



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CAMPUS DE ANANINDEUA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DAYSE NATÁLIA MATOS COELHO

**ESTUDO FRACTOGRÁFICO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA  
REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇAÍ E CURAUÁ**

Ananindeua – PA

2021

DAYSE NATÁLIA MATOS COELHO

**ESTUDO FRACTOGRÁFICO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA  
REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇAÍ E CURAUÁ**

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

Orientador: Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva.

Ananindeua – PA

2021

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

---

C672e Coelho, Dayse Natália Matos.  
ESTUDO FRACTOGRÁFICO DE COMPÓSITOS DE  
MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM FIBRAS DE  
AÇAÍ E CURAUÁ / Dayse Natália Matos Coelho. — 2021.  
76 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva  
Coorientação: Prof<sup>a</sup>. Dra. Verônica Scarpini Candido  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de  
Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2021.

1. Fibras de Açaí;. 2. Fibras de Curauá;. 3. Compósito  
Polimérico;. 4. Fractografia.. I. Título.

CDD 620.11

---

DAYSE NATÁLIA MATOS COELHO

**ESTUDO FRACTOGRÁFICO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA  
REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇAÍ E CURAUÁ**

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

Data da Aprovação:

Conceito:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva.

(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Orientador)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Verônica Scarpini Candido

(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Coorientadora)

---

MSc. Luciano Monteiro Almeida

(Engenheiro Mecânico – Membro Externo)

Ananindeua – PA

2021.

*In memoriam* ao meu irmão Denilton por em vida ter me apoiado no início desse meu sonho e aos meus pais, Wilma e Franciney, que finalmente terão uma filha engenheira, dedico

## AGRADECIMENTOS

A mim primeiramente, por sempre me esforçar para conquistar os meus objetivos e nunca desistir, e a Deus por ter sido o meu alicerce em todos os meus dias difíceis nessa graduação.

Aos meus pais, Wilma Matos e Franciney Coelho por todo amor, apoio e incentivo e por serem a minha base de força e coragem para eu nunca desistir de nada que almejo na minha vida profissional e pessoal. A vocês, meu eterno amor e gratidão.

*In memoriam* ao meu irmão Denilton, por todo amor e ensinamentos de irmão mais velho durante o seu existir, a minha irmã Denize por ter sido a minha inspiração de entrar em uma universidade pública, a minha sobrinha Deyseane por tornar os meus dias mais leves com todo o seu amor e as minhas primas Valéria e Susan pelo privilégio de tê-las em minha vida.

As minhas tias de coração, Ducarmo e Olinda, aos meus padrinhos Marciane e Júnior, ao meu tio Mailson e a minha prima Brenda, por todo apoio, amor e ensinamentos desde a infância até aqui. As minhas tias de sangue, em especial Maria e Telma pelo carinho, cuidado e apoio durante a graduação.

As minhas melhores amigas, Ana Victória e Sheron Alcântara por todo companheirismo de anos, por estarem presente em todos os momentos da minha vida e por sempre torcerem pelo meu sucesso.

Ao meu amigo e irmão, Paulo Aranha, por ter tornado a minha caminhada na graduação mais leve, por ter segurado na minha mão em inúmeros momentos difíceis e principalmente por ter sido pesquisador PIVIC da minha pesquisa do tcc, ajudando a tirar cada fibra de açaí até a etapa final, minha gratidão eterna.

Ao meu namorado, Hugo Rodolpho por todo apoio nessa minha fase final de curso, por cada palavra e gesto de incentivo para eu não desistir, por todo amor, carinho e compreensão e por deixar meus dias mais felizes.

A minha professora do ensino médio e da vida, Jaci Shand por ter sido a responsável por descobrir esse curso a qual sou apaixonada hoje.

Aos meus melhores amigos do ensino médio para a vida, Loyane Trindade, Dehmy Jeanny e Lucas Coelho, por me proporcionarem memórias boas e momentos alegres a cada reencontro.

Ao meu grupo de estudo, Sthefanny Mileni, Silmara Moraes, Carlos Cícero, Hanathanya Silva e Rosielem Magalhães, a qual compartilhamos muitas noites sem dormir, estresses, elogios, lágrimas, risadas e momentos únicos juntos que levarei para a vida.

Aos amigos, Jéssica Guimarães, Wellington Bruno, Juliana Barbosa, Dona Nelma, Rute Nara e Flávia Silva, que fizeram da minha jornada acadêmica mais leve e descontraída e

em especial Josilene Bonifácio, Jamylle Tavares e Lucas Rezende, por toda ajuda até os momentos finais da graduação.

Ao grupo de pesquisa de Materiais Compósitos da Faculdade de Engenharia de Materiais – UFPA Campus Ananindeua, por todo compartilhamento de conhecimento, em especial a Olívia Leite, Luciano Almeida, Damares Barbosa e Fernando Lins, por cada palavra de motivação e experiência compartilhada e por toda ajuda para a realização desse trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alisson Rios e coorientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Verônica Scarpini, pela orientação para a realização deste trabalho, por todo ensinamento repassado e sempre me desafiarem a ir atrás do conhecimento e por toda inspiração no excelente profissionais que são.

Aos Laboratórios de Práticas Tecnológicas e Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia de Materiais – UFPA Campus Ananindeua, pela acessibilidade estrutural para a realização desse trabalho.

Ao Laboratório de Química (LabQuim) da Faculdade de Licenciatura em Química – UFPA Campus de Ananindeua, em especial ao Jhony Ramos por todo suporte técnico, apoio e palavras de incentivo e a bolsista Stella Martins por todo suporte no laboratório.

A FINEP, a rede LABNANO-AMAZON/UFPA pelo apoio e disponibilidade para a realização das análises em Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.

A banca examinadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Verônica Scarpini e MSc. Luciano Almeida por aceitarem participar da defesa desse trabalho.

A Universidade Federal do Pará, a qual tenho orgulho de ter feito parte da maior do Norte e a Faculdade Engenharia de Materiais, em especial aos professores da faculdade a qual contribuíram significativamente para a minha formação.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para minha formação, o meu muitíssimo obrigada.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*

*(Marthin Luther King)*

## RESUMO

A necessidade de preservar o meio ambiente e de encontrar destinações dos resíduos dispostos ao ar livre, vem contribuindo para um maior interesse na utilização de materiais derivados de recursos renováveis e mais que isso, materiais sustentáveis associados a bons desempenhos mecânicos. Diante disso, nesse estudo foi utilizado as fibras do caroço do açaí, resíduo da agroindústria que gera um excesso de resíduos por ano e fibras de curauá, como recurso renovável em aplicação em compósitos poliméricos. O objetivo desse estudo foi desenvolver materiais compósitos através do método manual de fabricação, com matriz Poliéster Ortoftálica empregando reforço de fibras lignocelulósicas de açaí e curauá com comprimentos médios de 16 mm para fazer análises morfológicas das superfícies de fraturas. Os valores de fração mássica inserida foram de 50% de fibras de açaí, 50% de fibras de curauá e 50% híbrido, para 50% de resina e 1% de catalisador. Para isso, inicialmente foi feito a caracterização física de dimensionamento e densidade das fibras. Para a análise morfológica foram realizados rompimentos de 3 corpos de prova em direção uniaxial em uma prensa hidráulica de 15 toneladas da marca BOVENAU e levados para estudar a superfície de fratura através de análises macroscópicas e microscópicas dos corpos de prova, por meio de Microscopia Óptica – MO e Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV. Os compósitos apresentaram uma boa adesão interfacial fibra/matriz, observadas pelo rompimento das fibras e presença de poucas bolhas, assim demonstrando potencial para um comportamento mecânico satisfatório, sendo aptos para realização de ensaios mecânicos e aplicações futuras.

**Palavras-chave:** Fibras de Açaí, Fibras de Curauá, Compósito Polimérico, Fractografia.

## ABSTRACT

The need to preserve the environment and find the destinations for waste disposed of in the open air has contributed to a greater interest in the use of materials derived from renewable resources – and more than that, sustainable materials – associated with good mechanical performance. Therefore, in this study, fibers from the açai seed were used, a residue from the agroindustry that generates an excess of residues per year, and curauá fibers, as a renewable resource in applications in polymeric composites. The objective of this study was to develop composite materials through the manual manufacturing method, with an Orthophthalic Polyester matrix employing reinforcement of lignocellulosic fibers from açai and curauá with average lengths of 16 mm to perform morphological analysis of the fracture surfaces. The values of mass fraction entered were 50% açai fibers, 50% curauá fibers and 50% hybrid, for 50% resin and 1% catalyst. For this, the physical characterization of fiber sizing and density was performed. For a morphological analysis, ruptures of 3 specimens were performed in uniaxial direction in a 15-ton hydraulic press of the BOVENAU brand and taken to study the fracture surface through macroscopic and microscopic analysis of the specimens, by means of Optical Microscopy - MO and Scanning Electron Microscopy - SEM. The composites have good fiber/interfacial matrix adhesion, observed by fiber breakage and presence of bubbles, thus demonstrating the potential for a satisfactory mechanical behavior, being able to perform mechanical tests and future applications.

**Keywords:** Açai Fibers, Curauá Fibers, Polymeric Composite, Fractography.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Classificação dos compósitos. ....                                   | 21 |
| Figura 2 – Orientação das fibras.....                                           | 22 |
| Figura 3– Síntese da Resina Poliéster Insaturada. ....                          | 25 |
| Figura 4 – Árvore de açaizeiro. ....                                            | 31 |
| Figura 5 – Fruto de açaí a) no estágio inicial b) maduro. ....                  | 31 |
| Figura 6 – Micrografia da semente do açaí. ....                                 | 32 |
| Figura 7 – Resíduo do caroço do açaí. ....                                      | 34 |
| Figura 8 – <i>Ananás erectifolius</i> .....                                     | 34 |
| Figura 9 – Fibras de curauá sem resíduos de mucilagem. ....                     | 35 |
| Figura 10 – Fibrila de açaí vista por Microscopia Óptica. ....                  | 35 |
| Figura 11– Fluxograma do procedimento experimental do estudo. ....              | 38 |
| Figura 12 – Resina Poliéster Insaturada. ....                                   | 39 |
| Figura 13 – Catalisador MEK D 45.....                                           | 40 |
| Figura 14 - Cera desmoldante.....                                               | 41 |
| Figura 15– Carochos de açaí recém-coletados. ....                               | 41 |
| Figura 16– Fibras de Curauá. ....                                               | 42 |
| Figura 17 – Lavagem do caroço do açaí.....                                      | 43 |
| Figura 18 – Microscópio Estereoscópio Binocular. ....                           | 43 |
| Figura 19 – Fibra curta de curauá. ....                                         | 44 |
| Figura 20 – a) Pesagem de resina, b) e c) fibras na balança analítica. ....     | 46 |
| Figura 21 – Molde de madeira nas dimensões de 5x5x5cm.....                      | 47 |
| Figura 22 – Revestimento de desmoldante no molde de madeira. ....               | 48 |
| Figura 23 – Etapas de preparação do CP.....                                     | 48 |
| Figura 24 – Prensagem do molde de madeira na prensa hidráulica manual.....      | 49 |
| Figura 25 – Rompimento do compósito com fibras de curauá.....                   | 50 |
| Figura 26 –Microscópio Óptico com amostra de compósito com fibras de açaí. .... | 50 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27 - Metalizadora (marca Quorum Sputtery Coater SC7620) realizando a metalização.<br>.....                                                                                                                                                                                               | 51 |
| Figura 28 – Amostras metalizadas. ....                                                                                                                                                                                                                                                          | 51 |
| Figura 29– Microscópio Eletrônico de Varredura. ....                                                                                                                                                                                                                                            | 51 |
| Figura 30 – Distribuições estatística do comprimento das fibras de açaí.....                                                                                                                                                                                                                    | 52 |
| Figura 31 – Distribuição estatística do comprimento das fibras de curauá. ....                                                                                                                                                                                                                  | 52 |
| Figura 32 – Distribuição estatística do diâmetro das fibras de açaí .....                                                                                                                                                                                                                       | 53 |
| Figura 33 – Distribuição estatística do diâmetro das fibras de curauá .....                                                                                                                                                                                                                     | 53 |
| Figura 34 – CP's de fibras de açaí nas dimensões de 5x5x1,5 cm: a) não desfibriladas e b) desfibriladas.....                                                                                                                                                                                    | 55 |
| Figura 35 – CP's fraturados nas dimensões de 5x5x1,5 cm: a) cp de fibras de açaí, b) cp de fibras de curauá e c) cp híbrido. ....                                                                                                                                                               | 56 |
| Figura 36 – Macrografia e micrografia da fratura do compósito com 50% de fibras de açaí; (a) visão macro do corpo de prova; (b) impregnação de fibras e poliéster em aumento de 10x; (c) fratura das fibras em aumento de 30x; (d) bolha de ar na superfície da fratura em aumento de 30x. .... | 57 |
| Figura 37 – Macrografia e micrografia da fratura do compósito com 50% de fibras de curauá; (a) visão macro do corpo de prova; (b) arrancamento da fibra em aumento de 10x; (c) fratura das fibras em aumento de 30x; (d) bolha de ar na superfície da fratura em aumento de 30x. .              | 59 |
| Figura 38 – (a) Macrografia e micrografia da fratura do compósito híbrido (a) visão macro do corpo de prova, (b) visão geral em 10x, (c) detalhe da interface matriz-reforço em 30x e (d) fratura das fibras em aumento de 30x.....                                                             | 60 |
| Figura 39 - MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açaí; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da interface matriz-reforço em 300x.....                                                                                                                                       | 61 |
| Figura 40 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açaí; (a) visão geral e (b) detalhe da superfície com vazio por arrancamento de fibra e bolhas. ....                                                                                                                       | 62 |
| Figura 41 - MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açaí; (a) visão geral em 300x e (b) detalhe de fibras rompidas na superfície da fratura em 500x.....                                                                                                                       | 63 |
| Figura 42 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açaí; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície da fratura em 300x mostrando <i>pull out</i> da fibra de açaí..                                                                                                  | 63 |

|                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 43 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de curauá; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície em 500x com fibras rompidas na superfície na seção transversal da fratura. ....       | 64 |
| Figura 44 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de curauá; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície em 300x com vazio por bolhas de ar.....                                               | 65 |
| Figura 45 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açai e curauá; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície em 300x com vazio por arrancamento de fibras. ....                             | 66 |
| Figura 46 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açai e curauá; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície em 500x com fibras rompidas na superfície na seção transversal da fratura..... | 67 |
| Figura 47 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açai e curauá; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície da fratura em 300x mostrando <i>pull out</i> da fibra de curauá.....           | 68 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Características das fibras de Vidro, Carbono e Aramida.....                     | 26 |
| Tabela 2 – Composição química de celulose, hemicelulose e lignina de fibras naturais. .... | 29 |
| Tabela 3 – Densidade de fibras conforme literaturas. ....                                  | 32 |
| Tabela 4 – Ficha de informações do produto resina poliéster .....                          | 39 |
| Tabela 5 – Ficha de informações do catalisador MEK D 45.....                               | 40 |
| Tabela 6 – Relação de quantidades de resina e fibra.....                                   | 45 |
| Tabela 7 – Densidade das fibras de açai e curauá. ....                                     | 54 |

## **LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS**

|      |                                          |
|------|------------------------------------------|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| CP's | Corpos de Prova                          |
| NBR  | Norma Brasileira                         |
| MEV  | Microscopia Eletrônica de Varredura      |
| MO   | Microscópio Óptico                       |
| UFPA | Universidade Federal do Pará             |

## SUMÁRIO

|            |                                                                            |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                    | <b>15</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Objetivos .....</b>                                                     | <b>16</b> |
| 1.1.1      | Objetivo Geral.....                                                        | 16        |
| 1.1.2      | Objetivos Específicos .....                                                | 16        |
| <b>1.2</b> | <b>Justificativa.....</b>                                                  | <b>17</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                          | <b>19</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Materiais Compósitos .....</b>                                          | <b>19</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Lignocelulósicas .....</b> | <b>21</b> |
| 2.2.1      | Matrizes Poliméricas.....                                                  | 23        |
| 2.2.1.1    | Resina Poliéster.....                                                      | 24        |
| 2.2.2      | Fibras .....                                                               | 25        |
| 2.2.2.1    | Fibras lignocelulósicas.....                                               | 28        |
| 2.2.2.1.1  | Fibras de açaí .....                                                       | 30        |
| 2.2.2.1.2  | Fibras De Curauá .....                                                     | 34        |
| 2.2.3      | Aplicação Industrial .....                                                 | 36        |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                           | <b>38</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Materiais .....</b>                                                     | <b>39</b> |
| 3.1.1      | Materiais Sintéticos.....                                                  | 39        |
| 3.1.2      | Fibras lignocelulósicas.....                                               | 41        |
| <b>3.2</b> | <b>Metodologia experimental.....</b>                                       | <b>42</b> |
| 3.2.1      | Caracterização dimensional das fibras.....                                 | 43        |

|            |                                                                    |           |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2      | Determinação da densidade das fibras - método por picnômetro ..... | 44        |
| 3.2.3      | Confecção dos Compósitos.....                                      | 45        |
| 3.2.4      | Fratura dos CP's.....                                              | 49        |
| 3.2.5      | Microscopia Óptica das fraturas .....                              | 50        |
| 3.2.6      | Microscópio Eletrônico de Varredura das fraturas .....             | 50        |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                               | <b>52</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Caracterização das fibras.....</b>                              | <b>52</b> |
| 4.1.1      | Determinação dos comprimentos e diâmetros .....                    | 52        |
| 4.1.2      | Determinação da densidade das fibras .....                         | 54        |
| <b>4.2</b> | <b>Influência da dispersão das fibras na resina .....</b>          | <b>54</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Análise Macroscópica dos CP's fraturados.....</b>               | <b>56</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Aspectos fractográficos dos materiais compósitos .....</b>      | <b>57</b> |
| 4.4.1      | Análise por Microscopia Óptica – MO .....                          | 57        |
| 4.4.2      | Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV .....        | 61        |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                             | <b>69</b> |
| <b>6</b>   | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>                       | <b>70</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                           | <b>71</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a questão ambiental está sendo discutida em busca de se obter o desenvolvimento sustentável. Este tem ganhado destaque por propor que consciência ambiental e desenvolvimento econômico estejam interligados. Neste contexto, a substituição de materiais sintéticos por matérias-primas renováveis a partir de resíduos da agroindústria, vem sendo amplamente estudados para aplicação de novos materiais nos diversos setores industriais. Em materiais compósitos a utilização de fibras lignocelulósicas como reforço, é uma alternativa de baixo custo e com propriedades mecânicas relativamente semelhantes em relação às fibras sintéticas.

Caracterizado por um material reutilizável e de baixo custo, as fibras naturais (origem ora vegetal, ora animal) tem como utilização na fabricação de compósitos um significativo suporte mecânico. Isso ocorre devido ao custo benefício atrativo e atributos mecânicos regulares, comparados as fibras sintéticas (vidro, carbono e aramida) (NETO; PARDINI, 2016).

No passado recente, fibras sintéticas eram as categorias de reforços mais utilizados para a fabricação de compósitos com fibras. Porém, com o cenário de poluição agravado no mundo, a utilização de fibras vegetais aumenta grandemente, em função das suas propriedades elevadas de resistência e baixo custo. Com tratamentos químicos a rugosidade e rusticidade desses reforços lignocelulósicos aumentam e ajudam na adesão nas matrizes poliméricas, que auxiliam na garantia de um produto com boa procedência e um custo benefício atrativo. E ambas propriedades de confecção aumentam a credibilidade das fibras naturais para aplicação em compósitos (KOMURAI; KUMAR; PRASAD, 2017).

Vários tipos de tratamentos químicos podem ser realizados em fibras naturais com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas e melhorar a adesão em compósitos de matriz polimérica e fibras lignocelulósicas, mitigando o problema de molhabilidade das fibras que ocasiona defeitos interfaciais. Esse tratamento interfacial altera a morfologia e aperfeiçoa a capacidade de interação da fibra com a matriz polimérica, trazendo melhores resultados nas propriedades mecânicas do compósito (CAVALCANTI, 2018).

Algumas fibras possuem propriedades mecânicas bastante atrativas e vem sendo bastante estudada ao longo dos anos para aplicação em materiais compósitos. As fibras de

curauá possuem uma considerável resistência mecânica em comparação a outras fibras naturais como sisal, juta e linho. Essas fibras possuem excelentes propriedades físico-mecânicas (OLIVEIRA, 2016).

As fibras de açaí vêm ganhando espaço com estudos de suas propriedades em materiais compósitos. As fibras provêm do caroço do açaí, uma fruta abundante na região amazônica e são bastante consumidas gerando toneladas de resíduos ao ano nessa região. Com o intuito de mitigar os problemas de descartes desse resíduo, pesquisas vêm sendo realizadas para o aproveitamento delas. Em materiais compósitos as fibras de açaí são empregues como cargas devido serem fibras curtas (GHELEN, 2014; SEBRAE, 2015).

Os compósitos com reforços de fibras naturais são aplicados em vários seguimentos industriais, como na indústria automobilística, construção civil, aeroespacial e moveleira, por aliarem desempenho mecânico a materiais leves e de baixo custo. Estudos sobre fabricação de chapas e painéis a partir de compósitos com fibras naturais estão sendo explorados para aplicações em revestimentos na indústria civil, revestimentos internos de carros e móveis para casas (CARDOSO, 2014; BARBOSA, 2016).

Ainda há poucos estudos em relação à fabricação de compósitos com fibras de açaí para aplicação industrial e principalmente de compósitos híbridos com fibras de açaí e curauá e resina Poliéster. Diante disso, o presente trabalho aborda um estudo fractográfico de compósitos com fibras de açaí, curauá e híbridos como sugestão futura para aplicações industriais.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento morfológico da região de fratura dos compósitos com matriz de resina poliéster e reforços de fibras de açaí, curauá e híbrido.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- a) estudar as propriedades físicas das fibras de açaí e curauá;

- b) avaliar os fenômenos/ os defeitos interfaciais que ocorrem na interface matriz e reforço dos compósitos a partir de estudos fractográficos.
- c) estudar o potencial uso de fibras de caroço de açaí como possível agente de reforço em material compósito polimérico;

## 1.2 Justificativa

Na Assembleia Geral das Nações Unidas que aconteceu em 2015, foi elaborado a Agenda 2030 (Agenda de Desenvolvimento da ONU) que tem como plano de ação, estratégias globais para um desenvolvimento sustentável em um tempo de 15 anos. Esse plano de ação refere-se a 169 metas e aos 17 ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) que integram ações de dimensões social, ambiental e econômica que os 193 Estados-membros devem adotar e atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável, de acordo com a Comissão Nacional ODS (2018). Diante disso, o Brasil faz parte dos 193 Estados-membros que até 2030 devem executar o Plano de Metas e inclusão dos ODS em seus programas de governo.

O gerenciamento de resíduos sólidos é uma preocupação nos quesitos de sustentabilidade da Agenda 2030. Com isso, a necessidade de achar soluções para resíduos da agroindústria e torna-los úteis para aplicações de engenharia, diminuindo assim um grave problema ambiental e de saúde pública, vem se tornando eminente na engenharia verde. O caroço de açaí (*Euterpe oleracea mart.*), é um resíduo agroindustrial enormemente presente no extremo norte do Brasil por ser um fruto bastante consumido, gera milhares de toneladas ao ano e o e não há destinos ecologicamente correto e efetivos.

Partindo da necessidade de encontrar soluções para amenizar tais problemas, no âmbito ambiental esse trabalho justifica-se, pois utiliza fibras naturais do caroço do açaí considerado como resíduo agroindustrial, contribuindo para amenizar prováveis impactos ambientais e além também de utilizar fibras de curauá como matéria-prima renovável, para substituição de fibras sintéticas em materiais compósitos.

Cientificamente, justifica-se por ser um estudo relativamente novo que aborda sugestão de aplicação de compósitos híbridos a partir de fibras de açaí e curauá com matriz Poliéster Insaturada, analisando o comportamento interfacial do reforço e matriz nos compósitos fraturados através de estudos fractográficos.

Por fim, na questão econômica, por se tratar de um trabalho que emprega fibras naturais como reforço no compósito, justifica-se por ser materiais de baixo custo em relação à utilização de fibras sintéticas, e podem também gerar incentivos na economia local de vendedores da poupa do fruto do açaí.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Materiais Compósitos

Os Compósitos compõem uma das classes da Engenharia de Materiais. É um material multifásico que combina propriedades das fases constituintes. Essas fases constituintes necessitam ser quimicamente distintas e separados por uma interface. A maioria dos materiais compósitos são formados por duas fases, uma fase contínua chamada matriz, que envolve a outra fase, chamada fase dispersa. Essa classe de materiais combina materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas, bem como rigidez, tenacidade, resistência às condições do ambiente e a elevadas temperaturas, tornando um material com propriedades extraordinárias aptos para diversas aplicações de alta tecnologia (CALLISTER, 2018).

A matriz em um compósito pode ser um metal, um polímero ou um cerâmico. Tem a finalidade de ligar as fibras uma as outras, prevenindo a propagação de trincas que causa defeitos superficiais, que podem ocorrer devido à abrasão mecânica e reações químicas. A fase reforço em um compósito tem a função de melhorar a tenacidade a fratura da matriz. Não tem funcionalidade estrutural se não forem aglutinadas e estabilizadas por uma matriz. Os reforços mais utilizados são fibras sintéticas e naturais e podem se apresentar na forma de fibras contínuas, alinhadas e particuladas (CALLISTER, 2018; FERREIRA, JUNIOR e SOUZA, 2017; PEIXOTO, 2019).

A origem dessa classe de material existe a milhares de anos como os compósitos naturais, bem como a madeira, os ossos e os tecidos musculares que são exemplos de eficiência estrutural. Nesses compósitos naturais também pode-se observar uma fase aglutinante chamada matriz que envolve a fase reforço na forma filamentar, tendo assim trabalho energético através de esforços mecânicos (PEREIRA, 2017).

A necessidade de avanços tecnológicos em vários setores industriais, permitiu a criação de materiais tecnológicos de ponta, os materiais compósitos, responsável por inúmeras conquistas tecnológicas em aplicações nos setores aeroespaciais, naval, petroquímica, bioengenharia, automobilística, construção civil e uma infinidade em que demanda de materiais com propriedades relevantes. É um material com ampla aplicação devido a facilidade de

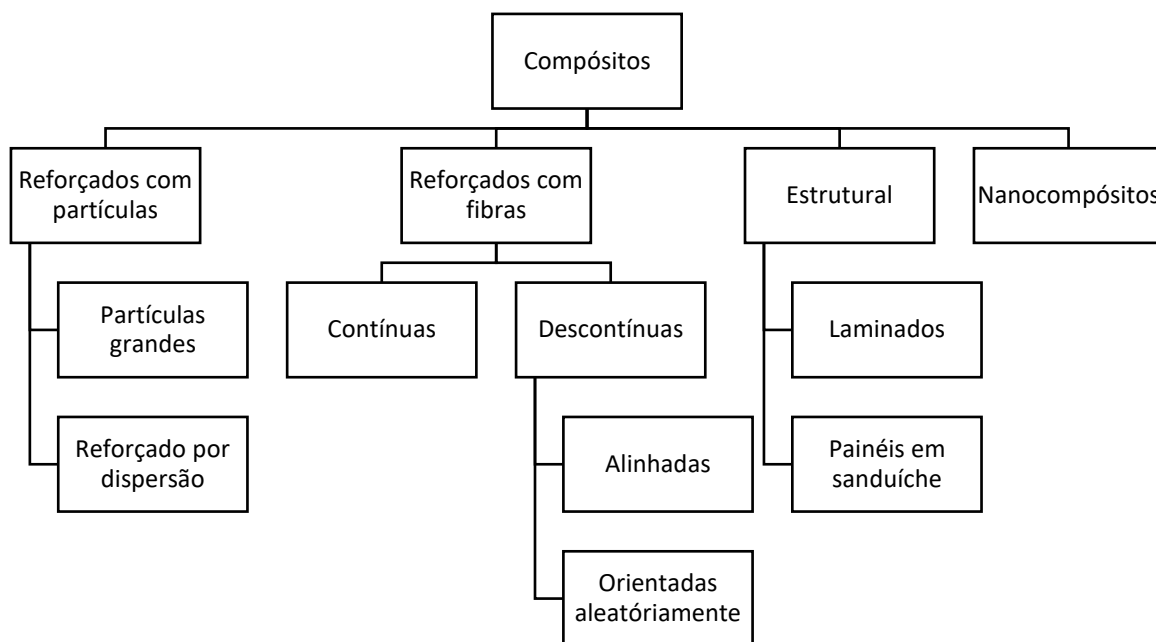
fabricação, possibilidade de usar materiais de baixo custo e de maior leveza. A escolha certa da matriz e o reforço a serem empregados dependem dos requisitos dos projetistas para tal aplicação (NETO e PARDINI, 2016).

As propriedades mecânicas de um material compósito dependem não só da escolha adequada da matriz e reforço para cada aplicação, mas também da interface reforço/matriz e o processo de fabricação desse material. É desejável que haja uma aderência interfacial eficaz para que os mecanismos de falhas não prejudiquem as propriedades do material. Os principais fatores que controlam as propriedades mecânicas e evitem falhas dos compósitos são: propriedades do reforço e matriz, fração volumétrica de reforços (fibras), orientação do reforço, comprimento e as propriedades da interface reforço/matriz (NETO e PARDINI, 2016; PEREIRA, 2017).

Devido a possibilidades infinitas de combinações de materiais para produzir um material compósito, sejam eles compósitos convencionais ou compósitos com matrizes diferentes, ou tipos de reforços distintos chamados de compósitos híbridos, as vantagens em desempenhos mecânicos e estruturais ganha destaque quando comparado a materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos, os materiais tradicionais. É visto como o material do futuro por combinar desempenho mecânico com custo/benefício (CALLISTER, 2018).

Os materiais compósitos apresentam quatro divisões principais: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras, compósitos estruturais e nano compósitos, conforme a Figura 1 abaixo. Esses materiais são de origem naturais e sintéticas (CALLISTER, 2018; NETO e PARDINI, 2016). Nesse estudo, o enfoque será dado aos compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas.

Figura 1 - Classificação dos compósitos.



Fonte: Adaptado de Callister (2018).

## 2.2 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Lignocelulósicas

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras são compostos de uma resina, o polímero, e fibras como reforço. As matrizes mais utilizadas em compósitos estruturais, esses também intitulados de compósitos avançados, são as poliméricas termofixas, as mais comuns são: epóxi, poliéster, fenólica e viniléster, possuindo um crescimento de 5% anual nos setores da indústria moderna. Porém, para requisitos de propriedades inferiores e maior demanda de fabricação, há os polímeros termoplásticos. A escolha da matriz adequada para o compósito depende da aplicação final (CALLISTER, 2018; MARINUCCI, 2011, REZENDE e BOTELHO, 2000).

Em aplicações estruturais os reforços utilizados em compósitos poliméricos são as fibras de carbono, fibra de vidro ou fibra de aramida, já em aplicações não estruturais as fibras naturais são empregadas, bem como fibras de coco, juta, sisal, açai e curauá (MARINUCCI, 2011).

O tipo de fase dispersa mais almejada tecnologicamente para um material compósito ter bons desempenhos mecânicos, precisam de características como alta resistência e/ou rigidez em relação ao seu peso, e essa fase encontra-se na forma de fibras. Tais características, são vistas por meio de parâmetros de resistência específica e módulo específico. Assim, para esses

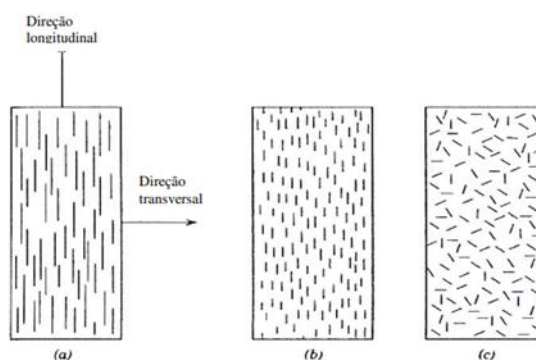
compósitos reforçados com fibras obterem resistência e módulo específicos elevados, é importante que as fibras e a matriz tenham baixa massa específica. A resistência desses compósitos, está diretamente relacionada ao comprimento das fibras (CALLISTER, 2018).

O desempenho mecânico de um material compósito reforçado de fibras depende da influência da orientação e da concentração das fibras para que o compósito tenha resistência e outras propriedades significativas. A magnitude da ligação interfacial entre fases fibra e matriz são dependentes da influência desses fatores (CALLISTER, 2018).

Para que tenha aumento na resistência e na rigidez de um material compósito é necessário que a fibra tenha um certo comprimento crítico. O comprimento crítico da fibra está relacionado à resistência e ao diâmetro da fibra e a força da ligação entre a fibra e matriz CALLISTER, 2018

Em relação a orientação das fibras no compósito, quando se tem uma distribuição uniforme as propriedades são mais interessantes. As fibras podem se apresentar de forma contínua e descontínua, sendo as fibras contínuas chamadas de fibras longas dispostas de forma alinhadas e as fibras descontínuas conhecidas como fibras curtas a orientação em compósitos normalmente se dá de modo aleatório, alinhados ou parcialmente orientados, representadas esquematicamente na Figura 2 (CALLISTER, 2018).

Figura 2 – Orientação das fibras



Fonte: Adaptado de Callister (2018).

Para compósitos com fibras contínuas e alinhadas as respostas mecânicas dependem de alguns fatores como: o comportamento tensão-deformação das fases fibras e matriz, frações volumétricas das fases e a direção onde a carga e a tensão são aplicadas. Já os compósitos com fibras descontínuas e alinhadas a eficiência é menor que as fibras contínuas, porém estão

ganhando cada vez mais importância na indústria. Os módulos de elasticidade e limites de resistência a tração de compósitos com fibras curtas como de fibras de vidro picado e fibras descontínuas de carbono e aramida, se aproximam respectivamente 90% e 50% em relação às fibras contínuas. E compósitos com fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente são aplicados quando se precisa de tensões totalmente multidirecionais (CALLISTER, 2018).

### 2.2.1 Matrizes Poliméricas

Os polímeros são de origem natural e sintético. São polímeros naturais os derivados de plantas e animais bem como, madeira, algodão, lã, borracha, seda e couro. Já os sintéticos são os polímeros mais úteis atualmente desde a Segunda Guerra Mundial e estes são plásticos, borrachas, materiais fibrosos. Essa classe de material é conhecida por possuir estrutura orgânica, formada por hidrocarbonetos. Os polímeros são classificados como termoplásticos, termofixos (termorrígido) e elastômeros (CALLISTER, 2018). Esse tipo de material vem ganhando inúmeras aplicações devido serem produzidos a baixo custo, por serem leves e por possuir boas características mecânicas, químicas e térmicas, que fazem com que os polímeros tenham um grande potencial comercial.

Dessa forma, é formado por macromoléculas, sendo a união de micromoléculas formando e monômeros e isso é possível através das ligações covalentes interatômicas. As reações desses monômeros para formar uma macromolécula é chamada polimerização e então se dá origem a um polímero. As técnicas de processamento para a polimerização vão definir a classificação desse material (MARINUCCI, 2011).

Diante desse conceito, temos 3 classes de polímeros mais conhecidos pelo comportamento mecânico, são eles: os plásticos, os elastômeros e as fibras. Os plásticos são materiais poliméricos subdivididos em 2 tipos: os termoplásticos e os termorrígidos (CANEVAROLO, 2006).

Os polímeros termoplásticos são obtidos quando há um aumento considerável de temperatura e pressão que amolecem o plástico e quando se solidificam ganha forma para molde. Esse processo é reiniciado quando submetidos as novas temperaturas e pressão, são fundidos o que permite ser um material reciclável. São conhecidos como polímeros solúveis, com alta massa molecular e possuem cadeias moleculares lineares ou ramificadas

(CANEVAROLO, 2006). Os polímeros lineares possuem cadeias únicas e longas, entre as cadeias podem estar presentes as ligações de van der Waals e de hidrogênio. Já os polímeros ramificados há a presença de cadeias laterais ramificadas ligadas as cadeias principais (CALLISTER, 2018).

Os termorrígidos são polímeros em rede, formado de muitas ligações cruzadas. São materiais infusíveis e não recicláveis, pois não amolecem em aquecimento. Tornando-se permanentemente rígidos (CALLISTER, 2018). Do mesmo modo que os termoplásticos, esses são submetidos a condições elevadas de temperatura e pressão, quando aquecidos o material flui ganhando forma de molde, moldados ainda na forma de pré-polímero, após reagem formando as ligações cruzadas entre cadeias e há a solidificação (CANEVAROLO, 2006).

Os polímeros termorrígidos mais utilizados são os poliéster e epóxi. De modo geral, são polímeros mais rígidos e resistentes que os termoplásticos, tendo propriedades mecânicas e elásticas superiores, possuindo também boas resistências a ataques químicos (CALLISTER, 2018; MARINUCCI, 2011).

Os elastômeros são polímeros elásticos com cadeias flexíveis ligadas uma, a outra, e podem se deformar ao mínimo duas e retornar ao estado inicial, possuem a capacidade de se deformar a níveis altos de deformação e retornarem elasticamente a sua forma original, da mesma forma que uma mola e isso é possível pelas ligações cruzadas característicos (CANEVAROLO, 2006).

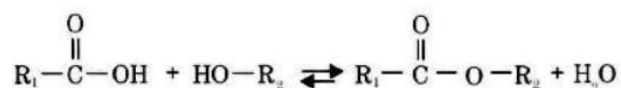
#### 2.2.1.1 Resina Poliéster

As resinas poliéster são as mais utilizadas em compósitos poliméricos termofixos. As boas propriedades mecânicas e físicas e a variedade de formulações, fazem com que tenham maior aplicação devido à combinação de desempenho e custo, tendo facilidade em atender requisitos específicos para a produção de materiais compósitos (MARINUCCI, 2011).

O poliéster consiste de uma família de polímeros em que ocorre uma reação de esterificação que acontece através de reações de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis formando um éster e água, por uma reação de polimerização por condensação por etapas,

conforme mostra a Figura 3. A partir dessas reações a resina poliéster pode ser ortoftálicas ou isoftálicas (NETO e PARDINI, 2016; MARINUCCI, 2011).

Figura 3– Síntese da Resina Poliéster Insaturada.



Fonte: Neto e Pardini (2016).

O processo de cura dessa resina acontece com a ativação de iniciadores de cura que acontece a partir de iniciadores, os chamados aceleradores, sendo os mais empregados as aminas terciárias e os sais de cobalto. E nesse processo, a quantidade de acelerador e catalisador controlam a velocidade de reação para a cura dessa resina e com isso o tempo de gel e a temperatura máxima atingida na reação. A cura da resina poliéster é um processo químico exotérmico de polimerização (NETO e PARDINI, 2016; MARINUCCI, 2011).

O tipo de moldagem utilizada na polimerização para obter o polímero, influencia na utilização ou não de catalisadores e aceleradores. Usualmente é utilizado a moldagem sob prensagem a quente em resinas poliéster e para esse tipo de moldagem usa-se somente catalisadores (NETO; PARDINI, 2016).

### 2.2.2 Fibras

A otimização e o aproveitamento das excelentes propriedades mecânicas associadas aos elementos fibrosos, são cruciais na elaboração de um componente estrutural em material compósito. O custo benefício e o desempenho esperado junto às técnicas de fabricação impostas, são levados em consideração na seleção desses elementos fibrosos. Ao estabelecer um projeto de um material compósito, a estrutura deve ser testada em várias condições, como carregamento estático, dinâmico ou os dois estados combinados, para se obter êxodo no reforço fibroso previsto para o projeto (MARINUCCI, 2011).

As condições nos materiais compósitos são referentes a capacidade do componente fibroso, a qual lhe atribui estruturas de bom aspecto de resistência e módulos de elasticidade

específicos na direção da fibra. Os componentes de reforços mais usados para a confecção de materiais compósitos são: fibras de vidro, fibras de carbono e fibras de aramida. (MARINUCCI, 2011). A Tabela 1 apresenta dados das características desses reforços.

Tabela 1 – Características das fibras de Vidro, Carbono e Aramida.

| <b>Material</b>        | <b>Massa Específica</b> | <b>Limite de Resistência a Tração [GPa(10<sup>6</sup>psi)]</b> | <b>Resistência Específica (GPa)</b> | <b>Módulo de Elasticidade [GPa(10<sup>6</sup>psi)]</b> | <b>Módulo Específico (GPa)</b> |
|------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Vidro-E                | 2,58                    | 3,45<br>(0,5)                                                  | 1,34                                | 72,5<br>(10,5)                                         | 28,1                           |
| Carbono                | 1,78-2,15               | 1,5- 4,8<br>(0,22-0,77)                                        | 0,70-2,70                           | 228-724<br>(32-100)                                    | 106-407                        |
| Aramida<br>(Kevlar 49) | 1,44                    | 3,6-4,1<br>(0,52-0,60)                                         | 2,5=2,85                            | 131                                                    | 91                             |

Fonte: Autor (2021).

As fibras de vidro são materiais que possuem boas atribuições elásticas e um custo benefício atrativo, o que a permite competir com metais não ferrosos, como o alumínio. As fibras de carbono são recomendadas para aplicação que requerem alta resistência com peso reduzido, devido a sua excepcional resistência e rigidez junto a seu módulo específico. Já as fibras de aramida, são utilizadas para fins que exigem alta resistência à impactos, em virtude da sua boa estrutura e sua elasticidade intermediária, em relação às outras fibras (MARINUCCI, 2011).

Com seu baixo custo, alta resistência à tração e uma boa inércia química, a fibra de vidro configura o reforço mais usado na confecção de materiais compósitos poliméricos. No entanto, a seus pontos negativos, como o baixo módulo de elasticidade e a baixa resistência a fadiga. Podendo ser tanto produzido na forma de filamentos contínuos, como no estado de fibra picada. O módulo de elasticidade nas direções axial e transversal ao filamento são iguais, o que torna as fibras de vidro isotrópicas (NETO; PARDINI, 2016).

Na manufatura de compósitos, as fibras de vidro mais utilizadas são do tipo Vidro E, S e C. Esse reforço fibroso possui uma condutividade térmica e calor específico, respectivamente,

equivalentes a 1,3 W/m.k e 850 J/Kg.k. Os componentes dos tipos de vidro, são capazes de alterar as propriedades da fibra obtida. Por conta da sua estreita faixa de temperatura na elaboração do filamento, as fibras de vidro tipo S possuem um alto custo. Já as fibras tipo E, são satisfatoriamente boas em ambientes aquosos, no entanto, tornam-se ineficazes em ambientes ácidos e alcalinos, devido a sua degradação. O que torna a fibra tipo C, a mais hábil para barreiras químicas em reservatórios (NETO; PARDINI, 2016).

No início do século XX as fibras de carbono começaram a ser comercializadas, devido à alta demanda pelo setor aeroespacial. As fibras de carbono são fabricadas através de controle processual orgânico em forma de fibra, e possuem como principais características o baixo peso e a alta resistência. Há uma gama de composições e morfologias para a formação e a criação de fibra de carbono, todas relacionadas aos atributos exigidos no objetivo final do reforço. Os precursores mais comuns são: a poliacrilonitrila (PAN), fibras de celulose e o pinche de petróleo (NETO; PARDINI, 2016).

Esses reforços de carbono podem ser classificados quanto às propriedades do precursor envolvido, ao módulo de elasticidade, à resistência e a fatores térmicos de finalização. Todos os estudos e pesquisas são direcionadas para o melhoramento dos atributos mecânicos da estrutura cristalina existente e pela redução dos defeitos estruturais da fibra. A retirada molecular do oxigênio, nitrogênio e hidrogênio da matéria-prima escolhida para a fabricação da fibra, é chamado pirólise e consiste na purificação do carbono e colabora na perfeita execução do fito estabelecido pela fibra (NETO; PARDINI, 2016).

Obtida através da policondensação de diaminas e diácidos a temperaturas baixas, gerando macromoléculas constituídas de amidas junto aos anéis aromáticos, as fibras poliamidas aromáticas, ou genericamente denominadas fibras de aramida, compõem um reforço de alta resistência à impactos. A anisotropia existente no reforço de aramida caracteriza-se pela ligação de cadeia poliméricas entre si na direção transversal por ligação de hidrogênio, nomeada também como ponte de hidrogênio (MARINUCCI, 2011).

A anisotropia também se caracteriza como o motivo das altas propriedades mecânicas desse reforço, pois há grande resistência na direção da fibra, em decorrência da forte ligação covalente entre as moléculas poliméricas. O elevado grau na orientação das cadeias moleculares, garante ao material alta resistência ao calor e elevadas condições mecânicas. As

fibras de aramida são resistentes ao fogo, isolantes tanto térmicos quanto elétricos, possuem resistência química à solvente orgânico, combustíveis e lubrificantes. A alta resistência à impactos acontece devido a elevada tenacidade, o que torna a fibra de aramida um reforço diferencial e atrativo comparado as outras fibras citadas (MARINUCCI, 2011).

#### 2.2.2.1 Fibras lignocelulósicas

Na manufatura de compósitos, a escolha de um bom reforço para uma matriz satisfatoriamente boa, pode ecoar no macro fase do produto final. Há duas situações para a incorporação da matriz. Aquele reforço que apresenta excelência nas propriedades mecânicas, como tração e compressão. Bem como aquele que leva em conta a quantidade carga peso na soma da matriz. Em ambos reforços se considera uma boa finalidade para a composição de material compósito. Dentre as fibras naturais, ambas designações são cruciais na boa execução e fabricação de compósitos desses reforços provindos da natureza (NETO; PARDINI, 2016).

A versatilidade de utilização das fibras naturais resulta na sua aplicabilidade na manufatura de diversos compósitos. A engenharia aplicada ao âmbito rotineiro levando as propriedades mecânicas e térmicas em consideração ao projeto ou produto designado, produz tecidos, bolsas, cordas e etc.. Quando se confecciona compósitos com fibras naturais de origem vegetal, recomenda-se em seu processo: a identificação da planta com seu nome científico; as normas de ensaios e condições que foram realizados; somados com a descrição de cada etapa do processo. Tudo isso para garantir uma ótima procedência na fabricação do reforço fibroso. As fibras naturais são compostas por celulose, hemicelulose, lignina e ceras. As quais também compõem a estrutura de fibrilas e microfibrilas (KOMURAI AH; KUMAR; PRASAD, 2017).

As propriedades individuais funcionam em virtude das características mecânica de resistência presente na estrutura funcional das fibras naturais. De modo geral, a estrutura física desses reforços fibrosos é formada por três camadas internas, junto à uma fratura ao redor das camadas, o que suscita no formato cilíndrico majoritariamente encontrado. Quando uma força é aplicada, algumas dessas camadas resistem e outras não, isso depende da sua composição química. A lignocelulose representa uma composição de biofibras, que é utilizada para desde aplicabilidades rotineiras até o uso que requer uma precisão mecânica maior, devido a sua alta resistência física presentes em suas camadas (KOMURAI AH; KUMAR; PRASAD, 2017).

As fibras naturais são compostas majoritariamente, respeitando a sua quantidade decrescente e respectiva, por: celulose, hemicelulose, pectina e lignina. Há também ceras e óleos em pequenas quantidades, pois depende das condições climáticas e tipo de solo que a biofibra foi coletada. A celulose, considerada a mais relevante, é quimicamente constituída por unidades de D-glucopiranoose unidas por ligações de B-1, 4-glicosídicas, isso ocorre devido a presença de ligações de hidrogênio entre unidades da estrutura cristalina formada. As biofibras apresentam uma região cristalina, que compõe toda estrutura do reforço, denominado de microfibras. Nela a celulose se encontra em maior quantidade, a qual proporciona as excelentes propriedades mecânicas das fibras naturais. Ademais, o ângulo da microfibras é o responsável pela permanência dessas características físicas somados as suas três camadas centrais (KOMURAIHAH; KUMAR; PRASAD, 2017). A Tabela 2, mostra a composição química de algumas fibras naturais.

Tabela 2 – Composição química de celulose, hemicelulose e lignina de fibras naturais.

| Fibra           | Celulose (%)  | Hemicelulose (%) | Lignina (%)   | Referência                                                                 |
|-----------------|---------------|------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Curauá          | 58,80 – 78,08 | 10,00 – 23,80    | 4,09 – 14,70  | (FERREIRA <i>et al.</i> , 2017; SANTOS, 2013; SOLTAN <i>et al.</i> , 2017) |
| Abacaxi (folha) | 64,48 – 70,51 | 14,21 – 20,89    | 2,93 – 4,24   | (ASIM <i>et al.</i> , 2018; TANPICHAI; WITAYAKRAN, 2018)                   |
| Açaí            | 36,13 - 46,51 | 18,65            | 30,35 - 47,92 | (BARBOSA <i>et al.</i> , 2019; MESQUITA, 2013)                             |
| Coco            | 39,79 – 44,20 | 5,00 – 22,10     | 32,80 – 43,61 | (MANJULA <i>et al.</i> , 2018; SUBHEDAR <i>et al.</i> , 2018)              |
| Piaçava         | 29,00 – 43,23 | 8,34 – 11,00     | 45,00 – 50,05 | (BORGES <i>et al.</i> , 2017; SOLTAN <i>et al.</i> , 2017)                 |

Fonte: Adaptado de Borges (2019).

A celulose é um polímero natural que reforça o material e possui função estrutural, aumentando a resistência à tração. As moléculas de hemicelulose, que se ligam por hidrogênio

à celulose e agem como matriz entre as microfibrilas da celulose, formam a rede hemicelulose/celulose, principal componente estrutural da célula da fibra. A cadeia de celulose gera microfibrilas que, em conjunto com a hemicelulose, formam as fibrilas que, dispostas em várias camadas, constroem a estrutura da fibra. A lignina é o agente responsável pela ligação entre a hemicelulose e a celulose, garantindo a união entre as fibrilas que constituem a fibra, contribuindo para a rigidez na parede da célula (JUNIOR, 2019; SOUSA, 2016).

#### 2.2.2.1.1 Fibras de açaí

A *Euterpe oleracea mart* existente no Pará e a *Euterpe Precatório Mart* predominante no Amazonas, são espécies de palmeira de açaí na Amazônia. Das espécies do gênero *Euterpe*, a *Euterpe oleracea mart* é que tem forte ocorrência natural no estuário amazônico. Essa palmeira é conhecida por vários nomes populares na região como, açaí-do-Pará, açaizeiro, açaí-do-Baixo Amazonas, açaí-de-touceira, açaí-de-planta e açaí-verdadeiro. O nome popular “Açaí” se origina da palavra em tupi (yá-çaí) e denota-se como “fruto que chora”. Esta diferencia-se da *Euterpe Precatória Mart* pela quantidade de estipe que possui e são conhecidas como de grande porte (SEBRAE, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

A *Euterpe oleracea mart* é caracterizada como uma palmeira de estipe liso e cilíndrico, podendo se desenvolver ereto e as vezes encurvado, chegando aproximadamente a 30 m de altura e diâmetro de 12cm a 18 cm. Suas folhas tem um comprimento que chegam até 3,5 m com forma alongada e superpostas em formato de colunas. Suas raízes são superficiais e em uma planta com 3 anos de idade possui um tamanho de 3,0m a 3,5m, já as que tem mais de 10 anos podem chegar até 5 m á 6 m de expansão. Nos seus estágios de desenvolvimento, os cachos no estipe são de 3 a 8 em quantidade, com centenas de frutos que chegam a pesar de 0,5 a 2,8 g (OLIVEIRA *et al.*, 2017), podendo ser observada na Figura 4 abaixo.

Figura 4 – Árvore de açaizeiro.



Fonte: Autor (2021).

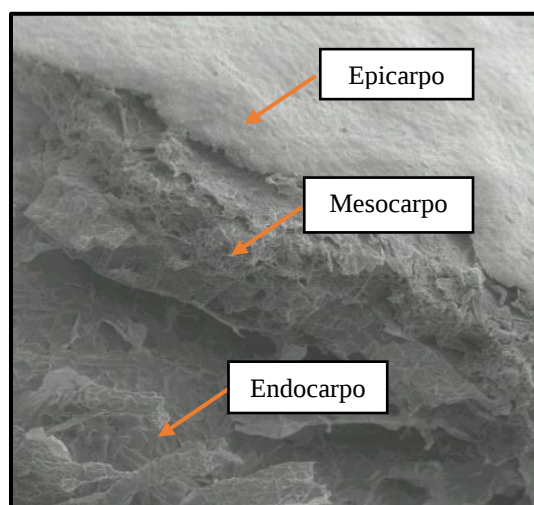
O fruto do açaí (Figura 5) possui uma coloração verde-brilhante no estágio inicial e quando maduro atinge uma cor vinho-acizentado. É caracterizado pelo epicarpo, mesocarpo e endocarpo. O epicarpo e mesocarpo formam a parte externa e representam de 7% a 15% da parte comestível do fruto. Já o endocarpo, constituindo a maior parte do caroço e coberto pelo mesocarpo e epicarpo, é caracterizado por uma semente com aspecto duro e com um eixo embrionário ínfimo, envolto de um material fibroso (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Para melhor visualizar a anatomia interna da semente, a Embrapa (2005) analisou por meio de imagens de MEV, na Figura 6 os detalhes que recobrem o endocarpo (núcleo) da semente de forma compacta e alinhada.

Figura 5 – Fruto de açaí a) no estágio inicial b) maduro.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6 – Micrografia da semente do açaí.



Fonte: Embrapa (2005).

As fibras de açaí possuem dimensões assimétricas e com geometria irregular. Seu comprimento tem valores aproximados de 15320  $\mu\text{m}$  e diâmetro de 104  $\mu\text{m}$ . É com auxílio da Microscopia Eletrônica de Varredura e também pela Microscopia Óptica que se torna possível fazer tais dimensões. É uma fibra com baixa densidade de 0,74 em relação a fibras de vidro, curauá, coco e vidro (GEHLEN, 2014). A Tabela 3 confirma os valores comparativos da densidade de cada fibra de acordo com as literaturas.

Tabela 3 – Densidade de fibras conforme literaturas.

| <b>Fibras</b> | <b>Densidade Literatura (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>).</b> |
|---------------|------------------------------------------------------------------|
| Açaí          | 0,74 $\text{g}/\text{cm}^3$ (GEHLEN, 2014)                       |
| Curauá        | 0,96 $\text{g}/\text{cm}^3$ ((MACIEL, 2017)                      |
| Coco          | 1,15 $\text{g}/\text{cm}^3$ ((DUAN <i>et al.</i> , 2018)         |
| Sisal         | 1,5 $\text{g}/\text{cm}^3$ (JUNIOR, 2019)                        |
| Vidro         | 2,5 $\text{g}/\text{cm}^3$ (JUNIOR, 2019)                        |

Fonte: Autor (2021).

Assim como todas as fibras naturais, as fibras de açaí são de origem lignocelulósicas, que são compostas de lignina, celulose e hemicelulose. De acordo com estudos de Gehlen

(2014), encontrou-se valores médios de 13,9% de hemicelulose, 39,1% de lignina e 27,5% de celulose das fibras de açaí *in natura*. Esses percentuais influenciam diretamente para que a fibra seja hidrofílica e ter uma baixa adesão quando aplicada com matrizes poliméricas. Para atenuar essas particularidades, tratamentos alcalinos são realizados para enfraquecer suas ligações químicas, modificando as estruturas moleculares da celulose alterando a cristalinidade e também removendo percentuais consideráveis de lignina e hemicelulose que recobrem a fibrila (BRAGA, 2019).

A Região Norte é a maior produtora do fruto do açaí no Brasil, sendo também a maior consumidora. A polpa do açaí é o produto de maior consumo, especificamente nos estados do Pará e Amazonas. Nesta região é consumido popularmente como suco de polpa, mas também em forma de sorvete artesanal, picolés, bombons, doces, bolos e corantes e com um mercado em plena expansão. O Brasil em 2019 produziu 1.398,32 t de açaí, sendo o estado do Pará responsável por 94,41% da quantidade de polpa produzida, segundo o censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2020). No âmbito de exportação, os EUA é o maior importador desse produto, no entanto outros países como Austrália e Japão, ainda que com percentuais pequenos, estão tornando-se também novos consumidores (SEBRAE, 2015).

Apesar da produção do açaí representar uma importante atividade econômica no Pará, milhares de toneladas de caroço da fruta são descartadas anualmente pelo agronegócio local após o beneficiamento, sendo vistos como resíduos e considerados lixo orgânico de difícil decomposição. O acúmulo desse lixo orgânico ocasiona poluição ambiental, gerando problemas à saúde da população pelo seu descarte inadequado. E por isso, por meio da logística reversa é necessário buscar meios de aproveitamento que gere soluções sustentáveis e econômicas para a redução do desperdício desse resíduo como, a criação de novos produtos oriundos que agreguem valor à cadeia produtiva deste (NARCISO; TEIXEIRA, 2017). A Figura 7 evidencia o acúmulo do resíduo em frente a um estabelecimento de venda da polpa da fruta, no município de Ananindeua- PA.

Figura 7 – Resíduo do caroço do açaí.



Fonte: Autor (2021).

#### 2.2.2.1.2 Fibras De Curauá

Cientificamente conhecido como *Ananás erectifolius*, o curauá é uma planta herbácea, da angiosperma (Monocotiledônea), pertencente à família das bromélias (Bromeliaceae), mesma família do abacaxi, e pode ser classificado como curauá-roxo, quando possui folhas na cor roxo-avermelhado, ou como curauá-branco, quando apresenta folhas na cor verde-claro (MACIEL, 2017; SANTOS, 2013), como demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – *Ananás erectifolius*



Fonte: Suframa (2019).

É uma planta nativa da Região Amazônica, predominante principalmente nos estados do Acre, Amazonas e Pará. Suas folhas, de onde são extraídas suas fibras, são planas, eretas e

rígidas, com largura que varia normalmente de 3,5 a 5,0 cm, espessura de 2,0 a 3,0 mm e comprimento de 1,0 a 1,5 m. Já seus frutos se assemelham ao abacaxi, porém, por serem mais fibrosos e ácidos, não são consumidos (MACIEL, 2017; BORGES, 2019).

O potencial uso dessas fibras em materiais de engenharia se dá através das folhas secas e seu beneficiamento para a comercialização é feito por meio do desfibramento em máquina desfibradora e após um processo de lavagem e secagem para retirada de resíduos de mucilagem (BORGES, 2019; JUNIOR, 2019). A Figura 9 mostra as fibras de curauá.

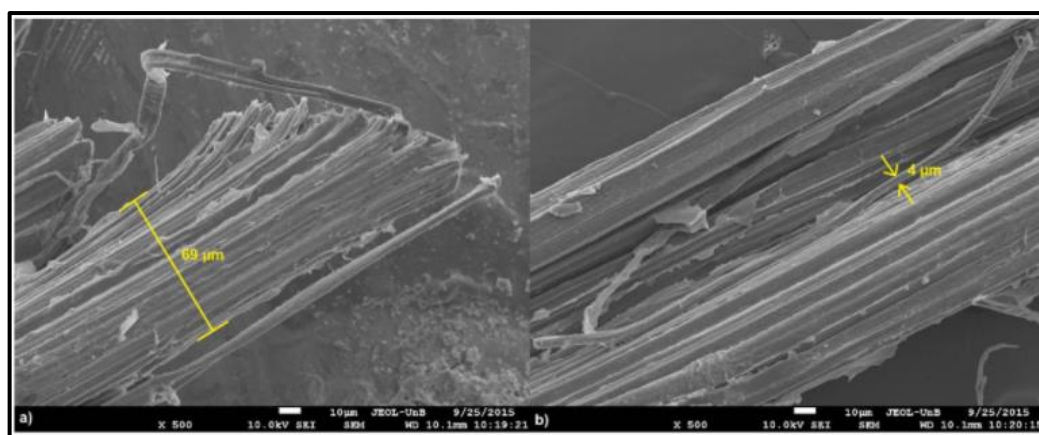
Figura 9 – Fibras de curauá sem resíduos de mucilagem.



Fonte: Autor (2021).

O diâmetro da fibra in natura é de aproximadamente  $69\ \mu\text{m}$ , enquanto as fibrilas possuem diâmetro com cerca de  $4\ \mu\text{m}$ . A micrografia apresentada na Figura 10 permite analisar o diâmetro das fibras e fibrilas, que são constituintes da fibra. Por se tratar de fibras vegetais, é um tipo de fibra com baixa densidade ( $1,4\ \text{g/cm}^3$ ), podendo variar. (SOUSA, 2016).

Figura 10 – Fibrila de açai vista por Microscopia Óptica.



Fonte: Sousa (2016).

Os principais componentes químicos da fibra de curauá são: celulose (58,80 a 78,08%), hemicelulose (10,00 a 23,80%) e lignina (4,09 a 14,70%). Além disso, a fibra possui aproximadamente 0,8% de teor de cinzas e umidade que pode variar de 5 a 20%, devido ao fato das fibras lignocelulósicas serem hidrofílicas e trocarem constantemente umidade com o ambiente (BORGES, 2019; SANTOS, 2013).

O elevado potencial dessa fibra se dá por, além de apresentar um custo semelhante ao de outras fibras no Brasil, está entre as fibras lignocelulósicas de maior resistência, possuir longa vida, alta capacidade de absorção e sustentação e apresentar resistência e propriedades físicas similares às fibras de linho de alto custo e até mesmo das de vidro (JUNIOR, 2019).

### 2.2.3 Aplicação Industrial

As fibras naturais como reforço em compósitos poliméricos vêm sendo amplamente estudada no âmbito científico para inúmeras aplicações. Estudos são realizados para analisar o comportamento mecânico, térmico e morfológico desses materiais.

Pereira (2017) utilizou em seu estudo, diferentes frações de fibras lignocelulósicas de: Juta, Sisal e Ráfia. Essas fibras são amplamente difundidas e de fácil aquisição e foram usadas em tamanhos curtos na fabricação de material compósito empregando resina Epóxida na produção de diferentes placas. Estudou-se as características físicas e mecânicas, tais como, propriedades mecânicas versus tempo de exposição aos raios ultravioleta, absorção de água, densidade, isolamento térmico e acústico, com intuito de serem empregados em duas possíveis aplicações: um banco/cadeira e um abrigo modular.

Na área da construção civil Pozzer (2018), estudou o desempenho físico e mecânico de painéis sanduíches com núcleo carrugados de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina Poliuretano de óleo de mamona, através da determinação de densidade aparente, inchamento de espessura, módulo e rigidez de cisalhamento, rigidez a adesão e a inflexão interna das partículas. Com os resultados concluiu que o painel tem capacidade de aplicação como laje-piso.

Barbosa (2016), produziu placas para mitigar os efeitos térmicos em habitação na Amazônia, através do processamento de compósitos poliméricos usando resina bicomponente

à base de óleo de mamona e reforçados com partículas de caroço do açaí. Para confirmação do seu potencial uso, caracterizações físicas, morfológicas e químicas nos caroços triturados, além de físicas, mecânicas e termográficas foram realizados nos compósitos. Os resultados demonstraram que a placa tem propriedades adequadas para uso em forros, devido à sua característica refletiva e seu potencial para o conforto térmico.

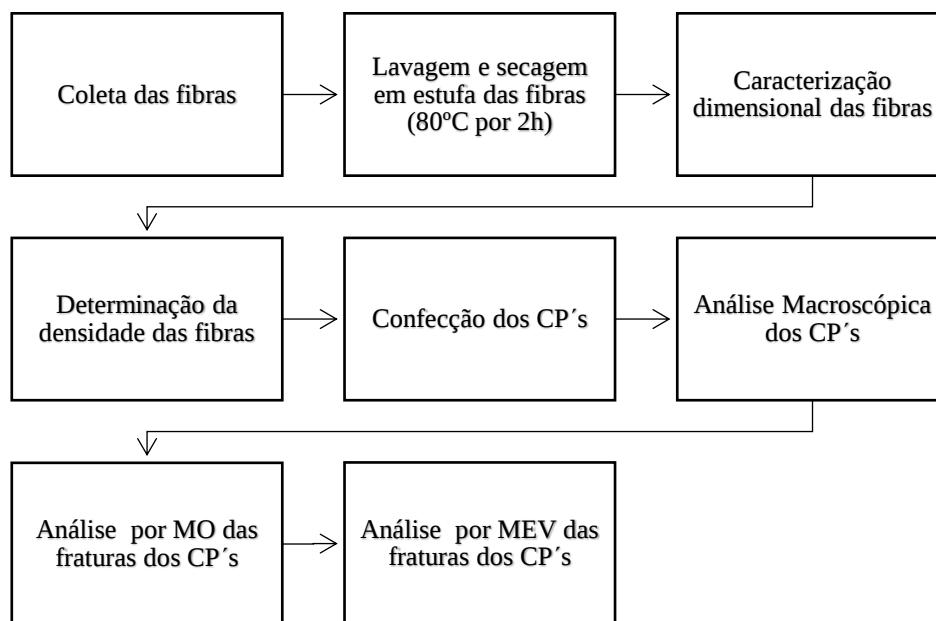
Já Sousa (2016), desenvolveu um material compósito a partir de um polímero biodegradável, o polihidroxibutirato (PHB), reforçado com fibras de curauá quimicamente tratadas, para ser viável como aplicação em revestimentos nas indústrias automotivas, nos quais sejam necessárias suas características térmicas e mecânicas. Para isso, teve como objetivo estudar as propriedades mecânicas, térmicas, através de ensaios de tração, flexão e impacto Izod e avaliados o módulo de elasticidade, limite de ruptura e limite de resistência em tração e flexão e resistência ao impacto e para analisar o comportamento térmico e a cristalinidade, os compósitos foram avaliados por TGA e Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC).

Os materiais compósitos exercem um papel muito importante no desenvolvimento de novos materiais, uma vez que eles possibilitam a união de características diferentes em um material mais avançado e funcional. Com a necessidade de criar materiais tecnológicos sustentável, o uso de fibras lignocelulósicas e seus constituintes tem despertado interesse da sua aplicação como matéria prima na produção de compósitos poliméricos, além de representar também uma oportunidade de agregar valor econômico a resíduos industriais (SOUSA, 2016; NERY e JOSÉ, 2018).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas experimentais para produção dos compósitos, estão apresentadas no fluxograma da Figura 11 abaixo.

Figura 11– Fluxograma do procedimento experimental do estudo.



Fonte: Autor (2021).

A preparação dos compósitos de matriz poliéster e fibras naturais de açaí e curauá, foram conduzidos no laboratório de Práticas Tecnológicas da Faculdade de Engenharia de Materiais - UFPA (Campus de Ananindeua). No entanto, as etapas iniciais bem como, as determinações dimensionais das fibras foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia de Materiais - UFPA (Campus de Ananindeua).

Já o ensaio de densidade das fibras e pesagem dos materiais para a produção dos corpos de prova, foram realizadas no Laboratório de Química (LabQuim) da Faculdade de Licenciatura em Química - UFPA (Campus de Ananindeua).

As análises de Microscopia Ótica (MO) foram feitas no Laboratório de Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia de Materiais - UFPA (Campus de Ananindeua), e de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Laboratório de Física Computacional Experimental – PPGF (Campus Belém).

### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados para a produção dos compósitos foram os seguintes:

#### 3.1.1 Materiais Sintéticos

- Resina

A matriz polimérica utilizada foi a solução de resina Poliéster Ortoftálica em Monômero de Estireno visualizada na Figura 12 e suas propriedades físicas e químicas foram fornecidas pela empresa Centerglass e estão presentes na Tabela 4.

Figura 12 – Resina Poliéster Insaturada.



Fonte: Autor, (2021).

Tabela 4 – Ficha de informações do produto resina poliéster

| PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA RESINA POLIÉSTER |                                      |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Estado Físico</b>                             | Líquido-viscoso                      |
| <b>Odor</b>                                      | Aromático e penetrante               |
| <b>Cor</b>                                       | Azulada                              |
| <b>Densidade</b>                                 | 1,05 a 1,15 g/cm <sup>3</sup> (25°C) |
| <b>Solubilidade em água</b>                      | 0,3 g/100 ml a 25°C                  |

Fonte: Centerglass.

- Catalisador

O catalisador utilizado para a cura da Resina Poliéster Insaturado foi MEK D 45 (Figura 13) e suas características químicas e físicas constam na Tabela 5 e adquiridas pela empresa Centerglass.

Figura 13 – Catalisador MEK D 45.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 5 – Ficha de informações do catalisador MEK D 45

| <b>PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO CATALISADOR MEK D 45</b> |                              |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Estado Físico</b>                                        | Líquido límpido e incolor    |
| <b>Odor</b>                                                 | Aromático e penetrante       |
| <b>Cor</b>                                                  | Incolor                      |
| <b>Densidade</b>                                            | 1,1 g/cm <sup>3</sup> (20°C) |
| <b>Solubilidade em água</b>                                 | Solúvel                      |

Fonte: Centerglass.

- Desmoldante

Para o desmolde do compósito da placa de madeira, foi empregado o desmoldante em cera (Figura 14).

Figura 14 - Cera desmoldante.



Fonte: Autor (2021).

Os materiais foram obtidos pela empresa CenterGlass: Resinas e fibras de vidro, localizada na Av. Augusto Montenegro – Mangueirão, Belém – PA.

### 3.1.2 Fibras lignocelulósicas

- Fibras de Açaí

Foram coletados caroços de açaí (Figura 15) úmidos, recém-retirados a polpa, no agro comércio no município de Ananindeua – PA.

Figura 15– Caroços de açaí recém-coletados.



Fonte: Autor (2021).

- Fibras de Curauá

Já as fibras de curauá (Figura 16) com tamanho médio de 69 cm foram adquiridas na região metropolitana de Belém.

Figura 16– Fibras de Curauá.



Fonte: Autor (2021).

### 3.2 Metodologia experimental

O procedimento experimental deste estudo, foi realizado com o intuito de produzir material compósito de matriz poliéster insaturado, utilizando fibras do resíduo do caroço do açaí e fibras de curauá como reforços para sugerir na aplicação de material MDF para a indústria moveleira. Para isso, foram feitos três tipos de compósitos, sendo: compósito de matriz poliéster insaturado e fibras do caroço do açaí, compósito de matriz poliéster insaturado e fibras de curauá e compósito híbrido feito a partir da matriz poliéster insaturado e fibras do caroço do açaí e curauá.

Inicialmente após a coleta dos resíduos do caroço de açaí, estes foram lavados (Figura 17) e peneirados para retirada de resquícios do epicarpo e mesocarpo (polpa da fruta) e obter o máximo de pureza das fibras, em seguida desfibriladas manualmente. Logo após, foram secas para retirada da umidade em estufa convencional à 80 °C por 2h. Já as fibras de curauá, foram retiradas as partes danificadas e penteadas para retirada de sujeiras e restos de folhas da mesma.

Figura 17 – Lavagem do caroço do açaí.

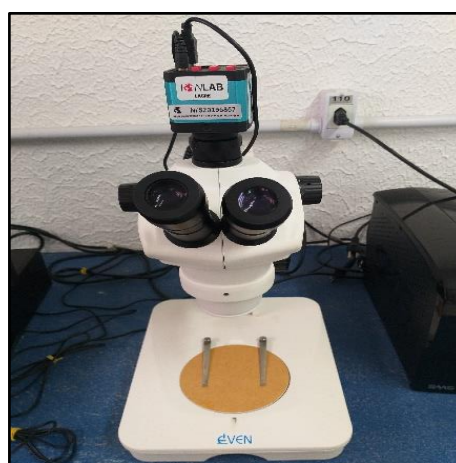


Fonte: Autor (2021).

### 3.2.1 Caracterização dimensional das fibras

Foi realizado uma catalogação de 100 filamentos de açaí e 100 filamentos de curauá para se obter o comprimento médio e diâmetro médio de ambas as fibras. O comprimento foi obtido através de uma régua milimétrica e o diâmetro pelo Microscópio Estereoscópio Binocular Zoom 1X ~ 4X da marca EVEN (Figura 18), com câmera acoplada para capturar as imagens de dimensionamento. Para a determinação dos diâmetros realizaram-se 3 medidas ao longo das fibras de açaí e 5 medidas ao longo dos filamentos de curauá e em seguida realizado a média aritmética destes.

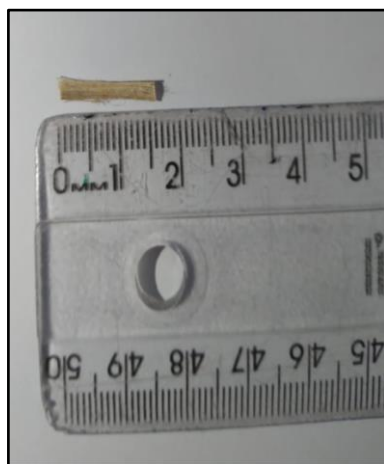
Figura 18 – Microscópio Estereoscópio Binocular.



Fonte: Autor (2021).

Após o cálculo da média aritmética do comprimento das fibras, as fibras de curauá foram cortadas em um comprimento de 1,6 cm semelhante ao tamanho médio das fibras de açaí, conforme a Figura 19.

Figura 19 – Fibra curta de curauá.



Fonte: Autor (2021).

### 3.2.2 Determinação da densidade das fibras - método por picnômetro

A técnica da densidade por picnometria foi realizada com base na norma NBR 11936 e no estudo de Gehlen (2014) utilizando etanol 92,8 INMP de densidade  $0,287\text{g/cm}^3$ . Inicialmente foi pesado o picnômetro vazio ( $m_1$ ) e após preenchido com etanol e pesado novamente ( $m_2$ ). Com esses valores calculou-se o valor exato do volume do picnômetro. Para obter o volume do etanol, foi retirado uma quantidade pequena de etanol do picnômetro (1) adicionado 0,8g de fibras açaí e em seguida pesado ( $m_3$ ), posteriormente completou-se com etanol o volume do picnômetro completamente e pesado ( $m_4$ ). O ensaio foi feito em triplicata. O mesmo foi realizado para as fibras de curauá. Para o cálculo da densidade utilizou-se as Equações 1, 2, 3 e 4.

$$V(\text{picnômetro}) = \frac{(m_2 - m_1)}{\rho_{\text{Etanol}}} \quad (3)$$

$$V(\text{etanol}) = \frac{(m_4 - m_3 - m_1)}{\rho_{\text{Etanol}}} \quad (2)$$

$$V(fibra) = V(picnômetro) - V(etanol) \quad (3)$$

$$\rho(fibra) = \frac{m3}{V(fibra)} \quad (4)$$

### 3.2.3 Confecção dos Compósitos

Para a confecção dos compósitos, utilizou-se o percentual mássico de 50% fibras e 50% resina poliéster e para compósito híbrido com fibras de açaí e curauá equivalente a 25/25% de fibras. Os percentuais adotados, foi determinado a partir do volume ocupado para uma mistura trabalhável. Com isso, experimentalmente, foi determinado a proporção ideal. A tabela 6, apresenta a relação de quantidade resinas/fibras utilizada nesse trabalho.

Tabela 6 – Relação de quantidades de resina e fibra

| Composição | Quantidade de corpos de prova produzidos | Resina (%) | Fibra (%) |
|------------|------------------------------------------|------------|-----------|
| CPA        | 1                                        | 50         | 50        |
| CPC        | 1                                        | 50         | 50        |
| CPAC       | 1                                        | 50         | 25/25     |

Fonte: Autor (2021).

Composição: CPA – Compósito de matriz Poliéster com 50% em volume de fibras de Açaí; CPC - Compósito de matriz Poliéster com 50% em volume de fibras de Curauá e CPAC – Compósito híbrido de matriz Poliéster com 25% em volume de fibras de Açaí e 25% em volume de fibras de Curauá.

Para o cálculo da quantidade exata de massa de resina e massa de fibras necessárias para cada corpo de prova, foi realizado a Equação 5, segundo o estudo de Silva (2019).

$$d = \frac{m}{v}$$

d: densidade (g/cm<sup>3</sup>)

m: massa (g)

v: volume (cm<sup>3</sup>)

Após os cálculos para determinação da quantidade em massa de fibras e resina para a confecção dos compósitos, foram pesados na balança analítica da marca Chyo JK-200, 64,68 g de resina poliéster (Figura 20.a) e 0,6 g que equivale a aproximadamente 22 gotas de catalisador MEK D45 para cada corpo de prova de cada tipo de compósito. Para o CPA foram pesadas 1,42 g de fibras de açaí (Figura 20.b), para o CPC foram 2,43 g de fibras de curauá (Figura 20.c) e para o compósito híbrido CPAC, 0,71 g de fibras de açaí e 1,21 g de fibras de curauá em massa de fibras. Foram pesados e homogeneizados em um recipiente de 140 ml.

Figura 20 – a) Pesagem de resina, b) e c) fibras na balança analítica.



(a)

(b)



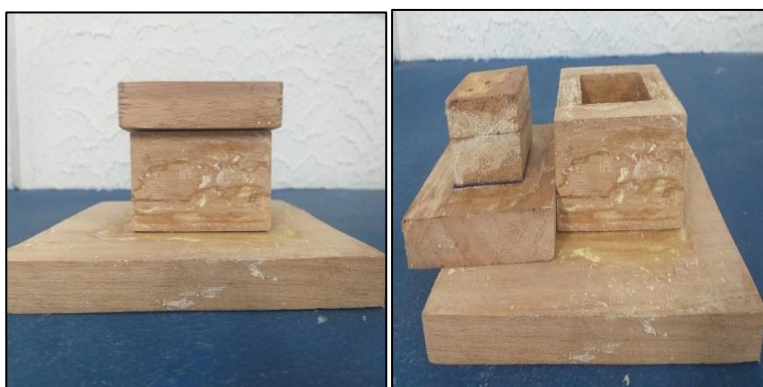
(c)

Fonte: Autor (2021).

- Moldagem

Para a produção dos corpos de prova, foram fabricados moldes sem fundo nas dimensões de 5x5x5cm (Figura 21) já no tamanho dos cortes para os ensaios físicos de acordo com a norma ABNT NBR15316-2.

Figura 21 – Molde de madeira nas dimensões de 5x5x5cm.



Fonte: Autor (2021).

Antes de iniciar a moldagem, passou-se cera desmoldante na parte interna do molde para facilitar o desmolde e na parte inferior do molde e placa de madeira utilizada como suporte para o molde sem fundo, com a intenção de que não houvesse vazamento de resina no momento de prensagem. Essa etapa é vista na Figura 22, abaixo.

Figura 22 – Revestimento de desmoldante no molde de madeira.



Fonte: Autor (2021).

- Etapas de preparação dos CP's

A confecção dos CP'S deu-se através do processo de moldagem manual (hand lay-up), da seguinte forma: em um recipiente de 140ml já com quantidade de resina pesada, gotejou-se o agente endurecedor (Figura 23.a) e em seguida realizado movimento circulares para que a reação química ocorresse iniciando o processo de cura (Figura 23.b). Logo após, houve a mistura das fibras com a resina (Figura 23.c), de modo que o reforço ficasse totalmente homogeneizado junto a matriz (Figura 23.d). Posteriormente da mistura das fibras e resina, iniciou-se o vazamento da mistura (Figura 23.e) no molde de madeira (5cm x5cm x 5cm) efetuando a impregnação e distribuindo de forma aleatória em que os vazios fossem preenchidos no molde (Figura 23.f).

Figura 23 – Etapas de preparação do CP.



(a)

(b)

(c)



(d)

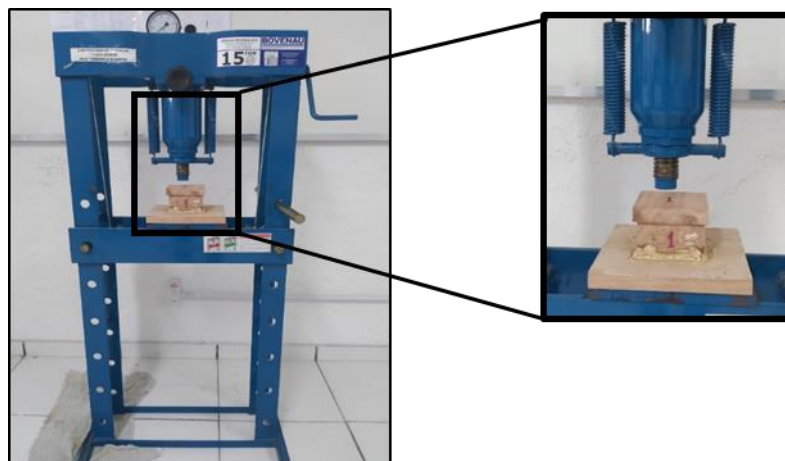
(e)

(f)

Fonte: Autor (2021).

Após a impregnação da resina e fibras no molde, foi realizado prensagem a frio dos cp's na prensa hidráulica manual de 15 toneladas da marca BOVENAU (Figura 24) submetidos a uma carga de 1 Tonelada por 10 min.

Figura 24 – Prensagem do molde de madeira na prensa hidráulica manual.



Fonte: Autor (2021).

### 3.2.4 Fratura dos CP's

Após a cura dos CP's por 72 horas, foi utilizado a prensa hidráulica manual aplicando uma carga de 3 ton por 3 min para que houvesse a ruptura, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Rompimento do compósito com fibras de curauá.



Fonte: Autor (2021).

### 3.2.5 Microscopia Óptica das fraturas

As amostras foram extraídas após 1 dia de cura para fazer o rompimento e analisadas no Microscópio Estereoscópio Binocular Zoom 1X ~ 4X Aumento 10X da marca EVEN com câmera acoplada, como mostra a Figura 26.

Figura 26 –Microscópio Óptico com amostra de compósito com fibras de açai.



Fonte: Autor (2021).

### 3.2.6 Microscópio Eletrônico de Varredura das fraturas

Para analisar a superfície de fratura, foram preparadas 3 amostras para fazer a metalização com ouro-paládio com o intuito de ser possível a visualização do material por este não ser um material metálico. Em seguida, estas foram colocadas na máquina metalizadora (marca Quorum Sputtery Coater SC7620) para pulverização de ouro e evaporação de carbono (Figura 27).

Figura 27 - Metalizadora (marca Quorum Sputtery Coater SC7620) realizando a metalização.



Fonte: Autor (2021).

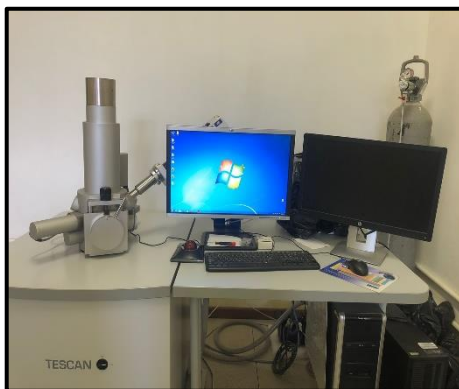
Após a metalização, conforme observado na Figura 28, as amostras metalizadas foram colocadas no MEV para a realização das análises. A Figura 29, mostra o equipamento utilizado.

Figura 28 – Amostras metalizadas.



Fonte: Autor (2021).

Figura 29– Microscópio Eletrônico de Varredura.



Fonte: Autor (2021).

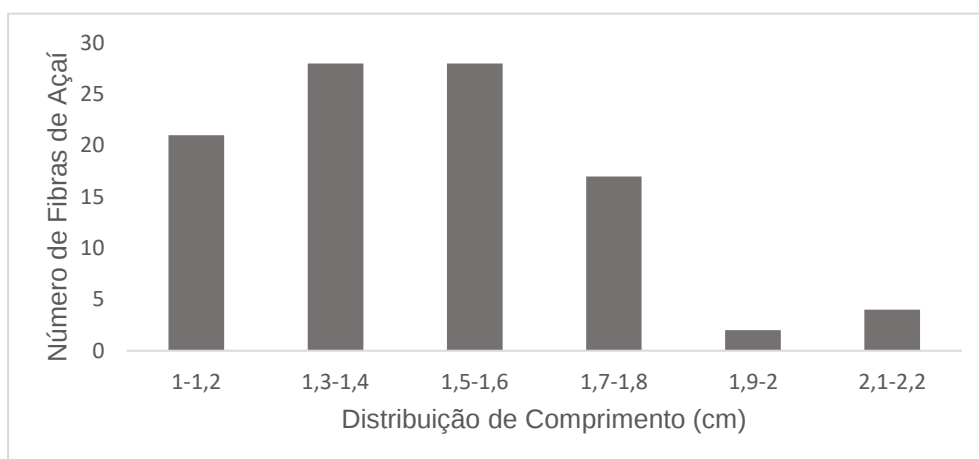
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização das fibras

#### 4.1.1 Determinação dos comprimentos e diâmetros

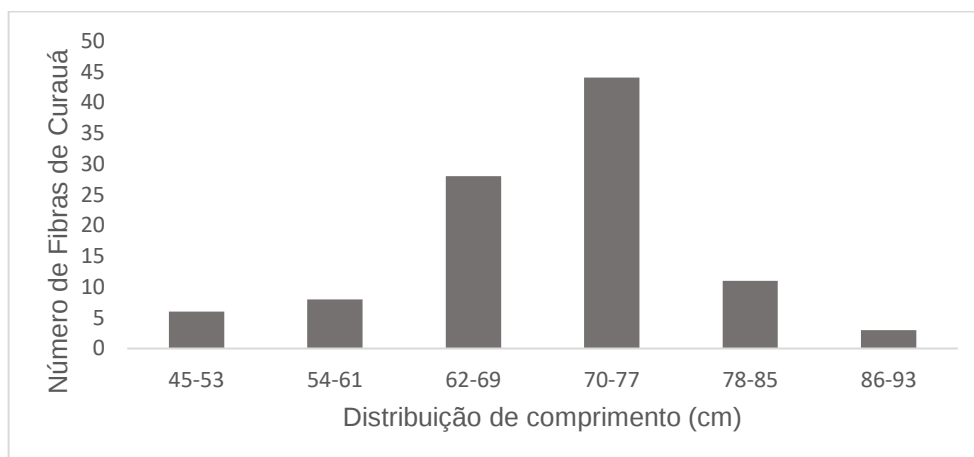
As distribuições da quantidade de fibras em analogia ao comprimento estão representadas na Figura 30 para fibras de açaí e na Figura 31 para fibras de curauá. Já os diâmetros em relação a quantidade de fibras são analisados pela Figura 32 para as fibras de açaí e na Figura 33 para as fibras de curauá que mostram o padrão de distribuição diametral.

Figura 30 – Distribuições estatística do comprimento das fibras de açaí.



Fonte: Autor (2021).

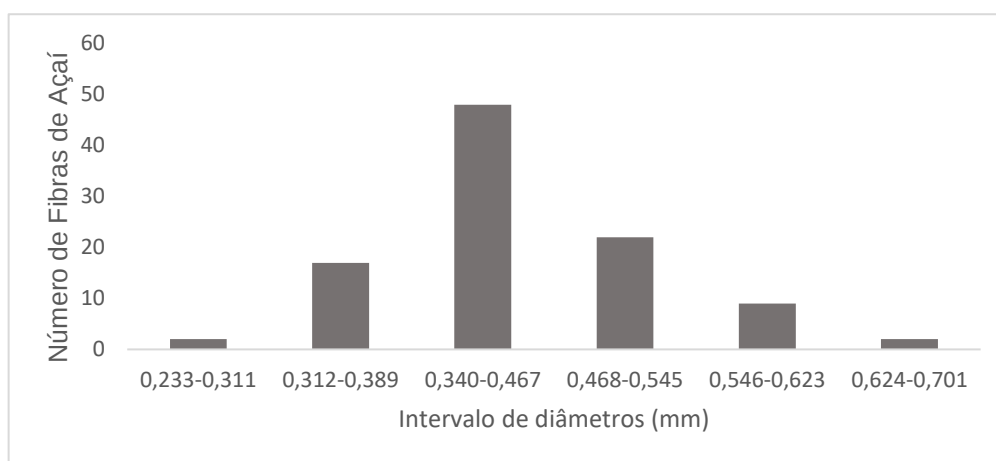
Figura 31 – Distribuição estatística do comprimento das fibras de curauá.



Fonte: Autor (2021).

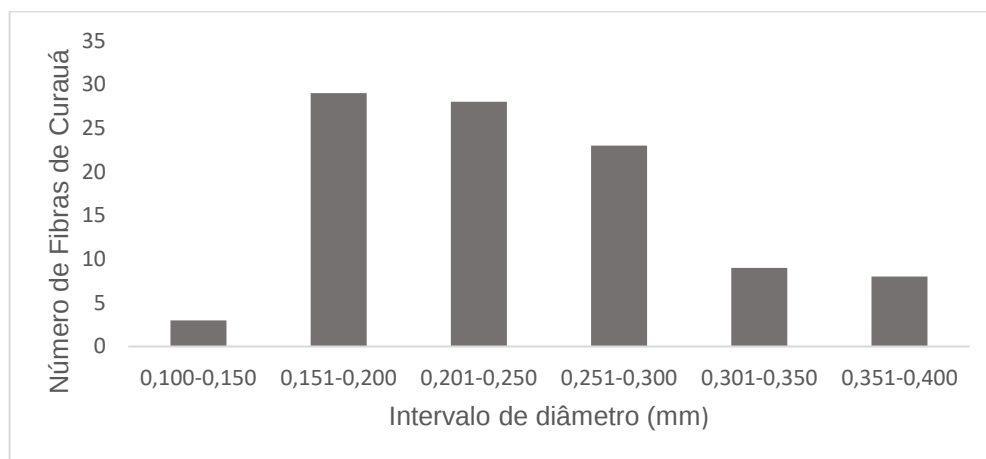
O comprimento das fibras de açaí variaram de 1,0 a 2,2 cm, com maior quantidade de fibras nos intervalos de 1,3 a 1,6 cm, obtendo um valor médio de 1,6 cm. Observa-se que a maior quantidade de fibras de curauá está no intervalo de 70 a 77 cm, e que através do cálculo da média dos comprimentos, as fibras de curauá tem um comprimento médio de 70 cm. Os tamanhos dos reforços fibrosos interferem na resistência mecânica dos materiais compósitos.

Figura 32 – Distribuição estatística do diâmetro das fibras de açaí



Fonte: Autor (2021).

Figura 33 – Distribuição estatística do diâmetro das fibras de curauá



Fonte: Autor (2021).

As fibras vegetais possuem espessuras e diâmetro variáveis. As maiores concentrações de fibras de açaí estão nos intervalos de diâmetros 0,34 a 0,46 mm, com valor médio de 0,4 mm. As fibras de curauá obtiveram um diâmetro médio de 0,2, tendo maiores concentrações de fibras nos intervalos de 0,15 a 0,25 mm. A avaliação dimensional foi realizada em 100 filamentos para cada tipo de fibra utilizada nesse trabalho.

#### 4.1.2 Determinação da densidade das fibras

A Tabela 7 abaixo representa os dados da densidade experimental das fibras naturais em comparação as literaturas.

Tabela 7 – Densidade das fibras de açaí e curauá.

| Fibras | Densidade experimental (g/cm <sup>3</sup> ) | Densidade literatura (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Açaí   | 0,80                                        | 0,74                                      |
|        |                                             | (Gehlen, 2014)                            |
| Curauá | 0,82                                        | 0,96                                      |
|        |                                             | (Maciel, 2017)                            |
|        |                                             | 1,32                                      |
|        |                                             | (Gehlen, 2014)                            |

Fonte: Autor (2021).

Observa-se que a densidade aparente por picnômetro utilizando etanol, realizada por triplicata, das fibras de açaí foi de 0,80 g/cm<sup>3</sup> e a densidade das fibras de curauá 0,82 g/cm<sup>3</sup>. Segundo Gehlen (2014), as variações dos resultados da densidade nas literaturas das fibras naturais de açaí e curauá *in natura*, ocorre em razão da influência dos espaços vazios e poros das fibras vegetais quando realizado a densidade aparente.

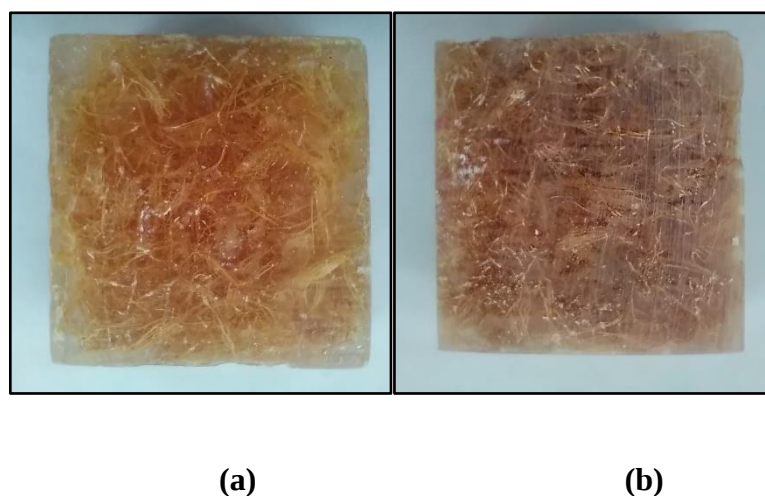
#### 4.2 Influência da dispersão das fibras na resina

Na figura 34 (a), é nítido a concentração da fibra no centro e aglomerados visíveis em regiões periféricas do CPA, isso ocorreu em razão do amontoado dos tecidos de fibras não desfibriladas em suas extremidades. Pois segundo Komuraiah, Kumar e Prasad (2017), indica um desempenho ruim em estados de tensão constante, pois a fibra curta em forma curva

concentra a tensão nas regiões extremas, dessa forma infere que a aplicação da fibra desse formato aglomerado na matriz pode influenciar negativamente nos resultados de resistência.

Já na Figura 34 (b), o CPA apresenta maior uniformidade na superfície, evidenciado pela coloração igualada e alta dispersão nas extremidades dos aspectos tridimensionais do compósito, com isso, segundo Marinucci (2011), a matriz se torna apta a receber uma tensão que favoreça a transferência de carga na interface matriz-fibra.

Figura 34 – CP's de fibras de açaí nas dimensões de 5x5x1,5 cm: a) não desfibriladas e b) desfibriladas



Fonte: Autor (2021).

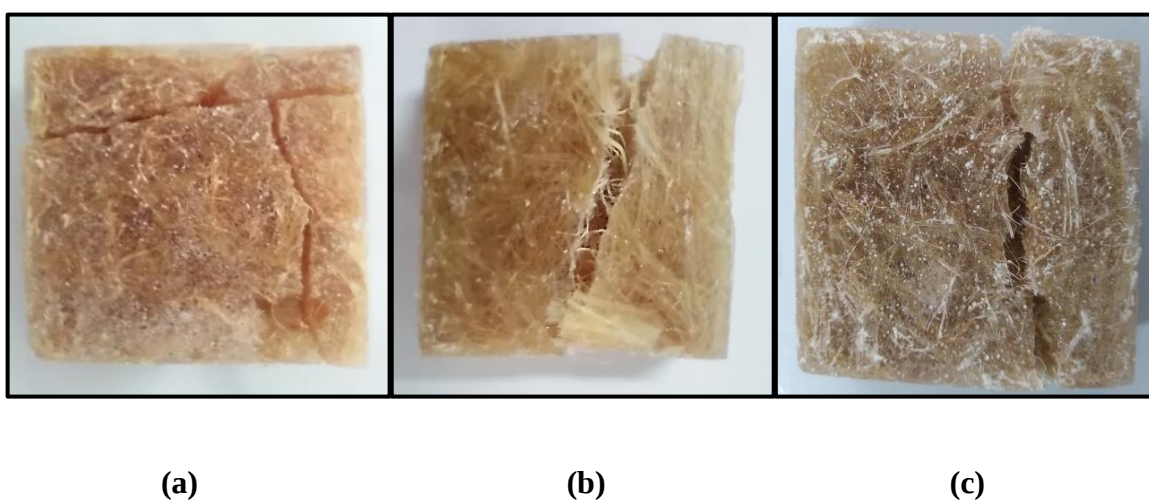
O processo de desfibrilamento é essencial para fibras naturais em matriz polimérica, em específico as fibras de açaí devido ao seu formato curvo, que é retirado em um emaranhado em forma de tecido que cobre o caroço. Logo, a retirada de cada fibra desse tecido ajuda na distribuição uniforme na confecção do compósito, bem como na dispersão da tensão na interface fibra-matriz, o que pode gerar bons resultados mecânicos.

De acordo com Callister (2018), as fibras curtas orientadas aleatoriamente devem possuir uma ótima relação interfacial junto a matriz, pois uma vez unidas a uniformidade das fibras organizadas na matriz, alcançam resultados mecânicos satisfatórios, senão feito dessa maneira, o compósito se torna inadequado para altas demandas físicas, como já abordado nos tópicos anteriores.

### 4.3 Análise Macroscópica dos CP's fraturados

Na Figura 35, é mostrado CP's de três tipos de compósitos fraturados, todos de matriz poliéster, porém cada um com reforço fibroso diferente. Antes de avaliar a fratura, é importante ressaltar que, segundo Marinucci (2011), a direção da carga aplicada, e seu respectivo módulo, é o fator que influencia no comportamento do compósito pós-fratura.

Figura 35 – CP's fraturados nas dimensões de 5x5x1,5 cm: a) cp de fibras de açai, b) cp de fibras de curauá e c) cp híbrido.



Fonte: Autor (2021).

Na figura 35 (a), é possível observar a fratura do compósito 50% fibra de açai, foi aplicada uma carga de 3 toneladas em direção uniaxial. No momento da ruptura, o CP rompeu em vários fragmentos as partes periféricas do compósito, logo analisou-se que quando o esforço foi iniciado no CP, o momento de ruptura foi extremamente curto, cerca de 0,9 s e assim sugere-se que o compósito não apresentou resistência a fratura suficiente.

Já na Figura 35 (b), também foi aplicada uma carga de 3 toneladas em direção uniaxial no compósito CPC. Porém, diferente do CPA, o momento de ruptura durou 1,2s, e a fratura foi mais lenta. Isso se deve, segundo Gehlen (2014), pela alta nobreza das propriedades da fibra de curauá quando comparadas as de açai, logo foi observado um maior potencial de suporte a esforços.

A figura 35.c, ilustra o compósito híbrido CPAC fraturado nas mesmas condições de carga, o momento de ruptura foi de 1,0s, o que se sugere que em razão da adição de fibra de

curauá houve melhora na resistência à ruptura quando aplicado a tensão, quando comparado ao CPA. Porém, observa-se no CPC e CPAC, a predominância da fratura central, ou seja, a ruptura não foi fragmentada, somente em uma linha.

#### 4.4 Aspectos fractográficos dos materiais compósitos

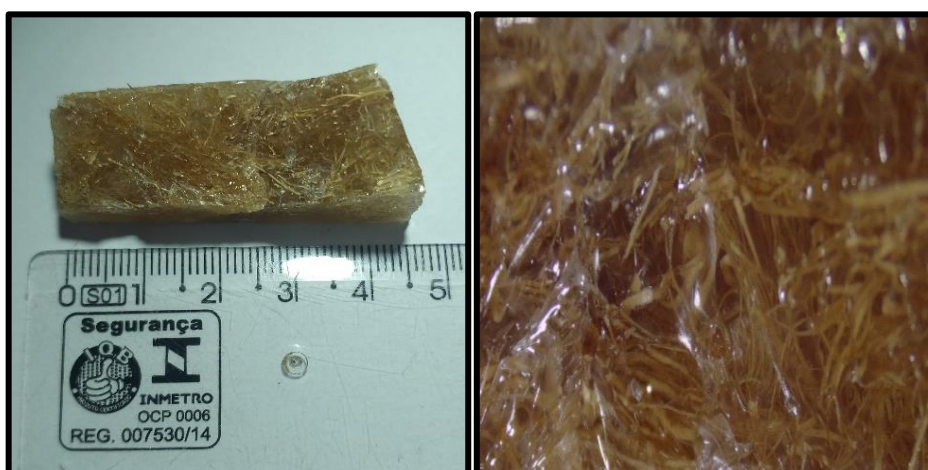
Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados referentes às análises das fractografias em Microscopia Óptica – MO e Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV da superfície de fratura dos compósitos de matriz poliéster insaturado e fibras curtas de aço e curauá, onde desejava-se observar o comportamento reforço/matriz.

##### 4.4.1 Análise por Microscopia Óptica – MO

- MO do Compósito de matriz poliéster e fibras de aço.

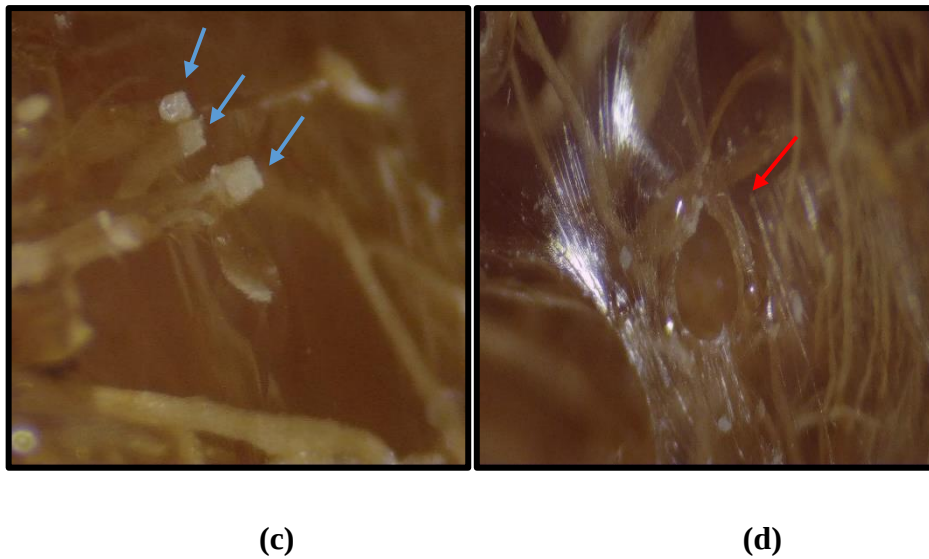
A Microscopia Óptica é essencial para observar e investigar características superficiais que influenciaram algum pivô de ruptura pós-fratura. A Figura 36, exibe o corpo de prova CPA a ser analisado.

Figura 36 – Macrografia e micrografia da fratura do compósito com 50% de fibras de aço; (a) visão macro do corpo de prova; (b) impregnação de fibras e poliéster em aumento de 10x; (c) fratura das fibras em aumento de 30x; (d) bolha de ar na superfície da fratura em aumento de 30x.



(a)

(b)



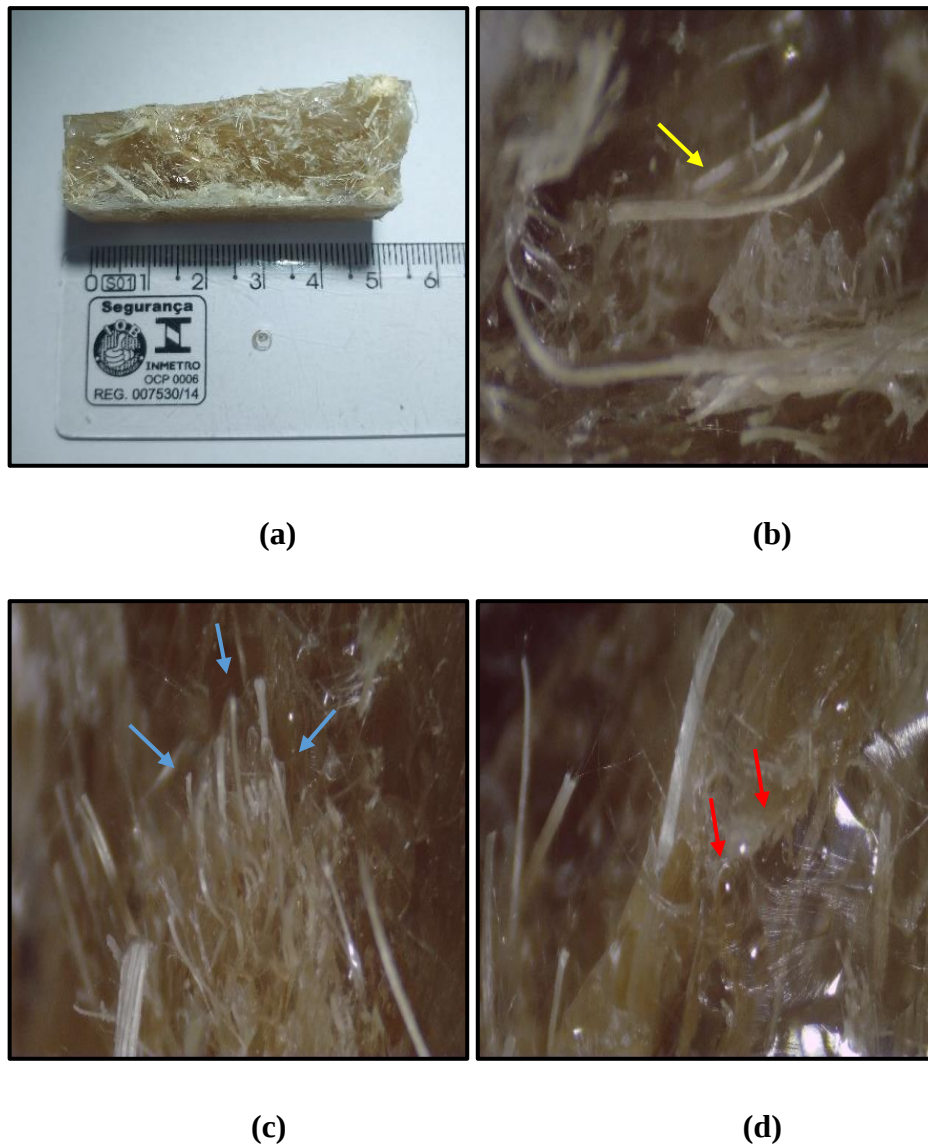
Fonte: Autor (2021).

A Figura 36 (a), mostra o CPA a ser analisado, já na Figura 36.b) fica claro na área central uma boa imersão da fibra na matriz, logo uma nítida adesão interfacial eficaz, visto na Figura 36 (c), com a fratura da fibra evidenciada pela seta azul. Na figura 36.d), uma área de bolhas, indicado pela seta vermelha, que visivelmente foi repartida em meio longitudinal no momento da ruptura no compósito de açai. Quando há bolhas no meio que perpassa a tensão, trincas se propagam na direção da carga, desfavorecendo a transferência de carga para as fibras que estão na base do compósito, como reportado também por Santos *et. al* (2018). Logo, isso ocorreu em relação a bolhas quando aplicou esforço, e formou uma cratera semiesférica.

- MO do Compósito de matriz poliéster e fibras de curauá

A amostra de material compósito com fibras de curauá é observado nas micrografias na Figura 37.

Figura 37 – Macrografia e micrografia da fratura do compósito com 50% de fibras de curauá; (a) visão macro do corpo de prova; (b) arrancamento da fibra em aumento de 10x; (c) fratura das fibras em aumento de 30x; (d) bolha de ar na superfície da fratura em aumento de 30x.



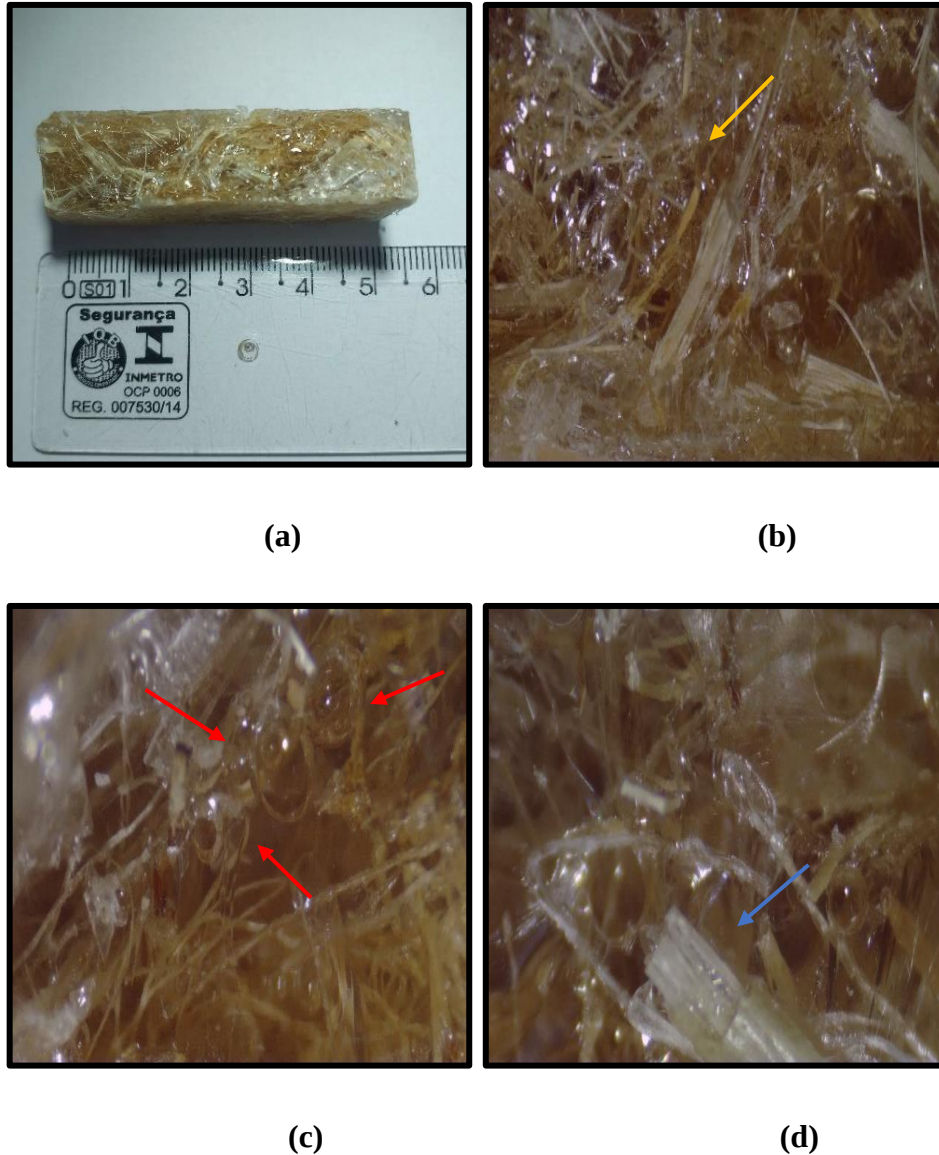
Fonte: Autor (2021).

Visualiza-se na Figura 37.a) pela seta amarela o arrancamento da fibra na região de fratura, na Figura 37.b) constata-se pelas setas azuis uma concentração de fibras fraturadas na resina poliéster. Já na Figura 37.c) há evidências de bolhas na matriz, apontadas pelas setas vermelhas, causada pela moldagem manual e fibras fora da matriz. As mesmas observações foram encontradas no estudo de Junior (2019), que observou a adesão reforço/matriz na região de fratura para os compósitos de curauá/epóxi.

- MO do Compósito de matriz poliéster e fibras híbridas

As micrografias do CPAC, para análise fractográfica por MO são observados na Figura 38.

Figura 38 – (a) Macrografia e micrografia da fratura do compósito híbrido (a) visão macro do corpo de prova, (b) visão geral em 10x, (c) detalhe da interface matriz-reforço em 30x e (d) fratura das fibras em aumento de 30x



Fonte: Autor (2021).

A Figura 38 (a), é referente ao corpo de prova a ser estudado. Na Figura 38.b), a seta laranja mostra a resina poliéster e as fibras de açaí e curauá evidenciando uma boa adesão, apesar de apresentarem aspectos de porosidade na superfície da fratura. Já na Figura 38.c) observa-se também a formação de bolhas de ar indicados pelas setas vermelhas, e na Figura 38.d), as setas azuis mostram rupturas de fibras de curauá. Observa-se que apesar das falhas,

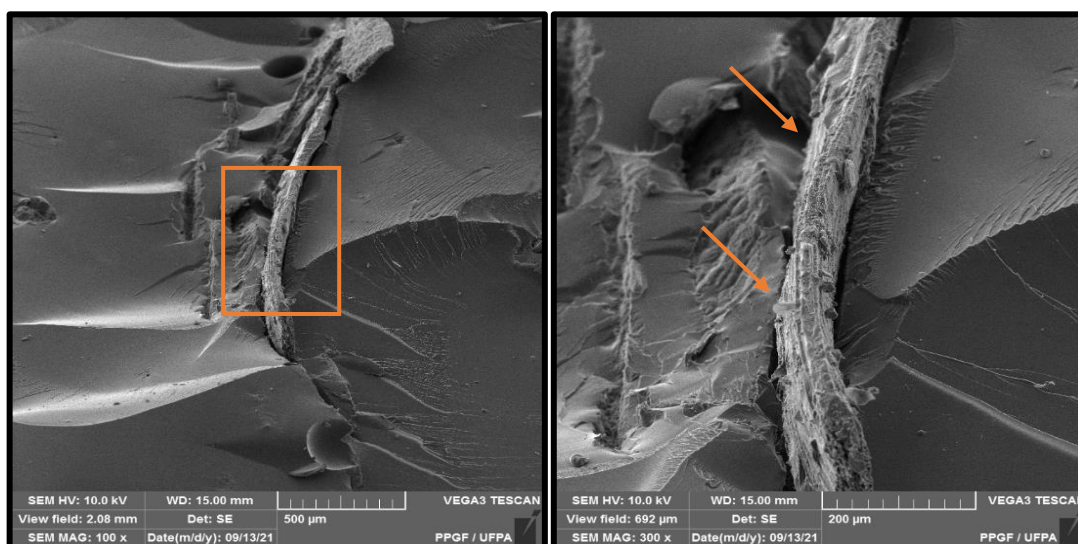
em decorrência também da metodologia de fabricação do corpo de prova, o compósito híbrido apresentou tendência a uma melhor adesão fibra/matriz

#### 4.4.2 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

- MEV do Compósito de matriz poliéster e fibras de açaí

A relação interfacial funciona como elo de transferência de carga, na Figura 39 (a), há uma região de fibra acoplada na matriz em suas extremidades, observado pelo retângulo laranja e na Figura 39.b a parte central do reforço está em evidencia mostrado pelas setas laranjas.

Figura 39 - MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açaí; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da interface matriz-reforço em 300x.



(a)

(b)

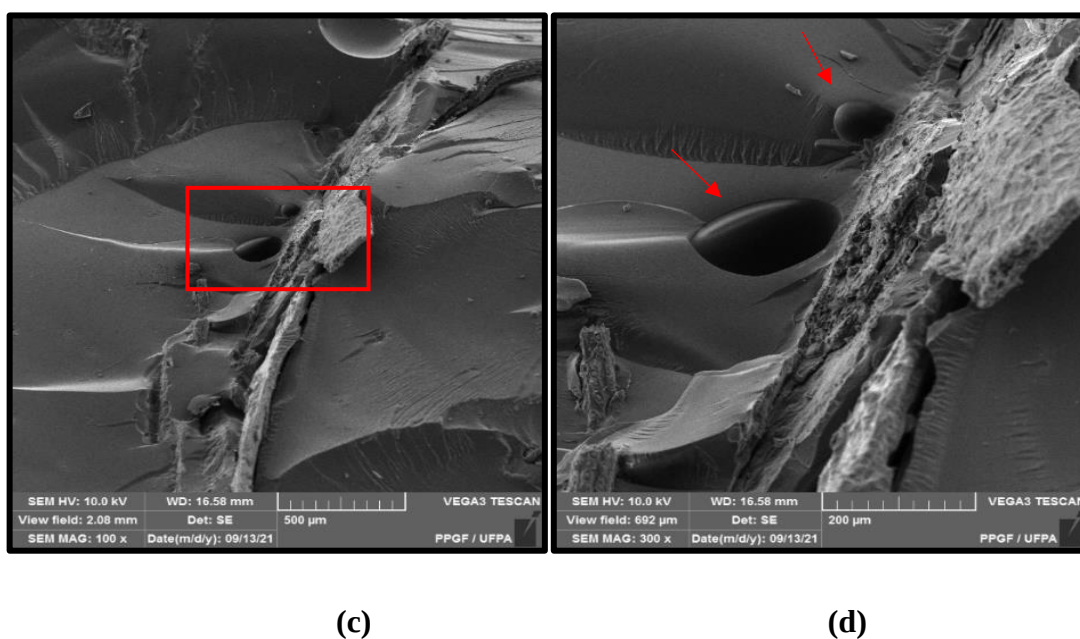
Fonte: Autor (2021)..

Segundo Teixeira (2019) e Gehlen (2014), um dos fatores que dificultam a adesão da fibra vegetal em matriz polimérica é a alta taxa de molhabilidade, causada pelo caráter hidrofílico. A baixa adesão interfacial da fibra junto a resina, está relacionado diretamente aos componentes bioquímicos da fibra, como lignina e hemicelulose. No entanto, na imagem é possível observar uma topografia desregular da fibra, causada por sua estrutura morfológica, o que dificultou a transferência de carga no momento da ruptura. Com isso, para uniformizar a superfície da fibra em uma topografia de poros alinhados e regulares, o que facilitaria a adesão

por sistema de microancoragem, tal procedimento é possível por tratamentos químicos na fibra como tratamentos alcalinos, merceirização e branqueamento.

A Figura 40 mostra uma região de fratura onde há vazios e bolha na superfície próximo a seção de tensão da fratura. Na Figura 40.a com menor aumento, pode-se ver no retângulo vermelho uma ruptura clássica com espaços vazios na matriz. Já com maior ampliação, a Figura 40.b, deixa clara imperfeições da estrutura pelas setas vermelhas. Na seta superior observa-se uma depressão côncava provavelmente criada durante o processo de homogeneização das misturas e a segunda seta localizada na parte inferior, nota-se uma depressão mais profunda no material aparentemente devido ao arrancamento total da fibra no momento da fratura.

Figura 40 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açaí; (a) visão geral e (b) detalhe da superfície com vazios por arrancamento de fibra e bolhas.



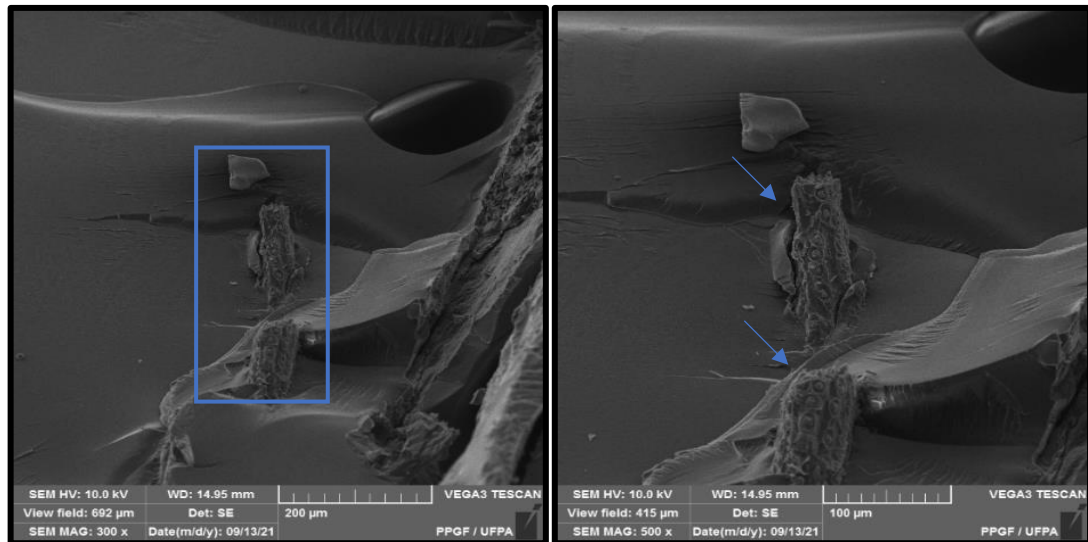
Fonte: Autor (2021).

A formação de bolhas no material compósito são um dos defeitos geradores de trincas, estes podem atuar como pontos concentradores de tensão, nucleando trincas, reduzindo assim a resistência mecânica do material. Segundo Neto e Pardini (2016), o processo de moldagem manual é o fator que ocasiona frações volumétricas de bolhas de ar.

A Figura 41, retrata também que as fibras de açaí foram rompidas, restando uma parte do reforço na matriz, visivelmente observado pelas setas azuis na Figura 41 (b). Assim,

mostrando que existe um certo grau de molhabilidade superficial e, por conseguinte, um certo ancoramento entre as fases.

Figura 41 - MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açáí; (a) visão geral em 300x e (b) detalhe de fibras rompidas na superfície da fratura em 500x.



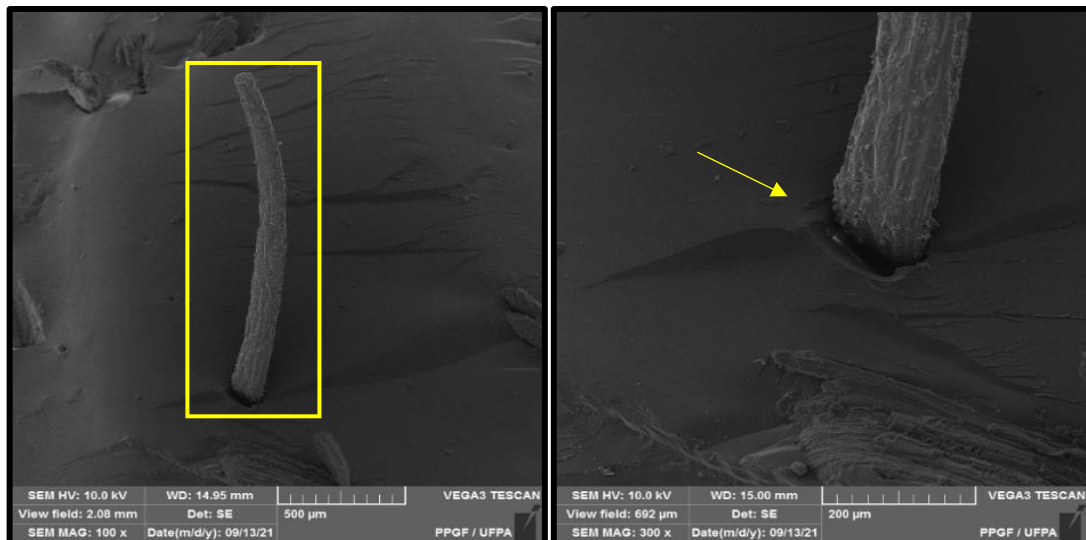
(e)

(f)

Fonte: Autor (2021).

É possível observar na Figura 42 (a) evidenciado pelo triângulo amarelo e ampliado na Figura 42 (b), o arrancamento parcial da fibra apontado pela seta amarela. Isso ocorreu na região onde há uma tendência a falhas de adesão interfacial.

Figura 42 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açáí; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície da fratura em 300x mostrando *pull out* da fibra de açáí.



(g)

(h)

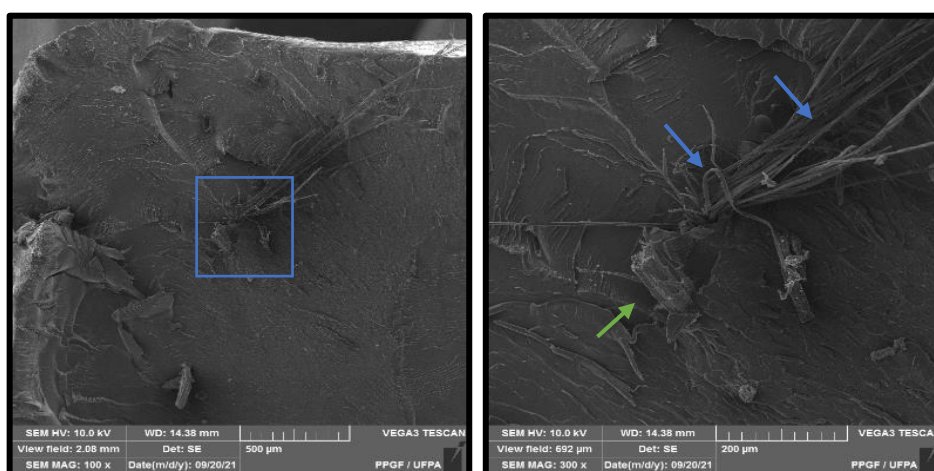
Fonte: Autor (2021).

Segundo Borges (2019), o efeito nomeado de arrancamento (*pull out*) acontece em detrimento do tamanho da fibra de reforço, visto que o açai possui 16mm, a análise não infere arrancamento total, pois essas normas de dimensões são aplicadas quando há ensaios, no presente estudo, esse fator não influencia, pois foi somente observado a fratura e seus aspectos de relações interfaciais.

- MEV do Compósito de matriz poliéster e fibras de curauá

Quando se trata de regiões das fibras fraturadas, a localização em que a tensão aplicada pode ser um dos fatores que influenciam essa ruptura, bem como atestam uma relação interfacial fibra-matriz satisfatória ou ineficaz. Na Figura 43, a região focalizada retratada pelo retângulo azul é evidente uma fibra fraturada, e nas redondezas fibrilas em um aglomerado, que são melhor observados pelas setas azuis. Esse estado é observado também no estudo de Teixeira (2019), que representa uma concentração de faces de fibras em contato com fibras vizinhas, o que na hora da confecção do compósito, dificulta o contato interfacial total da fibra na matriz polimérica, logo impacta no pleno desempenho quando exposto a esforços.

Figura 43 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de curauá; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície em 500x com fibras rompidas na superfície na seção transversal da fratura.



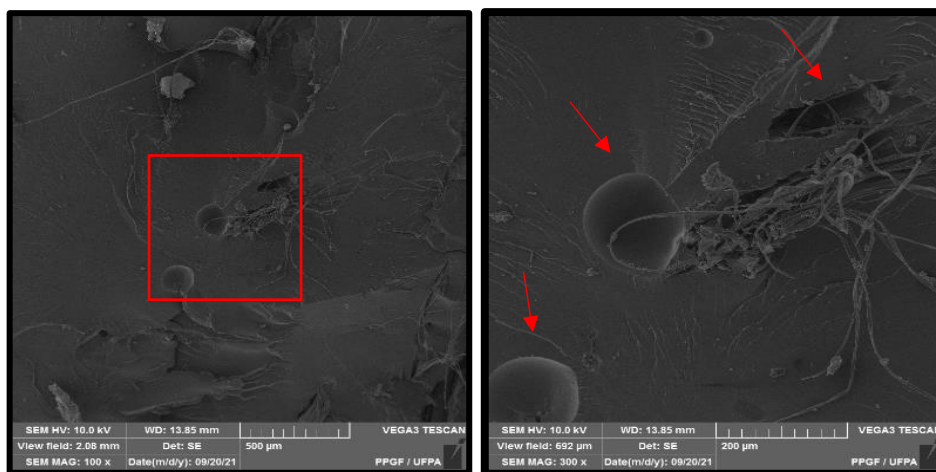
(a)

(b)

Fonte: Autor (2021).

A visão geral dos defeitos da Figura 44 (a), estão destacados no triângulo vermelho. Já na Figura 44 (b) é notável depressões rasas destacadas pelas setas vermelhas, também é nítido um vão contínuo com fibras de curauá em forma longitudinal.

Figura 44 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de curauá; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície em 300x com vazio por bolhas de ar.



(a)

(b)

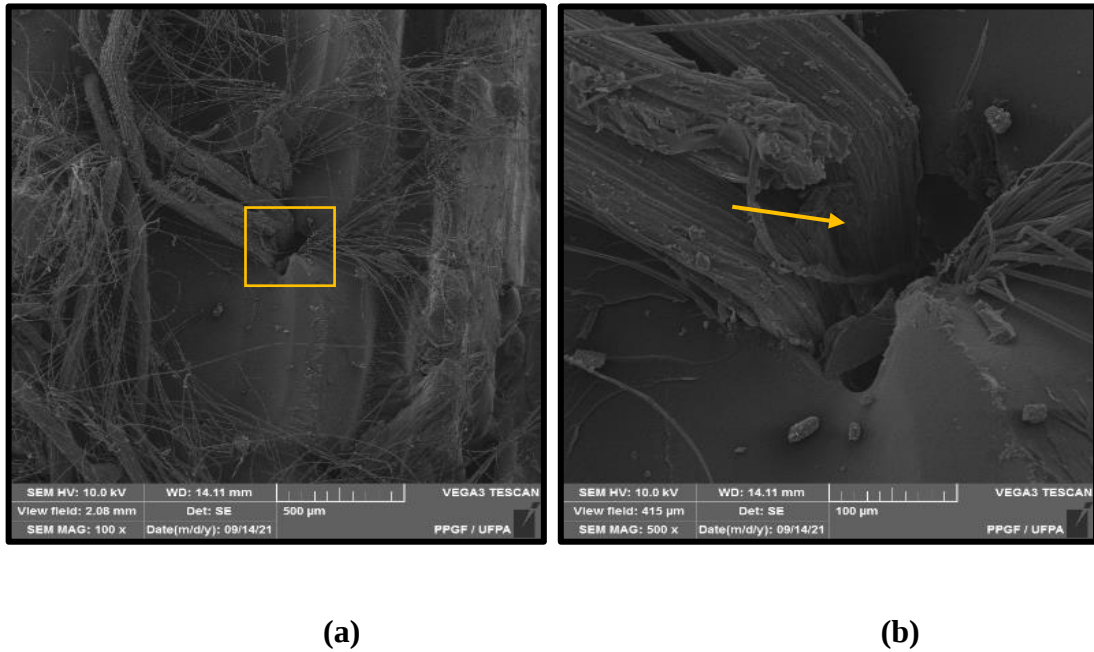
Fonte: Autor (2021).

Essa depressão corresponde as bolhas que são criadas quando a resina está em reação com o catalisador, e quando entra em processo de cura total, tem potencial para propagar trincas quando exposto a tensões multidirecionais. Nesse caso da análise, a tensão aplicada perpassou através das bolhas e foi transferida uma parte para a fibra, por estarem em contato direto. Com isso, não houve ruptura na fibra, visto que para fraturar a fibra em uma relação interfacial ideal, conforme Marinucci (2011), a carga deve ser transferida da matriz até a fibra, por essa razão houve essa falha que preservou a fibra inteira na matriz.

- MEV do Compósito de matriz poliéster e fibras híbridas

Nos compósitos híbridos são observados, nas Figura 45, Figura 46 e Figura 47 os defeitos que não foram possíveis observar na fractografia por Microscopia Óptica.

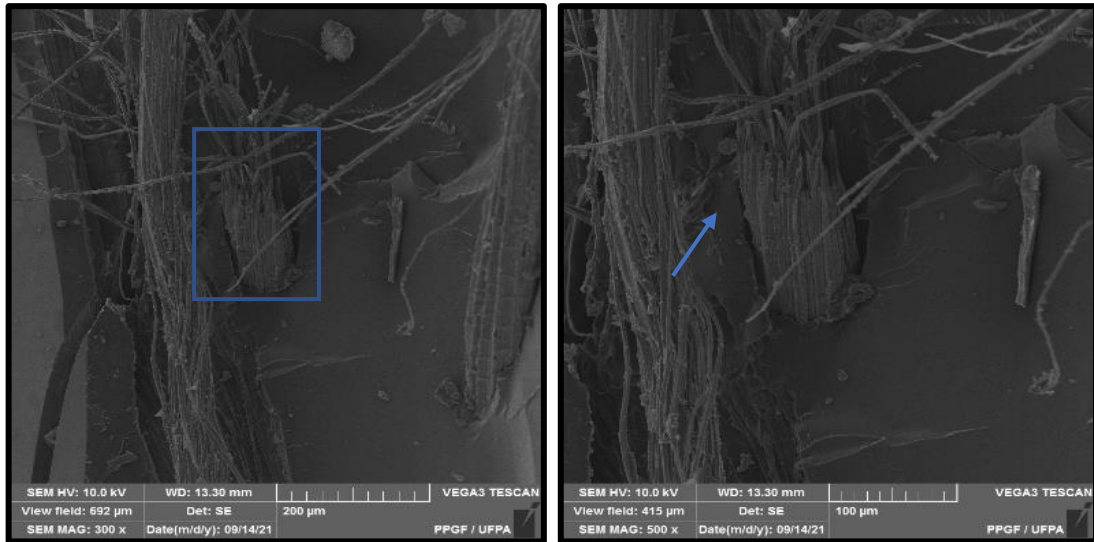
Figura 45 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de aço e curauá; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície em 300x com vazio por arrancamento de fibras.



Fonte: Autor (2021).

Assim como nas análises anteriores, observa-se nas Figuras 45.a e 45.b, que há também arrancamento total da fibra deixando um vazio na fase matriz, evidenciados pelas setas laranjas, devido ao efeito *pull out* que está relacionado ao tamanho crítico da fibra.

Figura 46 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açai e curauá; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície em 500x com fibras rompidas na superfície na seção transversal da fratura.



(c)

(d)

Fonte: Autor (2021).

Na Figura 46.a, é possível analisar que houve rompimento de fibra de curauá na seção transversal da fratura, observa-se também na Figura 46.b na região de fratura da fibra sua estrutura interna evidenciando feixes de fibrilas, característica de fibras vegetais.

Figura 47 – MEV da fratura de um corpo de prova com 50% de fibras de açai e curauá; (a) visão geral em 100x e (b) detalhe da superfície da fratura em 300x mostrando *pull out* da fibra de curauá.



(e)

(f)

Fonte: Autor (2021).

Nota-se na Figura 47(a), pelo retângulo amarela e nitidamente pelas setas amarelas na Figura 47.b, uma baixa interação da resina poliéster e o reforço sendo visível quando se analisa as interfaces. De acordo com Lima *et. al* (2019), isso decorre devido os componentes lignocelulósicos presentes em fibras vegetais sem tratamento químicos, que dificultam o ancoramento mecânico resultando em um alto grau de retirada de fibras

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como finalidade utilizar fibras do resíduo do caroço do açaí do comércio agroindustrial local e fibra nobre de curauá como fonte de material renovável, como reforço no compósito de matriz de poliéster ortoftálica, como solução para utilização de um resíduo visto como lixo. Diante das análises realizadas, conclui-se que:

- Após as determinações físicas das fibras, foi possível concluir que as fibras de açaí possuem um comprimento médio de 1,6 cm e as fibras de curauá 70 cm, e que as fibras de açaí possuem um diâmetro médio de 0,4 mm, maior que o diâmetro da fibra de curauá que tem o valor de 0,2 mm. Já os ensaios de densidade das fibras pelo método de picnometria por etanol, as fibras lignocelulósicas apresentaram densidade semelhantes aos das literaturas;
- O estudo de fractografia do presente trabalho, permitiu analisar a qualidade interfacial do material estudado através da fratura, onde foi possível observar os mecanismos de falha presente nos compósitos, onde os fenômenos mais presentes foram fibras rompidas, bolhas na matriz, arrancamento de fibras (pull out), fibras dispostas transversalmente na direção do carregamento. De acordo com os estudos, estes são defeitos interfaciais pivô de fratura no material compósito mais encontrados, quando se utiliza como método de fabricação a moldagem manual;
- Apesar dos defeitos observados na análise fractográfica, os compósitos apresentaram potencial uso, pois obtiveram uma boa relação interfacial observadas pelo rompimento das fibras e presença de poucas bolhas, o que sugere ter um comportamento mecânico satisfatório, assim sendo aptos para realização de ensaios mecânicos e aplicações futuras.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar tratamento químico nas fibras de açaí e curauá com objetivo de melhorar suas propriedades;
- Fabricar compósito de resina poliéster e fibras de açaí em percentuais menores que 50%;
- Fabricar compósito híbrido de resina poliéster e fibras de açaí e curauá em percentuais menores que 50%;
- Realizar ensaios mecânicos de flexão estática e tração perpendicular;

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15316-2:2019: Painéis de fibras de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio.** 5 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BARBOSA, A. M. **Compósitos poliméricos com resíduo de açaí para mitigação de efeitos térmicos como estratégias eco-alternativas em habitações na Amazônia.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

BORGES, E. R. G. **Desenvolvimento e caracterização física e mecânica de painéis de poliuretano com fibras de curauá e resíduos madeireiros.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

BRAGA, D. G. **Tratamentos químicos das fibras do mesocarpo de açaí para a produção de filmes de nanocelulose e nanocompósitos de quitosana.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2019.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 2ª edição revisada e ampl., São Paulo: Artliber, 2006.

CARDOSO, P.H.M. **Efeito do tratamento alcalino/mecânico de fibras de curauá nas propriedades de laminados compósitos de matriz epóxi.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2014.

CAVALCANTI, D. K. K. **Caracterização mecânica de compósitos híbridos com reforços de fibras naturais.** Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais), Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2018.

**Comissão Nacional para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Brasil). Relatório de Atividades 2017-2018.** Brasília: Presidência da República, 2018. 80p.

CORREIA, V. C.; SANTOS, S. F.; SEVASTANO, H. Jr.; CURAUÁ é exemplo de potencial comercial do bionegócio. In: A SUPERINTENDÊNCIA DA ZONA FRANCA DE MANAUS-SUFRMA. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/publicacoes/noticias/curaua-e-exemplo-de-potencial-comercial-do-bionegocio>. Acesso em: 06 de agosto de 2021.

DUAN, J. WU, H.; FU, W.; HAO, M. **Mechanical properties of hybrid sisal/coir fibers reinforced polylactide biocomposites.** Polymer Composites, v. 39, p. E188–E199, abr. 2018.

FERREIRA, J. A.; JÚNIOR, A. I. O.; SOUZA, J. R. P. **Comparação das resistências mecânicas do compósito resina poliéster/fibra de coco e madeiras brasileiras de usos estruturais.** Engevista, V. 19, n.5, p. 1364-1375, Dezembro, 2017.

GEHLEN, L. R. **Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açaí e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado.** Curitiba, 2014.

IMAZON; SEBRAE. **Boas práticas para manejo florestal e agroindustrial** – Produtos florestais não madeireiros: Açaí, Andiroba, Babaçu, Castanha-do-Brasil, Copaíba e Unha-de-gato. Imazon e Sebrae, Belém, 2010. 66p. Disponível em: <http://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/livros/BoasPraticasManejo.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2021.

JUNIOR, V. D. L. **Laminados de fibra de curauá/ epóxi obtidos a partir de pré-impregnados.** Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2019.

JONH, V. M. **Utilization of vegetal fibers for production of reinforced cemetitious materials.** RILEM technical letters. São Paulo, n° 2, p. 145-154, 2017. Disponível: <http://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/view/48>. Acesso: 20/04/2020.

KOMURAI AH, A.; KUMAR, N. S.; PRASAD, B. D. **The study of relationship between fracture angles of natural fiber with its micro fibril angle.** Science Direct. Anantapur – Índia, n° 173, p. 1198-1202, 2017. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816345167>. Acesso: 19/04/2020.

LIMA, R. A. A; CAVALCANTI, D. K.; NETO, J. S . S; COSTA, M. H; BANEIA, D. M. **Effect of surface treatments on interfacial properties of natural intralaminar hybrid composites.** Polymer Composites, vol 41, p.3114- 325, 2019.

MACIEL, N. O. R. **Análise mecânica comparativa de tração, flexão e Impacto entre compósitos reforçados com fibras de Curauá e compósitos reforçados com fibras de vidro.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Campos dos Goytacazes – RJ, 2017.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais compósitos poliméricos.** São Paulo: Artiber, 2011.

MATTIETTO, R. de A.; MOCHIUTTI, S.; CARVALHO, A. V. **Açaí: Euterpe oleracea.** Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2017.

MOTTA, L.A. C; GONÇALVES, L. K. S.; SILVA, M. R., Cunha, J.; DANTAS, M. E. **Painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras de rami para aplicação na Construção Civil.** Revista Matéria, v.21, n.3, pp.796-806, 2016.

Nery, T. B. R.; José, N. M. **Estudo das fibras de Bananeira pré-tratadas e in natura como possível matéria-prima para reforço em Compósitos Poliméricos.** Rev. Virtual Quim., Vol 10 – N° 2, 2018.

NETO, L.F; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** 2ª ed. Revista e ampl., Blucher, São Paulo, 2016.

NARCISO, C. S. C.; TEIXEIRA, G. S. M. **Estudo da adoção da logística reversa como alternativa para redução de impactos ambientais gerados pela produção de polpa de açaí.** Capanema-PA, 2017.

OLIVEIRA, M. S. P.; NETO, J. T. F. MATTIETTO, R. A.; MOCHIUTTI, S.; CARVALHO, A. V. **AÇAÍ *Euterpe oleracea*: *Euterpe oleracea* martius**. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2017.

OLIVEIRA, J. M. **Obtenção e caracterização de compósitos biodegradáveis de poliácido láctico (pla) reforçados com fibras de curauá**. Dissertação (Mestrado) -Faculdade Gama e Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF ,2016.

PEIXOTO, D. L. **Tipos de materiais compósitos**. Monografia (Graduação) Faculdade em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro. Ouro Preto – MG, 2019.

PEREIRA, J. M. C. R. **Desenvolvimento e fabrico de compósitos de matriz polimérica com fibras naturais**. Leiria, 2017.

POZZER, T.F. **Painél sanduíche com núcleo carrugado de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina PU-mamona**. 2018. 74f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

Presidência da República do Brasil. **Relatório Nacional Voluntário sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasil, 2017.

REZENDE, M. C, BOTELHO, E. C. **O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol 10, nº 2, 2000.

SANTOS, R. R.; RIBEIRO, M. M.; FUJIYAMA, R. T.; BRANCO, C. T. N. M. **Placas laminadas de compósito poliéster, tecido de juta e resíduos de madeira**. Estudos Tecnológicos em Engenharia, vol. 12, n. 2, p. 68-77, jul/dez 2018.

SANTOS, F. R. S. **Desenvolvimento e aplicação de compósitos à base de matriz polimérica reforçado com fibras de curauá (*Ananás erectifolius*) e resíduos de madeiras amazônicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, 2013.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Org.). **Boletim: Produção nacional de açaí**. SEBRAE, Brasília, 2015.

SILVA, A. M. V. **Avaliação do comportamento térmico de compósitos poliméricos produzidos com resíduos de açaí em edificações na amazônia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

SILVA, A. S.; SILVA, S. M.; GARCIA DEL PINO, G. **Confecção de compósito em matriz de resina epóxi reforçado com fibra de curauá**. 2016.

SOUSA, V. M. Z. **Caracterização mecânica, térmica e morfológica de compósitos de polihidroxibutirato (phb) reforçados com fibras de curauá**. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia) Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2016.

SUFRAMA. **Curauá é exemplo de potencial comercial do bionegócio**. 12 de Dez. de 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/suframa/pt-br/publicacoes/noticias/curaua-e-exemplo-de-potencial-comercial-do-bionegocio>> Acesso em: 18 de ago. de 2021.

TEIXEIRA, L. A. **O efeito da modificação química das fibras de curauá nas propriedades morfológicas, térmicas e mecânicas de compósitos de poliéster**. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia) - Universidade De Brasília, Brasília/DF, 2019.