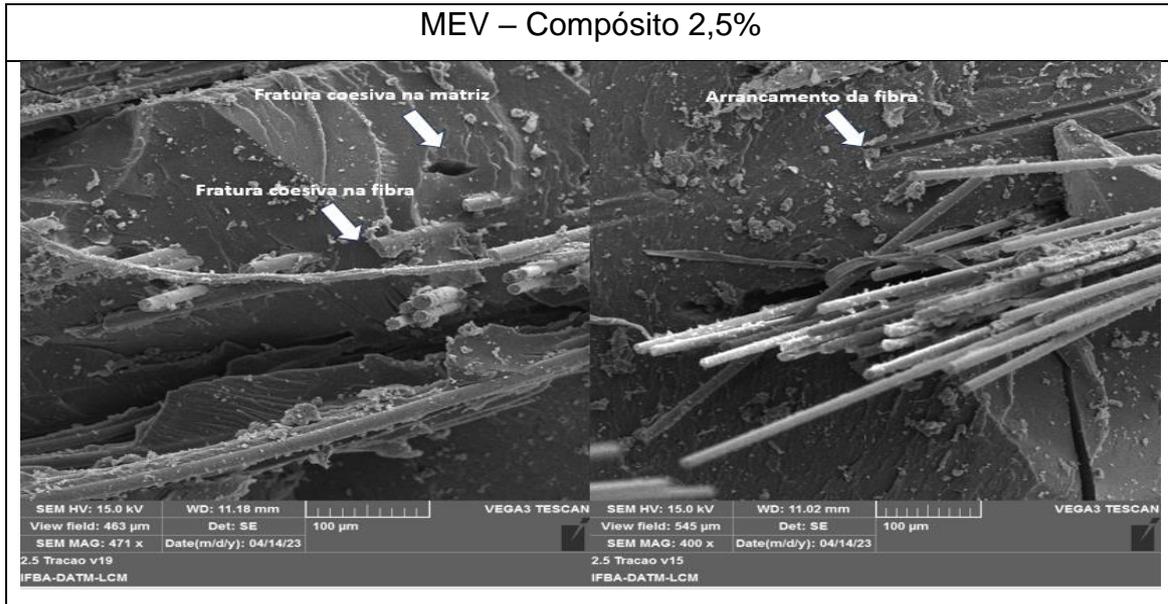
Os resultados da morfologia superficial apresentam as fraturas dos corpos-de-prova de tração e flexão das resinas e dos laminados com os seus diferentes percentuais de cargas. As Figuras 50, 51 e 52 mostram alguns mecanismos de falhas mais comum nos compósitos, consequência da falta de aderência entre o resíduo e a matriz, porém em regiões específicas. Demonstrando que apesar da orientação aleatória devido ao tamanho das partículas, aquelas que estão na direção da carga e orientação da fratura tendem a sofrer este tipo de arranque.

Figura 50 - Tipos de danos na tração uniaxial compósito 0%.



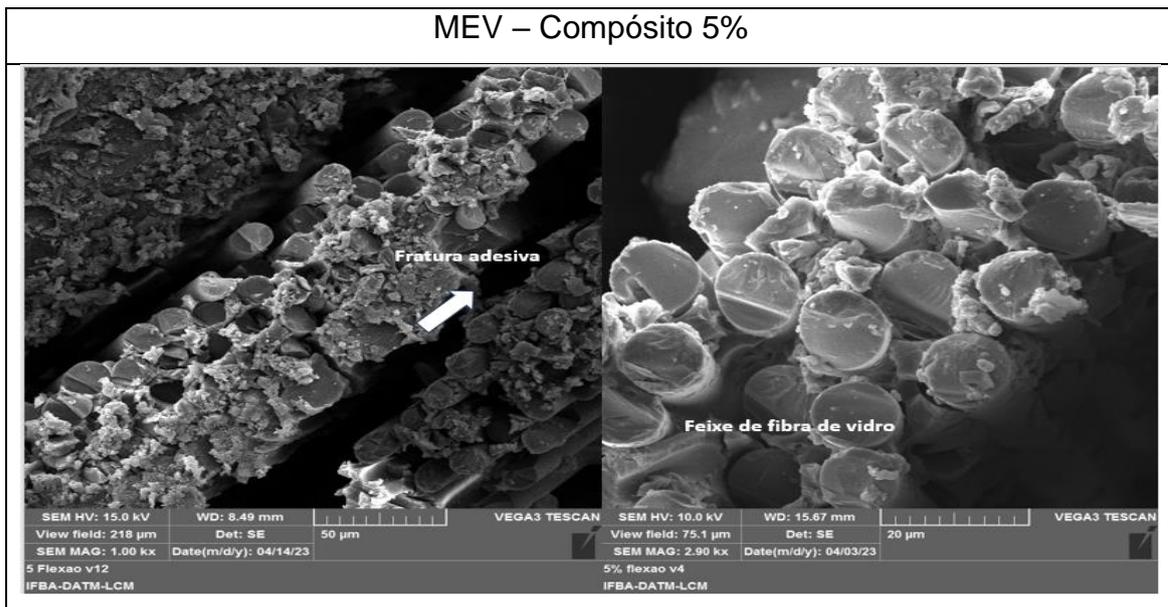
Fonte: Autoria Própria, 2024.

Figura 51- Tipos de danos na tração uniaxial compósito 2,5%.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Figura 52 - Tipos de danos na tração uniaxial compósito 5%.

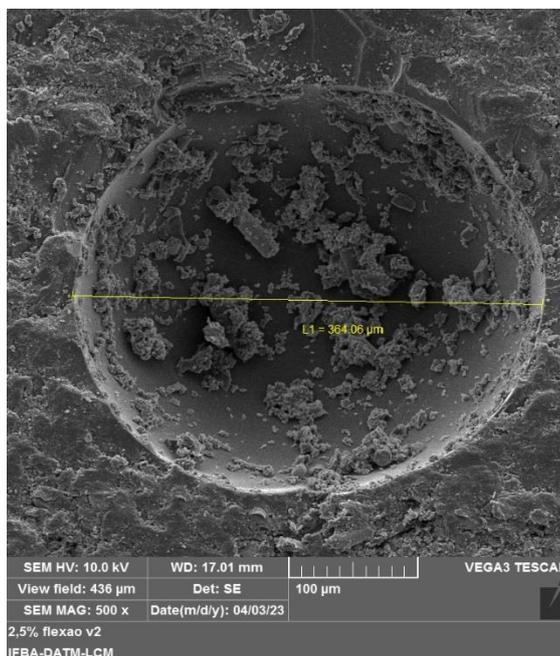


Fonte: Autoria Própria, 2024.

As figuras mostram alguns tipos de danos e defeitos encontrado na seção de fratura dos corpos de prova, obtidos através do MEV. É possível visualizar bolhas (Figura 53), a matriz entre as fibras, além de regiões caracterizadas por pequenos “furos” provenientes do arrancamento do particulado graças a desaderância entre a fibra e a matriz polimérica. Além disso, percebeu-se a

rugosidade e irregularidade da superfície. O que melhora a adesão carga de enchimento e não de reforço entra a matriz e ausência de porosidade. Pode-se concluir que tem uma interferência direta na absorção.

Figura 53 – Bolhas 2,5%



4. CONCLUSÃO

O trabalho de pesquisa analisou a influência da adição de particulados do exocarpo de licuri, em diferentes percentuais, em compósito laminados de matriz polimérica reforçado com manta de vidro. A partir das propriedades avaliadas, conclui-se que o particulado adicionado no compósito agiu como carga e não como reforço, sendo possível observar em cada etapa designada abaixo:

- A partir dos testes de densidade, o compósito mostrou que a adição do pó do exocarpo de licuri na matriz reduziu a densidade dos compósitos em 16,54% quando adicionado 2,5% de particulado e em 34,16% quando adicionado 5%, em relação ao laminado de referência de 0%. Isso ocorreu

devido à tendência de formação de vazios no compósito, que aumentam com o volume de carga adicionado.

- Em relação ao ensaio de tração uniaxial, a adição de 2,5% e 5% de particulado ao laminado causou uma redução significativa nas suas propriedades mecânicas. Ao analisarmos o valor de resistência à tração, a diferença entre o compósito de referência e o particulado adicional de 2,5% e 5% resultam em 75,74% e 81,51%. Ao compararmos a rigidez dos materiais, é possível notar uma redução de 27,83% no módulo, quando adicionado 2,5% de particulado, e uma redução de 75,97% quando adicionado 5%.
- Quanto as propriedades o ensaio de flexão, confirmam a tendência observada nos ensaios de tração quanto maior o percentual das partículas inseridas na resina, menor o módulo de elasticidade, maior a deflexão e menor a resistência à flexão (tensão de flexão). Esse fato é confirmado através do compósito de 2,5% e 5% o qual apresentaram um módulo de elasticidade menor que o compósito com 0%. Isto se dá devido à fraca interação partícula/matriz e aos vazios identificados nas análises de MEV.
- No ensaio de absorção de água, os compósitos de 2,5% e 5% apresentaram maior ganho de massa à medida que se aumentaram os percentuais de pó do licuri no compósito. Esse evento ocorre devido a composição estrutural intrínseca do licuri ser compostas por celulose, hemicelulose, lignina, pectina e ceras, favorecendo uma maior absorção de água devido sua natureza hidrofílica.
- As análises via MEV mostraram que o compósito de 0% apresentou maior distribuição e adesão reforço/matriz, que os laminados de 2,5% e 5%, que apresentaram ocorrência de bolhas, poros e microfissuras.

5. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- A baixa adesão do particulado na matriz foi demonstrada e, em outros trabalhos, deve-se experimentar a obtenção do compósito com outras resinas e porcentagens diferentes particulados;
- Realizar outros tipos de ensaios mecânicos como impacto em compósito;

- Fazer tratamento químico superficial no exocarpo antes de transformá-la em pó para melhorar a aderência a matriz;
- Modificar o processamento dos compósitos, uma vez que, o atual processamento gera falhas que impactam diretamente na resistência do material;
- Realizar ensaios de caracterização com os corpos de prova submetidos ao ensaio de envelhecimento natural para averiguar se houve alguma perda das propriedades devido à degradação gerada pelas intempéries;
- Avaliar a viabilidade técnica do uso dos compósitos obtidos para aplicações industriais diversas.

6. REFERÊNCIAS

ABBOOD, I. S.; ODAA, S. A.; HASAN, K. F.; JASIM, M. A. Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures - a review. **Materials Today: proceedings**, v. 43, p. 1003-1008, 2021.

ALENCAR, Krishana Carvalho de et al. **Compósitos de matriz polimérica com Resíduos da Construção e Demolição (RCD) e fibras de sisal**. 2022.

ALI, A.; SHAKER, K.; NAWAB, Y.; JABBAR, M.; HUSSAIN, T.; MILITKY, J.; BAHETI, V. Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites – A review. **Journal of Industrial Textiles**, v. 47, n. 8, p. 2153–2183, 2018.

ALVES, Luana Frateschi. **Obtenção e caracterização de compósitos híbridos de resina epóxi com fibra de vidro e alumínio**. 2017.

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. 4th ed. New York: CRC Press, 2017.

ARMENTIA S. L., ENCISO B., MOKRY G., ABENOJAR J., MARTINEZ M. A., Novel application of a thermoplastic composite with improved matrix-fibre interface. **Journal of Materials Research Technology**, v. 8, n. 6, p. 5536-5547, 2019.

AZAMMI, AM Noor et al. Estudos de caracterização de compósitos à base de matriz biopolimérica e fibras de celulose relacionados à interface fibra-matriz funcionalizada. In: **Interfaces em compósitos reforçados com partículas e fibras**. Publicação Woodhead, 2020.

BALASUBRAMANIAN K., SULTAN M.T.H., RAJESWARI N. Manufacturing techniques of composites for aerospace applications. **Sustainable Composites for Aerospace Applications**, p. 55–67, 2018.

BIVER, M.; TURNER, A.; FILELLA, M. Antimony release from polyester textiles by artificial sweat solutions: A call for a standardized procedure. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 119, p. 104824, fev. 2021.

BONDAR, G. **As ceras no Brasil e o licuri Cocos coronata Mart. na Bahia**. Salvador: Instituto Central de Fomento Econômico da Bahia, 1942. 86 p.

CABRAL, Isabel Cavalcanti. **Obtenção e caracterização de compósito com PEAD reciclado e pó da casca da semente da planta Sombreiro (Clitoria fairchildiana)**. 2016. Dissertação de Mestrado. Brasil.

CALLISTER JR., W. D.; WILEY, J. **Ciência e engenharia de materiais**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CALLISTER W. D., RETHWISCH D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10^a Ed., Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CHANDRASEKAR, M.; ISHAK, M. R.; SAPUAN, S. M.; LEMAN, Z.; JAWAID, M. A review on the characterisation of natural fibres and their composites after alkali treatment and water absorption. **Plastics, Rubber and Composites**, v. 46, n. 3, p. 119-136.

CLYNE, T. W.; HULL, D. **An Introduction to Composite Materials**. 3. ed. New York: Cambridge University Press, 2019.

DAUD, K. et al. Potential of Duckweed (*Lemna minor*) for the Phytoremediation of Landfill Leachate. **Journal of Chemistry**, p. 2-9, 2018.

DHAKAL H. N., ISMAIL S. O., 2021b. **3 - Lightweight composites, important properties and applications**. In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Sustainable Composites for Lightweight Applications, Woodhead Publishing, p. 53-119, 2021.

FERDINÁND, M. et al. Impact modification of PP with short PET fibers: Effect of heat setting on fiber characteristics and composite properties. **Composite Structures**, v. 311, p. 116810, 2023.

GUIMARÃES, J. S.; SHIOSAKI, R. K.; MENDES, M. L. M. Licuri (*Syagrus coronata*): características, importâncias, potenciais e perspectivas do pequeno coco do Brasil. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, v. 58, p. 169-192, 2021

HALIP, J. A.; HUA, L. S.; ASHAARI, Z.; TAHIR, P.; CHEN, L. W.; UYUP, M. K. A. Effect of treatment on water absorption behavior of natural fiber reinforced polymer composites. *In*: JAWAID, M.; THARIQ, M.; SABA, N. Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites. **Woodhead Publishing**, v. 1, n. 8, p. 141-156, 2019.

HASAN ABUL, MOHAMMAD. et al. Studies on the mechanical and Degradation Properties of Composites Using Acacia Catechu, Jute and Polypropylene. **Geocarto International**, v. 29, p.915-940, 2019.

HEREGA, ALEXANDER. The Selected Models of the Mesostructure of composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.173, p. 305-987, 2018.

HSISSOU R., SEGHIRI R., BENZEKRI Z., HILALI M., RAFIK M., ELHARFI A., Polymer composite materials: A comprehensive review. **Composite Structures**, v. 262, 2021.

KHALIL, H.P.S.A.; ISMAIL, H.; ROZMAN, H.D.; AHMAD, M.N. The effect of acetylation on interfacial shear strength between plant fibres and various matrices. **European Polymer Journal**, v.37, n.5, p.1037-1045, 2001.

KHANLOU, H. M.; HALL, W.; WOODFIELD, P.; SUMMERSCALES, J.; FRANCUCCI, G. The mechanical properties of flax fibre reinforced poly(lactic acid) bio-composites exposed to wet, freezing and humid environments. **Journal of Composite Materials**, v. 52, n. 6, p. 835–850, 2017.

KUMAR, A. P.; MOHAMED, M. N. A comparative analysis on tensile strength of dry and moisture absorbed hybrid kenaf/glass polymer composites. **Journal of Industrial Textiles**, v. 47, n. 8, p. 2050–2073, 2018.

KUMAR, S.; HIREMATH, S. S. Natural Fiber Reinforced Composites in the Context of Biodegradability: A Review. **Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials**, v. 5, p. 160-178, 2020.

LAU, K.; HUNG, P.; ZHU, M.; HUI, D. Properties of natural fibre composites for structural engineering applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 136, p. 222–233, 2018b.

LAU, K.; HUNG, P.; ZHU, M.; HUI, D. Properties of natural fibre composites for structural engineering applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 136, p. 222–233, 2018b.

LEÃO M. A. **Compósitos Poliméricos A Base De Fibras De Licuri: Efeitos Da Hibridização E Do Envelhecimento Ambiental Acelerado**. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte, 2013.

LEVY NETO, Flamínio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos Estruturais - ciência e Tecnologia**. São Paulo: EDGARD BLÜCHER, 2013.

LOTFI, A.; LI, H.; DAO, D. V.; PRUSTY, G. Natural fiber–reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, SAGE Publications Sage UK: London, England, 2019.

MACHADO, M. P.; MENCHISE, C. A.; BANDEIRA, C. F.. Desenvolvimento de Compósito Polimérico Reforçado com Fibras de Coco. **EXATAS, ENGENHARIAS E TECNOLOGIAS**, p. 64, 2021.

MAHBOOB, Z.; BOUGHERARA, H. Fatigue of flax-epoxy and other plant fibre composites: Critical review and analysis. **Composites Part A**, v. 109, p. 440–462, 2018.

MARQUES, A.T. **Apontamentos de Sistemas Compósitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2017

MEDEIROS, Diego L. et al. Ciclo de vida de compósitos com fibras vegetais: uma análise qualitativa das emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) do compósito de polipropileno com fibra de sisal. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 4, p. 1166-1180, 2016.

MOTA, Rui Carlos de Sousa. **Aproveitamento do exocarpo do licuri particulado para produção de um compósito utilizando como matriz um poliéster ortoftálico.** 2017.

MOTA, Rui Carlos de Sousa. **Aproveitamento do exocarpo do licuri particulado para produção de um compósito utilizando como matriz um poliéster ortoftálico.** 2017.

MOUSAVI, S. R. et al. Seyed Rasoul et al. Mechanical properties of bamboo fiberreinforced polymer composites: a review of recent case studies. **Journal of Materials Science**, p. 1-25, 2022.

MRAD, H.; ALIX, S.; MIGNEAULT, S.; KOUBAA, A.; PERRÉC, P. Numerical and experimental assessment of water absorption of wood polymer composites. **Measurement**, v. 115, p. 197–203, 2018.

MUKHTAR I. et al. Sugar Palm Fibre and its Composites: A Review of Recent Developments. **Universiti Putra Malaysia**, Serdang, p. 27, 2016.

NAGARAJAN, K. J.; BALAJI, A. N.; SATHICK BASHA, K.; RAMANUJAM, N. R.; ASHOK KUMAR, R. Effect of agro waste α -cellulosic micro filler on mechanical and thermal behavior of epoxy composites. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 152, p. 327-339, 2020.

NOBLICK, L. R. **Palmeiras das caatingas da Bahia e as potencialidades econômicas.** Simpósio sobre a Caatinga e sua Exploração Racional. Brasília, DF, EMBRAPA, p.99-115,1986.

OLIVEIRA FILHO, Genilson Cunha de. **Efeitos da hibridização nas propriedades mecânicas de compósitos reforçados por tecido de fibras de piaçava.** 2019.

OLIVEIRA FILHO, Genilson Cunha de. **Efeitos da hibridização nas propriedades mecânicas de compósitos reforçados por tecido de fibras de piaçava.** 2019.

OUARHIM, W.; ZARI, N.; BOUHFID, R.; QAISS, A. Mechanical performance of natural fiberbased thermosetting composites. *In*: JAWAID, M.; THARIQ, M.; SABA, N. Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites. **Woodhead Publishing**, v. 1, n. 3, p. 43-60, 2019.

OUSHABI A., SAIR S., OUDRHIRI HASSANI F., ABBOUD Y., TANANE O., EL BOUARI, A. The effect of alkali treatment on mechanical, morphological, and thermal properties of date palm fibers (DPFs): study of the interface of DPF - Polyurethane composite. **South African Journal of Chemical**, v. 23, 2017.

PASCAULT, J. P.; WILLIAMS, R. J. J. Overview of thermosets: Present and future. *In: GUO, Q. Thermosets: Structure, Properties, and Applications*. Elsevier, v. 2, cap. 1, p. 3-34, 2018,

PEREIRA, W. A. et al. Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra da Folha do Buriti. **Revista Matéria**, v. 26, n. 1, 2021.

PICKERING K. L., EFENDY M. A., LE T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A Applied Science Manufacturing**, v. 83, p. 98-112, 2016.

PISANU, L. **Estudo da força de adesão em polímeros dissimilares obtidos pelo processo de injeção multicomponente: Aplicações em compósitos com fibra de coco**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2018.

POLETTTO, Matheus. Compósitos termoplásticos com madeira-uma breve revisão. **Revista Interdisciplinar de Ciências Aplicadas**, v. 4, p. 42-48, 2017.

RAJAK D. K., PAGAR D. D., KUMAR R., PRUNCU C. I., Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. 2019. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 6, p. 6354-6374, 2019.

RAZERA, Marina de Lima. **Palmeira do sertão: caracterização da cadeia produtiva do licuri (Syagrus coronata Martius Beccari) em regiões da Bahia. 2021**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

REDDY R.A., YOGANANDAM K., MOHANAVEL V., **Effect of chemical treatment on natural fiber for use in fiber reinforced composites – Review**. *Materials Today: Proceedings*, 33, 2996 – 2999, 2020.

RODRIGUES, Miguel Ângelo Moura. **Furação Orbital de Compósitos Híbridos Aço/CFRP**. 2018.

SABA N., JAWAID M. A review on thermomechanical properties of polymers and fibers reinforced polymer composites. **Journal of Industrial Engineering Chemistry**, 67:1–11, 2018.

SAFRI, S. N. A.; SULTAN, M. T. H.; JAWAID, M.; JAYAKRISHNA, K. Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. **Composites Part B: Engineering**, Elsevier, v. 133, p. 112–121, 2018.

SANJAY, M. R.; MADHU, P.; JAWAID, MOHAMMAD; SENTHAMARAICANNAN, P.; SENTHIL, S.; PRADEEP, S. Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 566–581, 2018.

SANTOS, D. G. dos. **Estudo termo hídrico e caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra vegetal: simulação 3D e experimentação.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017.

SENTHILKUMAR, K., SABA, N., RAJINI, N., CHANDRASEKAR, M., JAWAID, M., SIENGCHIN, S.; ALOTHMAN, O. Y. Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 174, 2018.

SERETIS, G V; MANOLAKOS, D E; PROVATIDIS, C G. On the stainless-steel flakes reinforcement of polymer matrix particulate composites. **Composites Part B**, v. 162, p. 80–88, 2019.

SILVA, Jefferson Renan Santos da. **Obtenção e caracterização de um material compósito produzido com resíduos da castanha-do-brasil e poliestireno de alto impacto.** 2019.

TANZI, M. C.; FARÈ, S.; CANDIANI, G. **Foundations of Biomaterials Engineering.** Academic Press, p. 572, 2019.

WANG B., ZHONG S., LEE T.L., FANCEY K.S., MI J. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: a state-of-the-art review. **Adv. Mech. Eng.**, v. 12, n. 4, p. 1- 28, 2020.

YINGJI, W.; CHANGLEI, X.; LIPING, C.; SHELDON, Q. S.; JIANGTAO, C. Water-resistant hemp fiber-reinforced composites: In-situ surface protection by polyethylene film. **Industrial Crops & Products**, v. 112, p. 210–216, 2018.

YU, H., LONGANA, M., JALALVAND, M., WISNOM, M., POTTER, K., **Pseudoductility in intermingled carbon/glass hybrid composites with highly aligned discontinuous fibres.** In: *Composites: Part A*, 73., p. 35–44, 2015.