



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

JENNIFER FERREIRA FERNANDES

COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea Mart.*):

Caracterizações Físicas, de Resistência à Chama e Mecânicas

Ananindeua, PA
2025

JENNIFER FERREIRA FERNANDES

COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea Mart.*):

Caracterizações Físicas, de Resistência à Chama e Mecânicas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, do *campus* Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do grau de bacharela em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

Orientadora: Ma. Eng^a. Haianny Beatriz Saraiva
Lima

Ananindeua, PA
2025

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

F363c Fernandes, Jennifer Ferreira,
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS DE AÇAÍ
(Euterpe oleracea Mart.) : Caracterizações Físicas, de Resistência à
Chama e Mecânicas / Jennifer Ferreira Fernandes. — 2025.
66 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Prof^a. MSc. Haianny Beatriz Saraiva Lima
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia
de Materiais, Ananindeua, 2025.

1. Sustentabilidade. 2. Fibras naturais. 3. Matriz
polimérica. I. Título.

CDD 620.11

JENNIFER FERREIRA FERNANDES


COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea Mart.*):
Caracterizações Físicas, de Resistência à Chama e Mecânicas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Materiais, *Campus*
Universitário de Ananindeua, para a obtenção do
Grau de Bacharela em Engenharia de Materiais.


Data da aprovação: 25/02/2025

Conceito: EXCELENTE


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **DEIBSON SILVA DA COSTA**
Data: 10/03/2025 12:30:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **HAIANNY BEATRIZ SARAIVA LIMA**
Data: 10/03/2025 12:41:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Ma. Eng^a. Haianny Beatriz Saraiva Lima
(PPGEQ/ITEC/UFPA – Orientadora)

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS VINICIUS DA SILVA PAULA**
Data: 10/03/2025 14:13:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcos Vinicius da Silva Paula
(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Examinador Interno)

Documento assinado digitalmente
 **EMERSON CARDOSO RODRIGUES**
Data: 10/03/2025 20:05:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Emerson Cardoso Rodrigues
(FEQ/ITEC/UFPA – Examinador Externo)

Documento assinado digitalmente
 **ANA PAULA SOUZA DE SOUSA**
Data: 10/03/2025 14:09:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ma. Eng^a. Ana Paula Souza de Sousa
(PPGEQ/ITEC/UFPA – Examinadora Externa)

Ananindeua, PA
2025

Dedico este TCC ao meu tio Pedro Monteiro (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço a Deus e à minha mãezinha Nossa Senhora de Nazaré, por estar comigo ao longo desta caminhada, dando-me força e coragem para superar cada dificuldade durante a graduação.

À minha mãe Alba Lúcia, por ser minha inspiração, motivação e o meu alicerce. Obrigada por me proteger, por me criar com todo o amor e dedicação, e por nunca faltar nada para mim e meu irmão. Por sempre acreditar nos meus sonhos, incentivando-me a estudar e a alcançar lugares mais longes por meio da educação. Pelas ligações diárias a noite, que transformavam qualquer dia difícil em um momento de amor e paz ao ouvir sua voz.

Ao meu avô João Vinagre e ao meu irmão Yan Aleixo, que, mesmo à distância, sempre estiveram de abraços abertos, transmitindo apoio e amor. Aos meus familiares e amigos de Maracanã, por estarem sempre me esperando com energia positiva, tornando meus momentos mais felizes.

Ao Yan Araújo, que acreditou em mim desde o início da graduação, mesmo nos momentos que me senti perdida. Obrigada pelos conselhos, pela força, pelos ensinamentos, pela proteção, pelo carinho e pela paciência. Obrigada por me incentivar e estar comigo quando iniciei o meu primeiro artigo científico.

Aos meus amigos da graduação, em especial à Alicia Zanon, por ter me colocado ao seu grupo das meninas engenheiras e desde então se tornou minha melhor amiga nesse percurso, me protegendo, me ajudando e me apoiando. Ao Manoel Monteiro, que chegou depois na minha vida, porém por ser do interior me conquistou de olhos fechados e me ajudou durante meu trabalho de conclusão de curso.

Ao Professor Deibson Costa, por me aceitar no grupo de pesquisa, acreditar no meu potencial e me orientar durante este período, me ensinando e me guiando. Às orientadoras Haianny Lima e a Ana Paula, por serem tão dedicadas, pacientes e exigentes, incentivando o melhor de mim.

Ao professor Emerson, pelos ensinamentos e orientações ao longo da minha pesquisa. Aos meus amigos do GPMMAC, que contribuíram para uma graduação mais leve com as conversas descontraídas durante os intervalos do café e almoço. A Universidade Federal do Pará (UFPA) pela oportunidade deste sonho, ao Laboratório de Engenharia Química (LEQ) e ao Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM) onde realizei as caracterizações deste trabalho.

A todos os amigos que fiz durante esta graduação, o meu muito obrigada!

RESUMO

O açaí é o principal produto florestal não madeireiro consumido no Brasil, além de ter um alto valor nutricional o fruto é utilizado para fabricação de cosméticos. Porém, há preocupação com o descarte irregular dos caroços em rios e ruas. Dessa forma, o trabalho objetivou caracterizar as fibras do caroço do açaí e incorporá-las em matriz polimérica para posterior realização de ensaios físicos, resistência à chama, mecânicos e análise fractográfica dos compósitos. Os caroços foram lavados para remoção de impurezas e as fibras foram extraídas manualmente para determinação da massa específica pelo método do picnômetro, a caracterização morfológica por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e posterior aplicação na fabricação dos compósitos. A fabricação, iniciou-se com uma matriz de resina poliéster ortoftálica, iniciador de cura butanox 1% (v/v) e a fibra de açaí em frações mássicas de 1%, 2% e 3%, a partir do método de fabricação *hand lay up* em molde de silicone com aplicação de compressão de 47,5 N. Os compósitos produzidos foram submetidos aos ensaios físicos de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) que seguiram as normas ASTM D570, ASTM D2734 e ASTM D792, respectivamente. O ensaio de flamabilidade, seguiu os parâmetros da norma ASTM D635. Os ensaios mecânicos foram realizados em conformidade com as normas, sendo a de tração ASTM D638 e flexão ASTM D790. A massa específica foi de 1,109 g/cm³ e obteve resultado semelhante com os estudos pesquisados. Diante a fibra analisada, notou-se uma morfologia irregular, rugosa, com possíveis ceras e contendo canais de pontuação. Nos ensaios físicos dos compósitos houve um aumento da AA e PA após inserção das fibras quando comparado com a matriz plena e a MEA que está de acordo com a regra da mistura. No ensaio de flamabilidade os compósitos obtiveram resultados inferiores ao limite estabelecido pelas normas ASTM D635 e CONTRAN 498, assim os compósitos apresentaram bons resultados. No ensaio mecânico de tração e flexão, as fibras atuaram como carga de enchimento na matriz, porém, quando comparadas com outras literaturas, obtiveram resultados superiores. Na análise fractográfica, observou-se que quanto maior a fração de fibra no compósito, maior a quantidade de defeitos. Desse modo, o desempenho da fibra de açaí possibilita realizar aplicações e aumentar o desenvolvimento econômico e sustentável diante das caracterizações e ensaios abordados.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Fibras naturais; Matriz polimérica.

ABSTRACT

Açaí is the main non-timber forest product consumed in Brazil. In addition to its high nutritional value, the fruit is also used in the production of cosmetics. However, there is concern regarding the improper disposal of the seeds in rivers and streets. Thus, this study aimed to characterize the fibers from açaí seeds and incorporate them into a polymeric matrix for subsequent physical, flammability, mechanical, and fractographic analysis of the composites. The seeds were washed to remove impurities, and the fibers were manually extracted for the determination of specific mass using the pycnometer method, morphological characterization through Scanning Electron Microscopy (SEM), and the fabrication process began with an orthophthalic polyester resin matrix, a 1% (v/v) Butanox curing initiator, and açaí fibers in mass fractions of 1%, 2%, and 3%, using the hand lay-up method in a silicone mold under 47.5 N compression. The produced composites underwent physical tests for Water Absorption (WA), Apparent Porosity (AP), and Apparent Specific Mass (ASM), following ASTM D570, ASTM D2734, and ASTM D792 standards, respectively. The flammability test was conducted according to ASTM D635. Mechanical tests were performed following standardized procedures, with tensile testing in accordance with ASTM D638 and flexural testing in accordance with ASTM D790. The specific mass obtained was 1.109 g/cm³, showing results similar to those found in the literature. Regarding the analyzed fiber, an irregular, rough morphology was observed, with possible waxes and the presence of pit canals. In the physical tests of the composites, WA and AP increased after fiber insertion compared to the pure matrix, while ASM followed the rule of mixtures. In the flammability test, the composites showed results below the limits established by ASTM D635 and CONTRAN 498 standards, demonstrating satisfactory performance. In the tensile and flexural mechanical tests, the fibers acted as filler in the matrix; however, when compared to other studies, they exhibited superior results. The fractographic analysis indicated that a higher fiber fraction in the composite led to an increased number of defects. Thus, the performance of açaí fiber enables applications that contribute to economic and sustainable development, considering the characterizations and tests conducted.

Keywords: Sustainability; Natural fibers; Polymeric matrix.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma da classificação dos materiais compósitos.....	17
Figura 2 – Carga (fase dispersa) , matriz (fase contínua) e interface das fases.....	18
Figura 3 – Representação das fases dispersas dos compósitos	20
Figura 4 – Atuação das fibras como reforço	21
Figura 5 – Fluxograma da classificação das fibras.....	23
Figura 6 – Mapa do cultivo do açaí	24
Figura 8 – Ilustração do ensaio de flamabilidade.....	27
Figura 9 – Fraturas do ensaio de tração.....	28
Figura 10 – Alteração do momento fletor e alteração das distâncias.....	29
Figura 11 – Fluxograma do processo de fabricação dos materiais compósitos	31
Figura 12 – a) Resina e b) Ativador	32
Figura 13 - Caroços brutos na feira comercial	33
Figura 14 - a) caroços imersos em água e b) caroços de açaí limpos.....	33
Figura 15 – Fibras extraídas do caroço do açaí	34
Figura 16 – Análise morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	35
Figura 17 – Fluxograma de fabricação dos compósitos	36
Figura 18 – Dimensões utilizadas nos corpos de prova	37
Figura 19 – Corpos de prova utilizados nos ensaios	37
Figura 20 – Aparato para medir a massa imersa	38
Figura 21 – Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de flamabilidade.....	38
Figura 22 – Realização do ensaio de flamabilidade	39
Figura 23 – Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração	39
Figura 24 – Máquina modelo KE 2000 MP da marca KRATOS.....	40
Figura 25 – Medidas dos corpos de prova de flexão.....	41
Figura 26 – Amostras para a análises fractográficas	41
Figura 27 – Micrografia da fibra de açaí (a-b)	44
Figura 28 – Gráfico da relação deste trabalho com outros trabalhos e as normas	47
Figura 29 – Gráfico da comparação do Limite de Resistência e Porosidade Aparente	50
Figura 30 – Fraturas do compósito com 1% de fibra de açaí a) 1mm e a b) 0,5 mm.....	52
Figura 31 – Fratura do compósito com 2% de fibra de açaí a)1mm e a b)2 mm	52
Figura 32 – Fratura do compósito com 3% de fibra de açaí a)2mm e a b)1 mm	
Figura 33 – Dados do ensaio de flexão	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das resinas poliéster	20
Tabela 2 – Propriedades, unidades e valores específicos da resina poliéster insaturada ortoftálica.....	32
Tabela 3 – Comparação da massa específica da fibra com a literatura	43
Tabela 4 – Ensaio físicos (AA, PA e MEA)	45
Tabela 5 – Dados do ensaio de flamabilidade e a redução em comparação com a matriz	46
Tabela 6 – Dados do limite de resistência dos compósitos produzidos.....	48
Tabela 7 – Comparação do Limite de Resistência à Tração com outros trabalhos	51
Tabela 8 – Comparação da Resistência à flexão do trabalho com outras literaturas.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Absorção de Água
ASTM	American Society for Testing and Materials
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
E	Módulo de Young
F	Carga aplicada
FA	Fibra de Açaí
FAC	Fibra de Açaí com Compressão
GPa	Giga Pascal
kN	Quilonewton
kV	Quilovolt
LABCAT	Laboratório de Catálise e Biocatálise
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
LME	Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura
LAMPS	Laboratório de Materiais Porosos Sintetizados
LRT	Limite de Resistência à Tração
MEA	Massa Específica Aparente
MEK-P	Peróxido de Metil Etil Cetona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mi	Massa imersa
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
Ms	Massa seca
Mu	Massa úmida
PA	Porosidade Aparente
pH	Potencial hidrogeniônico
UFPA	Universidade Federal do Pará
USIMAT	Usina de Materiais
ε	Deformação de Engenharia
ρ	Densidade
σ	Tensão de ruptura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivo geral	14
1.2.1 Objetivos específicos.....	14
1.3 Composição do trabalho	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Materiais compósitos	16
2.1.1 Fase matriz.....	18
2.1.1.1 Matrizes poliméricas	18
2.1.1.1.1 Resina poliéster	19
2.1.2 Fase reforço	20
2.2 Compósitos poliméricos	21
2.3 Compósitos reforçados com fibras	22
2.4 Açai (<i>Euterpe oleracea Mart.</i>)	24
2.4.1 Propriedades e características das fibras de açai	25
2.5 Método de fabricação manual (<i>hand lay up</i>)	26
2.6 Caracterização dos compósitos	26
2.6.1 Ensaio físicos	26
2.6.2 Ensaio de flamabilidade	27
2.6.3 Ensaio de tração	28
2.6.4 Ensaio de flexão.....	29
2.6.5 Análise fractográfica.....	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Materiais	32
3.1.1 Matriz polimérica	32
3.1.2 Fibras do açai.....	33
3.2 Métodos	33
3.2.1 Extração da fibra.....	34
3.2.1.1 Massa específica da fibra.....	34
3.2.1.2 Morfologia da fibra.....	35
3.2.2 Fabricação dos compósitos	35
3.2.3 Ensaio físicos dos compósitos	36

3.2.4 Ensaio de flamabilidade	38
3.2.5 Ensaio mecânicos	39
3.2.5.1 Ensaio de tração.....	39
3.2.5.2 Ensaio de flexão.....	40
3.2.5.3 Análise fractográfica.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Massa específica da fibra	43
4.2 Caracterização morfológica da fibra	44
4.3 Ensaio físicos dos compósitos	45
4.4 Ensaio de flamabilidade	46
4.5 Ensaio mecânicos	48
4.5.1 Ensaio de tração.....	48
4.5.1.1 Análise fractográfica.....	51
4.5.2 Ensaio de flexão.....	53
5 CONCLUSÃO.....	56
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Analisando o cenário atual do mundo, a produção de materiais sustentáveis é uma alternativa para mitigar os efeitos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos, que são fonte de poluição e degradação ambiental. Para reduzir esse impacto, é necessário adotar medidas de otimização dos processos produtivos, com foco na redução de desperdício, reaproveitamento de materiais e aprimoramento das técnicas de fabricação (Vertown, 2022). Nessa perspectiva, Ferdinánd *et al.* (2023), destaca que as fibras naturais concentram possíveis incorporações como cargas em materiais compósitos, podendo reduzir os impactos ambientais.

O açaí é o principal produto florestal não madeireiro consumido no Brasil e também um importante fruto de exportação para diversos países. O estado do Pará destaca-se como o principal produtor e cultivador de açaí, uma fruta nativa da floresta Amazônica, reconhecida por seu elevado valor nutricional e pelo papel significativo como fonte de renda para inúmeras famílias da região. Segundo a Adepará (2023), a produção anual de açaí ultrapassa um milhão e quatrocentos mil toneladas.

Nos métodos convencionais de consumo, os processadores de açaí locais descartam os caroços em grandes sacolas, que são coletadas pelas autoridades municipais e encaminhadas para aterros sanitários ou lixões em várias cidades do Pará (Menezes *et al.*, 2019). Contudo, é frequente a ocorrência de desafios na destinação apropriada desses resíduos, resultando no descarte desses materiais em vias públicas, em rios ou em lixões a céu aberto (Miranda *et al.*, 2022). Diversas pesquisas foram elaboradas com o intuito de promover uma reutilização para estes materiais orgânicos, visto que, possuem potencial para síntese de novos materiais por apresentarem alto teor de lignina e, conseqüentemente, elevada durabilidade (Santos *et al.*, 2023).

A confecção de materiais poliméricos reforçados com fibras tem se expandido nos últimos anos, uma vez que podem contribuir para a melhora de suas propriedades (Minillo *et al.*, 2021). A fabricação de materiais compósitos surgiu da necessidade industrial de desenvolver materiais com uma combinação de propriedades superiores às dos polímeros, metais ou cerâmicas para determinadas aplicações. Essa combinação possibilita que os compósitos exibam características aprimoradas em comparação com as dos seus materiais constituintes (Callister; Rethwisch, 2020).

Portanto, este estudo propôs caracterizar as fibras extraídas do caroço do açaí e desenvolver compósitos com matriz polimérica incorporando 1%, 2% e 3% em massa, para avaliar suas propriedades físicas, de resistência à chama e mecânicas de tração e flexão.

1.1 Justificativa

O açaí é um fruto de grande relevância no Pará, com mais de 114 municípios voltados à sua produção, registrando uma quantidade produzida de 1,6 milhões de toneladas em 224,04 mil hectares e produtividade de 7,12 toneladas por hectare, gerando um valor de produção de 5,93 bilhões de reais em 2022 (Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará, 2023).

No entanto, a intensa comercialização do açaí gera grandes quantidades de resíduos nas regiões produtoras, sendo a maior parte desses resíduos descartada em locais irregulares (65,4%), enquanto o restante segue para aterros sanitários (34,6%). Ao longo dessa pesquisa, observou-se que os resíduos do caroço de açaí recolhidos pelos caminhões de lixo eram encaminhados para os aterros municipais, enquanto os resíduos recolhidos por meio de transporte alternativo eram dispostos em locais irregulares (Cardoso Neto, 2023).

Há diversas irregularidades identificadas na forma de despejo dos resíduos gerados pelos estabelecimentos no Pará, o que influencia diretamente no aumento de impactos ambientais na região, como a poluição do solo, elevação do índice de material orgânico e a poluição visual, resultando na alteração negativa das paisagens (Negrão, 2021).

Diante ao abordado, o trabalho tem como justificativa a preocupação ambiental com os resíduos de caroços de açaí gerados e descartados de forma irregular. Assim, esta pesquisa busca fabricar compósitos com as fibras dos caroços de açaí em matriz polimérica, devido ao baixo custo, a contribuição do avanço científico, minimização dos impactos ambientais e a sustentabilidade ao reutilizar esses resíduos.

1.2 Objetivo geral

O trabalho propôs a caracterização das fibras do caroço do açaí e a fabricação de compósitos de matriz polimérica termofixa com a incorporação das fibras de açaí em diferentes proporções mássicas de 1%, 2% e 3%, para posterior realização de ensaios físicos, resistência à chama, mecânicos e análise fractográfica.

1.2.1 Objetivos específicos

- Analisar a morfológica das fibras do caroço do açaí por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para análise da superfície da fibra.

- Fabricar compósitos em matriz polimérica com incorporação da fibra de açaí, nas frações mássicas de 0%, 1%, 2% e 3%.

- Explorar os ensaios físicos de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA), e Massa Específica Aparente (MEA).

- Avaliar o desempenho da resistência à chama dos compósitos por meio do ensaio de flamabilidade, nas diferentes porcentagens de incorporação de fibra.

- Investigar os testes mecânicos de tração e flexão dos compósitos com diferentes frações mássicas de fibra de açaí.

- Analisar a fractográfica dos compósitos após a fratura resultante do ensaio mecânico de tração.

1.3 Composição do trabalho

A seção 1 apresenta a introdução, a justificativa e os objetivos do trabalho, enfatizando a importância da sustentabilidade e diminuição dos impactos ambientais, destacando a reutilização de fibras naturais em matriz polimérica para a fabricação de compósitos.

A seção 2 descreve a revisão da literatura que exhibe as principais características dos materiais estudados durante o trabalho. Destaca-se a importância dos materiais compósitos para a atualidade e os diferentes tipos de reforço e matrizes utilizadas. A matriz polimérica escolhida no trabalho é detalhada ao decorrer da revisão, assim como, as fibras naturais na utilização como cargas.

A seção 3 aborda a metodologia da pesquisa, descrevendo todos os materiais e equipamentos utilizados nos processos experimentais. São apresentados desde a obtenção dos caroços em comércio local, a etapa de beneficiamento realizada até as etapas de caracterização dos corpos de prova para os respectivos ensaios.

A seção 4 abrange os resultados e discussões das análises e testes realizados ao longo do trabalho. Sendo elaborados com tabelas e gráficos para evidenciar as propriedades e características de cada processo e com as diferentes frações mássicas de fibra.

A seção 5 apresenta a conclusão, destacando as contribuições e os principais resultados alcançados no trabalho, traçando um paralelo entre os objetivos e os resultados obtidos. Além disso, a seção é finalizada com propostas e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção de revisão bibliográfica, foram abordados os conceitos fundamentais e avanços sobre materiais compósitos. Iniciou-se com uma discussão sobre a fase matriz, englobando diferentes tipos de matrizes, como as poliméricas, e explorando o uso de resina poliéster. Em seguida, o foco foi direcionado à fase de reforço, onde foram descritos os tipos de reforços, com ênfase nos reforços com fibras. Foram descritos as propriedades e aplicações de compósitos poliméricos, além disso, explorou-se o processo de fabricação manual, conhecido como *hand lay up*. Um destaque foi dado ao uso das fibras de açai (*Euterpe oleracea Mart.*), detalhando suas propriedades e características. Por fim, a caracterização dos compósitos foi descrita, abordando os ensaios físicos, de inflamabilidade e mecânicos.

2.1 Materiais compósitos

O material compósito é a união de dois ou mais materiais, sendo uma matriz e um reforço. O termo “compósito” é utilizado desde a metade do século XX, com a criação de compósitos multifásicos seguindo projetos de engenharia para atingir determinadas propriedades ou/e características pretendidas. Todavia, os materiais compósitos já existiam antes mesmo do termo criado, os quais eram usados na forma como a madeira, tijolos de argilas reforçados com palha, conchas marinhas e o aço, que é uma liga metálica (Callister; Rethwisch, 2020).

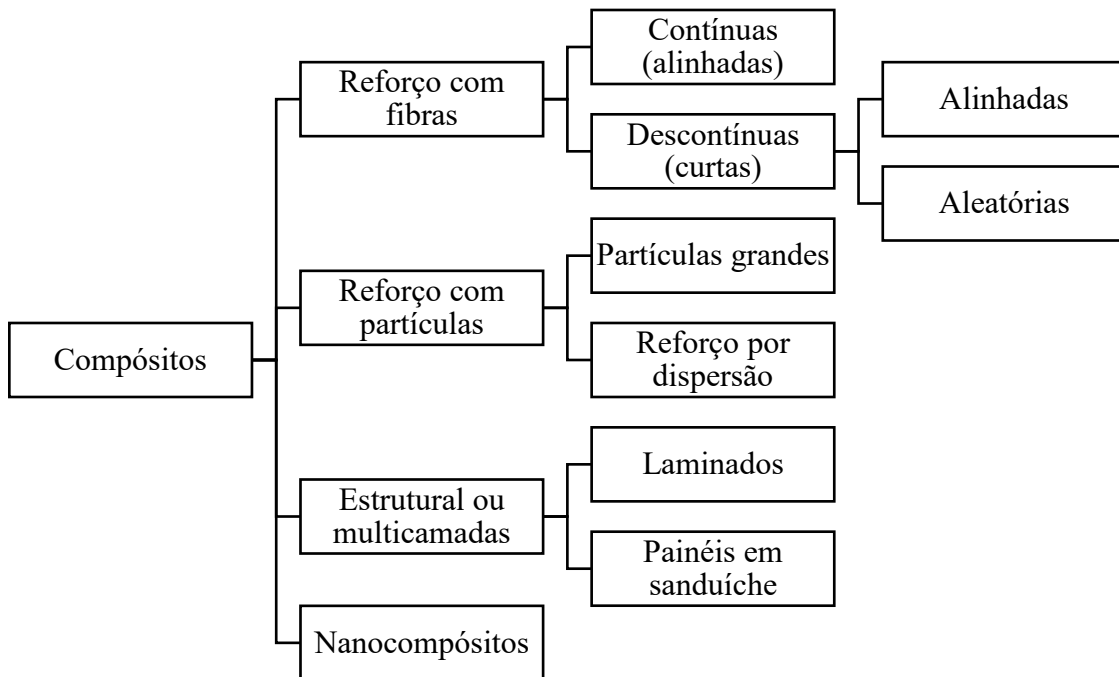
Conforme o princípio de ação combinada, melhores composições são obtidas por uma combinação adequada de dois ou mais materiais distintos havendo equilíbrio entre as propriedades dos materiais compósitos. Assim, o conceito de material compósito oferece interessantes possibilidades de fabricação, baseando-se entre uma matriz e um material que atua como carga. A matriz tem a função de envolver a carga, distribuindo de forma uniforme as forças aplicadas no compósito e proporcionando proteção estrutural (Rocha, 2020).

Para obter um desempenho eficaz em um material compósito com fibras e atender às diversas necessidades de uma aplicação específica, é fundamental uma seleção rigorosa de vários fatores, incluindo a orientação das fibras, a fração volumétrica das fibras na matriz, o número de lâminas e a sequência de empilhamento, além da geometria do material. A capacidade de ajustar esses fatores oferece amplas possibilidades de adaptação dos materiais compósitos a aplicações, a fim de alcançar as propriedades desejáveis (Krusche, 2023).

As matrizes são elementos essenciais dos compósitos, pois são classificadas por sua natureza química, por matrizes poliméricas, matrizes cerâmicas, matrizes de carbono e matrizes

metálicas. A matriz assume um papel de suma importância no compósito, tendo em vista a responsabilidade de distribuir os carregamentos e tensões, proteger o reforço e fornecer propriedades específicas ao material compósito que será fabricado (Levy Neto; Pardini, 2016). Na Figura 1, observa-se um simplificado esquema de classificação dos materiais compósitos.

Figura 1 – Fluxograma da classificação dos materiais compósitos



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch, 2020

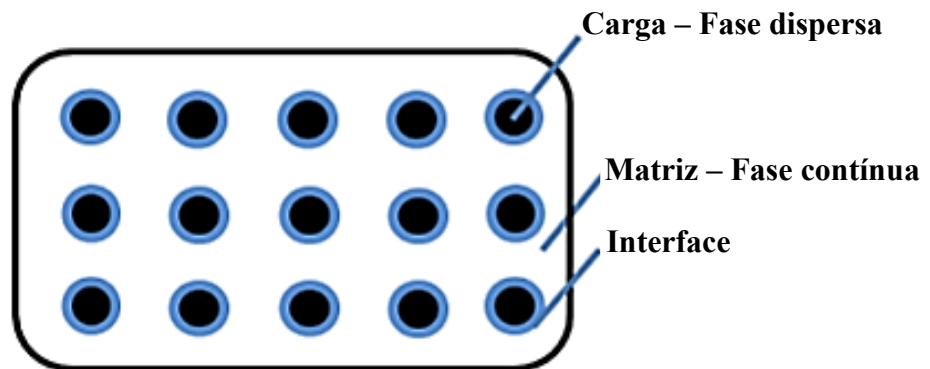
No entendimento de Rocha (2020) o reforço nos compósitos desempenha o papel crucial de aumentar a resistência mecânica, sendo constituído por materiais fibrosos, particulados ou estruturais. Entre os principais tipos de reforços fibrosos, destacam-se a fibra de carbono, a fibra de vidro e a fibra de aramida, além dos reforços estruturais, como os laminados e os sanduíches.

Os compósitos têm sido amplamente utilizados devido ao interesse crescente de desenvolver novos materiais que se combinem de maneira eficiente com as necessidades de diferentes aplicações. A combinação de resistências mecânica, térmica e acústica é alcançada para atender às exigências específicas de cada aplicação. Além disso, alguns compósitos contêm matérias-primas de origem natural e renovável, o que contribui para minimizar os efeitos negativos dos resíduos no meio ambiente. Diante disso, os materiais compósitos ganham destaque em pesquisas científicas recentes, sendo amplamente discutidos em eventos nacionais e internacionais de interesse na área (Oliveira, 2023).

2.1.1 Fase matriz

Nos materiais compósitos, a carga (fase dispersa) é responsável no compósito por suportar as forças aplicadas. Já a matriz (fase contínua) é responsável por distribuir as transferências quando o material é submetido a esforços mecânicos e por proteger a carga do ambiente em que está inserido. As duas ligações carga/matriz são chamadas de interface, na qual a qualidade afeta o desempenho mecânico do compósito. Dessa maneira, a escolha do tipo de matriz é importante na produção de compósitos, levando em consideração o método de produção e a finalidade de aplicação (Shackelford, 2007; Lourenço, 2017). Na Figura 2 nota-se um esquema das fases (dispersa e contínua) e a interface de um compósito.

Figura 2 – Carga (fase dispersa) , matriz (fase contínua) e interface das fases



Fonte: Lourenço, 2017

A eficácia de um produto utilizando um material compósito pode ser determinado pelo método de fabricação. Dependendo da exigência de cada projeto, características importantes podem mudar, como as proporções volumétricas da fibra e da matriz, orientação correta do reforço e o tempo de cura da matriz. Pois, a escolha inadequada pode aumentar o custo de produção contribuindo para a perda de competitividade do produto (Marinucci, 2019).

Segundo Callister e Rethwisch (2020), a fase matriz de um compósito pode ser um metal, um polímero ou um cerâmico. Normalmente, os metais e os polímeros são utilizados como matrizes, visto que a ductilidade do material é importante. Os compósitos com matriz cerâmica são empregados quando deseja-se melhorar a tenacidade à fratura do material.

2.1.1.1 Matrizes poliméricas

Os materiais compósitos de matriz polimérica configuram-se pela matriz de um material polimérico que se caracterizam em dois tipos: termoplástico e termoendurecido. Essas matrizes são interessantes devido a sua leveza natural, sua resistência e rigidez relativa ao polímero não

reforçado ou metais convencionais, para que permita a maior liberdade de produção de componentes com características adequadas à sua aplicação (Gonçalves, 2022).

Matrizes termoplásticas oferecem amplas vantagens em relação às matrizes termofixas, destacando-se pela facilidade de reciclagem e pela capacidade de serem moldadas novamente conforme necessário após tratamentos específicos. Essas características permitem que esses materiais atendam a preocupações ambientais, já que podem ser aquecidos e remodelados, possibilitando a reutilização do compósito (Murray, 2021).

As matrizes termorrígidas são desenvolvidas por polímeros onde suas moléculas possuem uma estrutura tridimensional rígida. Essa matriz é formada diante de uma mistura de dois ou mais componentes. Quando é realizada a mistura desses componentes em proporção adequada há a polimerização e a formação da estrutura tridimensional, nomeado como processo de cura (Moura *et al.*, 2009). Após todo o processo de polimerização, não há nenhuma possibilidade de realizar a sua moldagem, uma vez que não haverá interferência da temperatura na viscosidade que proporcione uma moldagem. São exemplos de matrizes termorrígidas as resinas fenólicas, epóxi e poliéster (Gomes, 2015).

2.1.1.1.1 Resina poliéster

As resinas de poliéster são polímeros que expõem uma ampla gama de aplicação, abrangendo plásticos, fibras, revestimentos, compósitos e diversas outras áreas. Essas aplicações estão diretamente relacionadas ao tipo de monômero, aditivo, iniciadores e agentes de cura que possibilitam variadas combinações de propriedades mecânicas e químicas ao material (Thomas; Chirayil; Hosur, 2019).

As resinas podem ser de diversos tipos, como as ortoftálicas, tereftálica ou isoftálica, sendo determinado pelos ácidos utilizados para a fabricação. As resinas ortoftálicas são objetos de estudo para serem aplicadas onde requer transparência ou quando houver pigmentação para não haver interferências. Essas resinas costumam apresentar alta viscosidade e são indicados para a produção de telhas, domos, botões e estatuários. Dessa forma, podem ser pré-aceleradas ou estabilizadas sobre a ação da luz. É possível uma grande variação de características por meio de modificações na formulação deste tipo de resina. (Baggio, 2005). A seguir, apresenta-se a Tabela 1 de comparação das resinas poliéster e suas características.

Tabela 1 - Comparação das resinas poliéster

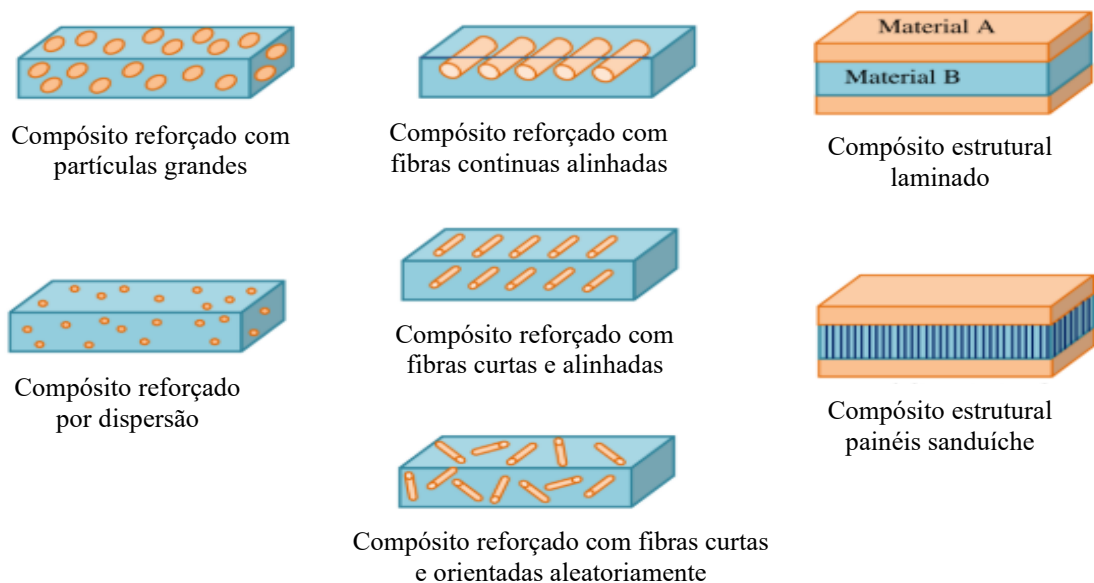
Tipos	Características
Ortoftálica	Resina comum de menor custo para usos básicos.
Teraftálica	Possui resistências físicas pouco superiores a ortoftálica, porém baixa resistência a UV.
Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores.
Isoftálica c/NPG	O NPG melhora a resistência a hidrólise.
Bisfenólica	Possui melhores características químicas e térmicas.

Fonte: Silaex, 2023

2.1.2 Fase reforço

A fase reforço de um material compósito tem a capacidade de conferir a resistência quando o material é submetido a esforços mecânicos, que são geralmente constituídos por materiais fibrosos, particulados ou estruturais (Rocha, 2020). No esquema de classificações de reforços, tem-se os compósitos reforçados com partículas, os reforçados com fibras longas e contínuas ou curtas e descontínuas, conferindo propriedades direcionadas ao compósito conforme a orientação. Por fim, existem os estruturais, que combinam diferentes configurações de matriz e reforço, como apresenta a Figura 3 (Callister; Rethwisch, 2020).

Figura 3 – Representação das fases dispersas dos compósitos

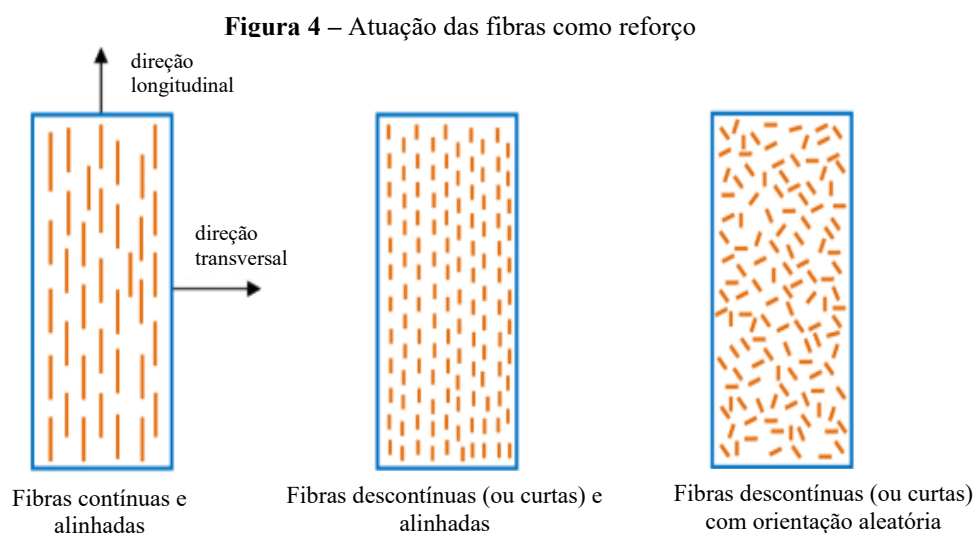


Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch, 2020

No entendimento de Melo (2022) o reforço pode ser essencial para matriz, pois quando ocorre uma interferência não desejada em elementos estruturais, afeta potencialmente a sua capacidade, ocasionando acréscimo dos deslocamentos das tensões de esforços mecânicos, sucedendo o esgotamento máximo da resistência, acarretando o colapso estrutural do material.

Callister e Rethwisch (2020) abordam os tipos de reforço que podem obter diversas variedades de partículas, como óxidos, carburetos, nitretos entre outros. Também se destaca o método de fabricação pelas quais as partículas podem ser utilizadas quando são incorporadas na matriz durante o processo de fabricação. O mesmo descreve o efeito do reforço particulado nas propriedades mecânicas que podem influenciar na resistência, rigidez e tenacidade.

Nos compósitos, a matriz pode ser composta por um polímero e o reforço que pode apresentar um caminho natural para a exploração das propriedades. Dessa maneira, o uso dos reforços no material utilizado pode funcionar como barreiras contra a propagação de fissuras em virtude da sua alta rigidez, que retarda o crescimento de rachaduras em compósitos para aumentar suas propriedades mecânicas (Oliveira, 2023). Os reforços constituídos por fibras são normalmente compostos por um conjunto de finos filamentos, caracterizados por uma alta razão entre o comprimento e outras dimensões ou ordenações (Terra, 2021). A Figura 4, a seguir, ilustra as formas que as fibras podem atuar como reforço em compósito.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch, 2020

2.2 Compósitos poliméricos

Em razão da grande diversidade de materiais e técnicas de produção, a tarefa de selecionar o processo de fabricação mais apropriado para a produção de peças a partir de compósitos torna-se relativamente difícil. Caso o processo de fabricação não seja corretamente

escolhido, pode haver variações na fração volumétrica da carga e matriz, orientação da carga, tempo de trabalho e de cura da matriz. Assim, algumas condições devem ser alcançadas durante a produção do compósito: i) deve ocorrer total impregnação das cargas pela matriz; ii) as cargas devem estar uniformes e dispersas na matriz, sem gerar agregados ou aglomerados; iii) a razão de aspecto das cargas não deve ser alterada durante o processamento; iv) no caso de termofixos, a cura deve ser uniforme ao longo de toda a peça; v) a remoção de bolhas de ar (vazios) deve ser efetiva; vi) em casos em que elevadas temperaturas de processos são utilizadas, tanto a carga como a matriz devem ser termicamente estáveis na temperatura utilizada (Merlini, 2021).

Os materiais compósitos poliméricos são normalmente de moldagem estrutural constituídos por uma fase contínua polimérica reforçada por uma fase descontínua fibrosa e que se agregam a físico-química após um processo de polimerização. Diante disso, a crescente procura por matérias ecológicas, tem possibilitado o desenvolvimento de materiais de matrizes poliméricas com fibras naturais. A utilização destas fibras em compósitos vem crescendo no setor industrial devido à baixa densidade, menor abrasão nas máquinas de processamento, boa adesão e aos baixos custos (Oliveira, 2023).

Callister e Rethwisch (2020) abordam sobre os compósitos com matriz polimérica (PMC — polymer-matrix composites) que consistem em uma resina polimérica como a fase matriz, e em fibras como o meio de reforço. Esses materiais são usados na maior diversidade de aplicações dos compósitos, como consequência de suas propriedades em temperatura ambiente, da facilidade de fabricação e do seu custo.

2.3 Compósitos reforçados com fibras

Nas últimas décadas, houve grande progresso no uso de cargas de base natural à volatilidade de petróleo e seus recursos. A utilização de cargas de base natural apresenta algumas limitações (baixa estabilidade térmica, inflamável, alta absorção de umidade, além de variação nas propriedades mecânicas). Isto levou a mais estudos na combinação do enchimento de base natural para superar estas limitações. O objetivo comum é substituir cargas sintéticas para estudar a viabilidade das limitações do enchimento natural (Mochane *et al*, 2019).

As fibras podem ser divididas em dois grupos: naturais, oriundos da natureza, e sintéticas, confeccionando pelo homem. A escolha entre esses tipos de fibras para a produção de materiais compósitos influenciam diretamente nas propriedades finais do produto (Gabriel, 2020). As fibras sintéticas se subdividem em orgânicas (aramida, poliéster e polietileno) e inorgânicas (fibras de carbono e vidro). Por outro lado, as fibras naturais são categorizadas de

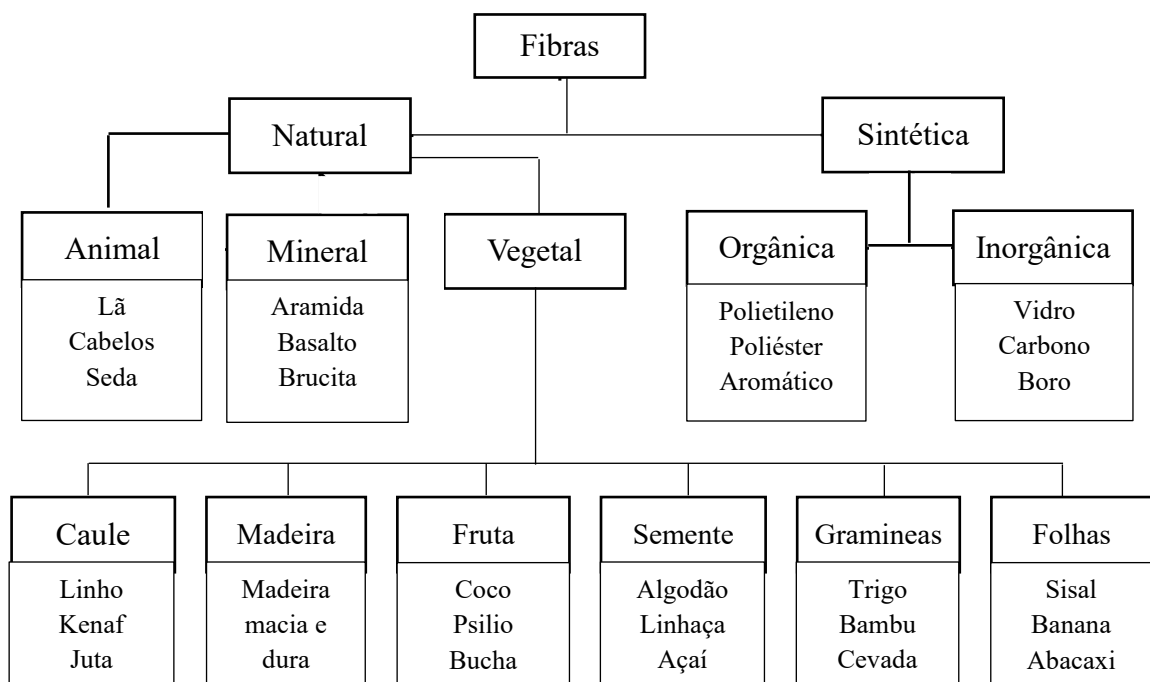
acordo com sua origem em vegetal, mineral e animal, exemplificadas pelo algodão, basalto e seda, respectivamente (Pereira, 2020).

O uso de recursos naturais para desenvolver materiais de alto desempenho tem crescido. As fibras naturais emergiram como uma nova geração de reforços e cargas de enchimento para polímeros. A relação custo benefício, renovabilidade, fácil disponibilidade e biodegradabilidade são algumas das vantagens das fibras naturais. As fibras podem ser obtidas a partir de resíduos gerados por culturas agrícolas, pela criação de animais e até por certos tipos de comércio. A utilização destas fibras pode ajudar a resolver os problemas como: minimizar os descartes inadequados de resíduos e reduzir a poluição ambiental (Islam *et al.*, 2022).

Durante os últimos 20 anos, a obtenção de novos materiais compósitos tornou-se em grande escala a maior linha de pesquisa do campo da Engenharia de Materiais, para aplicações diversas, estruturais e não estruturais. Diante ao abordado, as fibras vegetais foram utilizadas massivamente, principalmente no Brasil, em especial na região Amazônica, pois possui uma ampla qualidade de fibras oriundas da sua diversidade (Oliveira, 2023).

As fibras vegetais, também conhecidas como fibras lignocelulósicas, são classificadas de acordo com a espécie da planta de onde são extraídas (como folhas, caules, entre outras partes). Estas fibras são compostas principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. A interação complexa entre esses componentes confere as fibras vegetais propriedades físicas e químicas únicas, tornando-as importantes para diversas aplicações industriais e tecnológicas (Lazarini, 2020). A Figura 5 mostra as classificações e determinadas origem de algumas fibras.

Figura 5 – Fluxograma da classificação das fibras

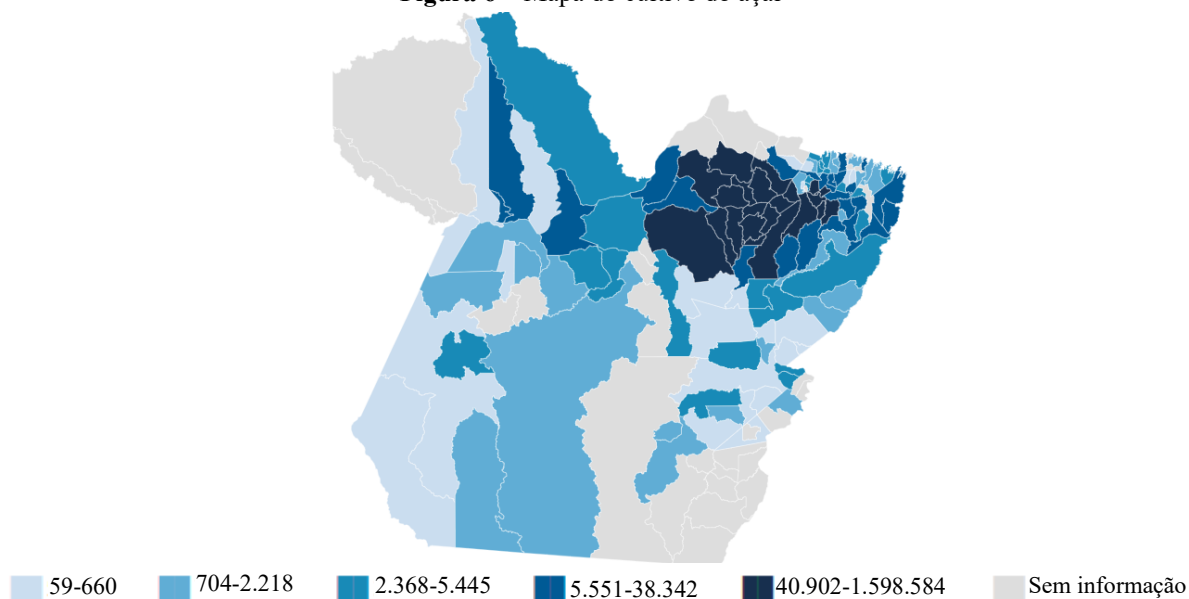


Fonte: Adaptado de Mochane, 2019

2.4 Açaí (*Euterpe oleracea Mart.*)

O açaizeiro é uma palmeira da Amazônia Oriental, nativa do Pará, com a maior ocorrência no estuário do rio Amazonas onde ocupa área de 10.000 km². Os açaizeiros são naturalmente das áreas de várzea do igapó, pois cresce melhor em áreas abertas com abundância de sol para o desenvolvimento dos frutos e em solos bem drenados. No Brasil a área colhida do açaí cresceu quase 72 mil hectares, saindo de 136 mil hectares em 2015 para 208 mil hectares em 2021. Logo, no mesmo período, a produção nacional saltou de 1 milhão de toneladas para 1 milhão e 485 mil toneladas. O valor da produção também cresceu nos últimos anos. Só no estado do Pará, o açaí movimentou, em 2021, mais de 5 bilhões de reais, o que atrai pequenos, médios e grandes produtores (Shaley, 2005; Embrapa, 2023). A Figura 6 apresenta o mapa de cultivo e do valor da produção do açaí no estado do Pará, expressos em mil reais.

Figura 6 – Mapa do cultivo do açaí



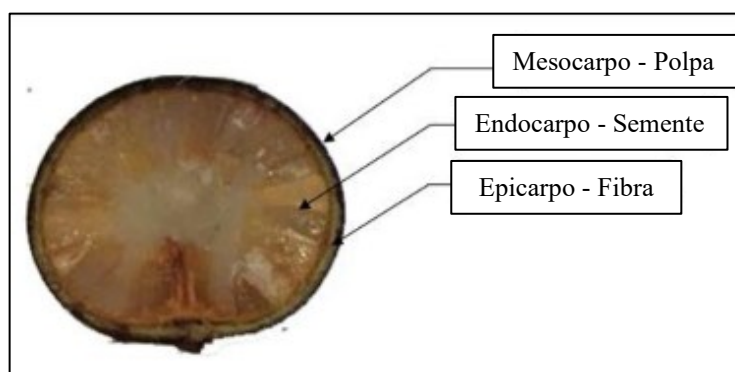
Fonte: IBGE, 2023

O açaí é um dos produtos amazônicos que experimentaram considerável evolução na oferta e, principalmente, na demanda, expandindo-se para o mercado nacional e internacional nas duas últimas décadas. A boa aceitação do produto no mercado se deve às suas características alimentares e funcionais, por conter consideráveis níveis de antocianinas e ácidos graxos insaturados, entre outros atributos diferenciados. Da polpa dos frutos, obtém-se o suco, utilizado como alimento e como componente de suplemento alimentar e cosméticos, principalmente. A produção agrícola e extrativa do açaí reveste-se de importância ambiental, na medida em que, quando realizada de forma racional, pode auxiliar a conservação da Floresta Amazônica. Do ponto de vista social, a atividade é exercida predominantemente por populações

tradicionais e agricultores familiares, sendo, normalmente, uma das principais fontes de renda dessas famílias. Tem sido estimado que as atividades de extração, transporte, comercialização e industrialização de frutos e palmito de açazeiro são responsáveis pela geração de 25 mil empregos diretos e geram anualmente mais de R\$ 40 milhões em receitas (Embrapa, 2022).

Com a intenção de melhorar o entendimento sobre o fruto do açai, analisa-se separadamente as partes constituintes do fruto, sendo eles: o mesocarpo, o epicarpo e o endocarpo como ilustra a Figura 7. O mesocarpo a parte do fruto de onde se extrai a polpa, o epicarpo são as fibras que se constituem por uma fina película conhecida por casca, por fim, o endocarpo corresponde a semente (Souza, 2019).

Figura 7 – Divisões do fruto do açai



Fonte: Souza, 2019

Após retirarem a polpa do açai, surge uma problemática comum nos municípios paraenses, com destaque para a capital do Estado, Belém, que não conta com instrumental que regulamenta o segmento de batedores de açai, no tocante à enorme geração de caroços abandonados e sem destinação correta, nas esquinas do estado do Pará (Figueiredo, 2023).

2.4.1 Propriedades e características das fibras de açai

As fibras naturais têm emergido uma alternativa promissora para o reforço de materiais compósitos poliméricos. Fibras naturais, como juta, sisal, algodão, bambu, açai e muitas outras, possuem propriedades físicas e mecânicas únicas que as tornam atraentes para cargas em materiais poliméricos. Estas fibras são conhecidas por serem leves, biodegradáveis e renováveis, características que estão em sintonia com a crescente demanda por soluções amigáveis ao meio ambiente na indústria (Galvão Neto, 2023).

As fibras de açai atuam como fase dispersa em compósitos poliméricos de matriz termoplástica. Contudo, seu desenvolvimento não alcançou o potencial esperado, pois há uma necessidade significativa de avanços no uso das fibras. Assim, há grandes oportunidades para

pesquisas científico-tecnológicas que explorem a viabilidade desses compósitos em diferentes aplicações (Silva, 2022).

A fibra oriunda do caroço de açaí é uma fibra natural de origem vegetal. Para estas fibras se utiliza o termo fibras lignocelulósicas. A estrutura da fibra lignocelulósicas apresentam vantagens em relação às fibras sintéticas, pois são de fonte natural abundante, renovável, baixo custo, baixa densidade, ótimas propriedades específicas tais como resistência e módulo de elasticidade, menor abrasividade e biodegradáveis (Lima Júnior, 2007).

2.5 Método de fabricação manual (*hand lay up*)

Há uma variação de processos que podem ser utilizados para a fabricação de materiais compósitos. Cada um evidencia benefícios econômicos de produção e desempenho a qual o material deve alcançar na etapa do projeto desejável. Para a escolha do processo mais adequado, quatro fatores devem ser considerados: o desenho (concepção), tipo de matriz, estrutura de carga e possíveis processos (Merlini, 2021).

Os processos de fabricação podem ser divididos em processos de molde aberto e processos de molde fechados. A diferença está na qualidade de acabamento nas superfícies e na quantidade de moldes necessários para a conformação da peça. Exemplos de processos que utilizam molde aberto: hand lay-up, spray-up, enrolamento filamental e a infusão. Exemplos de fabricação de molde fechado: moldagem por prensagem e a moldagem por transferência de matriz (Levy Neto; Pardini, 2016).

O Hand Lay-up é um dos processos de fabricação mais simples e antigos adotados pelas indústrias. Antes da etapa de fabricação, o molde precisa ser devidamente preparado e necessita-se retirar as poeiras acumuladas e os detritos. O responsável pelo processo deve utilizar produtos específicos para o processo de confecção (Sercel, 2018).

2.6 Caracterização dos compósitos

A caracterização de materiais compósitos é um processo fundamental para a avaliação de suas propriedades físicas, resistência à chama e mecânicas de tração e flexão sendo essencial para determinar a adequação desses materiais para aplicações específicas.

2.6.1 Ensaio físicos

As propriedades físicas são determinadas por meio da absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA), os dados podem influenciar diretamente nas propriedades dos compósitos, como: estabilidade térmica, estabilidade

dimensional, peso específico, propriedades mecânicas, durabilidade e outras propriedades de grande influência para os materiais compósitos que serão utilizados (Costa, 2016).

Diante do abordado, determina-se a massa seca (M_S), massa úmida (M_U) e a massa imersa (M_I) obtidas do material desejado, seguindo as normas ASTM D792, ASTM D2734 e ASTM D570 para os cálculos das propriedades físicas, por meio das Equações 1-3. Onde o valor de ρ_{H_2O} representa a densidade da água de aproximadamente 1 g/cm^3

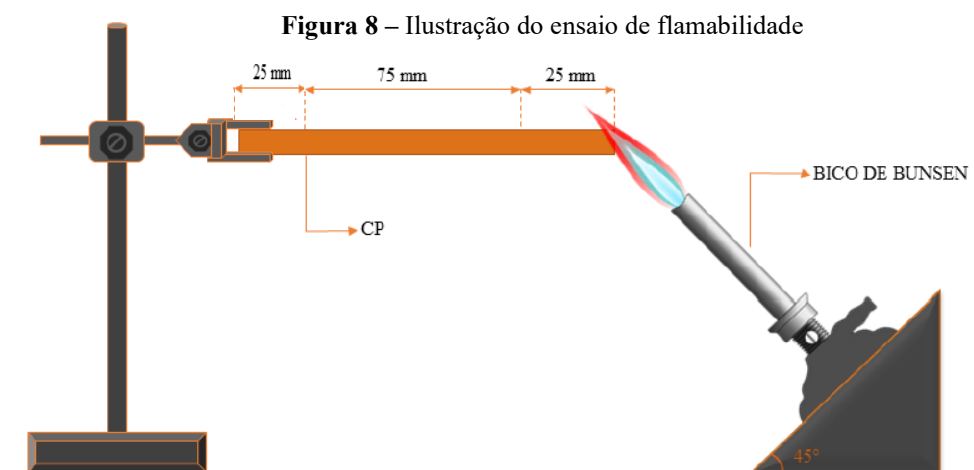
$$AA (\%) = \frac{M_U - M_S}{M_S} 100 (\%) \quad (1)$$

$$PA (\%) = \frac{M_U - M_S}{M_U - M_I} 100 (\%) \quad (2)$$

$$MEA (\%) = \frac{M_S}{M_U - M_I} \rho_{H_2O} (\text{g/cm}^3) \quad (3)$$

2.6.2 Ensaio de flamabilidade

O ensaio de flamabilidade segue a norma ASTM D635, este método de teste abrange um procedimento de triagem laboratorial para comparar a taxa linear relativa de queima ou extensão e tempo de queima, ou ambos, de plásticos na forma de barras, moldadas ou cortadas de folhas, chapas ou painéis, e testados na posição horizontal, como ilustra a Figura 8.



Fonte: Adaptado de Gomes, 2023

Após os dados obtidos do ensaio, é utilizada a Equação 4 para calcular a taxa de propagação de chama. O L é o comprimento útil utilizado no corpo de prova em milímetros e t é o tempo em segundos em que a chama leva para percorrer o comprimento útil do compósito.

$$\text{TAXA} = \frac{L}{t} \text{ (mm/min)} \quad (4)$$

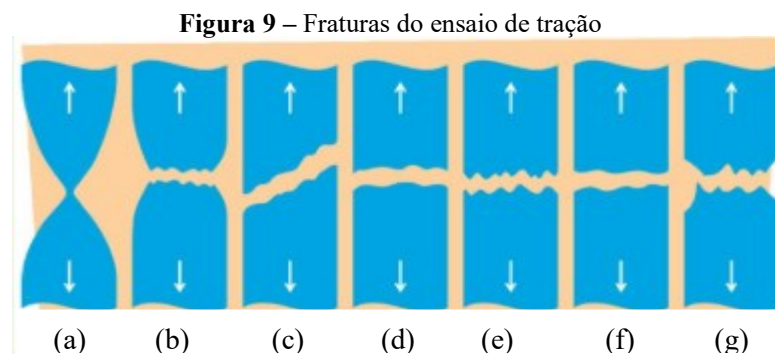
Callister e Rethwisch (2020) enfatizam a importância do ensaio de inflamabilidade dos materiais, especialmente quando se aplica aos materiais poliméricos e compósitos de matriz polimérica em virtude da maior parte ser constituída por polímeros. O polímero puro é inflamável e, diante disso, existe grande preocupação para diminuir a inflamabilidade desses materiais puros.

2.6.3 Ensaio de tração

Um dos principais ensaios mecânicos utilizados para estudo das propriedades dos materiais é o teste de tração. O teste consiste em submeter um corpo de prova com formato e dimensões padronizadas a uma carga gradativa de tração uniaxial nas suas extremidades que tende a esticá-lo. Os resultados do ensaio são registrados na forma de um gráfico que relaciona a tensão aplicada em função da deformação sofrida pelo corpo de prova (Garcia *et al.*, 2013).

De acordo com Callister e Rethwisch (2020) a zona elástica é quando o material sofre deformação enquanto submetido a esforço, e quando esse cessa, o material volta ao seu estado inicial. Já na zona plástica do diagrama, quando o esforço cessa o material se deforma e não retorna ao seu estado inicial, ou seja, a deformação na peça é permanente. Neste, tem-se a verificação da tensão máxima suportada para a peça. Após, ocorre o ponto de ruptura, onde a peça se rompe.

De acordo com Marques (2022) as fraturas nos ensaios de tração têm diferentes formas, quando o material é dúctil, é possível prever o momento anterior a ruptura do mesmo, visto que esse apresenta estrangulamento e estiramento do corpo de prova antes de romper como apresentado na Figura 9 (a). Já, quando o material é mais rígido e frágil, não é possível evidenciar a deformação plástica, visto que a ruptura ocorre logo após a seção elástica evidenciado na Figura 9 (b) - 9 (g).

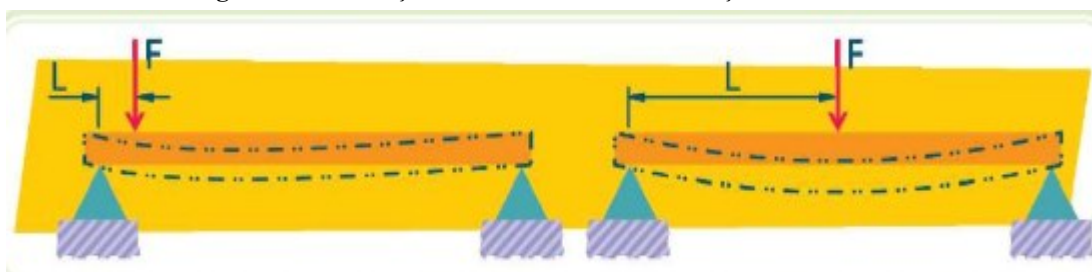


Fonte: Marques, 2022

2.6.4 Ensaio de flexão

No entendimento de Marques (2022), o ensaio de flexão é para quantificar a flecha de deformação que ocorre no corpo de prova. Desse modo, aplica-se uma força (F) sobre a peça, e verifica-se a deformação em distância da posição inicial que ocorre. No entanto, é importante ressaltar que o ponto onde a força é aplicada, interfere no resultado obtido, pois cria-se o momento fletor, o qual é o resultado da aplicação de uma força a uma determinada distância (Figura 10). Nesse caso abordado, quanto maior a distância do apoio ou engaste a que a força for aplicada, maior será o momento fletor ocorrido e assim, maior a flecha de deformação gerada na peça.

Figura 10 – Alteração do momento fletor e alteração das distâncias



Fonte: Marques, 2022

O ensaio mecânico de flexão pode ocorrer em três pontos e é especificado por meio da norma ASTM D790 (2017). Nesse cenário, o corpo de prova é apoiado sobre dois roletes e carregado de maneira crescente por um cutelo, situado na metade da distância entre os apoios. Assim, determina-se as propriedades referentes à flexão de plásticos reforçados e não reforçados, como compósitos com alto módulo de elasticidade, além de materiais isolantes. O cutelo e os apoios precisam ter superfícies cilíndricas com raios geralmente no valor de $5,0 \pm 0,1$ mm ($0,197 \pm 0,004$ pol.), a menos que dimensões alternativas para casos específicos sejam aplicadas.

2.6.5 Análise fractográfica

A utilização de materiais compósitos nos diversos setores industriais eleva a demanda crescente por análises fractográficas, objetivando o melhor entendimento em relação aos mecanismos de danos ou falhas em componentes fabricados com diferentes materiais. A fractografia é o estudo das morfologias da superfície da fratura e fornece uma visão atraente para os mecanismos encontrados, onde podem ser usados para aperfeiçoar projetos futuros dos materiais (Greenhalgh, 2009).

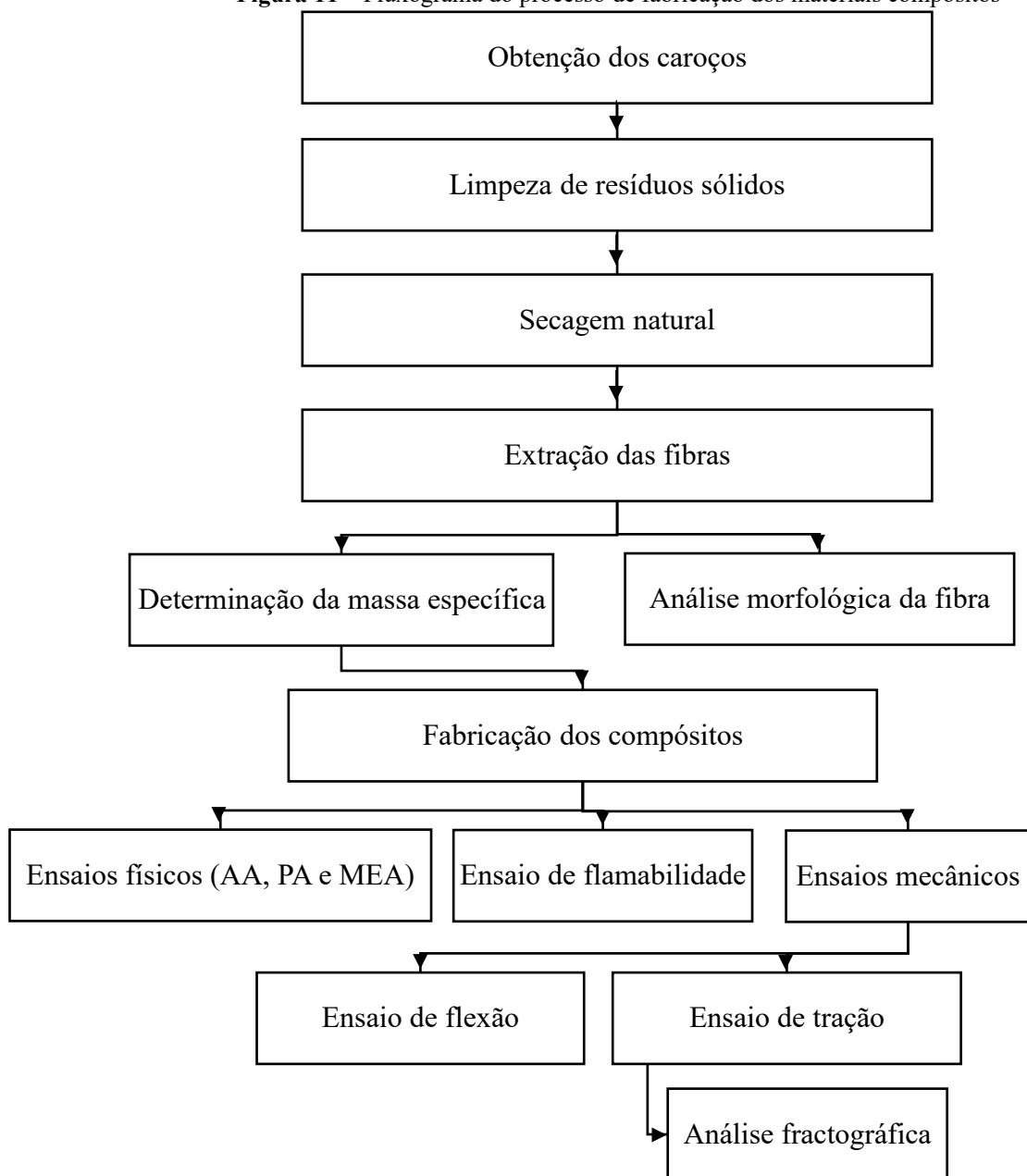
Os mecanismos de falha que podem ocorrer durante a fratura de um compósito fibrado são: ruptura das fibras, deformação e o trincamento da matriz, descolamento das fibras, deslizamento interfacial, seguido da ruptura das fibras (*pull out*), o efeito denominado de pontes de fibras (*fiber bridging*), onde as superfícies de uma trinca são interligadas por fibras. Vários destes mecanismos podem atuar simultaneamente durante o processo de fratura de um compósito (Costa, 2016).

Há 3 (três) operações básicas para análise fractográfica: (1) classificação do tipo de falha, (2) mapeamento da trinca e (3) análise química da superfície de fratura. A primeira classificação, envolvendo o tipo de falha, conduz a duas definições: falhas interlaminares e translaminares. Fraturas interlaminares ou delaminações são melhores analisadas pela direção de propagação da trinca utilizando-se microscopia óptica estereoscópica, enquanto que as fraturas translaminares, onde ocorre o rompimento das fibras, são melhores analisadas por microscopia eletrônica de varredura (Costa, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os compósitos da fibra do caroço de açaí foram confeccionados no Laboratório de Catálise (LABCAT) da Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará (UFPA). A Figura 11 apresenta um fluxograma com as principais etapas do processo da fabricação dos compósitos que consistiu na obtenção dos caroços de açaí, a extração manual das fibras dos caroços, nas quais foram realizadas suas referidas caracterizações e posteriormente a fabricação dos compósitos nas diferentes frações mássicas de fibra, para a realização dos respectivos ensaios seguintes.

Figura 11 – Fluxograma do processo de fabricação dos materiais compósitos



Fonte: Autora, 2025

3.1 Materiais

3.1.1 Matriz polimérica

A matriz polimérica utilizada neste trabalho constituiu-se de uma resina poliéster insaturada ortoftálica cristal de nome Fortcom 6100, com densidade de aproximadamente $1,10 \text{ g/cm}^3 - 1,20 \text{ g/cm}^3$, segundo a ficha do fabricante. O procedimento deu início da polimerização utilizando o Butanox M-50 – peróxido de metil etil cetona - (MEK-P) na proporção de 1% (v/v). A Tabela 2 mostra algumas propriedades da resina poliéster insaturada ortoftálica cristal.

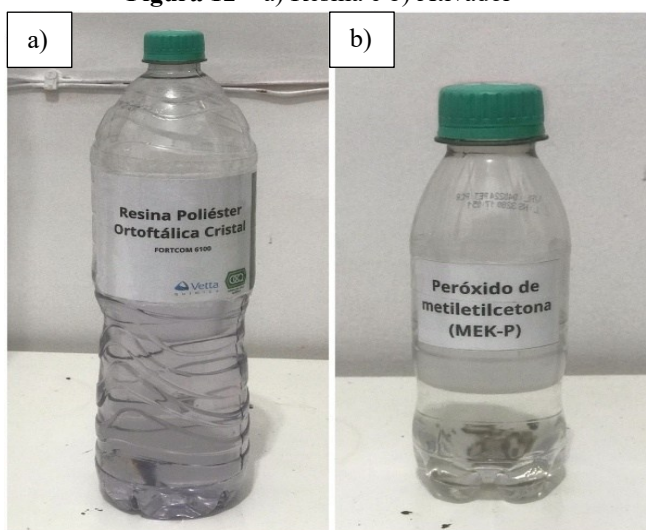
Tabela 2 – Propriedades, unidades e valores específicos da resina poliéster insaturada ortoftálica

Propriedades	Valores	Unidades
Aspecto	Cristal/incolor	25 °C
Viscosidade	1100-1600	cP
Densidade	1,10 – 1,12	g/cm^3
Tempo de gel	09 - 14	Minutos

Fonte: Adaptado de Oswaldo Cruz Química, 2024

A Figura 12 mostra a resina poliéster insaturada ortoftálica cristal e o ativador BUTANOX M-50 – peróxido de metil etil cetona - (MEK-P), usados no trabalho.

Figura 12 – a) Resina e b) Ativador



Fonte: Autora, 2025

3.1.2 Fibras do açaí

Os caroços de açaí utilizados neste trabalho, foram coletados nos meses de agosto, setembro e outubro de 2023 de uma feira na região metropolitana de Belém-PA. O fruto é proveniente da região das ilhas das Onças, localizada nas proximidades de Belém-PA. A Figura 13, expõe os caroços.

Figura 13 - Caroços brutos na feira comercial



Fonte: Autora, 2025

3.2 Métodos

Posterior a coleta dos caroços de açaí, iniciou-se a limpeza para retirar os resíduos sólidos do fruto. A Figura 14-a) apresenta os caroços de açaí em água e a 14-b) os caroços de açaí limpos.

Figura 14 - a) caroços imersos em água e b) caroços de açaí limpos



Fonte: Autora, 2025

Os caroços foram submetidos primeiro a água corrente e foram colocados em um recipiente com água durante 1h como ilustra a Figura 14-a), em seguida, foram retirados e novamente lavados com água corrente 5 vezes para sair toda a “borra” do açaí. Em seguida, já limpos como mostra a Figura 14-b) foram colocados em recipientes grandes e posto em um lugar arejado para a secagem natural.

3.2.1 Extração da fibra

O processo de extração deu início quando os caroços de açaí estavam todos secos e limpos. Logo, as fibras foram extraídas manualmente. A Figura 15 ilustra as fibras extraídas do caroço do açaí.

Figura 15 – Fibras extraídas do caroço do açaí



Fonte: Autora, 2025

3.2.1.1 Massa específica da fibra

A massa específica aparente das fibras de açaí foi determinada pelo método do picnômetro. O procedimento deu início com a medição do picnômetro vazio (m_1), do picnômetro + fibras (m_2), do picnômetro + fibras + água destilada (m_3) e contendo apenas água destilada (m_4). Por conseguinte, os valores dos dados obtidos da massa específica aparente foram aplicados na Equação 5. Onde o ρ_{H_2O} é a densidade da água destilada que representa aproximadamente a temperatura no ensaio.

$$ME_A = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 + m_2) - (m_1 + m_3)} * \rho_{H_2O} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (5)$$

3.2.1.2 Morfologia da fibra

A análise de caracterização morfológica da fibra de açaí foi realizada em um Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN MIRA3 no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME) que faz parte do conjunto de Laboratórios Institucionais do Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém-PA ilustrado na Figura 16. Utilizou-se a máquina de revestimento por pulverização catódica EMITECH K500 para realizar a metalização com ouro por 3 minutos na fibra natural estudada, a qual foi submetida a emissão de elétrons secundários com uma voltagem de 15 kV.

Figura 16 – Análise morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)



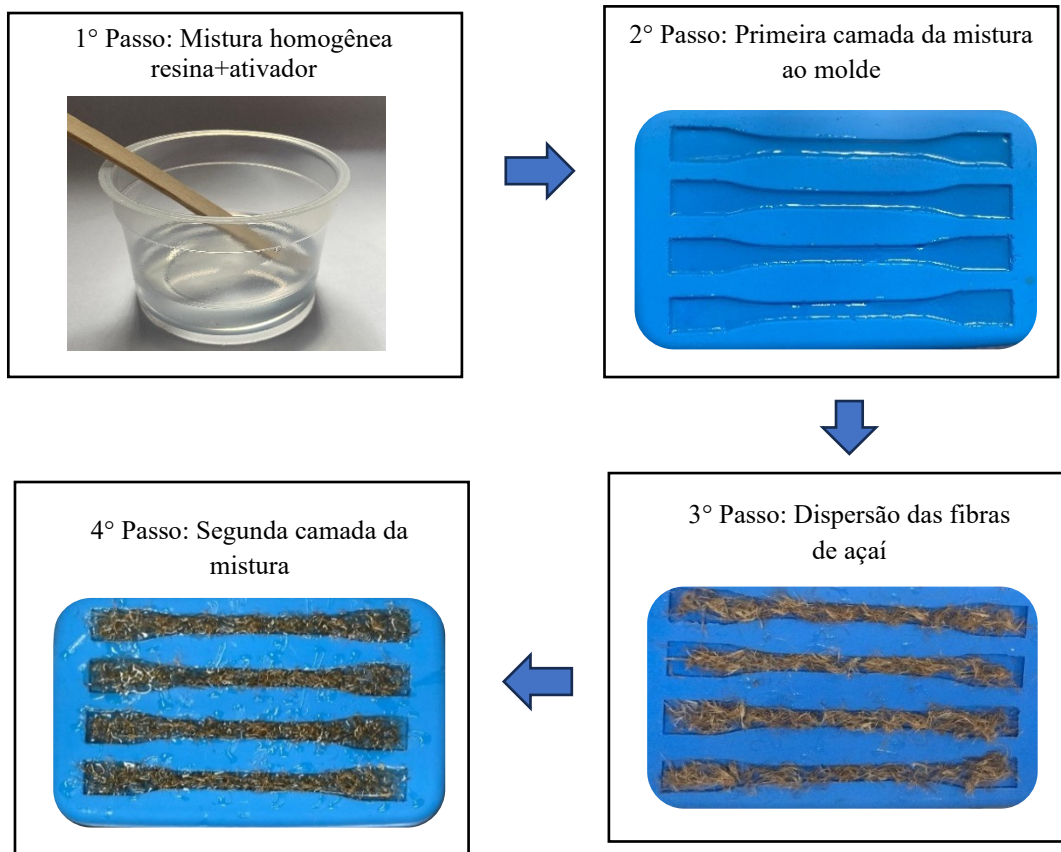
Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica, 2017

3.2.2 Fabricação dos compósitos

A fabricação foi realizada com os equipamentos disponibilizados pelos laboratórios de Catálise (LABCAT) e pelo de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS), que fazem parte dos laboratórios de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Logo, dispersou-se as fibras em um vidro relógio e foram colocadas na estufa por 30 minutos a 100 °C e deu início ao processo, a Figura 17 apresenta um fluxograma dos principais processos utilizados na confecção dos compósitos com 1%, 2% e 3% de fibra em massa e a matriz de comparação.

Figura 17 – Fluxograma de fabricação dos compósitos



Fonte: Autora, 2025

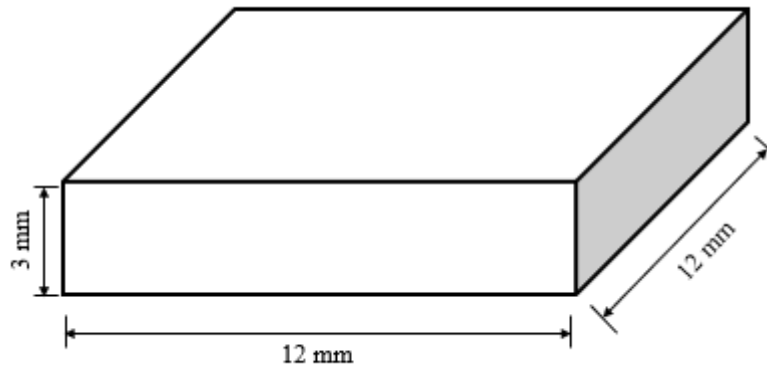
Após a segunda camada da mistura esperou-se atingir o ponto de gel dos corpos de prova para aplicar uma compressão 47,5 N sobre eles durante 25 minutos, em seguida, esperou-se 72h para retirada dos compósitos do molde e realização dos acabamentos superficiais por lixamento e marcações nos corpos de provas para os seus respectivos ensaios.

3.2.3 Ensaios físicos dos compósitos

Para a determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água nos compósitos do trabalho e a matriz de comparação utilizou-se as normas ASTM D792, ASTM D2734 e ASTM D570 respectivamente. Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS) e no Laboratório de Catálise e Biocatálise (LABCAB) da Universidade Federal do Pará.

Nos ensaios físicos, os corpos de prova foram utilizados com as mesmas dimensões de 12 mm por 12 mm. A Figura 18 exhibe as dimensões dos corpos de prova utilizados.

Figura 18 – Dimensões utilizadas nos corpos de prova



Fonte: Autora, 2025

Foram confeccionados cinco corpos de prova para cada fração mássica de fibra. A Figura 19 expõe os corpos de provas utilizados nos ensaios físicos com 1% de fibra de açaí com compressão, 2% de fibra de açaí com compressão e 3% de fibra de açaí com compressão e a matriz plena com compressão.

Figura 19 – Corpos de prova utilizados nos ensaios



Fonte: Autora, 2025

Para a obtenção da massa seca (M_S), os corpos de prova foram colocados em uma estufa e mantidos a 105 °C durante 24 h, após isso, foram submetidos à pesagem em uma balança analítica. Na determinação da massa úmida (M_U), os corpos de provas foram imersos em um recipiente com água destilada e deixados por 24 h e pesados em uma balança analítica. Já para a determinação da massa imersa (M_I) foi utilizado um aparato para os corpos de prova ficarem imersos em água destilada e calcular o peso de cada um como ilustra a Figura 20.

Figura 20 – Aparato para medir a massa imersa

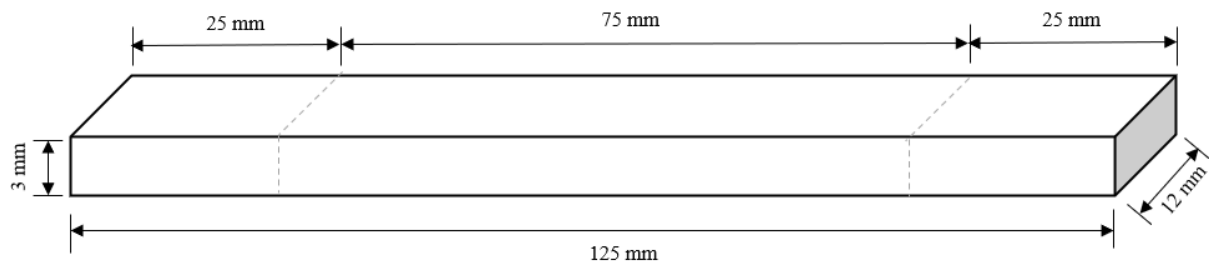


Fonte: Autora, 2025

3.2.4 Ensaio de flamabilidade

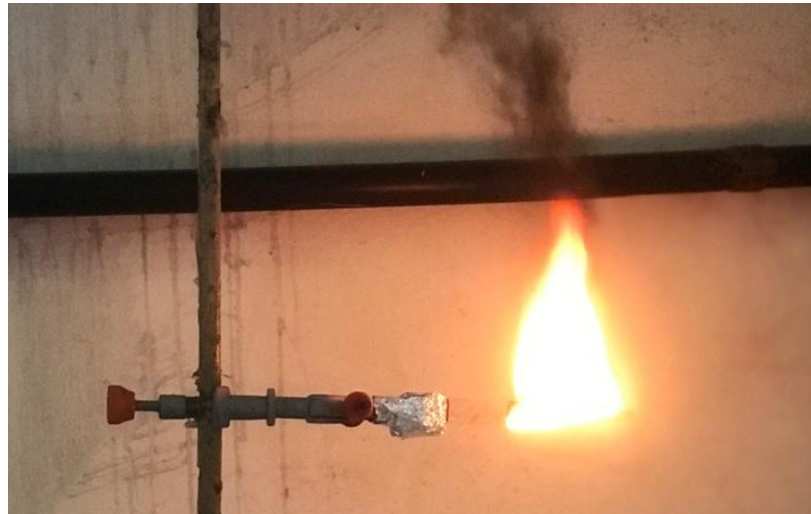
O ensaio de flamabilidade horizontal seguiu os parâmetros da norma ASTM D635 e foi realizado na Usina de Materiais (USIMAT) da Universidade Federal do Pará. Foram confeccionados 5 corpos de prova de cada seção com as dimensões e marcações da Figura 21.

Figura 21 – Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de flamabilidade



Fonte: Autora, 2025

Neste ensaio foi utilizado um bico de Bunsen inclinado a 45° para direcionar a chama ao corpo de prova durante 30 segundos. Após, atingir a marca de 25 mm, o tempo então foi contabilizado até terminar a segunda marca de 75 mm exigida pela norma, para posteriormente fazer os cálculos necessários do ensaio. A Figura 22 exhibe o ensaio sendo realizado.

Figura 22 – Realização do ensaio de flamabilidade

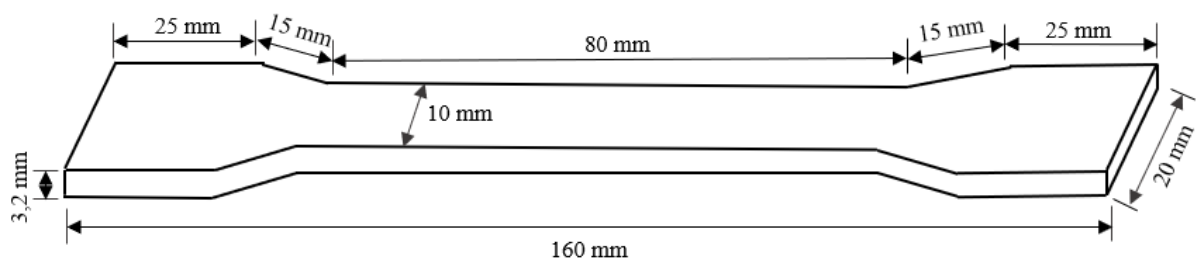
Fonte: Autora, 2025

3.2.5 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos são cruciais para avaliar a resistência e a tensão dos compósitos. Ensaios como tração e flexão são amplamente utilizados. A resistência à tração permite avaliar a capacidade do material de resistência aos esforços de estiramento, enquanto o ensaio de flexão mede a resistência à curvatura, importante em muitas aplicações estruturais. A análise fractográfica, também realizada pelo MEV, auxilia na compreensão dos mecanismos de falha.

3.2.5.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado seguindo a norma ASTM D 638 (2014). Foram confeccionados oito corpos de prova para cada fração mássica de fibra, para garantir um melhor resultado diante ao ensaio abordado, e tiveram marcações na área útil de 80 mm e as dimensões ilustradas na Figura 23.

Figura 23 – Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração

Fonte: Autora, 2025

Os testes foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM) da Universidade Federal do Pará, em um equipamento de ensaio universal KRATOS, modelo IKCL1-USB, juntamente com um computador com o sistema de aquisição dos dados acoplado como mostra a Figura 24, o ensaio foi configurado com célula de carga de 5 kN a uma velocidade de 5 mm/min.

Figura 24 – Máquina modelo KE 2000 MP da marca KRATOS



Fonte: Autora, 2025

No ensaio de materiais compósitos com matriz polimérica, a tensão de resistência à tração (TRT) em MPa pode ser determinada pela Equação 6.

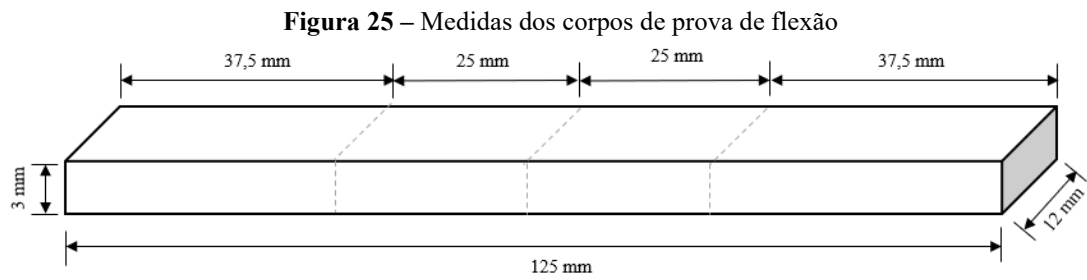
$$TRT = \frac{F}{A} \text{ (MPa)} \quad (6)$$

Sendo F a força aplicada em Newtons (N) e A a área útil da seção transversal do corpo de prova em mm².

3.2.5.2 Ensaio de flexão

O ensaio mecânico de flexão foi realizado no Laboratório de Engenharia de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí. Os testes executados nos compósitos seguiram a norma ASTM D790. Utilizou-se um equipamento da marca EMIC, modelo DL 500, na velocidade de 2 mm/min e com a célula de carga de 5 kN.

Para o ensaio, foram fabricados 8 corpos de prova com o processo e as frações mássicas correspondentes. As dimensões utilizadas estão ilustradas na Figura 25.



Fonte: Autora, 2025

Em um ensaio de flexão em três pontos, a tensão máxima (tensão de resistência à flexão) na superfície do corpo de prova, pode ser calculada pela Equação 7.

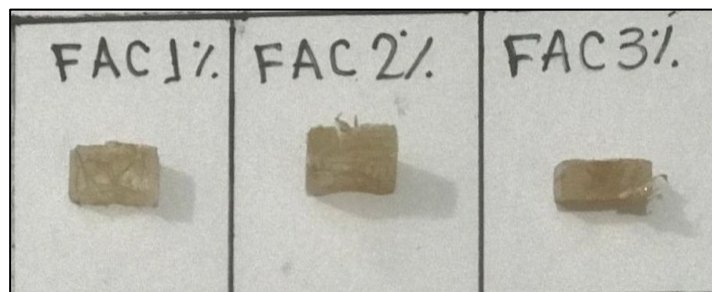
$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (7)$$

A tensão de flexão, representada por σ , é medido em MPa e corresponde à resistência máxima do material. A força aplicada no ponto central do corpo de prova é indicado por F, expresso em Newtons (N). O L representa o vão entre as vigas por milímetros (mm), o b é a largura de cada seção transversal da amostra também em mm e por fim o h que representa a altura as seção transversal do ponto em mm.

3.2.5.3 Análise fractográfica

O ensaio visa analisar os mecanismos de falha da superfície da fratura que ocorreram devido à possíveis imperfeições geradas no processo de fabricação, a partir de cada série confeccionada, para isso coletou-se os corpos de prova após os ensaios mecânicos realizados. A Figura 26 mostra as amostras da FAC (Fibra de Açaí com Compressão) com as frações mássicas de 1%, 2% e 3% que foram analisadas.

Figura 26 – Amostras para a análises fractográficas



Fonte: Autora, 2025

As análises das fraturas dos compósitos foram efetivadas na máquina *Hitachi Tabletop Microscope* TM3000 do Laboratório de Microscopia (LABMIC), da Universidade Federal do Pará.

3.3 Análise estatística

Os dados obtidos dos ensaios físicos (AA, PA e MEA), de flamabilidade e mecânicos (tração e flexão) foram submetidos à análise de variância de fator único (ANOVA). A análise foi realizada utilizando o software Statistica 10, com um nível de confiança de 95%. O valor de p foi utilizado para determinar a rejeição ou não da hipótese nula (H_0), indicando se há diferenças significativas entre as médias.

Valores de p menores que 0,05 indicam que a hipótese nula foi rejeitada, sugerindo que pelo menos uma das médias apresenta diferença significativa em relação às outras. Uma vez que a hipótese nula é rejeitada ($p < 0,05$), aplica-se o teste de Tukey (TSD) para realizar comparações entre as médias e identificar quais dos grupos apresentam diferenças entre si.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos com a fibra de açai. A determinação da massa específica das fibras permitiu avaliar sua densidade, fator crucial para o desempenho do compósito. A caracterização morfológica, feita por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), forneceu detalhes sobre a superfície da fibra. Posto isso, seguiu com a fabricação dos compósitos para realizar os ensaios físicos que abordou as propriedades de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente revelando a influência das fibras na matriz polimérica. Já os ensaios mecânicos de tração e flexão permitiram a avaliação da resistência da rigidez dos compósitos, determinando a influência da adição de fibras no material. Por fim, uma análise fractográfica permitiu entender os mecanismos de falha, como trincas e descolamento da fibra, conectando esses resultados às propriedades mecânicas de tração observadas.

4.1 Massa específica da fibra

O procedimento para determinar a massa específica aparente das fibras foi conduzido pelo método do picnômetro. Calculou-se com base na sessão 3 (Equação 5) e o procedimento ocorreu em triplicata para segurança e precisão do resultado. A Tabela 3 mostra a comparação do resultado do trabalho com outras literaturas.

Tabela 3 – Comparação da massa específica da fibra com a literatura

Massa específica da fibra de açai (g/cm³)	Referência
1,109 (± 0,01)	Este trabalho
1,01 (± 0,01)	Oliveira, 2019
1,27 (± 0,12)	Santos <i>et al</i> , 2023

Fonte: Autora, 2025

A massa específica da fibra de açai está de acordo com as literaturas pesquisadas de Oliveira (2019) e Santos *et al* (2023), confirmando a coerência dos resultados obtidos.

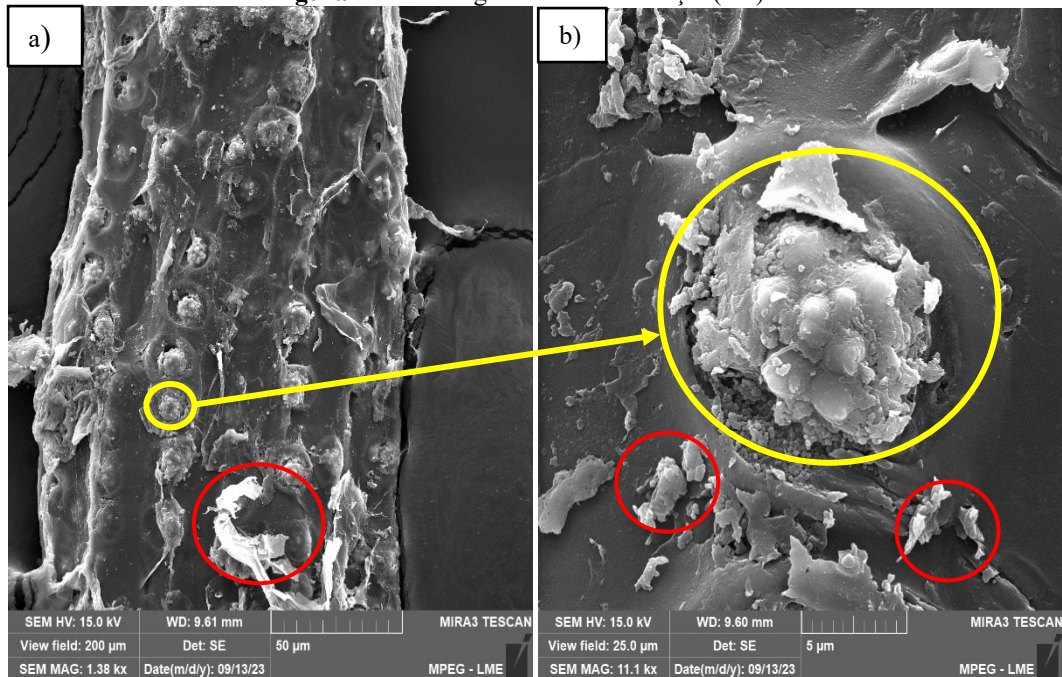
Segundo os estudos de Ashby e Jones (2012), materiais com baixa densidade são mais leves, o que os torna especialmente valorizados em aplicações industriais que buscam reduzir o peso sem comprometer a eficiência. Os compósitos, que combinam materiais de diferentes densidades, podem ser projetados para equilibrar características como leveza e resistência.

Além disso, materiais de baixa densidade não só reduzem o peso, mas também contribuem para a diminuição do consumo de energia, tornando-os uma escolha estratégica em setores que priorizam a eficiência energética.

4.2 Caracterização morfológica da fibra

A Figura 27 apresenta a micrografia da fibra de açaí realizada por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Figura 27 – Micrografia da fibra de açaí (a-b)



Fonte: Autora, 2025

Na análise morfológica das fibras do açaí, observou-se uma superfície rugosa e irregular, com a presença de ceras e outras organizações naturais, conforme destacado pelo círculo vermelho, características típicas das fibras não submetidas a tratamentos térmicos ou químicos. Esses resultados estão alinhados com Santos (2023), que descreve deformações irregulares e sem formas definidas das fibras de açaí.

De maneira geral, determinadas fibras vegetais tendem a apresentar superfícies rugosas com saliências enriquecidas em silício em áreas específicas, o que pode estar relacionado às propriedades de reforço em compósitos, além de contribuir para a dispersão das propriedades mecânicas (Leal Neta, 2015).

4.3 Ensaios físicos dos compósitos

A Tabela 4 exibe os ensaios físicos de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) dos compósitos com fibras de açaí em comparação a matriz plena.

Tabela 4 – Ensaios físicos (AA, PA e MEA)

Fibras/Proporção	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)
Matriz Plena	1,672 (± 0,792)	1,991 (± 0,925)	1,192 (± 0,017)
1% Fibra de açaí	2,041 (± 0,510)	2,362 (± 0,530)	1,162 (± 0,048)
2% Fibra de açaí	2,706 (± 0,221)	3,107 (± 0,227)	1,145 (± 0,012)
3% Fibra de açaí	2,893 (± 0,471)	3,500 (± 0,545)	1,208 (± 0,014)

Fonte: Autora, 2025

De acordo com a Tabela 4, notou-se um aumento na AA e PA após incremento das fibras nos compósitos, isso pode estar relacionado diretamente com o alto grau hidrofílico presente em fibras vegetais (Costa, 2016). Em contrapartida, a massa específica aparente (MEA) não apresentou um comportamento linear em relação ao aumento do percentual de fibras. No entanto, ao considerar os desvios padrão em termos de valores absolutos, pode-se concluir que a inserção de fibra não provocou alterações na massa específica dos compósitos. Diante ao abordado, os resultados de massa específica aparente estão de acordo com a regra da mistura, onde cada fase que constitui o compósito contribui com as propriedades efetivas do material, pois a diferença entre os materiais foi mínima (Callister; Rethwisch, 2020).

A análise estatística dos ensaios físicos de AA, PA e MEA revelou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre a matriz plena (0% de fibra) e as frações de fibra, sendo necessária a aplicação do teste Tukey (par a par). Com isso, os resultados demonstraram que a adição de fibras de açaí influenciou significativamente as propriedades físicas do material quando a fração de fibra atinge 3%, com $p = 0,020351$ para AA, $p = 0,011484$ para PA e $p = 0,040659$ para MEA. Para as frações intermediárias (1% e 2%), as diferenças observadas em relação à matriz plena não foram estatisticamente significativas, indicando que apenas a maior proporção de fibras promove alterações perceptíveis nas propriedades analisadas.

A inserção de 3% de fibras aumenta a capacidade de absorção de água do material, possivelmente devido à natureza hidrofílica das fibras de açaí. Além disso, o aumento da fração

mássica pode gerar vazios na matriz, elevando a porosidade do material. Por fim, a redução da massa específica aparente pode estar associada à menor densidade das fibras de açaí em comparação com a matriz polimérica, resultando em um material menos denso (Costa, 2016).

4.4 Ensaio de flamabilidade

A Tabela 5 apresenta os dados obtidos no ensaio de flamabilidade dos compósitos e da matriz. A redução (%) de queima foi calculada em relação à taxa de queima da matriz plena.

Tabela 5 - Dados do ensaio de flamabilidade e a redução em comparação com a matriz

Fibras/Proporção	Taxa de queima (mm/min)	Redução (%)
Matriz Plena	34,213 (\pm 0,572)	-
1% Fibra de açaí	33,860 (\pm 1,986)	1,031%
2% Fibra de açaí	29,666 (\pm 0,772)	13,290%
3% Fibra de açaí	23,883 (\pm 0,754)	30,193%

Fonte: Autora, 2025

Na Tabela 5, observa-se que a matriz plena obteve o maior valor de taxa de queima perante aos compósitos. Quanto maior a fração mássica da fibra de açaí, menor a taxa de queima, pois a fibra agiu como retardante de chama no compósito. Sendo assim, o compósito com 3% de fibra de açaí obteve a maior redução de queima em relação a matriz.

A celulose e a hemicelulose presente no caroço de açaí, são componentes predominantes e desempenham papéis importantes quanto à taxa de queima, visto que, o processo de decomposição térmica na ausência de oxigênio, é ideal para transformar biomassa em biocombustíveis (Nunes, 2023). Devido à presença de grupos hidroxila fenólicos na lignina, ela é capaz de neutralizar os efeitos dos radicais livres gerados durante a combustão de materiais. Além disso, sua estrutura aromática e a diversidade de grupos funcionais fazem da lignina uma excelente candidata como agente de carbonização. Quando incorporada a uma matriz polimérica e submetida a altas temperaturas, a lignina promove a formação de carbono, contribuindo para a proteção térmica e a resistência à combustão (Guo *et al*, 2020). A presença lignina na fibra de açaí, evidencia a reticulação da lignina, no qual, pode ter desenvolvido o comportamento como retardante de chama (Santos, 2022).

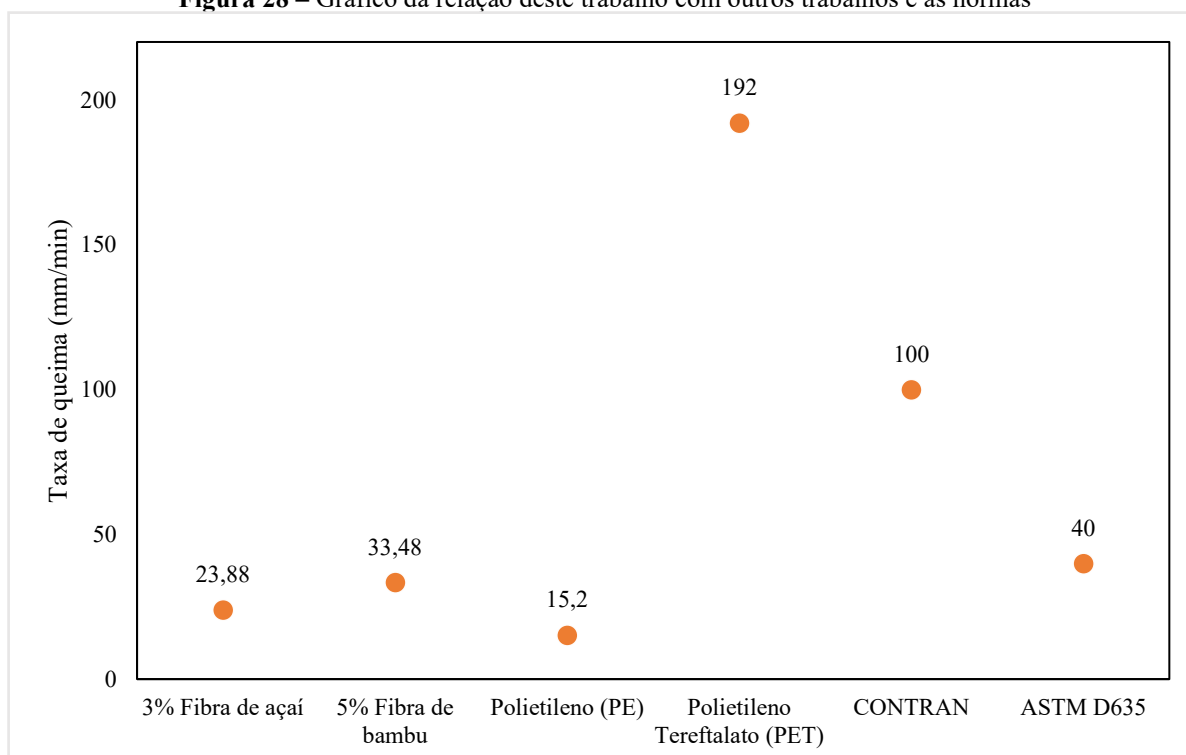
A análise de variância (ANOVA) indicou que há diferenças estatisticamente significativas entre os grupos analisados com $p < 0,05$. Esse resultado justifica a aplicação do teste de Tukey HSD para identificar quais frações de fibra apresentaram diferenças relevantes.

Com base no teste de Tukey, constatou-se que a matriz plena (0% de fibra) apresentou diferenças significativas em relação às frações de 2% de fibra ($p = 0,001675$) e 3% de fibra ($p = 0,000205$). Esses resultados indicam que a introdução de fibras na matriz altera as propriedades relacionadas à flamabilidade do material.

Além disso, diferenças foram observadas entre as frações de 1% e 2% ($p = 0,004542$), 1% e 3% ($p = 0,000205$) e 2% e 3% ($p = 0,000398$), indicando que as variações na quantidade de fibra podem influenciar o comportamento do material.

A Figura 28 expõe o gráfico da relação do compósito de matriz polimérica com a fibra de açaí do presente trabalho (fração mássica de 3%), comparado com o compósito de 5% de Fibra de bambu (Lima, 2022), limite da norma ASTM D635, Polietileno (PE) ASTM D635, Polietileno Tereftalato (PET) ASTM D635 e o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN).

Figura 28 – Gráfico da relação deste trabalho com outros trabalhos e as normas



Fonte: Autora, 2025

Ao comparar o compósito com 3% de fibra de açaí com o compósito contendo 5% de fibra de bambu, observa-se que o compósito com fibra de açaí apresenta melhor desempenho no retardo da chama em relação ao de fibra de bambu em matriz polimérica.

Ademais, a norma ASTM D635 estipula que a amostra não deve ultrapassar uma velocidade de propagação de chama superior a 40 mm/min. Diante disso, os dados de taxa de queima deste trabalho obtiveram os menores valores de taxa estão de acordo com os parâmetro estabelecido pela norma. O compósito com 3% de fibra de açaí obteve a redução de 40,29% em relação a norma ASTM D635.

Quando comparado ao CONTRAN, os valores da taxa de propagação dos compósitos foram menores que o limite exigido pela norma de até 100 mm/min, padrão nacional estabelecido para revestimentos automotivos. Desse modo, o compósito com 3% de fibra apresentou uma redução de 76,11%.

4.5 Ensaios mecânicos

4.5.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração, seguiu a norma ASTM D638, para a matriz plena e os compósitos de 1%, 2% e 3% de fibra de açaí. A Tabela 6 apresenta os dados obtidos do limite de resistência no ensaio mecânico.

Tabela 6 – Dados do limite de resistência dos compósitos produzidos

Composição	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
Matriz Plena	37,89 (\pm 2,83)	15,66 (\pm 3,39)	0,33 (\pm 0,03)
1% Fibra de açaí	17,28 (\pm 1,83)	6,30 (\pm 0,71)	0,24 (\pm 0,03)
2% Fibra de açaí	17,87 (\pm 2,46)	4,94 (\pm 2,82)	0,22 (\pm 0,13)
3% Fibra de açaí	19,02 (\pm 1,01)	5,02 (\pm 2,59)	0,22 (\pm 0,01)

Fonte: Autora, 2025

Na Tabela 6, observa-se que a matriz plena obteve um resultado superior aos compósitos com fibras no Limite de Resistência à Tração (LRT). Assim, as fibras utilizadas na confecção dos compósitos do trabalho podem ser classificadas como carga de enchimento. O Alongamento e o Módulo de elasticidade diminuíram com a inserção de fibra na matriz, visto que, a transferência de tensões entre matriz e fibras podem influenciar diretamente no material. De modo geral, os materiais compósitos são materiais multifásicos, devido apresentarem

propriedades de ambas fases que se constituem em matriz e carga, a qual pode atuar como reforço ou enchimento (Callister; Rethwisch, 2020).

Nota-se que com o aumento da fração mássica da fibra natural na composição do compósito, ocorre conseqüentemente a diminuição no valor da tensão máxima (MPa). Acredita-se que este fenômeno pode estar relacionado com o direcionamento da fibra de açaí, visto que, a fibra não tem apenas uma direção. Essa característica aumenta os pontos de concentração de tensão e reduz a resistência mecânica de tração. Quanto maior a fração volumétrica da fibra, mais difícil a distribuição homogênea das mesmas pela matriz polimérica, podendo interferir na transferência de tensão da matriz para a carga fibrosa quando o material for solicitado no ensaio de tração (Wearn, 2020).

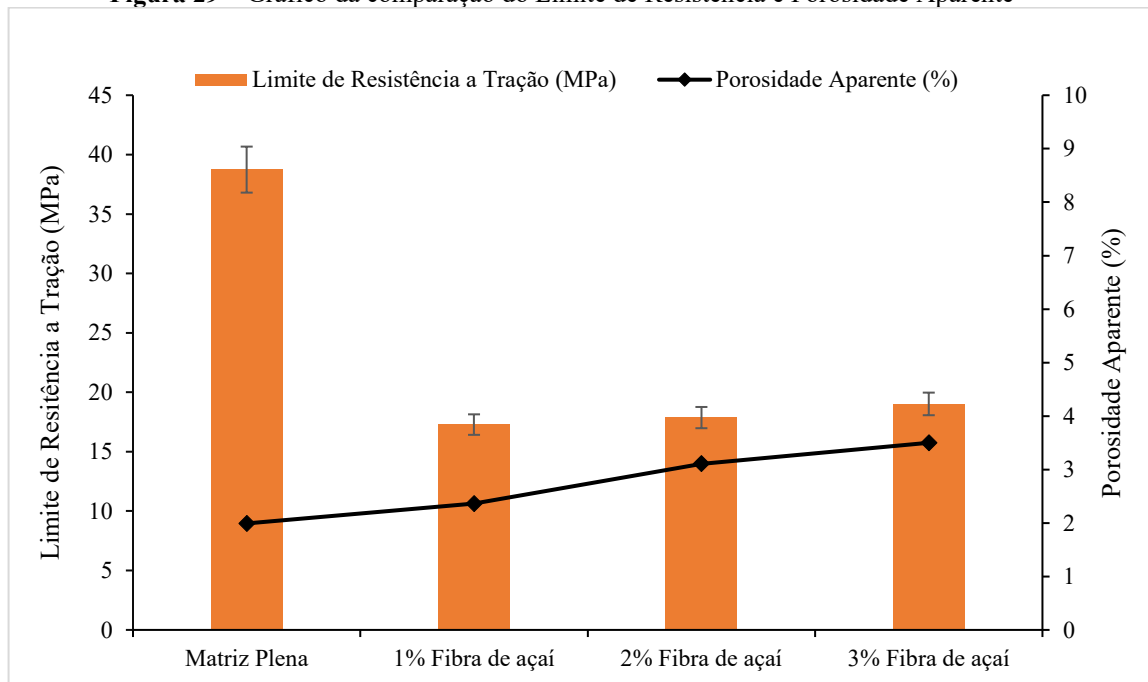
Perante ao exposto, presume-se que os materiais compósitos com fibras vegetais sejam constantemente procurados por sua natureza ecológica e sustentável, pois a crescente utilização desses materiais no setor industrial é principalmente, por sua baixa densidade e baixo custo, além de que são oriundas de fontes renováveis (Souza, 2020).

Com base na ANOVA a probabilidade de significância encontrada foi de $p = 0,000$ indicando que $p < 0,05$ para todas as iterações da matriz plena com as frações de fibra. Isso revela uma diferença estatisticamente significativa entre a matriz plena e as frações de fibras analisadas. Com esse resultado, foi possível realizar o teste de Tukey HSD para comparações par a par.

Para todas as comparações que envolvem a fração 0%, as diferenças foram significativas ($p = 0,000201$). Isso indica que a resistência à tração da matriz plena (0%) é estatisticamente diferente das resistências das frações com fibras (1%, 2% e 3%). Ou seja, a introdução de fibra na matriz altera significativamente a resistência à tração do material.

Não houve diferenças estatisticamente significativas entre as frações de 1% e 2% ($p = 0,780978$), 1% e 3% ($p = 0,837548$), ou entre 2% e 3% ($p = 0,998521$). Esses valores de p acima de 0,05 indicam que as frações 1%, 2%, e 3% apresentam resistências à tração semelhantes, e as variações observadas nas médias podem ser atribuídas ao desvio padrão ou a variações experimentais, e não a uma diferença real nas propriedades mecânicas.

A Figura 29, apresenta o gráfico da comparação do Limite de Resistência (MPa) e Porosidade Aparente (%) dos compósitos produzidos.

Figura 29 – Gráfico da comparação do Limite de Resistência e Porosidade Aparente

Fonte: Autora, 2025

Na Figura 29, notou-se que a matriz plena obteve menor porosidade, pois não houve nenhum enchimento com fibras. Nota-se que quanto maior o percentual de fibras na matriz polimérica, maior a porosidade aparente no compósito. O aumento de porosidades, vazios e bolhas podem ser fatores que causam fragilidade no material e, conseqüentemente, interferem na resistência a tração, já que os mesmos elementos podem atuar como concentradores de tensões, ocasionando trincas e fraturas do material (Costa, 2016).

De acordo com Merlini (2021), as propriedades dos compósitos com fibras descontínuas são influenciadas pela fração volumétrica, orientação, comprimento, dispersão e distribuição das fibras, além da adesão entre a carga e a matriz, um dos fatores que pode ter comprometido as propriedades mecânicas do compósito é a distribuição irregular das fibras na matriz, devido ao processo de fabricação manual. Esse método pode ter influenciado em maior concentração de fibras em determinados pontos do material, o que gera heterogeneidade nas propriedades finais.

A Figura 7, exibe comparação do Limite de Resistência à Tração (LRT) com 1% Fibra de cana-de-açúcar, 5% Fibra de Juta e 10% Fibra de Ráfia em matriz polimérica.

Tabela 7 – Comparação do Limite de Resistência à Tração com outros trabalhos

Composição	Limite de Resistência (MPa)	Referência
1% Fibra de açaí	17,28 (\pm 1,83)	Este trabalho
2% Fibra de açaí	17,87 (\pm 2,46)	Este trabalho
3% Fibra de açaí	19,02 (\pm 1,01)	Este trabalho
1% F. Cana-de-açúcar	17,12 (\pm 2,48)	Santos, 2023
5% Fibra de Juta	11,57 (\pm 2,60)	Alencar <i>et al.</i> , 2021
10% de Fibras de Ráfia	8,46 (\pm 1,18)	Oliveira Filho <i>et al.</i> , 2020

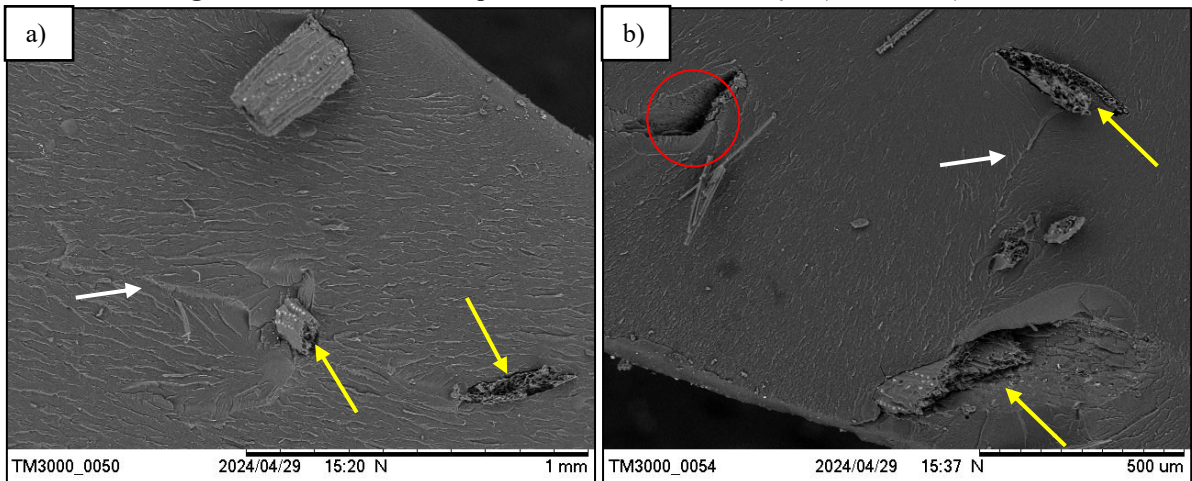
Fonte: Autora, 2025

Posto isto, ao comparar os compósitos com fibras de açaí, 1% fibras de cana-de-açúcar, 5% fibras de juta e 10% fibra de ráfia em matriz polimérica, a resistência apresentada pelos compósitos fabricados neste trabalho obteve maior resistência, o que pode estar relacionada à compressão aplicada aos materiais durante o método de fabricação, uma vez que pode ter contribuído para melhor molhabilidade das fibras na matriz, pois o eficiente desempenho das propriedades mecânicas de tração dos compósitos reforçados por fibras geralmente está associado a uma adequada ancoragem conseguida ao longo de uma boa fabricação pelo método *hand lay up*. É importante estabelecer boa adesão entre essas fases, a fim de permitir a transferência eficaz de esforços ou tensões para a carga quando solicitado esforço ao material proporcionando melhor aderência e uma boa interface (Costa, 2016).

4.5.1.1 Análise fractográfica

Na análise da superfície das fraturas do compósito com 1% de fibra de açaí, observou-se algumas imperfeições como evidenciado na Figura 30.

Figura 30 – Fraturas do compósito com 1% de fibra de aço a) 1mm e a b) 0,5 mm

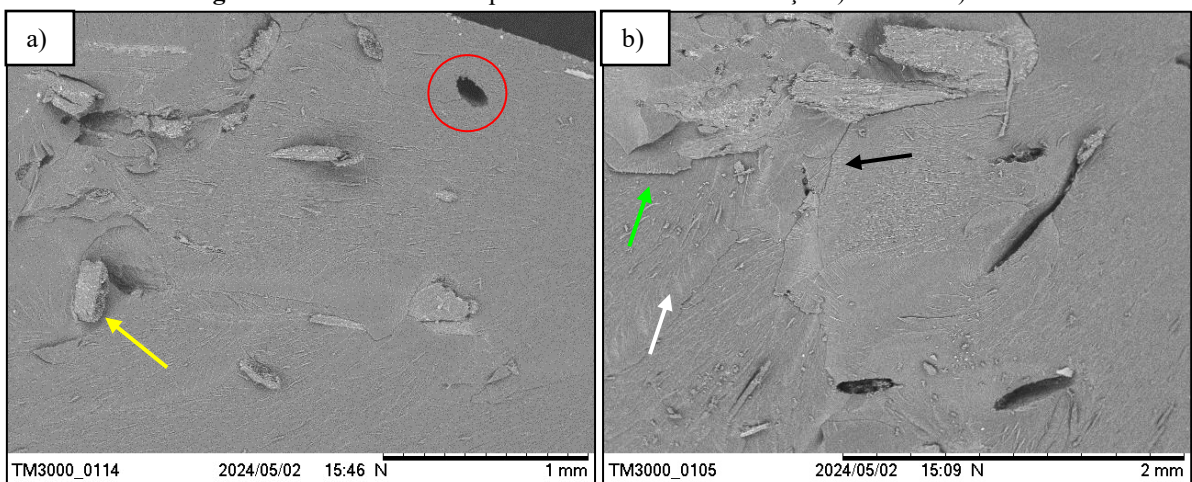


Fonte: Autora, 2025

A partir das micrografias apresentadas na Figura 30, observa-se que a superfície de fratura é predominantemente heterogênea (fibra/matriz) e foi retirada da área de ruptura transversal do corpo de prova. Nas fraturas, são visíveis as marcas de rios (seta branca) que é característico de fratura frágil, arrancamento (*pull out*) que indica uma má adesão entre a fibra/matriz e as fibras rompidas (seta amarela) que evidenciam uma boa adesão ou ancoragem da fibra na matriz. A ruptura ocorreu de forma brusca no compósito, pois nas extremidades das fibras, pode ter ocorrido a nucleação e propagação de trincas no material (Costa, 2016).

Na Figura 31, é demonstrado a fratura do compósito polimérico com a fração mássica de 2% de fibra de aço.

Figura 31 – Fratura do compósito com 2% de fibra de aço a) 1mm e a b) 2 mm



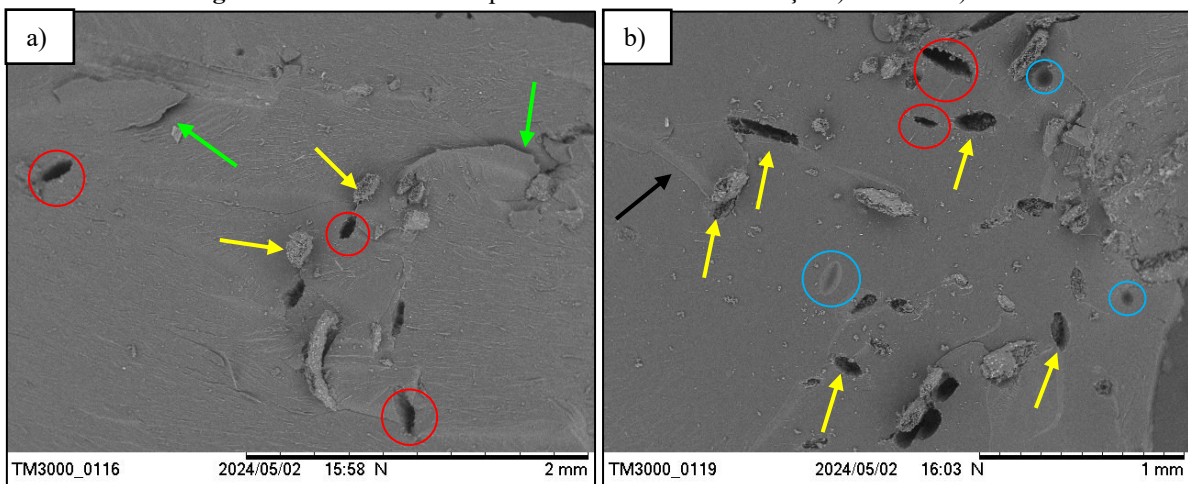
Fonte: Autora, 2025

Na Figura 31, também notou-se as marcas de rios (seta branca), arrancamento (*pull out*), fibras rompidas (seta amarela), propagação de fraturas (seta preta) e franjas (seta verde). As características visíveis do material indicam que, durante o processo de fabricação, podem ter

ocorrido devido a possível formação de bolhas na mistura, aumentando a probabilidade de uma ruptura prematura. As fibras de açaí não têm formato uniforme, o que também pode ter ocasionado maiores defeitos e um decaimento da resistência mecânica do material (Martins Neto, 2022).

Na Figura 32, é exibida a fratura do compósito com a fração mássica de 3% de fibra de açaí. No qual, são apresentados alguns defeitos ou informação sobre a fratura, os vazios de fibras (*pull out*), fibras rompidas (seta amarela), propagação de fraturas (seta preta), franjas (seta verde) e bolhas (círculo azul).

Figura 32 – Fratura do compósito com 3% de fibra de açaí a) 2mm e b) 1 mm



Fonte: Autora, 2025

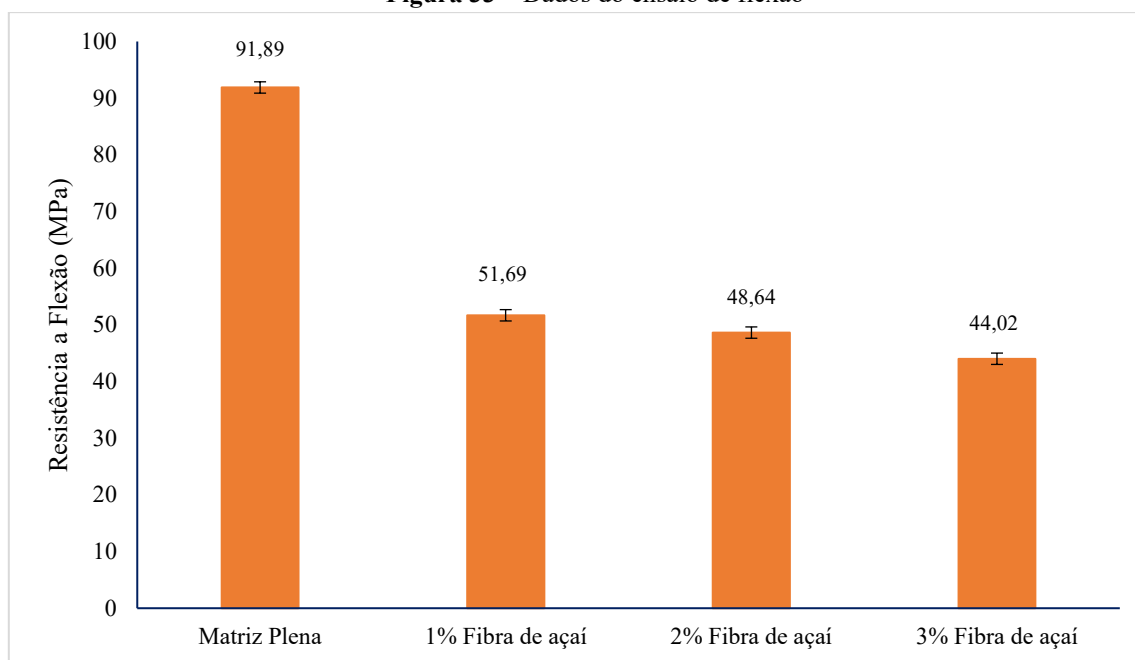
Na Figura 32, observou-se a micrografia com 3% de fibra de açaí não tem uma homogeneidade das fibras na matriz, conseqüentemente, isto afeta as propriedades desse material, o que ocasiona a diminuição nas resistências mecânicas dos compósitos. Outro fator adicional que prejudica as propriedades mecânicas do compósito, é a porosidade nos materiais confeccionados. Percebeu-se que quanto maior a fração mássica da fibra na matriz polimérica, maior a quantidade de defeitos no compósito, pois houve uma menor adesão e uma maior heterogeneidade no compósito (Santos Filho, 2023).

Outrossim, é possível que a perda de resistência mecânica dos compósitos pode estar associada com o método de fabricação (método *hand lay-up*) ou devido à disposição da fibra na matriz (Santos, 2023).

4.5.2 Ensaio de flexão

Os valores médios do ensaio de resistência a flexão, que atendeu a norma ASTM D790, para a matriz plena e com as diferentes porcentagens de fibras de açaí, sendo elas: 1%, 2% e 3%, são apresentados na Figura 33.

Figura 33 – Dados do ensaio de flexão



Fonte: Autora, 2025

Na Figura 33, é possível avaliar que a resistência à flexão apresentou um comportamento decrescente dos compósitos em relação à matriz poliéster. Este fato, também foi observado no teste de tração. Outro fator que pode ter contribuído para diminuição da resistência é a presença concentradores de tensão no interior do corpo de prova, como poros e bolhas (Santos, 2023).

De acordo com o estudo de Dhibar *et al.*, (2018), nos compósitos reforçados com fibras naturais, nota-se que o aumento da fração mássica de carga, acarreta na diminuição da resistência à flexão dos compósitos. Os estudos apresentados reiteram que tanto a quantidade de reforço quanto a interação entre matriz e reforço afetam diretamente a resistência dos compósitos.

Uma análise de variância (ANOVA de fator único) revelou uma probabilidade de significância de $p < 0,05$ para todas as interações entre a matriz plena e as frações de fibra. Esse resultado confirma uma diferença estatisticamente significativa entre a matriz plena e as frações de fibras. Portanto, foi possível a comparação com teste de Tukey HSD.

Os resultados do teste mostraram diferenças significativas ($p = 0,000195$) em todas as comparações envolvendo a matriz, evidenciando que a resistência à flexão da matriz é estatisticamente distinta das resistências das frações (1%, 2%, 3%). Esse resultado destaca que a incorporação de fibras na matriz altera significativamente a resistência do material.

Por outro lado, não foram identificadas diferenças significativas entre as frações de 1% e 2% ($p = 0,692235$), 1% e 3% ($p = 0,103896$), ou 2% e 3% ($p = 0,481570$). Esses valores de p

superiores a 0,05 indicam que as resistências à flexão das frações de 1%, 2% e 3% são semelhantes, indicando que não houve variações significativas.

Comparação dos resultados de flexão obtidos em compósitos poliméricos, de mesma matriz, com diferentes proporções de fibras vegetais está presente na Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação da Resistência à flexão do trabalho com outras literaturas

Composição	Limite de Resistência (MPa)	Referência
1% Fibra de açaí	51,69 (\pm 1,18)	Este trabalho
2% Fibra de açaí	48,64 (\pm 3,88)	Este trabalho
3% Fibra de açaí	44,03 (\pm 5,54)	Este trabalho
1% Fibra da coroa de abacaxi	30,42 (\pm 2,86)	Pampolha, 2024
1% Fibra de palha da costa	19,12 (\pm 0,02)	Tavares, 2019
5% Fibra de bambu	35,93 (\pm 5,04)	Lima, 2022

Fonte: Autora, 2025

Conforme observado na Tabela 8, pode-se notar que a depender da fibra incorporada, a interação com a matriz proporcionou comportamentos distintos no ensaio de flexão. A resistência dos compósitos do trabalho foram maiores que os das literaturas pesquisadas. Isto, pode ter ocorrido pelo método de fabricação com compressão realizado nos corpos de prova podendo correlacioná-los a uma boa adesão da fibra com a matriz poliéster. As propriedades mecânicas de materiais compósitos são influenciadas por uma série de fatores, incluindo a estrutura da matriz, a natureza do material de reforço, a eficácia da interface entre carga e matriz (Bessa; El Banna, 2017).

5 CONCLUSÃO

As fibras de açaí utilizadas como carga em compósitos de matriz poliéster influenciaram, de modo geral, as propriedades físicas, de inflamabilidade e mecânicas do material. A massa específica da fibra de açaí foi determinada em $1,109 \text{ g/cm}^3$, conforme os valores reportados na literatura. Além disso, na análise morfológica das fibras do açaí, observou-se uma superfície rugosa e irregular, com a presença de ceras e graxos naturais. Além, de apresentaram canais de pontuação com saliências enriquecidas em silício em áreas específicas.

Nos ensaios físicos dos compósitos, notou-se um aumento na AA e PA após inserção das fibras nos compósitos. E os resultados de MEA que estão de acordo com a regra da mistura.

No ensaio de inflamabilidade, observou-se que a matriz obteve maior taxa de queima dos compósitos analisados, e quanto maior a fração de fibra, menor a taxa de queima. O compósito com 3% de fibra obteve a maior redução de queima em relação a matriz, alcançando 30,193%, entretanto, todos se enquadram na norma ASTM D635 e o CONTRAN.

No ensaio de tração, as fibras na matriz foram classificadas como carga de enchimento, visto que, a matriz plena obteve um resultado superior aos compósitos. Quando a resistência à tração foi comparada com a PA, observou-se que a matriz apresentou menor PA e quanto maior a fração de fibra na matriz polimérica, maior a PA no compósito, o que proporcionou o surgimento de vazios e bolhas que causam fragilidade no material.

Na análise da fratura dos compósitos, foram observados alguns defeitos na fratura como os vazios de fibras, fibras rompidas, propagação de fraturas, franjas e bolhas. Percebeu-se que quanto maior a fração mássica da fibra na matriz polimérica, maior a quantidade de defeitos no compósito.

No ensaio mecânico de flexão, a resistência apresentou um comportamento decrescente dos compósitos em relação à matriz poliéster e também a fibra atuou como carga de enchimento no compósito.

Os compósitos poliméricos revelaram ser alternativas promissoras para aplicações como painéis, divisórias de paredes e outros materiais que não exigem elevado desempenho mecânico. Além de apresentar características específicas para essas finalidades, sua utilização contribui para a valorização de resíduos naturais, reduzindo o descarte inadequado e mitigando impactos ambientais, promovendo assim um modelo mais sustentável de produção e consumo e a preservação da Amazônia seguindo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODs) metas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU).

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Investigar a influência de tratamentos térmicos nas fibras de açaí para analisar suas propriedades e otimizar os resultados nos compósitos poliméricos;
- Melhorar os métodos de fabricação dos compósitos para avaliar a possibilidade de aumentar sua resistência mecânica;
- Fabricar compósitos utilizando outras frações mássicas de fibras de açaí, analisando o efeito dessas variações nas propriedades do material;
- Desenvolver compósitos incorporando caroços de açaí triturado como reforço, visando a redução de resíduos e a avaliação de seu desempenho em matrizes poliméricas.

REFERÊNCIAS

Açaí - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/acai>>. Acesso em: 11 jun. 2024.

ADEPARÁ. Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará. **Representantes da Agência ressaltaram as inovações adotadas como a implantação da Guia de Trânsito Vegetal (GTV) do Açaí, que rastreia a produção, identificando as localidades de origem, destino do produto e sua atividade produtiva.** Disponível em: <https://agenciapara.com.br/noticia/45953/adepara-destaca-importancia-da-rastreabilidade-do-acai-em-evento-com-agentes-do-setor-produtivo> 2023. Acesso em: 21 de janeiro de 2024.

ADEPARÁ. Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará. **Pará fecha 2023 como líder absoluto na produção de açaí e dendê além de mais três importantes culturas agrícolas.** Agência Pará de Notícias. Disponível em: <<https://agenciapara.com.br/noticia/50282/para-fecha-2023-como-lider-absoluto-na-producao-de-acai-e-dende-alem-de-mais-tres-importantes-culturas-agricolas>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

ALENCAR, Krishana Carvalho de; OLIVEIRA, Adriane Pimentel; CARNEIRO, Marcelo de Souza; *et al.* Influência do comprimento e proporção do fio de fibras de juta na resistência mecânica à tração de compósitos poliméricos / Influence of the length and proportion of jute fibers yarn on the mechanical strength to tension of polymeric composites. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 12, p. 116381–116389, 2021.

Área plantada com açaizeiros de terra firme gerados pela pesquisa cresce 675% no Brasil. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/79157772/area-plantada-com-acazeiros-de-terra-firme-gerados-pela-pesquisa-cresce-675-no-brasil>>. Acesso em: 11 jun. 2024.

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

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

ASTM D 635 – **Standard Test Method for Rate of Burnin or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position,** American Society for Testing and Materials 2018.

ASTM D 638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM D 790 – **Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials,** Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2017.

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

ASHBY, Michael Farries e JONES, David Rayner Hugh (2012). *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties and Design* (4th ed.). **Fourth Edition**. Butterworth-Heinemann. 2012.

BAGGIO, Airton. **Aproveitamento dos resíduos de compósitos à base de resina poliéster e fibra de vidro**. 2005. v ii, 92 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2005.

BESSA, Magno Luiz Tavares. **Estudo da dispersão e adesão de micropartículas de diamante em formulação de compósitos epoxídicos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Do Norte Fluminense – UENF, 2017.

CALLISTER, William David Junior e RETHWISCH, David Gregory. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., 10ª edição. 944 P. Rio de Janeiro, 2020. ISBN 978-11-194-5391-8.

CARDOSO NETO, Haroldo Humberto Lobo; SOUZA, Inaê Vilhena de; FAÇANHA, Aline Cristina Mendes; *et al.* A DISPOSIÇÃO FINAL DE CAROÇO DE AÇAÍ NO DISTRITO ADMINISTRATIVO DE ICOARACI, PARÁ. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 221–236, 2023.

CARVALHO, Guilherme Campos. **Estudo das propriedades mecânicas de compósitos com matriz de epóxi reforçados com fios de sisal e linho**. 2020. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Bragança, 2020.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). Resolução n°. 498 - "Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos automotores nacionais e importados." 29 de julho de 2014.

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

DE OLIVEIRA, Johnatt Allan Rocha; PASSOS, Marcele Fonseca; DA CONCEIÇÃO, Adriene Carvalho. Pré-tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino de resíduos de sementes de açaí (ASW) para produção de açúcares fermentáveis e etanol. **Revista Internacional de Avanços em Engenharia e Tecnologia**, v. 2, pág. 49-56, 2020.

DHIBAR, Biraj; SINGH, Siddharth Vikram; ANWAR, Shoeb; SINGH, Abhineet. Sugarcane Bagasse Reinforced Polyester Composites. **International Research Journal of Engineering and Technology** (IRJET). Volume: 05 Edição: 05 | Maio-2018.

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

FERDINÁND, Milán; VÁRDAL, Róbert; LUMMERSTORFER, Thomas; PRETSCHUH, Claudia; GAHLEITNER, Markus; FALUDI, Gábor; MÓCZÓ, János; PUKÁNSZKY, Bela. Impact modification of PP with short PET fibers: Effect of heat setting on fiber characteristics and composite properties. **Composite Structures**, v. 311, p. 116810, 2023.

FIGUEIREDO, Diana da Luz; MENDES, Ingrid Tatiany ribeiro de Souza; SOUZA, Cezarina Maria Nobre. Aproveitamento dos caroços de açaí descartados no município de Marituba - PA a partir da tecnologia social. **Cadernos UniFOA**, v. 18, n. 51, 2023. Disponível em: <<https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/3980>>. Acesso em: 11 jun. 2024.

GABRIEL, Larissa. **Obtenção e caracterização de compósitos de polipropileno e fibras de abacaxi utilizando agentes de acoplamento de fontes renováveis**. 2020. 50 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2020.

GALVÃO NETO, Leoncio Soares. Utilização de fibras naturais como reforço de materiais compósitos poliméricos. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 12, p. 30815–30824, 2023.

GARCIA, Amauri; Spim, Jaime Alvares; Santos, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Gen LTC 2ª Ed. 2013.

GOMES, Jailton Weber. **Compósito de matriz polimérica e resíduos gerados pela manufatura do MDF (Medium Density Fiberboard)**. 154f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

GOMES, Leandro Vale. **RESÍDUOS DE MINÉRIO DE COBRE E MADEIRA (Erismia uncinatum) EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS: Caracterizações Físicas, Mecânica e Flamabilidade**. Orientador: Emerson Cardoso Rodrigues. 2023. Trabalho de Curso. (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

GONÇALVES, Maria do Rosário Sousa. **Desenvolvimento de sistema de visão termográfico para detecção de defeitos em materiais compósitos de matriz polimérica**. 2022. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2022.

GREENHALGH, Emile. **Failure analysis and fractography of polymer composites**. Woodhead publishing Limited; 2009.

Hand lay-up: O que é e como funciona. **Sercel: Soluções em fibras**. Disponível em: <<http://www.sercel.com.br/blog/hand-lay-up-o-que-e-e-como-funciona.html>>. Acesso em: 31 de maio de 2022.

HILLER, Ana Paula. **Desenvolvimento de compósito inteligente de juta com agente termocrômico**. 2022. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Têxtil, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2022.

ISLAM, Md Zahidul; SARKER, Md Emdad; RAHMAN, Md Mahbubor; et al. Green composites from natural fibers and biopolymers: A review on processing, properties, and applications. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 41, n. 13–14, p. 526–557, 2022. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/07316844211058708>>. Acesso em: 19 maio 2024.

KRUSCHE, Felipe Biermann. **Aplicação de Inteligência Artificial na otimização e análise de incertezas em materiais compósitos laminados**. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear). Universidade de São Paulo, 2023.

Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME). Museu Paraense Emílio Goeldi. Disponível em: <<https://www.gov.br/museugoeldi/pt-br/a-instituicao/pesquisa/laboratorios-abertos-multiusuarios/laboratorio-de-microscopia-eletronica-de-varredura-lme/laboratorio-de-microscopia-eletronica-de-varredura-lme>>. Acesso em: 5 dez. 2024.

LAZARINI, Rafael Gouveia. **Pré-tratamento de fibras de bagaço de cana-de-açúcar e seu uso em altos teores em compósitos com polipropileno via mistura termocinética**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

LEAL NETA, Luzia Soares; COSTELLA, Ângela Mari dos Santos; MELO FILHO, João de Almeida. Caracterização físico-química de fibras de curauá e sua aplicação em compósitos poliméricos. **Scientia Amazonia**, v. 4, n. 1, p. 21, 2015. Disponível em: <<http://www.scientia-amazonia.org/attachments/article/23/v4%20n1%2021-27%202015.pdf>>

LEVY NETO, Flávio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora Blucher, 2016.

LIMA, Haianny Beatriz Saraiva. **Avaliação da resistência à chamas de compósitos poliéster isoftálico insaturado com resíduo de lama vermelha e fibra de bambu**. Orientador: Deibson Silva da Costa. 2022. 68 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2022.

LIMA JÚNIOR, Ubirajara Marques. **Fibras da semente do açaizeiro (Euterpe Oleracea Mart.) : avaliação quanto ao uso como reforço de compósitos fibrocimentícios**. 2007. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LOURENÇO, Lécio Manuel Gonçalves. **Caracterização física e mecânica de compostos híbridos de matriz polimérica**. masterThesis, 2017.

MARINUCCI, Gerson. **MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS: fundamentos e tecnologia**. 1101347. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2019. 93 f. 93 v.

MARQUES, Vanessa Dummer. **APOSTILA–ENSAIOS MECÂNICOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS**. Universidade Federal de Pelotas, 2022.

MARTINS NETO, Sandoval Ferreira; SILVA, Douglas Santos; FUJIYAMA, Roberto Tetsuo. PROPRIEDADES MECÂNICAS E FRACTOGRAFIA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS DE SISAL E MALVA. *In*: ANDRADE, Priscyla Lima De; RIBEIRO, Iara Margolis (Eds.). **Ciência e Engenharia de Materiais: princípios e fundamentos em pesquisa**. 1. ed. [s.l.]: Editora Científica Digital, 2022, p. 180–197.

MELO, Kátia Moureira. **Resíduo de sisal: uma alternativa sustentável como reforço particulado em compósito polimérico com adição de agente silano**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Têxtil) Programa de pós-graduação em engenharia têxtil, Universidade Federal do Pará, 2022.

MENEZES, Grece Kelly Alencar; COUTO, Luciano Louzada; FLORES, Maria do Socorro. **Manejo dos caroços de açaí como possibilidade de desenvolvimento local no município de Ananindeua-PA**. *Universidade e Meio Ambiente*, v. 1, pág. 20-33, 2019.

MERLINI, Cláudia. **Ciência e tecnologia de compósitos poliméricos**. 1ª Ed. São Paulo: Artliber Editora, 2021. 328 p. ISBN 978-65-86443-13-4.

MINILLO, Larissa Queiroz; CARDOSO, Bruno Cesar de Castro, ORTENZI Altibano. Design of nautical cleat for small–medium boats using hybrid curaua–glass fiber–reinforced epoxy. **Materials Today: Proceedings**, v. 34, Part 1, p. 341-349, 2021. doi:10.1016/j.matpr.2020.06.074

MIRANDA, Lidiane de Vilhena Amanajás; MOCHIUTTI, Silas; CUNHA, Alan Cavalcanti Da; CUNHA, Helenilza Ferreira Albuquerque. Descarte e destino final de caroços de açaí na Amazônia Oriental-Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. e01382, 2022.

MOCHANE, Mokgaotsa.; MOKHENA, Teboho; MOKHOTHU, Thabang Hendrica SADIKU, Rotimi;. Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review. **Express Polymer Letters**, v. 13, n. 2, p. 159–198, 2019.

MOURA, Marcelo Fernando Soares Ferreira de; MORAIS, Alfredo Manoel Balacó de; MAGALHÃES, António Gonçalves de. **Materiais Compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2009.

MURRAY, R. E. et al. Structural validation of a thermoplastic composite wind turbine blade with comparison to a thermoset composite blade. **Renewable Energy**, v. 164, p. 1100–1107, fev. 2021.

NEGRÃO, Andrei Gonçalves; MOURA, Arthur Gutemberg Andion Farias; AZEVEDO, Rosa Caroline Maia; *et al*. Mapeamento do descarte irregular do caroço do açaí no bairro do Jurunas no município de Belém/PA / Mapping the irregular disposal of the açaí seeds in the Jurunas neighborhood in the municipality of Belém/PA. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 63284–63294, 2021.

NUNES, Camily Maggioni; PERAZZINI, Hugo. VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO CAROÇO DE AÇAÍ PARA ENERGIA RENOVÁVEL: CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E QUÍMICA. **Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica**, 2023.

OLIVEIRA, Dhimitrius Neves Paraguassú Smith de. **Painéis de cimento Portland produzidos com fibra de mesocarpo do açaí**. 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Departamento de Pós-Graduação, Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unifap.br:80/jspui/handle/123456789/392>.

OLIVEIRA, Felipe Cesário. Uso do compósito reforçado com fibra de carbono em viga de concreto armado submetida a descontinuidade não prevista: reforço e análise numérica por elementos finitos. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. Volume 19, n 2, p.65-79 2023.

OLIVEIRA, Mariana Lima de. **Obtenção e caracterização de compósitos com matriz de resina poliéster, resíduos do sabugo de milho e fibras de juta e de vidro tipo E**. doctoralThesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.

OLIVEIRA FILHO, Edwillson Gonçalves; LUZ, Fernanda Santos; FUJIYAMA, Roberto Tetsuo, SILVA, Alisson Clay Rios; CANDIDO, Verônica Scarpini, MONTEIRO, Sergio Neves. Effect of Chemical Treatment and Length of Raffia Fiber (*Raphia vinifera*) on Mechanical Stiffening of Polyester Composites. **Polymers**, [S.L.], v. 12, n. 12, p. 2899, 3 dez. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym12122899>.

PAMPOLHA, Izabela da Costa. **Fibras da coroa do abacaxi em compósitos de matriz ortoftálica: caracterizações físicas e mecânicas**. Orientador: Deibson Silva da Costa. 2024. 92 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2024.

PEREIRA, Alexandre Luiz. **Compósitos reforçados com fibras naturais**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2020.

Produção Agropecuária | IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/acai-cultivo/pa>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

REBELLO, Fabrício Khoury; SILVA JUNIOR, José Itabirici De Souza E; LOPES, Maria Lúcia Bahia. **DESAFIOS NA PRODUÇÃO DE AÇAÍ NA AMAZÔNIA BRASILEIRA: DO EXTRATIVISMO AO PLANTIO**. In: SILVA, Maria Elanny Damasceno (Ed.). **Interfaces entre Desenvolvimento, Meio Ambiente e Sustentabilidade**. 1. ed. [s.l.]: Atena Editora, 2021, p. 142–153. Disponível em: <<https://www.atenaeditora.com.br/post-ebook/3914>>.

ROCHA, Denis Rodrigues da. **Estruturas De Aeronaves: análise do aumento da utilização de materiais compósitos**. 2020. 49 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciências Aeronáuticas, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2020.

SANTOS, Avenir Gleidson Andrade. **Caracterização do tecido fibroso de tururi e avaliação de propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçados com tecido fibroso de tururi**. Orientadora: Verônica Scarpini Cândido. 2023. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2023.

SANTOS, Deborah Júlia dos. **A influência do tratamento alcalino nas fibras do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos de matriz poliéster ortoftálica.** Orientador: Deibson Silva da Costa. 2023. 78 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2023.

SANTOS FILHO, Juscelino Borba dos. **Compósito polimérico com matriz termofixa de poliéster com fibras descontínuas de poliéster reciclado a partir de resíduos têxteis.** 2023. Trabalho de Curso (Bacharel em Engenharia de Materiais) - Campus Blumenau, Universidade Federal de Santa Catarina, 2023.

SANTOS, Lucas Bivar Bararua. **Aerogel sustentável baseado em nanocelulose e lignina com propriedades retardantes de chama.** 2022. Trabalho de Curso (Bacharel em Engenharia Aeroespacial) - Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

SANTOS, Matheus Maciel; PASOLINI, Fernanda Souza; COSTA, Ana Paula Oliveira. Caracterização físico-química do caroço e da fibra do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) via métodos clássicos e instrumentais. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 9, n. 2, p. 143-160, 2023.

SHANLEY, Patricia; MEDINA, Gabriel. **Frutíferas e plantas úteis na vida amazônica.** Ilustrado por Silvia Cordeiro, Antônio Valente, Bee Gunn, Miguel Imbiriba, Fábio Strympl. Belém: CIFOR, Imazon, 2005. 300 p. il. ISBN 85-88808-02-1.

SHACKELFORD, James Frederick. **Ciência Dos Materiais, 6/E.** [s.l.] Prentice Hall/Sp, 2007.

SILAEX **Poliester** **insaturado.** Disponível em:<
<http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>>.

SILVA, Cibele Oliveira da; SILVA, Fernando Nunes da; BANNA, Wassim Raja El; *et al.* Uso das fibras do caroço do açaí como fase dispersa em compósitos de matriz termoplástica: uma revisão bibliográfica / Use of açaí lump fibers as dispersed phase in thermoplastic matrix composites: a bibliographic review. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 28654–28679, 2022.

SILVA, Sthefani dos Santos; SILVA, Geverson Façanha da; CASTRO, Denis de Freitas. Utilização de fibras do mesocarpo e caroço do açaí como componente de misturas areia - asfalto para a pavimentação na cidade de Manaus/AM. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 4, p. 0627–0633, 2017. Disponível em:
 <<https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/24469416030420170627>>

SOUZA, Geraldo Lira de. **Desenvolvimento de suporte para notebook a partir de compósito produzido com sementes do açaí.** 2022. 142 f. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM), 2019.

SOUZA, Jonathan Diogo. **Elaboração de material didático-instrucional de processos de fabricação de material compósito de matriz polimérica utilizado na indústria aeronáutica.**

2018. Trabalho de Curso (Bacharel em Engenharia Aeronáutica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2018.

SOUZA, Ricardo Fernandes de. **Obtenção, caracterização e aplicação de um composto de matriz de poliéster e carga de pó de Carnaúba**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.

TAVARES, Arthur Ruan Dias. **Caracterização mecânica e morfológica de compostos com fibras de vidro e palha da costa (Raphia Taedigera Mart)**. Orientador: Deibson Silva Costa. 2019. 75 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

TERRA, Bruna Mota. **Caracterização da etapa de estabilização do processo produtivo de fibra de carbono a partir de poliácridonitrila utilizando algoritmos inteligentes**. Mestrado em Tecnologia Nuclear - Reatores, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

THOMAS, Sabu; CHIRAYIL, Cintil Jose; HOSUR, Mahesh. **Unsaturated Polyester Resins: Fundamentals, Design, Fabrication, and Applications**. Oxford Cambridge, MA: Elsevier, 2019.

VERTOWN, 2022. **Gestão de resíduos**. Disponível em: <https://www.vertown.com/blog/6-medidas-para-a-reducao-da-geracao-de-residuos-na-sua-empresa/>. Acesso em: 02 de janeiro de 2024.

WEARN, Yves Nicolau; MONTAGNA, Larissa Stieven; PASSADOR, Fábio Roberto. Compósitos de fibra de coco/PEBD: efeito do tratamento superficial das fibras de coco em compósitos verdes. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 1, pág. e-12548, 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762020000100303&tlng=pt>. Acesso em: 6 fev. 2025.