



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

LEONARDO JOSÉ BIASI COSTA

**OBTENÇÃO DE CELULOSE A PARTIR DE FIBRAS DO FRUTO DO AÇAÍ
(*EUTERPE OLERACEA MART*)**

Ananindeua, PA

2025

LEONARDO JOSÉ BIASI COSTA

**OBTENÇÃO DE CELULOSE A PARTIR DE FIBRAS DO FRUTO DO AÇAÍ
(*EUTERPE OLERACEA MART*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, campus universitário de Ananindeua, para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Edinaldo José de Sousa Cunha.

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)

C837o Costa, Leonardo José Biasi.
OBTENÇÃO DE CELULOSE A PARTIR DE FIBRAS DO
FRUTO DO AÇAÍ (EUTERPE OLERACEA MART) /
Leonardo José Biasi Costa. — 2025.
61 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal
do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de
Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2025.

1. Fibras do açaí. 2. Fibras Lignocelulósicas. I.
Título.

CDD 620.1122

LEONARDO JOSÉ BIASI COSTA


**OBTENÇÃO DE NANOFIBRA A PARTIR DE FIBRAS DO FRUTO DO AÇAÍ
(EUTERPE OLERACEA MART)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, campus universitário de Ananindeua, para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará.


Data da aprovação: 10/12/2025.

Conceito: EXCELENTE


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 EDINALDO JOSE DE SOUSA CUNHA
Data: 26/12/2025 11:25:11-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha
(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Orientador)

Documento assinado digitalmente
 MARCOS VINICIUS DA SILVA PAULA
Data: 26/12/2025 09:20:18-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Marcos Vinícius de Paula
(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Examinador Interno)

Documento assinado digitalmente
 DEIBSON SILVA DA COSTA
Data: 19/12/2025 15:21:31-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

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

Dedico este trabalho a Deus que me concedeu forças para chegar até aqui e a minha mãe, quem me criou e me possibilitou concluir meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por acompanhar meus caminhos, quem me guia e ilumina, que, em suas graças, me possibilitou chegar até aqui.

Agradeço eternamente a minha mãe, a pessoa que me inspirou e inspira até hoje, quem me criou e, mediante muita batalha, conseguiu criar a mim e minha irmã, nos proporcionou estudo de qualidade, quem me ensinou a falar, ler, escrever, meu exemplo de pessoa generosa e batalhadora, meu eterno amor.

Agradeço a meu Pai, Leonardo Maia, quem auxiliou, dentro do possível, para que eu concluísse meus estudos até aqui.

Agradeço a minha família, em especial meus avós Edson Biasi (*in memoriam*) e Ideicer Marquetti, que me criaram como segundos pais, sempre presentes.

Agradeço a equipe do laboratório de química do campus Ananindeua, em especial, Jhonny, técnico do laboratório de química do campus Ananindeua, quem me ensinou muito e auxiliou chegar até aqui.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Edinaldo Cunha, um grande professor, quem acreditou no meu potencial e possibilitou esse trabalho.

Agradeço aos meus amigos, companheiros dessa jornada, Adriana Oliveira, Ana Karolina, Déborah Júlia e Izabela Pampolha pelos momentos de descontração, pelas brigas, pelas motivações para chegar até aqui, foram um dos pilares essenciais para a conclusão dessa corrida.

Por fim, minha eterna gratidão a todos por meu auxiliarem nessa caminhada.

RESUMO

Compósitos com biopolímeros reforçados com fibras naturais são conhecidos como biocompósitos. Tais materiais são grandemente estudados devido serem biodegradáveis e possuir um custo de produção menor em comparação a materiais utilizados em grande quantidade na indústria. O açaí se destaca nos estudos para essa aplicação por ser grandemente descartado a partir da extração do seu suco. Em vista disso, este trabalho busca caracterizar fibras de açaí, extraídas a partir do descarte e tratadas em diversos tipos de tratamento, para avaliar suas possíveis aplicações. Primeiramente, as fibras foram trituradas em micromoinho, localizado no Laboratório Labfilme, e posteriormente peneiradas em peneiras de 200 *mesh*. Em seguida, nas amostras separadas, foram feitos respectivamente, tratamentos alcalinos, com hidróxido de sódio (NaOH), branqueamentos, com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e hipoclorito de sódio (NaClO) e ácidos, com ácido sulfúrico (H₂SO₄), em concentrações diferentes. Ao final, foram obtidas 9 amostras, sendo elas nomeadas de FA1 a FA9, onde FA1 é a fibra sem tratamento, FA2 passou somente por tratamento alcalino, FA3, FA4 e FA5 passaram por tratamento alcalino e branqueamento a concentrações diferentes de peróxido de hidrogênio, FA6, FA7 e FA8 por tratamento alcalino, com concentrações diferentes de hidróxido de sódio e branqueamento com hipoclorito de sódio e a amostra final, FA9, por tratamento alcalino, branqueamento com hipoclorito de sódio e ácido. Após o fim dos tratamentos, as amostras foram analisadas a partir de Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX). A partir do EDS, foi analisada a amostra FA1, evidenciando a caracterização da composição da fibra, mostrou uma presença significativa de cálcio (Ca), carbono (C), oxigênio (O) e silício (Si). Com o DRX foi possível confirmar o aumento da cristalinidade após o tratamento. Já no MEV, notou-se uma melhor remoção da camada superior das fibras em FA6, FA7 e FA8 e em FA9 houve uma degradação maior das regiões amorfas da fibra, possibilitando a visualização de fibrilas finas e alongadas.

Palavras-chave: Fibras do Açaí; Fibras Lignocelulósicas; Fibras de Celulose; Bio-Compósitos.

ABSTRACT

Composites based on biopolymers reinforced with natural fibers are known as biocomposites. These materials have been widely studied due to their biodegradability and lower production costs compared to conventional materials commonly used in industry. Açai stands out in this context because a large amount of residue is generated during juice extraction. In this sense, this study aims to characterize açai fibers obtained from discarded residues and subjected to different chemical treatments in order to evaluate their potential applications. Initially, the fibers were ground in a micromill located at the Labfilme Laboratory and subsequently sieved through 200-mesh sieves. The separated samples were then subjected to alkaline treatments using sodium hydroxide (NaOH), bleaching treatments using hydrogen peroxide (H_2O_2) and sodium hypochlorite (NaClO), and acid treatments using sulfuric acid (H_2SO_4) at different concentrations. At the end of the process, nine samples were obtained and labeled FA1 to FA9, where FA1 corresponds to untreated fibers; FA2 underwent only alkaline treatment; FA3, FA4 and FA5 underwent alkaline treatment followed by bleaching with different concentrations of hydrogen peroxide; FA6, FA7 and FA8 underwent alkaline treatment with different concentrations of sodium hydroxide followed by bleaching with sodium hypochlorite; and FA9 underwent alkaline treatment, bleaching with sodium hypochlorite and acid treatment. After the treatments, the samples were characterized by Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), Scanning Electron Microscopy (SEM), and X-ray Diffraction (XRD). EDS analysis of FA1 revealed the fiber composition, showing a significant presence of calcium (Ca), carbon (C), oxygen (O), and silicon (Si). XRD results confirmed an increase in crystallinity after the chemical treatments. SEM analysis indicated improved removal of the superficial layer in samples FA6, FA7, and FA8, while sample FA9 showed greater degradation of the amorphous regions of the fiber, allowing the visualization of fine and elongated fibrils.

Keywords: Açai Fibers; Lignocellulosic Fibers; Cellulose Fibers; Biocomposites.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos materiais compósitos	21
Figura 2 - (a) estrutura da amilose, (b) amilopectina.	23
Figura 3 – Tipos de Reforços.	25
Figura 4 - Cultivo de açaí	28
Figura 5 – camadas do caroço do açaí. (1) seção transversal do fruto, (2) epicárpio, (3) cicatriz, (4) polpa, (5) pericarpo + tegumento, (6) mesocarpo.	28
Figura 6 – Estrutura do fruto do açaí, em escala de 1 mm.	29
Figura 7 - Estrutura das fibras de açaí em escala de 200 nm.	30
Figura 8 - Ilustração dos pits na estrutura da fibra de açaí, em escala de 50 µm. ...	31
Figura 9 - Fluxograma geral do processo.	32
Figura 10 - Caroços de açaí, subproduto da polpa do açaí	33
Figura 11 - a) Peneira de 80 mesh; b) Peneira de 200 mesh ; c) Fundo de peneira; d) Conjunto de peneiras utilizadas.	34
Figura 12 - Banho com agitação.....	35
Figura 13 - Tratamento Alcalino	35
Figura 14 - Fibras após tratamento alcalino.....	36
Figura 15 - Tratamento ácido.	37
Figura 16 - Fibras obtidas ao final do processo.	37
Figura 17 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	39
Figura 18 - Amostras obtidas.	40
Figura 19 - DRX de FA1 (a) e DRX de FA5 (b).....	41
Figura 20 - Comparação do DRX.	42
Figura 21 - Espectroscopia Eletrônica de Transmissão (EDS) da fibra sem tratamento (FA1).....	43
Figura 22 - a) EDS do ponto 1; b) EDS do ponto 2; c) EDS do ponto 3.	44
Figura 23 - MEV da fibra sem tratamento.	46
Figura 24 - MEV da amostra FA2.	47
Figura 25 - a) MEV da amostra FA3; b) MEV da amostra FA4; c) MEV da amostra FA5.	47
Figura 26 - a) MEV da amostra FA6; b) MEV da amostra FA7; c) MEV da amostra FA8.	48
Figura 27 - MEV da amostra FA9.	49

Figura 28 - Comparação MEV fibras in natura.....	49
Figura 29 - Comparação das fibras após tratamento alcalino e branqueamento.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Siglas das amostras.....	38
Tabela 2 - Dados obtidos a partir do EDS da fibra in natura.	45

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

Ácido sulfúrico (H_2SO_4)

American Society for Testing and Materials (ASTM)

Análise Termogravimétrica (TGA)

Cálcio (Ca)

Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Carbono (C)

Difração de raios x (DRX)

Dispersão de energia de raios x (EDS)

Fibra de açaí sem tratamento (FA1)

Fibra de açaí tratada com NaOH a 5,0 % (FA2)

Fibra de açaí tratada com NaOH a 5,0 % e H_2O_2 a 1,0 % (FA3)

Fibra de açaí tratada com NaOH a 5,0 % e H_2O_2 a 2,5 % (FA4)

Fibra de açaí tratada com NaOH a 5,0 % e H_2O_2 a 5,0 % (FA5)

Fibra de açaí tratada com NaOH a 1,0 % e NaClO a 3,0 % (FA6)

Fibra de açaí tratada com NaOH a 2,5 % e NaClO a 3,0 % (FA7)

Fibra de açaí tratada com NaOH a 5,0 % e NaClO a 3,0 % (FA8)

Fibra de açaí tratada com NaOH a 5,0 % e NaClO a 3,0 % e H_2SO_4 a 50,0 % (FA9)

Laboratório de microscopia eletrônica de varredura (LME)

Laboratório de química da UFPA de Ananindeua (LAQUIM)

Laboratório de síntese e adsorção (LSA)

Matriz de carbono (CaMC)

Matriz cerâmica (CMC)

Matriz metálica (MMC)

Matriz polimérica (PMC)

Matriz polimérica reforçada com fibra (FRP)

Microscopia Eletrônica de transmissão (MET)

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Nanômetros (nm)

Nanopartículas de Silício (SiO_2)

Nanotubos de Carbono (CNTs)

Hidróxido de sódio (NaOH)

Hipoclorito de sódio (NaClO)

Oxigênio (O)

Peróxido de hidrogênio (H₂O₂)

Silício (Si)

Sílica (Si₂)

Tonelada (t)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	Justificativa e motivação	18
1.3	Composição Do Trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Materiais compósitos	20
2.2	Matriz Polimérica	21
2.2.1	Bio-nanocompósitos e Biopolímeros	22
2.2.2	Compósitos com Matriz de Amido	22
2.3	Reforços em materiais compósitos	24
2.3.1	Reforço com particulados	24
2.3.2	Tipos de Nanomateriais	24
2.4	Nanofibras de Celulose	25
2.5	Aplicações dos Bio-nanocompósitos	26
2.6	Fibras Lignocelulósicas e a Fibra de Açaí	27
2.6.1	Propriedades das Fibras Lignocelulósicas	27
2.6.2	Fibra de Açaí	27
2.6.3	Processamento e Características	30
2.7	Tratamento da Fibra	30
2.7.1	Tratamento Alcalino	31
2.7.2	Branqueamento	31
2.7.3	Tratamento ácido	31
2.7.4	Outros Tratamentos	32

3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais	33
3.1.1	Reagentes	33
3.1.2	Fibras de açai	33
3.2	Metodologia	34
3.3	Moagem	34
3.4	Peneiramento	34
3.5	Tratamentos Químicos Aplicados	35
3.5.1	Tratamento Alcalino	35
3.5.2	Branqueamento	36
3.5.3	Tratamento Ácido	36
3.5.4	Neutralização	37
3.6	Difração de Raios X	38
3.7	Análise Microscópica Eletrônica de Varredura	39
3.8	Espectroscopia de Dispersão de Energia	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	Tratamentos Químicos	40
4.2	Difração de Raios X	41
4.3	Espectroscopia de Dispersão de Energia	43
4.4	Microscopia Eletrônica de Varredura	46
4.4.1	Comparação dos resultados obtidos em MEV	49
5	CONCLUSÃO	51
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da ciência, se tem tido uma maior necessidade de materiais com características e propriedades cada vez mais específicas, onde materiais como cerâmicos, metálicos e poliméricos não possuem as características requeridas. A partir disso, se tem buscado combinar materiais diferentes, com a finalidade de se obter um material final com melhores propriedades e maior custo-benefício (Coelho, 2022).

Com a constante busca por materiais com propriedades e características cada vez mais específicas, surge, na metade do século XX, os materiais compósitos como uma nova classe de materiais. Esses são conhecidos por apresentar a combinação de dois ou mais materiais diferentes, sendo que os mesmos apresentam fases distintas, onde um material se apresenta como fase matriz, sendo constante por toda a estrutura, enquanto o restante se denomina como fase dispersa ou reforço, devido se apresentar de maneira descontínua no compósito (Abramovich, 2017; Callister, 2020).

Uma variação de materiais compósitos vastamente estudada atualmente é de biocompósitos, quais são constituídos por um biopolímero como matriz e uma fase nanodimensional (Moraes, 2019).

Nesse contexto, se tem uma crescente utilização de materiais lignocelulósicos como forma de reforço para as matrizes poliméricas e biopolímeros, principalmente devido seu baixo custo, densidade baixa, quando comparado as usualmente utilizadas fibras de vidro, além de serem biodegradáveis e de fontes renováveis (Crisuolo, 2022).

Os materiais lignocelulósicos mais estudados atualmente são principalmente extraídos de subprodutos agrícolas e um grande exemplo disso é a utilização do tecido fibroso do fruto do açaí (*Euterpe oleracea Mart.*), tendo que cerca de 85 % dos caroços de açaí são descartados depois da extração do suco (Borges, 2021)

Segundo Lima (2019) e Mesquita (2019), O fruto do açaí é grandemente cultivado e consumido, principalmente no norte do Brasil, devido seu suco e valores nutricionais, no entanto, devido grande parte do seu subproduto ser descartado como resíduo, cerca de 1.200 t/dia, somente na região metropolitana de Belém (PA), têm se tornado um problema ambiental a ser estudado. Esse resíduo ainda se tem uso, em

porcentagens pequenas, em caldeiras como fonte de cogeração de energia, mas ainda apresenta grande desuso na sociedade, podendo ser mais bem estudado para futuras aplicações na sociedade e indústria.

Estudos recentes mostraram que as fibras provenientes do caroço do açaí apresentam características adequadas para serem aplicadas como reforço em materiais compósitos, tendo também grande pesquisa sobre o processamento de tais fibras para o estudo do aprimoramento de suas propriedades (Silva, 2023).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a obtenção de celulose a partir das fibras do caroço do açaí por meio de tratamentos químicos alcalinos, de branqueamento e ácido, correlacionando os efeitos desses tratamentos com as alterações morfológicas, estruturais e cristalográficas das fibras.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar das fibras de açaí após moagem e peneiramento;
- Examinar o efeito do tratamento alcalino nas estruturas lignocelulósicas das fibras;
- Analisar a eficiência de cada branqueamento na remoção da estrutura vegetal;
- Estudar as alterações cristalográficas após tratamento alcalino e branqueamento com peróxido de sódio;
- Avaliar a composição da fibra de açaí;
- Observar as alterações morfológicas na superfície das amostras;
- Comparar, visualmente, os resultados das amostras com outros trabalhos.

1.2 Justificativa e motivação

Com a crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental, se têm tido um aumento crescente do estudo de aplicações dos subprodutos agrícolas, com o objetivo principal de reduzir o seu descarte como resíduo. Um grande exemplo de material que pode ter reuso é o resíduo proveniente da extração do suco do açaí, o caroço do açaí.

Em média, 85 % dos caroços de açaí são descartados como resíduo, apresentando um desafio ambiental, mas também uma grande oportunidade de desenvolvimento de novos materiais sustentáveis.

O uso dessas fibras como reforço na produção de materiais compósitos tem sido considerado uma boa alternativa para reduzir os impactos ambientais de matérias-primas convencionais. Estudos recentes indicam que além do uso de fibras naturais como reforço, também pode ter melhores resultados a partir do tratamento químico da fibra antes da produção do compósito.

Portanto, a justificativa desse trabalho se dá à necessidade de desenvolver soluções sustentáveis para o problema de resíduos de açaí e busca por materiais sustentáveis, a partir da sua análise para uso como reforço em biopolímeros, a fim de possibilitar a substituição de fibras não renováveis ou não degradáveis por fibras naturais.

1.3 Composição Do Trabalho

A pesquisa envolve a obtenção e análise de fibras de Celulose, obtidas a partir de tratamentos químicos destacados ao longo do trabalho.

A seção 1 apresenta a introdução e objetivos, buscando contextualizar a relevância e o potencial da pesquisa na indústria.

A Seção 2 aborda a revisão bibliográfica, destacando os materiais compósitos, o uso de fibras como reforço e, em especial, as fibras de açai, evidenciando suas propriedades e potencial de aplicação.

A Seção 3 expõe os materiais e processos realizados, desde o beneficiamento das fibras até sua caracterização.

A Seção 4 abrange os resultados e discussões das análises realizadas, comparando cada amostra.

A Seção 5 evidencia a conclusão do trabalho, destacando os resultados e contribuições obtidas, além também de sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais compósitos

Atualmente se tem uma grande variedade de materiais utilizados na indústria, com diversas propriedades e características e cada vez mais vem crescendo a necessidade de materiais mais especializados para aplicações específicas. Em vista dessa necessidade crescente, surgem os materiais compósitos, os quais na metade do século XX foram postulados como uma nova classe de materiais (Mendonça, 2019).

Segundo Jesus (2021), desde então, estes têm apresentado uma importância significativa no mundo dos materiais de engenharia, o que como consequência causou uma maior investigação nas aplicações desses materiais, principalmente nas áreas de indústria aeroespacial, automóveis, construção civil e outras importantes áreas.

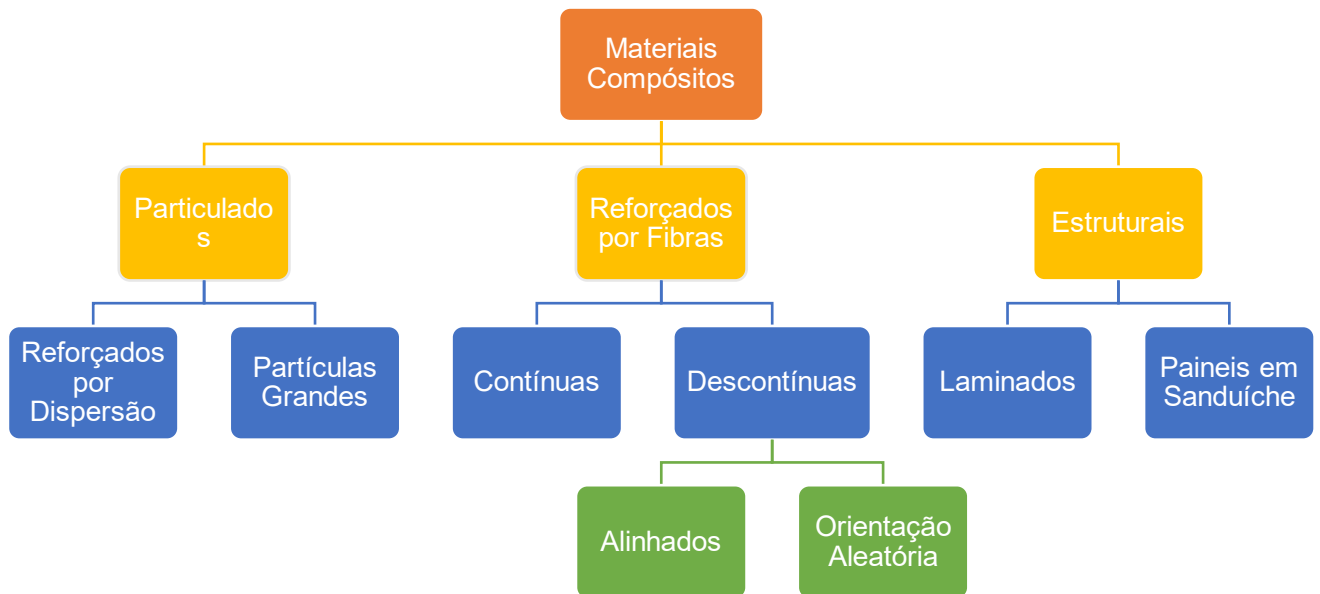
Devido esses materiais, comumente, apresentarem elevados valores de resistência e rigidez específicas, continuam sendo largamente estudados para novas áreas, principalmente em aplicações específicas (Azevedo, 2021).

A norma ASTM D 3878 (2020) postula que materiais compósitos são formados a partir da combinação de dois ou mais materiais, tendo que o mesmo possui propriedades as quais não são encontradas nos constituintes isolados.

Os materiais ditos como fases matriz e reforço apresentam como principal característica naturezas químicas diferentes, logo promovendo comportamentos e propriedades diferentes, onde a matriz deve prioritariamente manter uma coesão com o reforço, o envolvendo e distribuindo o seu carregamento, enquanto o reforço, em caso de fibras, deve aplicar uma melhor capacidade de resistência na direção em que é instalado no compósito (Ruão, 2022).

Müzel (2020) propõe que uma característica básica que define um compósito é apresentar pelo menos duas fases distintas, a nível macroscópico, na sua matéria, sendo essas fases denominadas de matriz e reforço, tendo que as propriedades obtidas podem variar com o tipo de material reforço, sua organização e outros fatores, apresentados na Figura 1.

Figura 1– Classificação dos materiais compósitos



Fonte: Adaptado de Callister Jr. e Rethwisch (2020).

2.2 Matriz Polimérica

As matrizes são caracterizadas por serem um constituinte contínuo por toda a peça e representarem a maior quantidade dos componentes do compósito. Em tese, as matrizes podem ser melhoradas ao incorporar um material reforço, onde a quantidade de reforço que pode ser incorporada é limitada pela matriz, tendo que ao se aplicar uma força no compósito, a mesma vai ser distribuída pela matriz e reforço (Herzmann, 2022).

Com base na sua natureza, as matrizes podem ser classificadas em quatro categorias, sendo essas de Matriz polimérica (PMC), matriz metálica (MMC), matriz cerâmica (CMC) e matriz de carbono (CaMC), também chamados de compostos carbono-carbono, onde o PMC possui uma temperatura mais baixa de processamento quando comparada com as outras matrizes (Kim, 2020).

Os materiais compósitos com matriz polimérica, conhecidos também como *fiber reinforced plastics* ou *fiber reinforced polymers* (FRP) na literatura internacional, são geralmente compostos por fibras com altos valores de resistência envolvidas em

material polimérico, tendo que o comportamento do material e suas propriedades vão variar com o tipo e direção das fibras (Silvestre, 2022).

Em matrizes poliméricas, pode ocorrer uma adesão de até 70 % de reforço em fibras, as quais geralmente possuem maior rigidez e resistência que a matriz, sendo essas dadas como o suporte principal do material (Rashid, 2020).

As matrizes poliméricas são as mais utilizadas entre todas, principalmente devido apresentar fácil processamento, não exigindo altas pressões e temperaturas elevadas, tendo também que ao incorporar o reforço, é mais fácil de se observar alterações nas suas propriedades. Entre os tipos de polímeros utilizados como matriz, se destacam os termofixos, principalmente devido possuírem um baixo custo de matéria prima e um processamento mais simples quando comparando as matrizes poliméricas termoplásticas (Gandia, 2019; Chaudhary, 2020).

Nos últimos anos, a busca por alternativas mais sustentáveis tem impulsionado o uso de biopolímeros como matrizes poliméricas, substituindo os polímeros convencionais. A incorporação de reforços naturais a essas matrizes possibilita também a obtenção de biocompósitos e, quando esses reforços apresentam dimensões nanométricas, de bionanocompósitos, potencializam a melhoria de propriedades mecânicas e funcionais (Ramesh, 2022; Ramires, 2020).

2.2.1 Bio-nanocompósitos e Biopolímeros

A preocupação crescente com o meio ambiente e a sustentabilidade tem influenciado fortemente no desenvolvimento de bionanocompósitos, os quais são compósitos feitos a partir de biopolímeros e nanomateriais. Com a maior conscientização sobre os impactos ambientais dos materiais sintéticos, tem aumentado significativamente a procura por materiais mais sustentáveis e os bionanocompósitos surgem como uma solução promissora (Vieira, 2022).

2.2.2 Compósitos com Matriz de Amido

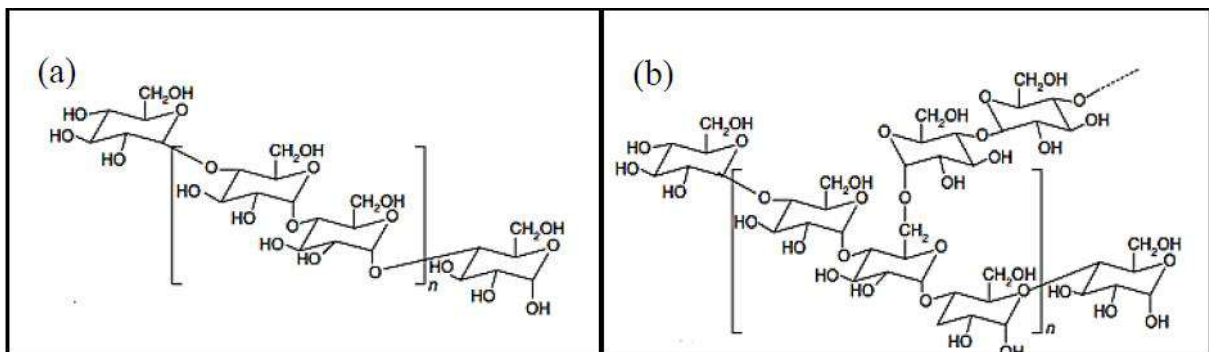
A matriz de amido se dá como uma matriz polimérica que utiliza o amido como componente principal. O amido se dá como um polissacarídeo natural o qual é composto por unidades de glicose e é amplamente utilizado em compósitos devido a sua abundância e baixo custo, sendo sua vasta disponibilidade e degradabilidade

fatores importantes para a redução do impacto ambiental e maior aplicação nas indústrias (Wang, 2023).

2.2.2.1 Propriedades do Amido como Matriz

Segundo Verma (2021), O amido é um biopolímero que pode ser extraído de fontes vegetais usualmente conhecidas, como batata, milho, arroz e trigo. Ele é composto principalmente por amilose e amilopectina. A amilose é uma cadeia linear de unidades de glicose, enquanto a amilopectina possui estrutura ramificada, tendo essas estruturas ilustradas na Figura 2.

Figura 2 - (a) estrutura da amilose, (b) amilopectina.



Fonte: Vilhena, 2020.

A amilose contribui para a formação de géis e espessantes devido sua estrutura linear, ajudando a formação de redes tridimensionais quando gelatinizada, evidenciado pela sua viscosidade (Oyeyinka, 2021).

Já a amilopectina oferece uma estrutura ramificada, aumentando a viscosidade e a solubilidade do amido em água, contribuindo também na formação de uma rede estável quando o amido é processado, essa estrutura ramificada facilita a formação de géis, sendo um ponto importante para aplicações industriais (Obadi, 2023).

2.2.2.2 Propriedades Físicas do Amido

Ao ser aquecido em água, o amido tem a capacidade de absorver a água, o que resulta na formação de uma pasta viscosa, chamada de gel, tendo a sua viscosidade variável conforme a fonte do amido e as condições de processamento, como temperatura, tempo de aquecimento e concentração do amido (Nizam, 2021)

2.2.2.3 Propriedades Mecânicas do Amido

O amido, como matriz, apresenta resistência e dureza moderadas, podendo ser melhoradas com a adição de reforços. O amido puro pode não apresentar resistência mecânica igual a uma matriz sintética, mas ao combinar-se com fibras ou partículas pode aumentar significativamente (Muñoz-Gimena, 2023).

2.3 Reforços em materiais compósitos

Os materiais compósitos podem ser reforçados com fibras, podendo ser contínuas ou descontínuas, partículas dispersas no material ou placas, que fornecem rigidez adicional (Callister, 2020).

A eficácia do reforço é determinada por fatores como a alteração da resistência à tração, rigidez e adesão do reforço a matriz, tendo essas propriedades variantes conforme o objetivo da aplicação do reforço, podendo ser um reforço estrutural ou somente reforço de enchimento (Mendonça, 2019).

2.3.1 Reforço com particulados

Os particulados, ou nanomateriais são caracterizados por apresentarem uma dimensão na faixa de 1 a 100 nm (nanômetros), apresentam uma melhor área de contato para incorporação com a matriz, propriedades mecânicas, térmicas e excepcionalmente elétricas (Baig, 2021).

2.3.2 Tipos de Nanomateriais

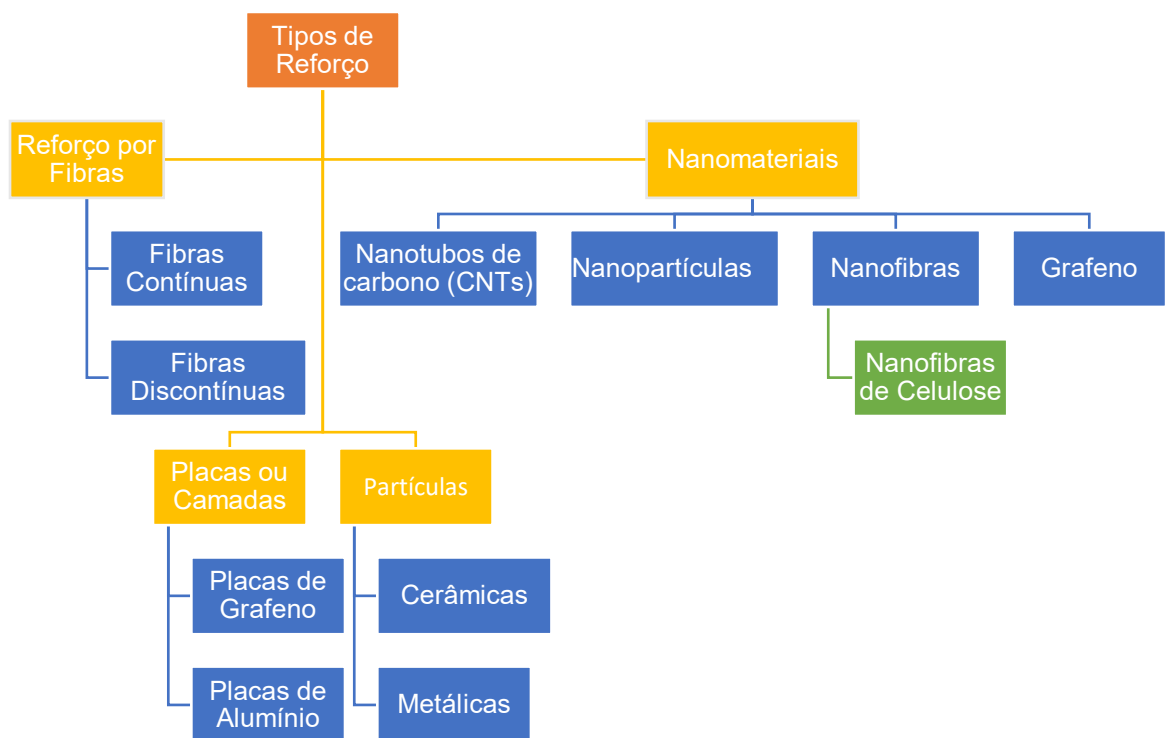
Segundo Salem (2022), alguns principais materiais podem ser:

- Nanotubos de Carbono (CNTs): Estruturas cilíndricas de carbono que apresentam alta resistência e baixa densidade, podendo melhorar significativamente a resistência à tração e condutividade elétrica dos compósitos;
- Nanopartículas de Silício (SiO_2): Utilizadas para aumentar a dureza e resistência ao desgaste dos compósitos;

- Grafeno: Uma única camada de átomos de carbono dispostos em estrutura hexagonal, apresentando alta resistência mecânica e condutividade térmica;
- Nanofibras de Celulose: Fibras naturais com dimensões nanométricas, podendo ser utilizadas como reforço em matrizes poliméricas e biopoliméricas, aumentando a rigidez e resistência dos compósitos.

A Figura 2 apresenta as categorias de Reforços mais utilizados.

Figura 3 – Tipos de Reforços.



Fonte: Adaptado de Salem (2022).

2.4 Nanofibras de Celulose

Segundo Smriti (2023) e Mahmoud (2024), as nanofibras de celulose, também chamadas de nanocelulose, são estruturas fibrosas onde seu principal componente é a celulose. Essas estruturas apresentam escalas nanométricas, possuindo diâmetros geralmente inferiores a 100 nanômetros e podem apresentar grandes comprimentos, devido suas estruturas altamente ordenadas. Podem apresentar alta resistência mecânica, rigidez, baixa densidade e capacidade de formar redes tridimensionais, além também de serem biodegradáveis.

A nanocelulose pode ser obtida por diversos métodos, tendo os mais comuns o mecanismo de homogeneização e tratamentos químicos. No processo de

homogeneização, a celulose é submetida a altas pressões com o objetivo de quebrar as fibras em escalas nanométricas, já por tratamentos químicos, as fibras são tratadas com ácidos que quebram as ligações entre as fibras (Suflet, 2024; Shamsuri, 2022).

A obtenção da nanocelulose pode se dar a partir da extração de fontes vegetais, onde as principais fontes são plantas lignocelulósicas, como o açaí, abacaxi, bambu e eucalipto ou até mesmo resíduos agrícolas. Essas fontes são usualmente escolhidas devido a sua abundância e possibilidade de usar subprodutos que são normalmente descartados (Pradhan, 2023; Mo, 2024).

A nanocelulose têm se destacado em estudos devido apresentar propriedades desejáveis, como alta resistência mecânica e rigidez. Devido suas propriedades, se tornou uma alternativa promissora para substituição de plásticos em materiais compósitos e apresenta aplicações em filmes e revestimentos, devido sua capacidade de formar filmes transparentes e de alta resistência (Liu, 2024; Gonçalves, 2023).

Outro campo de aplicação em ascensão do mesmo é no desenvolvimento de nanocompósitos, onde a nanocelulose atua como reforço em matrizes poliméricas, apresentando maior durabilidade e resistência ao compósito (Habib, 2025).

No entanto, apesar das vantagens, a produção e aplicação ainda enfrentam desafios significativos devido seu custo de produção em larga escala e a complexidade dos processos de extração, porém, as pesquisas continuam avançando, objetivando otimizar os processos de extração e reduzir custos, devido a crescente demanda por soluções mais sustentáveis e a busca por alternativas aos plásticos derivados do petróleo. As perspectivas para o uso de nanofibras de celulose são crescentes, especialmente pelo desenvolvimento de produtos mais ecológicos e sustentáveis (Pennells, 2022; Norizan, 2022).

2.5 Aplicações dos Bio-nanocompósitos

Na atualidade o uso de Bio-nanocompósitos têm tido um grande aumento, explicado pela tendência crescente de explorar materiais mais sustentáveis para a indústria. Os bio-nanocompósitos, além de apresentarem significativa relevância por serem mais ecológicos, também podem apresentar propriedades diversas, como desempenho elétrico, térmico e tração (Iroegbu, 2022).

No entanto, as indústrias vêm enfrentando desafios na sua produção, principalmente na dispersão uniforme dos nanomateriais e a compatibilidade entre o biopolímero e os reforços (Moraes, 2019).

2.6 Fibras Lignocelulósicas e a Fibra de Açaí

As fibras lignocelulósicas apresentam uma boa performance no quesito sustentabilidade, além de apresentarem baixo custo de produção, sendo esse um fator que apresenta grande influência na indústria. Essas fibras são derivadas principalmente de resíduos agrícolas e florestais, o que oferece uma alternativa mais ecológica quando comparadas as fibras sintéticas (Abe, 2021).

2.6.1 Propriedades das Fibras Lignocelulósicas

Segundo Hasan (2022), fibras lignocelulósicas apresentam principalmente em sua estrutura uma combinação de celulose, hemicelulose e lignina, onde a celulose fornece rigidez e resistência à tração, enquanto a hemicelulose oferece flexibilidade e adesão, lignina suporte estrutural adicional e resistência à degradação.

Tais fibras possuem uma alta concentração de celulose e lignina, mas apresentando uma densidade menor que fibras sintéticas, tornando-as mais vantajosas quando se requiere fibras com densidade menor (Rangappa, 2021).

2.6.2 Fibra de Açaí

Os estados responsáveis pela maior produção de açaí no mundo são os estados do Pará e Amapá, sendo responsáveis pela produção de 80 % de toda a produção nacional e 55 % de toda a produção mundial, sendo um grande exportador do fruto, tendo no Pará, a cidade de Igarapé-Miri como destaque, por exportar cerca de 21,7 % da produção nacional (Silva, 2023; Oliveira, 2024).

A Figura 4 ilustra plantações de açaí da cidade de Carajás, interior do Pará.

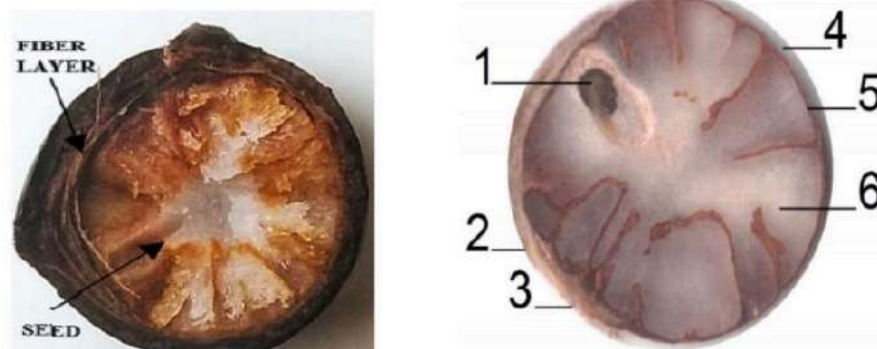
Figura 4 - Cultivo de açaí



Fonte: Paraense, 2022.

Segundo Silva (2023), a fibra do caroço do açaí é um bom exemplo de fibra lignocelulósica, a qual têm sido foco de estudos devido apresentar um bom potencial como reforço em materiais compósitos, devido suas propriedades mecânicas e também a biodegradabilidade. Trazendo uma nova finalidade a esse material, pode trazer um novo valor aos resíduos agrícolas e também contribuir a sustentabilidade dos compósitos. A Figura 5 evidencia as camadas do caroço do açaí.

Figura 5 – camadas do caroço do açaí. (1) seção transversal do fruto, (2) epicárpio, (3) cicatriz, (4) polpa, (5) pericarpo + tegumento, (6) mesocarpo.



Fonte: Silva, 2023.

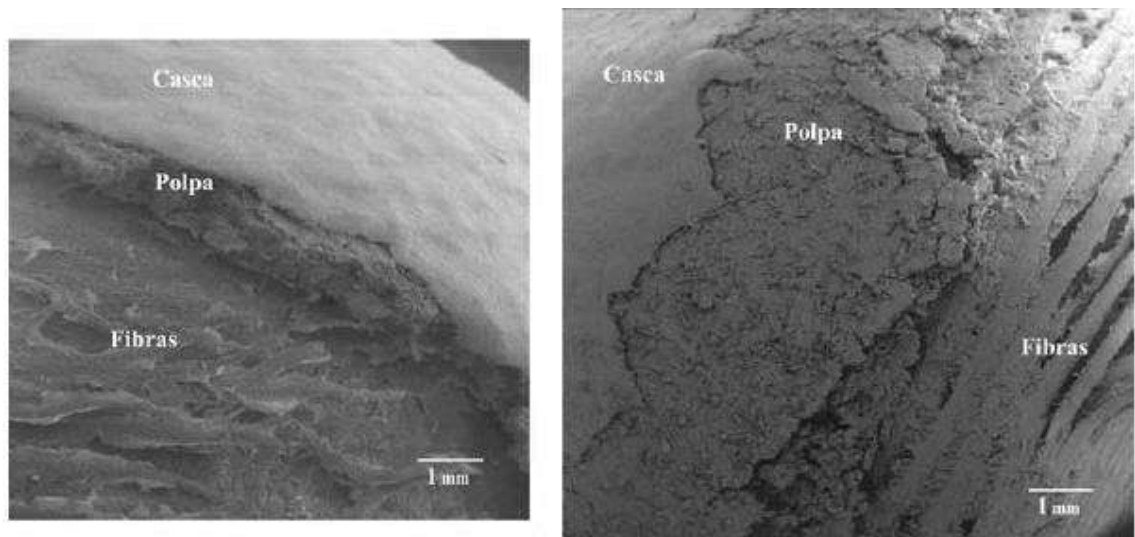
Na Figura 5 são ilustradas as diferentes regiões do caroço do açaí. Segundo Lima (2019), pode se caracterizar essas regiões por:

- Eixo Embriônico: onde se localiza o embrião da planta, apresentando amido na sua composição;
- Epicárpio: parte mais externa do fruto, ou casca;
- Cicatriz: área onde o fruto estava preso ao cacho;
- Polpa: parte vital do fruto em termos de valor nutritivo;
- Pericarpo + Tegumento: o pericarpo se divide em três camadas, epicárpio, mesocarpo e endocarpo, onde o endocarpo tem maior influência devido ser formado por células lignificadas, assim como o tegumento;
- Mesocarpo: é uma camada intermediária do pericarpo, sendo bastante fino e fornecendo principalmente suporte estrutural.

As fibras do açaí são extraídas principalmente da parte externa do fruto, como o pericarpo e tegumento.

Na Figura 6 é apresentado a microscopia da estrutura do fruto do açaí.

Figura 6 – Estrutura do fruto do açaí, em escala de 1 mm.



Fonte: Martins, 2009.

Segundo Oliveira (2015), as fibras do açaí tendem a se entrelaçarem, o que beneficia o uso dela como reforço em compósitos, visto que é um fator que auxilia a homogeneização, prevenindo irregularidades que a fibra pode apresentar na sua estrutura, tendo essa estrutura representada pela Figura 7.

Figura 7 - Estrutura das fibras de açaí em escala de 200 nm.



Fonte: Silva, 2023.

2.6.3 Processamento e Características

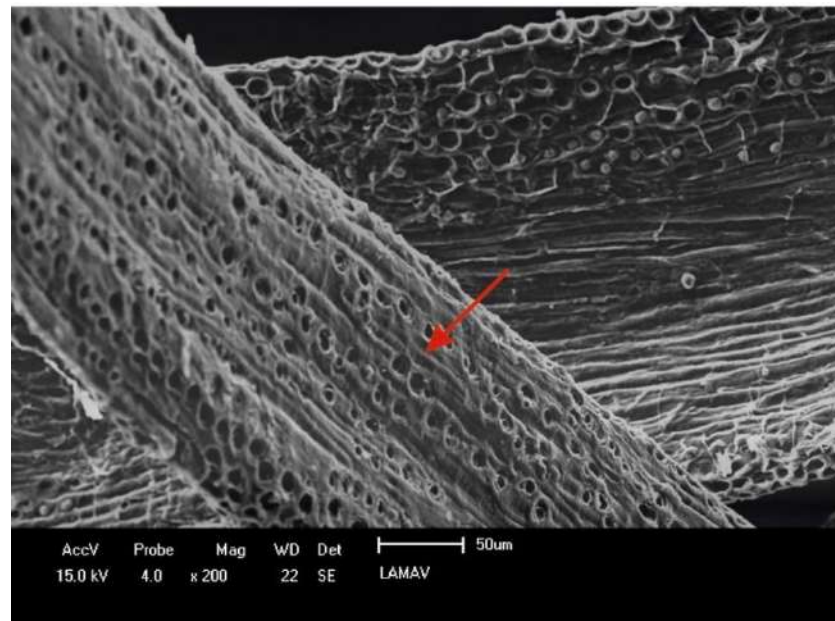
O processamento das fibras se dá com a finalidade de remover as impurezas e materiais que compõem a fibra e também as prepara para o compósito, a partir de tratamentos físicos e químicos, com a finalidade de melhorar suas propriedades finais e também a adesão à matriz (Mesquita, 2013).

2.7 Tratamento da Fibra

Segundo Vilhena (2020), o tratamento da fibra é uma etapa crucial no preparo do reforço, influenciando grandemente nas propriedades finais dos compósitos e também na adesão à matriz, o que influencia diretamente nas suas propriedades mecânicas.

Conforme estudo de Martins (2009), as fibras de açaí apresentam concentrações significativas de silício (Si) e sílica (Si₂) e *pit channels*, conhecidos como canais de pontuação ou *pits*, os quais se destacam por apresentarem pontuações com aberturas diretas na fibra, sendo eles ilustrados, a partir da microscopia eletrônica de varredura (MEV), na Figura 8.

Figura 8 - Ilustração dos pits na estrutura da fibra de açaí, em escala de 50 μm .



Fonte: Silva, 2023

2.7.1 Tratamento Alcalino

O tratamento alcalino tem por principal objetivo a remoção da lignina, hemicelulose e outros compostos não celulósicos das fibras, melhorando a rugosidade superficial das fibras, o que conseqüentemente melhora a adesão à matriz, tendo também que o tratamento alcalino pode ocasionar uma melhora significativa da resistência à tração e a rigidez das fibras naturais. É comum o uso do hidróxido de sódio nessa etapa (Vilhena, 2020).

2.7.2 Branqueamento

Já o tratamento de branqueamento tem por principal objetivo clarear as fibras, removendo as impurezas que podem afetar a qualidade do compósito, melhorando a aparência das fibras e também suas propriedades mecânicas. Esse processo utiliza principalmente o peróxido de hidrogênio ou hipoclorito de sódio (Hasan, 2022).

2.7.3 Tratamento ácido

O tratamento ácido é um dos mais utilizados para a obtenção de nanofibras, sendo um processo que geralmente envolve a hidrólise ácida da celulose com ácidos fortes, como o ácido sulfúrico, nítrico ou clorídrico, os quais atuam na degradação das

regiões amorfas da estrutura celulósica, preservando as regiões cristalinas (Samarawickrama, 2023).

Além de promover uma hidrólise eficaz, o ácido sulfúrico permite um melhor controle das propriedades do material final, como tamanho das partículas, grau de cristalinidade e comportamento reológico. Conforme são ajustados os parâmetros do tratamento, como tempo, concentração do ácido e temperatura, é possível obter nanofibras com excelente estabilidade (Yang, 2024).

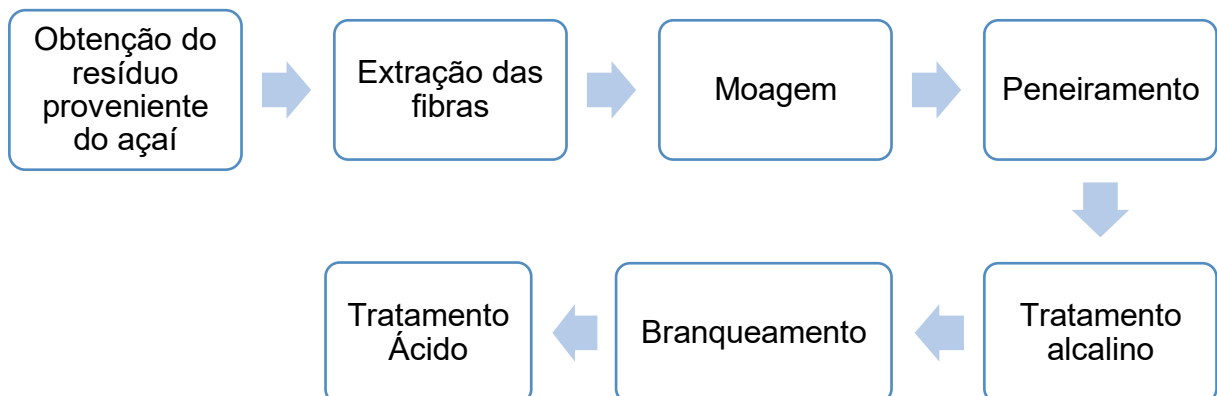
2.7.4 Outros Tratamentos

Segundo Mohammed (2022) e Radoor (2021), tratamentos como silano e ozônio também têm sido estudados para melhorar as propriedades das fibras e a sua interação com a matriz do compósito, onde o silano atua como um agente acoplador, melhorando a adesão entre o reforço e a matriz, enquanto o ozônio, um gás altamente reativo, age oxidando a área superficial das fibras, aumentando as interações com a matriz polimérica, promovendo uma melhora na adesão das fibras ao polímero e também uma melhor distribuição da fibra na matriz.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Todo o processo prático se destacará nessa seção, desde o preparo da fibra até suas caracterizações, onde o fluxograma ilustrado pela Figura 9 destaca as principais etapas do processo.

Figura 9 - Fluxograma geral do processo.



3.1 Materiais

3.1.1 Reagentes

Os reagentes utilizados nesse trabalho foram cedidos gentilmente pelo laboratório de química da UFPA de Ananindeua (LAQUIM), sendo esses reagentes a solução de hidróxido de sódio (NaOH 5 % m/v) e ácido sulfúrico (H₂SO₄ 98 % m/v).

Também se utilizou a solução comercial de hipoclorito de sódio (NaClO 2,5 % de cloro ativo), proveniente da marca Tubarão, conforme ilustra a Figura 11.

3.1.2 Fibras de açai

Os caroços de açai, ilustrados na Figura 10, foram fornecidos por um batedor de açai, localizado em uma feira da cidade de Belém do Pará, o qual recebe os frutos provenientes da região de Igarapé-Miri, cidade do estado do Pará

Figura 10 - Caroços de açai, subproduto da polpa do açai



Fonte: Autor, 2025.

3.2 Metodologia

A partir do beneficiamento dos caroços de açaí, se inicia o processo de limpeza das fibras, para retirada dos resíduos sólidos ainda presentes nos caroços

3.3 Moagem

Posterior a limpeza, as fibras foram moídas em micromoinho, localizado no Laboratório Labfilme, com o objetivo de reduzir o tamanho das fibras e obter maior homogeneidade no mesmo.

3.4 Peneiramento

Após o processo de beneficiamento das fibras por meio da moagem, as partículas resultantes foram submetidas a uma etapa de peneiramento sequencial, utilizando peneiras, provenientes do laboratório de química da UFPA de Ananindeua (LAQUIM), de 80 mesh e, posteriormente, de 200 mesh, onde a Figura 11-a), 11-b) e 11-c) evidencia as peneiras utilizadas e 11-d) a estrutura montada.

Figura 11 - a) Peneira de 80 mesh; b) Peneira de 200 mesh ; c) Fundo de peneira; d) Conjunto de peneiras utilizadas.



Fonte: Autor, 2025.

Esse procedimento teve como objetivo obter uma granulometria mais uniforme e adequada, promovendo a separação das partículas mais finas e, assim, melhorando a qualidade do material para as etapas subsequentes do processo.

3.5 Tratamentos Químicos Aplicados

Nesta seção serão abordados os tratamentos químicos utilizados, sendo esses, o tratamento alcalino, branqueamento, tratamento ácido e neutralização

3.5.1 Tratamento Alcalino

Para iniciar os processos de tratamento da fibra, a fibra já moída e peneirada, foi pesada e transferida para Erlenmeyers e adicionou-se a solução de hidróxido de sódio (NaOH 1 %; 2,5 % e 5 % m/v), na proporção de 20 ml de solução para cada 1 g de fibra, em seguida foram levados a banho com agitação, mostrado na Figura 12, disponibilizado pelo Laboratório de Síntese e Adsorção (LSA), pelo período de 2 horas em 60 °C e 150 rpm, tendo o tempo contado a partir do momento em que atingiu a temperatura desejada. O banho foi efetuado conforme ilustra a Figura 13.

Figura 12 - Banho com agitação.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 13 - Tratamento Alcalino



Fonte: Autor, 2025.

Ao final do tratamento, as fibras foram filtradas em filtração a vácuo, como ilustra a Figura 14.

Figura 14 - Fibras após tratamento alcalino.



Fonte: Autor, 2025.

3.5.2 Branqueamento

O branqueamento também ocorreu similar, mas utilizando a solução comercial de hipoclorito de sódio (NaClO 3,0 % de cloro ativo) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2 1,0 %; 2,5 % e 5,0 %), na proporção de 20 ml de solução para cada 1 g de fibra.

3.5.3 Tratamento Ácido

O Tratamento ácido ocorreu semelhante ao alcalino, por um período de 2 horas em banho maria, mas utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4 50 % m/v), na proporção de 20 ml de solução para cada 1 g de fibra. a primeira observação de que o processo ocorreu, foi a mudança de cor das fibras, possuindo uma coloração mais escurecida, como ilustra a Figura 15.

Figura 15 - Tratamento ácido.



Fonte: Autor, 2025.

3.5.4 Neutralização

Após o tratamento ácido, adicionou-se 100 ml de água destilada a cada 1 g de fibra, objetivando diminuir a concentração de ácido e interromper a reação de hidrólise e a solução foi deixada em descanso para decantar. Após a decantação, o sobrenadante foi retirado com o auxílio de uma pipeta, tendo o processo de adição de água destilada, decantação e retirada do sobrenadante repetido até apresentar pH próximo de 6.

O material obtido ao final do processo é evidenciado na Figura 16.

Figura 16 - Fibras obtidas ao final do processo.



Fonte: Autor, 2025.

Ao final dos tratamentos químicos, as amostras obtidas, ao final de cada tratamento, foram separadas e nomeadas em siglas, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Siglas das amostras.

Sigla	Tratamento Realizado
FA1	Sem tratamento (<i>in natura</i>)
FA2	NaOH 5%
FA3	NaOH 5% + H ₂ O ₂ 1,0%
FA4	NaOH 5% + H ₂ O ₂ 2,5%
FA5	NaOH 5% + H ₂ O ₂ 5,0%
FA6	NaOH 1,0% + NaClO 3,0%
FA7	NaOH 2,5% + NaClO 3,0%
FA8	NaOH 5,0% + NaClO 3,0%
FA9	NaOH 5,0% + NaClO 3,0% + H ₂ SO ₄ 50%

Fonte: Autor, 2025.

3.6 Difração de Raios X

A análise a partir da Difração de Raios X permite analisar as fases cristalinas em um material, de modo a identificar e quantificar a partir da interação de raios x com os planos cristalinos da substância, permitindo determinar o grau de cristalinidade, a estrutura cristalina e o arranjo atômico.

Utilizando a Equação 1, é possível calcular o índice de cristalinidade (%IC) pelo método de Segal, onde I_{am} é a intensidade de difração do material amorfo e I_{max} a intensidade máxima de difração.

$$\%IC = \left(\frac{I_{max} - I_{am}}{I_{max}} \right) \times 100 \quad 1)$$

As análises de difração de raios X (DRX) foram realizadas no departamento de Física, na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), com um difratômetro de raio x, da marca RIGAKU, modelo Smartlab, utilizando tubes de raios-x, anodo de Cu-K α , operando com tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. As medidas foram conduzidas em geometria θ - 2θ , no intervalo angular de 5° a 70° (2θ), com varredura contínua,

passo angular de $0,02^\circ$ e velocidade de varredura de $1,0^\circ/\text{min}$. O tempo de aquisição por passo foi de 1,2 s, utilizando fenda divergente de $1,0^\circ$, fenda de espalhamento de $1,0^\circ$ e fenda receptora de 0,3 mm.

3.7 Análise Microscópica Eletrônica de Varredura

As caracterizações morfológicas das amostras de fibra foram realizadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN MIRA3 no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME), parte do conjunto de Laboratórios Institucionais do Museu Paraense Emílio Goeldi, em Belém-PA, ilustrado na Figura 17. Antes de se iniciar o processo, foi realizada a metalização com ouro por 3 minutos na voltagem de 15 kV nas amostras a serem trabalhadas.

Figura 17 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica, 2017.

3.8 Espectroscopia de Dispersão de Energia

A caracterização de espectroscopia de dispersão de energia (EDS), tem a capacidade de analisar os elementos presentes na superfície das amostras, identificando e quantificando os componentes químicos presentes. O EDS utilizado para as caracterizações da fibra *in natura* é acoplado ao mesmo MEV discutido anteriormente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são abordados os resultados obtidos a partir dos diferentes tratamentos químicos aplicados nas fibras de açai, seguidos das análises realizadas por Difração de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS).

Inicialmente, são descritas as mudanças visuais observadas nas amostras ao longo das etapas dos tratamentos químicos.

Em seguida, no DRX, é possível avaliar os efeitos estruturais dos tratamentos químicos na organização cristalina da celulose em cada amostra.

Por fim, apresentados os resultados da análise EDS da amostra FA1, consecutivamente os resultados obtidos no MEV, onde é possível observar, as alterações morfológicas promovidas pelos tratamentos, como exposição das microfibras de celulose e alterações na estrutura da parede celular.

4.1 Tratamentos Químicos

Após os tratamentos químicos, foi possível verificar uma diferença visual entre cada amostra, ilustrada pela Figura 18.

Figura 18 - Amostras obtidas.



Fonte: Autor, 2025.

A partir da figura, verifica-se a diferença na coloração. Tendo que FA2 passou apenas pelo tratamento alcalino, a sua coloração pode ser explicada devido ao hidróxido de sódio remover parcialmente a lignina da fibra e também pela reação formar cromóforos, os quais tendem a cor vermelho ou marrom.

Já em FA3, FA4 e FA5, observa-se um branqueamento progressivo da fibra, conforme maior a porcentagem de peróxido de hidrogênio utilizada. Isso se dá devido o reagente atuar removendo os restos permanentes da lignina e também os grupos cromóforos da estrutura.

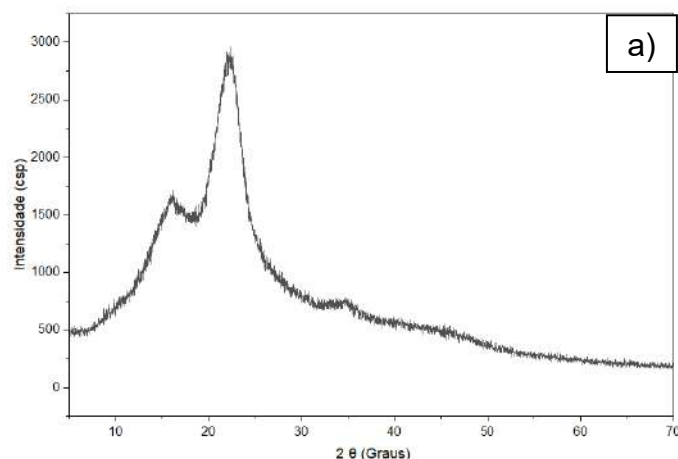
Em seguida, em FA6, FA7 e FA8, ocorreu o branqueamento progressivo da fibra utilizado o hipoclorito de sódio. É possível observar também o clareamento das fibras, devido ao reagente atuar oxidando diretamente a lignina, transformando seus compostos em ácidos carboxílicos e quinonas incolores.

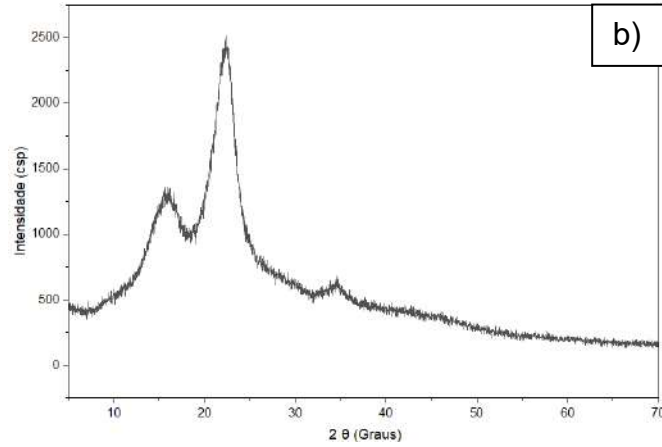
Por fim em FA9 se tem uma amostra mais branca, porém com grande redução da massa e semelhante a uma massa densa. Isso se dá devido o ácido sulfúrico promover um tratamento agressivo, hidrolisando principalmente as regiões amorfas da celulose, apresentando mais regiões cristalinas, mas causando também a degradação e solubilização das fibras.

4.2 Difração de Raios X

A análise de DRX (Difração de Raios X), foi realizada nas amostras FA1 e FA5, com o objetivo de verificar a alteração da cristalinidade após o tratamento alcalino e branqueamento com hipoclorito de sódio. Os resultados são exibidos na Figura 19.

Figura 19 - DRX de FA1 (a) e DRX de FA5 (b).



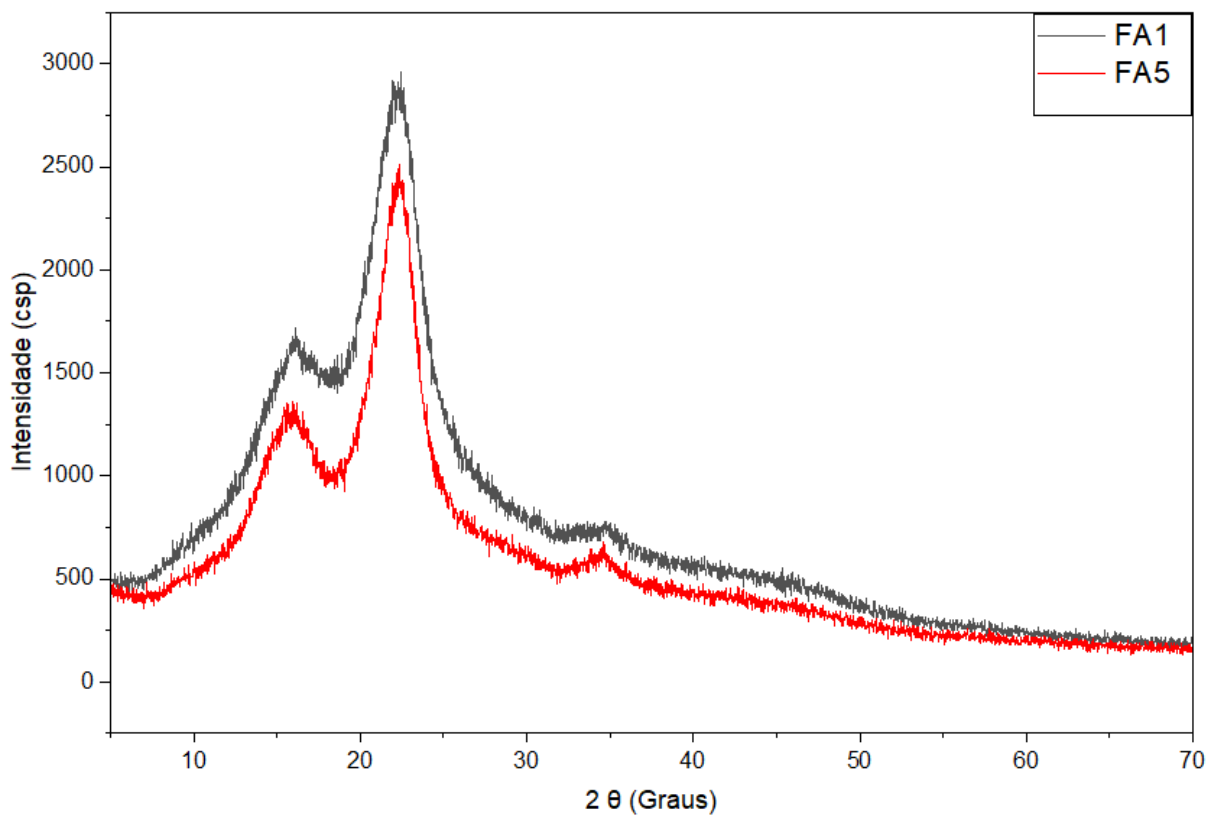


Fonte: Autor, 2025.

A partir dos gráficos, é possível observar n Figura 19-b) picos relativamente mais estreitos e definidos em relação a Figura 19-a), característica visual predominante em materiais com maior cristalinidade.

A partir da Figura 20 pode se comparar os resultados da difração de raios x.

Figura 20 - Comparação do DRX.



Fonte: Autor, 2025.

Com a Figura 20 é possível observar mais claramente a diferença dos picos, onde FA1 possui picos mais altos e largos comparados a FA5, tendo também a presença de dois picos, o primeiro entre 15 e 20 graus e um segundo pico, entre 20 e 25 graus. O primeiro pico corresponde a transição entre regiões amorfas e cristalinas da celulose, indicando presença parcial de cadeias de celulose, mas com desordem estrutural. Já o segundo pico representa a reflexão da celulose tipo 1.

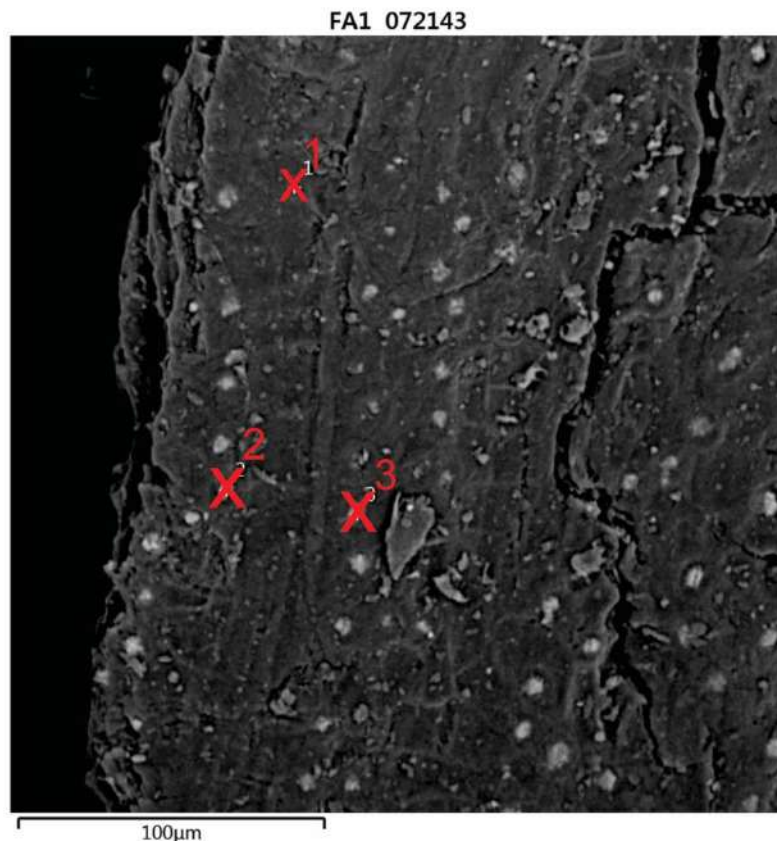
Na amostra FA5, a maior definição do primeiro pico representa uma maior ordenação estrutural da amostra e conseqüentemente diminuição da fase amorfa da amostra. Já com o segundo pico é possível observar que houve um aumento do grau de cristalinidade devido seu pico mais bem definido.

Por meio da Equação 1, foi possível calcular a cristalinidade das amostras, onde a amostra FA1 apresentou 48,85 % e FA5 60,56 %.

4.3 Espectroscopia de Dispersão de Energia

Foi realizado o EDS de 3 pontos, representado na Figura 21.

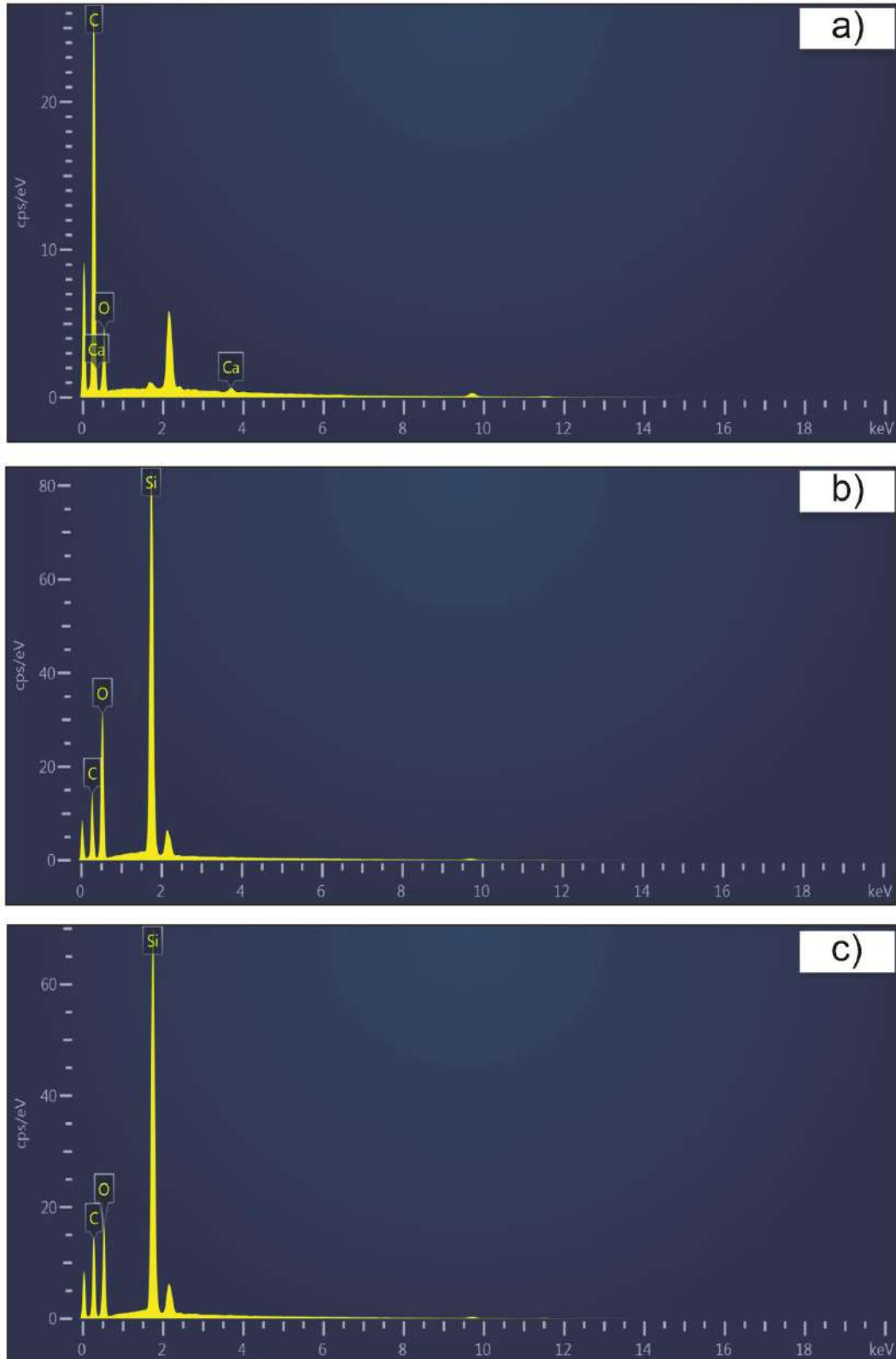
Figura 21 - Espectroscopia Eletrônica de Transmissão (EDS) da fibra sem tratamento (FA1).



Fonte: Autor, 2025.

A partir do EDS de 3 pontos, evidenciados na Figura 20, foi possível obter os resultados mostrados na Figura 22.

Figura 22 - a) EDS do ponto 1; b) EDS do ponto 2; c) EDS do ponto 3.



Ao analisar a Figura 22, foi possível destacar os dados obtidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados obtidos a partir do EDS da fibra *in natura*.

Ponto 1		
Elemento	% Peso	% Atômica
Carbono (C)	71,32 %	77,08 %
Oxigênio (O)	27,96 %	22,68 %
Cálcio (Ca)	0,73 %	0,23 %
Ponto 2		
Elemento	% Peso	% Atômica
Carbono (C)	37,26 %	48,25 %
Oxigênio (O)	40,64 %	39,51 %
Silício (Si)	22,10 %	12,24 %
Ponto 3		
Carbono (C)	45,82 %	57,88 %
Oxigênio (O)	31,51 %	29,87 %
Silício (Si)	22,67 %	12,25 %

Fonte: Autor (2025).

Ao analisar os dados obtidos, descritos na Tabela 2, pode-se observar no ponto 1 uma maior presença de carbono e pequena quantidade de cálcio, elementos comuns em composições orgânicas de celulose, lignina e hemicelulose.

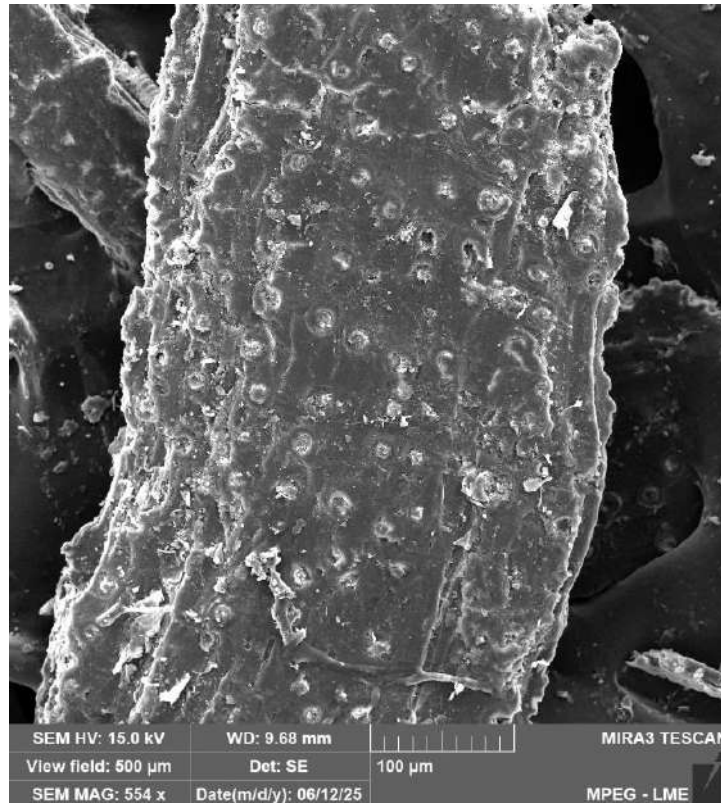
Já no ponto 2, se tem uma quantidade significativa de silício, confirmando a presença de sílica (SiO_2) e ao comparar com o ponto 1, se tem uma redução percentual do carbono, indicando ser uma região mais mineral com menor presença de materiais orgânicos.

Por fim no ponto 3, se tem dados semelhantes ao ponto 2, devido também se tratar de outra incrustação de sílica.

4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada em todas as amostras, podendo observar-se diferenças entre cada amostra. Primeiramente, na amostra FA1, fibra somente moída e sem tratamento, evidenciada na Figura 23.

Figura 23 - MEV da fibra sem tratamento.



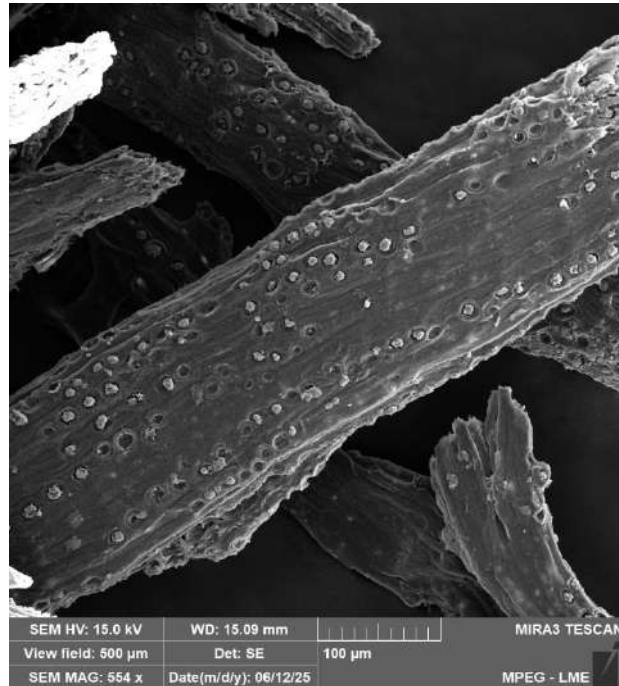
Fonte: Autor, 2025.

A partir da Figura 23, observa-se a presença de uma camada superficial irregular na fibra e também incrustações de sílica. Segundo Eleutério (2025), essa camada apresenta principalmente lignina, hemicelulose e ceras, estruturas comuns em fibras lignocelulósicas

As incrustações de sílica são fortemente ligadas à estrutura das fibras vegetais. Dependendo dos tratamentos químicos aplicados, essas partículas podem contribuir para o aumento da rigidez das fibras e, conseqüentemente, melhorar o desempenho mecânico de compósitos reforçados. No entanto, esse fenômeno pode igualmente resultar em uma aderência insuficiente das fibras à matriz, promovendo o *pull-out* das fibras (Thimmegowda et al., 2025; Mundhe & Kandasubramanian, 2024).

Em comparação, na Figura 24 é evidenciada a amostra FA2, a qual teve sofrido somente o tratamento alcalino.

Figura 24 - MEV da amostra FA2.

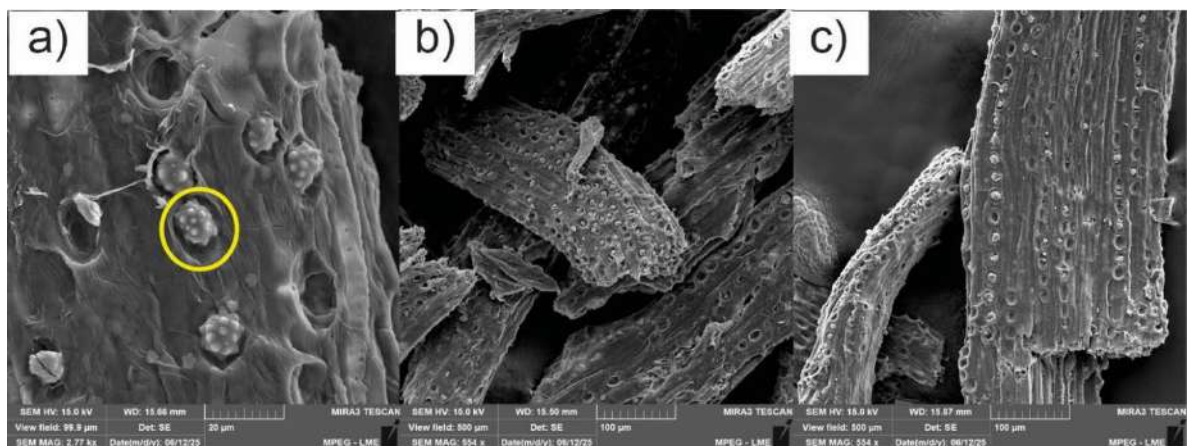


Fonte: Autor, 2025.

Já na Figura 24, é possível notar a diminuição da camada superficial, devido a reação com o hidróxido de sódio, que reage com parte das estruturas da mesma, já podendo notar alguns pits devido a remoção de algumas incrustações de sílica.

A Figura 25 ilustra o MEV das amostras de FA3, FA4 e FA5, respectivamente, as quais sofreram branqueamento com peróxido de hidrogênio.

Figura 25 - a) MEV da amostra FA3; b) MEV da amostra FA4; c) MEV da amostra FA5.

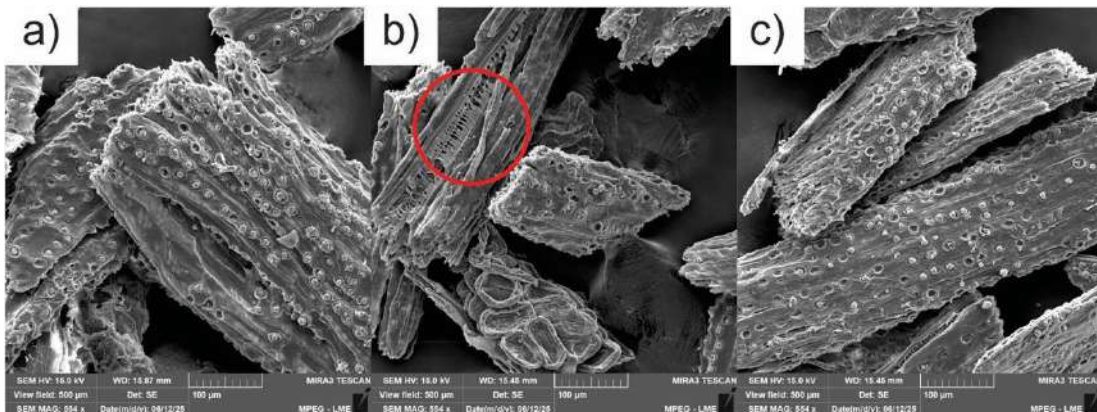


Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 25-a) são evidenciadas as incrustações da sílica, tendo uma destacada pelo círculo amarelo, ainda visíveis na amostra FA3, evidenciando sua estrutura; na Figura 25-b) a estrutura das fibras da amostra FA4, mostrando uma menor quantidade de sílica, caracterizando uma melhor remoção dos materiais indesejados; por fim a Figura 25-c) evidencia a estrutura da amostra FA5, a qual ilustra ainda a presença da sílica.

A Figura 26 evidencia o MEV das amostras FA6, FA7 e FA8, as quais, diferente das anteriores, sofreram branqueamento com hipoclorito de sódio.

Figura 26 - a) MEV da amostra FA6; b) MEV da amostra FA7; c) MEV da amostra FA8.

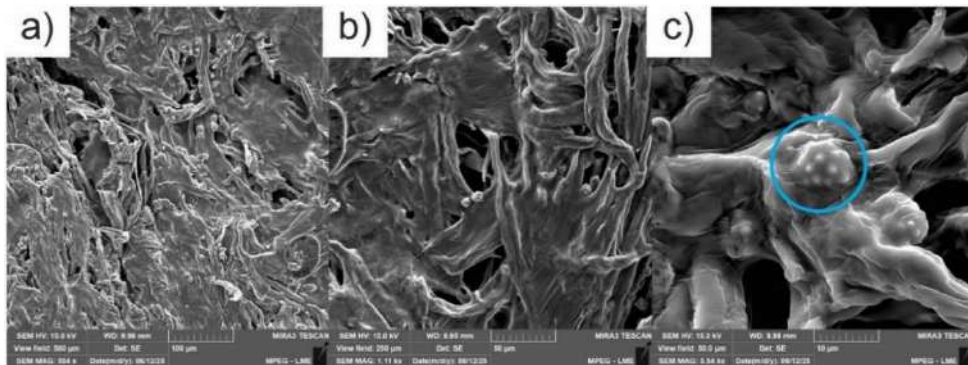


Fonte: Autor, 2025.

Assim como nos tratamentos anteriores, feitos com branqueamento a base de hipoclorito de sódio, ilustrado na Figura 25, as amostras branqueadas com hipoclorito de sódio, na Figura 26, apresentam características similares, como remoção parcial da camada superior e incrustações de sílica. Na Figura 26-a) se evidencia principalmente os pits causados pela remoção parcial da sílica, em 26-b) é evidenciado, pelo círculo vermelho, a desagregação da parede celular superficial, podendo notar a separação entre camadas, o que indica que os tratamentos químicos conseguiram romper a matriz lignocelulósica.

Por fim, a Figura 27 apresenta as imagens obtidas do MEV da amostra FA9.

Figura 27 - MEV da amostra FA9.



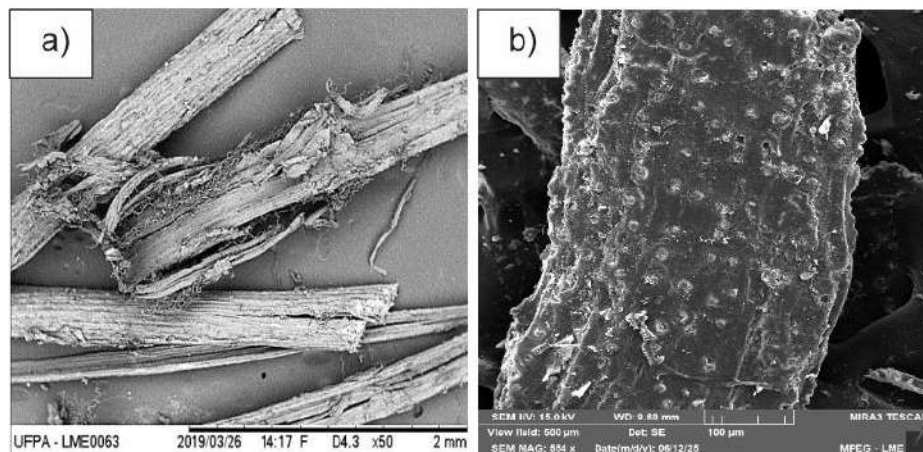
Fonte: Autor, 2025.

Observa-se na Figura 27 a estrutura obtida ao final do tratamento ácido na amostra FA9, podendo observar a exposição de fibrilas finas e alongadas, característica principal das nanofibras de celulose, as quais se mostram entrelaçadas entre si, como rede, tendo uma remoção significativa de materiais amorfos, mas, na Figura 27-c), se evidencia, pelo círculo azul, a permanência de algumas incrustações de sílica.

4.4.1 Comparação dos resultados obtidos em MEV

Ao comparar os resultados obtidos em MEV do tratamento da fibra de açaí com o mesmo tratamento realizado em fibras de Sisal (VILHENA, 2020), observa-se na Figura 28 a comparação das fibras *in natura*.

Figura 28 - Comparação MEV fibras *in natura*.

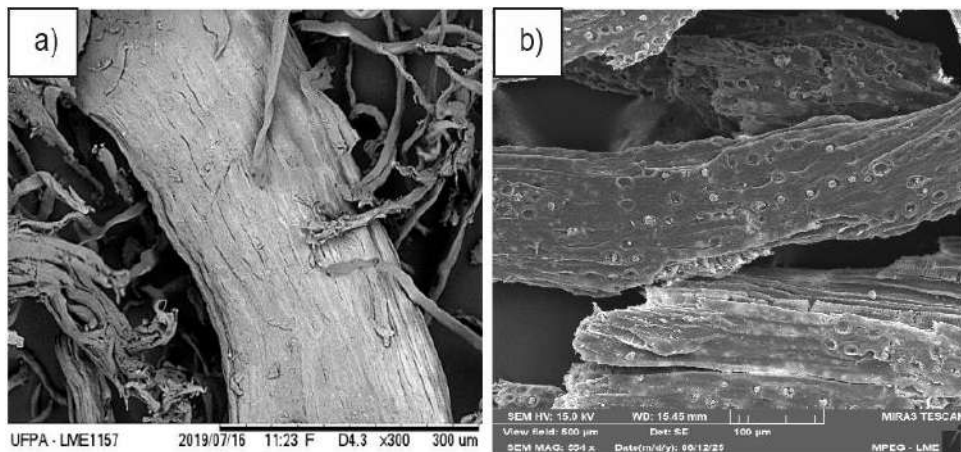


Fonte: Autor, 2025

Ao analisar a Figura 28, em 28-a) tem-se a fibra de sisal e 28-b) de açai. É possível observar que ambas as fibras possuem uma camada superficial de componentes não fibrosos, como lignina e hemicelulose, formando uma estrutura de fibras menos expostas.

Já ao analisar as fibras após o tratamento ácido e branqueamento, se obtém a Figura 29.

Figura 29 - Comparação das fibras após tratamento alcalino e branqueamento.



Fonte: Autor, 2025

Observa-se 29-a) a Fibra de sisal e 29-b) de açai. É possível analisar que na fibra de sisal foi possível remover grande parte dos componentes não fibrosos, enquanto no açai estão mais presentes como as incrustações de sílica.

5 CONCLUSÃO

Visualmente, as amostras apresentaram um clareamento gradativo das fibras, evidenciando a eficácia dos tratamentos de branqueamento.

Com a análise do DRX, foi observado um aumento na cristalinidade na amostra FA5, caracterizando o aumento da ordem da celulose causada pelos tratamentos químicos. Utilizando a equação de Segal, foi possível averiguar o aumento da cristalinidade após o tratamento, de 48,85 %, na fibra sem tratamento, para 60,56 %, após o tratamento alcalino e branqueamento com 5,0 % de peróxido de hidrogênio.

Já a partir do EDS, verifica-se a presença de elementos comuns em materiais orgânicos, os quais identificam a presença de celulose, lignina e hemicelulose.

A análise por microscopia eletrônica de varredura evidenciou as mudanças morfológicas das amostras ao longo dos tratamentos aplicados, demonstrando uma remoção progressiva da camada superficial e desagregação da parede celular, indicando a ruptura da matriz lignocelulósica. Por fim, o tratamento ácido, expôs fibrilas finas e alongadas, características de celulose, tendo também a remoção significativa de materiais amorfos, mesmo com a presença de algumas incrustações de sílica. Esses resultados confirmam a eficácia dos tratamentos químicos para obtenção da celulose.

Ao comparar os resultados obtidos no trabalho com experimentos semelhantes de outro estudo, observou-se que as fibras de açaí apresentam maior dificuldade na remoção das substâncias aderidas em relação a fibra de sisal.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Tratar as fibras com concentrações maiores;
- Produzir biocompósitos utilizando matrizes biopoliméricas;
- Realizar análise via Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) para analisar a possível obtenção de nanofibras de celulose;
- Investigar, via análise térmica em análise Termogravimétrica (TGA) ou Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), a estabilidade térmica da celulose;
- Avaliar a viabilidade econômica do processo de extração de celulose em pequena escala ou industrial;
- Comparar a eficiência da fibra de açaí com outros resíduos agroindustriais na obtenção de celulose.

REFERÊNCIAS

ABRAMOVICH, Haim. **Stability and Vibrations of Thin-Walled Composite Structures**. Langford Lane: Elsevier, 2017. 759 p.

ABE, Mateus Manabu *et al.* Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 15, p. 2484, 28 jul. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13152484>.

AZEVEDO, Thalles Manoel Quindeler de Paula. **Avaliação do comportamento da aderência de um novo sistema de compósito laminado para reforço em estrutura de concreto**. 2021. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2021.

ASTM D3878-20a, **Standard Terminology for Composite Materials, ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2020.

BAIG, Nadeem *et al.* Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. **Materials Advances**, [S.L.], v. 2, n. 6, p. 1821-1871, 2021. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d0ma00807a>.

BORGES, M. V.; SOUSA, E. B. de; SILVEIRA, M. F. A.; SOUZA, A. R. M. de .; ALVES, V. M.; NUNES, L. B. M. .; BARROS, S. K. A. . Physico-chemical and technological properties of acai residue flour and its use . **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 5, p. e17810514517, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i5.14517. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14517>. Acesso em: 23 jul. 2024.

CALLISTER, William; RETHWISCH, David. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 10. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CHAUDHARY, Vijay *et al.* A review on plant fiber reinforced thermoset polymers for structural and frictional composites. **Polymer Testing**, [S.L.], v. 91, p. 106792, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106792>.

COELHO, Hellen Cristina Mendonça. **Compósito poliéster com particulados argilosos: caracterizações mecânicas e flamabilidade**. 59 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2022.

CRISCUOLO, Gabriel. **Aplicação da técnica de infusão a vácuo para a confecção de painéis compósitos de matriz polimérica reforçados/carregados com resíduos lignocelulósicos**. 2022. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2022.

ELEUTÉRIO, Telmo et al. A Review of Natural Fibers: classification, composition, extraction, treatments, and applications. *Fibers*, [S.L.], v. 13, n. 9, p. 119, 4 set. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/fib13090119>.

GANDIA, Rômulo Marçal; GOMES, Francisco Carlos; CORRÊA, Andréa Aparecida Ribeiro; RODRIGUES, Maykmiller Carvalho; MENDES, Rafael Farinassi. Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 222, p. 168-182, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.107>.

GONÇALVES, S. et al. *Nanocellulose from a colloidal material perspective*. *Frontiers in Materials*, v. 10, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2023.1231404/full>.

HABIB, Abdul *et al.* Recent advancements in nanocellulose reinforced biopolymer hybrid composites: a review. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 496, p. 145115, mar. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145115>.

HASAN, Afnan *et al.* Making the lignocellulosic fibers chemically compatible for composite: a comprehensive review. *Cleaner Materials*, [S.L.], v. 4, p. 100078, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clema.2022.100078>.

HERZMANN, Tiago Vinícius. **Produção e Determinação de Propriedades Mecânicas de Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal**. 2022. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.

IROEGBU, Austine Ofondu Chinomso *et al.* Recent developments and future perspectives of biorenewable nanocomposites for advanced applications. *Nanotechnology Reviews*, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 1696-1721, 1 jan. 2022. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/ntrev-2022-0105>.

JESUS, Jéssica Lima Coimbra de. **Utilização de compósitos de polímero reforçado com fibras na construção e reabilitação: casos de estudo**. 2021. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Conservação e Reabilitação do Edificado, Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, 2021.

KIM, Yong K.; CHALIVENDRA, Vijaya. Natural fibre composites (NFCs) for construction and automotive industries. **Handbook Of Natural Fibres**, [S.L.], p. 469-498, 2020. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-818782-1.00014-6>.

Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME). Museu Paraense Emílio Goeldi. Disponível em: <<https://www.gov.br/museugoeldi/pt-br/ainstituicao/pesquisa/laboratorios-abertos-multiusuarios/laboratorio-de-microscopia-eletronicade-varredura-lme/laboratorio-de-microscopia-eletronica-de-varredura-lme>>. Acesso em: 30 Jul. 2025.

LIMA, Anna Cristina Pinheiro de *et al.* Physicochemical characterization of residual biomass (seed and fiber) from açai (Euterpe oleracea) processing and assessment of the potential for energy production and bioproducts. **Biomass Conversion And Biorefinery**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 925-935, 26 nov. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-019-00551-w>.

LIU, Yang *et al.* Nanocellulose-based functional materials for physical, chemical, and biological sensing: a review of materials, properties, and perspectives. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 212, p. 118326, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118326>.

MAHMOUD, Maha M. *et al.* Nanocellulose: a comprehensive review of structure, pretreatment, extraction, and chemical modification. **Polymer Reviews**, [S.L.], v. 64, n. 4, p. 1414-1475, 22 jul. 2024. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15583724.2024.2374929>.

MARTINS, Maria Alice *et al.* Comportamento térmico e caracterização morfológica das fibras de mesocarpo e caroço do açai (Euterpe oleracea Mart.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, [S.L.], v. 31, n. 4, p. 1150-1157, dez. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-29452009000400032>.

MENDONÇA, Vanessa Cristina de Sousa Melo. **Caracterização das propriedades mecânicas de uma resina epoxy reforçada com nanotubos de carbono e ferro**. Tese de Doutorado, 2019.

MESQUITA, Antonio de Lima. **ESTUDOS DE PROCESSOS DE EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FIBRAS DO FRUTO DO AÇAÍ (*Euterpe oleracea* MART.) DA AMAZÔNIA PARA PRODUÇÃO DE ECOPAINEL DE PARTÍCULAS DE MÉDIA DENSIDADE**. 2013. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

MO, Ya *et al.* Preparation of nanocellulose and application of nanocellulose polyurethane composites. **Rsc Advances**, [S.L.], v. 14, n. 26, p. 18247-18257, 2024. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d4ra01412j>.

MOHAMMED, Mohammed *et al.* Surface treatment to improve water repellence and compatibility of natural fiber with polymer matrix: recent advancement. **Polymer Testing**, [S.L.], v. 115, p. 107707, nov. 2022. Elsevier BV.

MORAES, Mario Henrique Moreira de. **Caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica com adição de resíduos sólidos industriais**. 87 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

MUNDHE, Aditya *et al.* Advancements in natural fiber composites: innovative chemical surface treatments, characterizatón techniques, environmental sustainability, and wide-ranging applications. **Hybrid Advances**, [S.L.], v. 7, p. 100282, dez. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100282>.

MUÑOZ-GIMENA, Pedro Francisco *et al.* A Review on Reinforcements and Additives in Starch-Based Composites for Food Packaging. **Polymers**, [S.L.], v. 15, n. 13, p. 2972, 7 jul. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym15132972>.

MÜZEL, Sarah David; BONHIN, Eduardo Pires; GUIMARÃES, Nara Miranda; GUIDI, Erick Siqueira. Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: a review. **Polymers**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 818, 4 abr. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym12040818>.

NIZAM, Nuraina Hanim Mohd *et al.* Physical, thermal, mechanical, antimicrobial and physicochemical properties of starch based film containing aloe vera: a review. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 15, p. 1572-1589, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.138>.

NORIZAN, Mohd Nurazzi *et al.* Nanocellulose-Based Nanocomposites for Sustainable Applications: a review. **Nanomaterials**, [S.L.], v. 12, n. 19, p. 3483, 5 out. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/nano12193483>.

OLIVEIRA, Johnatt *et al.* Evaluation of alkaline delignification (naoh) of acai seeds (*Euterpe oleracea*) treated with h₂so₄ dilute and effect on enzymatic hydrolysis. **Chemical Engineering Transactions**, [S.L.], v. 43, p. 499-504, 2015. AIDIC: Italian Association of Chemical Engineering. <http://dx.doi.org/10.3303/CET1543084>.

OLIVEIRA, Manuela. **Nove municípios paraenses lideram produção nacional do açaí, aponta Fapespa**. 2024. Disponível em: <https://www.fapespa.pa.gov.br/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

OBADI, Mohammed *et al.* High-amylose maize starch: structure, properties, modifications and industrial applications. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 299, p. 120185, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120185>.

OYEYINKA, Samson A. *et al.* A review on structural, digestibility and physicochemical properties of legume starch-lipid complexes. **Food Chemistry**, [S.L.], v. 349, p. 129165, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129165>.

PARAENSE, Correio. **Embrapa realiza curso sobre o plantio de açaí em terra firme**. 2022. Disponível em: <https://correioparaense.com.br/2022/04/12/embrapa-realiza-curso-sobre-o-plantio-de-acai-em-terra-firme/>. Acesso em: 23 jul. 2024.

PENNELLS, Jordan *et al.* Benchmarking the Production of Cellulose Nanofibres: biomass feedstock, mechanical processing, and nanopaper performance. **Journal Of Polymers And The Environment**, [S.L.], v. 31, n. 5, p. 1760-1786, 7 dez. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-022-02672-2>.

PRADHAN, Dileswar *et al.* Nanocellulose Based Green Nanocomposites: characteristics and application in primary food packaging. **Food Reviews International**, [S.L.], v. 39, n. 9, p. 7148-7179, 10 nov. 2022. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/87559129.2022.2143797>.

RADOOR, Sabarish *et al.* Investigation on Mechanical Properties of Surface-Treated Natural Fibers-Reinforced Polymer Composites. **Mechanical And Dynamic Properties Of Biocomposites**, [S.L.], p. 135-162, 18 jun. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527822331.ch7>.

RAMESH, Manickam *et al.* A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: processing, properties, and prospects. **Polymers**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 589, 31 jan. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14030589>.

RAMIRES, Elaine C. *et al.* Cellulose Nanocrystals versus Microcrystalline Cellulose as Reinforcement of Lignopolyurethane Matrix. **Fibers**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 21, 29 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/fib8040021>.

RANGAPPA, Sanjay Mavinkere *et al.* Lignocellulosic fiber reinforced composites: progress, performance, properties, applications, and future perspectives. **Polymer Composites**, [S.L.], v. 43, n. 2, p. 645-691, 27 nov. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pc.26413>.

RASHID, Ans Al; KHALID, Muhammad Yasir; IMRAN, Ramsha; ALI, Umair; KOC, Muammer. Utilization of Banana Fiber-Reinforced Hybrid Composites in the Sports Industry. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 14, p. 3167, 16 jul. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13143167>.

RUÃO, Hugo Miguel Pereira. **Seleção de Polímeros Termoplásticos para Matrizes Híbridas Metaloplásticas usadas em Processos de Quinagem de Componentes Aeronáuticos**. 2022. Dissertação de Mestrado. Atlântica-Instituto Universitário.

SALEM, Salem S. *et al.* A Comprehensive Review of Nanomaterials: types, synthesis, characterization, and applications. **Biointerface Research In Applied Chemistry**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 41, 24 jan. 2022. AMG Transcend Association. <http://dx.doi.org/10.33263/briac131.041>

SAMARAWICKRAMA, K. G. R. *et al.* Extraction and analysis of cellulose nanocrystals from cotton balls by acid hydrolysis. **Journal Of Science Of The University Of Kelaniya**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 23-29, 20 abr. 2023. Sri Lanka Journals Online (JOL). <http://dx.doi.org/10.4038/josuk.v16i1.8075>.

SHAMSURI, Md. Jamil SNA and Abdan K (2022) Nanocellulose Extraction Using Ionic Liquids: Syntheses, Processes, and Properties. *Front. Mater.* 9:919918. doi: 10.3389/fmats.2022.919918

SILVA, Tulane Rodrigues da *et al.* A review on the performance of açai fiber in cementitious composites: characteristics and application challenges. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 71, p. 106481, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106481>.

SILVESTRE, Jane Ianuchauskas **Estudo das propriedades elétricas e dielétricas de um nanocompósito polimérico a base de resina epóxi e nanotubos de carbono**. 2022. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Estadual Paulista, Rosana, 2022.

SUFLET, Dana M. *et al.* Cationic curdlan: synthesis, characterization and application of quaternary ammonium salts of curdlan. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 123, p. 396-405, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.01.050>.

SMRITI, Shamima Akter *et al.* Recent developments of the nanocellulose extraction from water hyacinth: a review. **Cellulose**, [S.L.], v. 30, n. 14, p. 8617-8641, 1 ago. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-023-05374-7>.

THIMMEGOWDA, Dharanendra Yachenahalli *et al.* Enhancement of Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites Using Different Approaches—A Review. **Journal Of Composites Science**, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 220, 29 abr. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/jcs9050220>.

VERMA, Deepak Kumar *et al.* Isolation, modification, and characterization of rice starch with emphasis on functional properties and industrial application: a review. **Critical Reviews In Food Science And Nutrition**, [S.L.], v. 62, n. 24, p. 6577-6604, 27 mar. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2021.1903383>.

VIEIRA, Italo Rennan Sousa *et al.* Recent advances in biobased and biodegradable polymer nanocomposites, nanoparticles, and natural antioxidants for antibacterial and antioxidant food packaging applications. **Comprehensive Reviews**

In **Food Science And Food Safety**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 3673-3716, 17 jun. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12990>.

VILHENA, Mailson Batista de. **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AMIDO TERMOPLÁSTICO REFORÇADO COM MICRO E NANOFIBRAS DE SISAL (Agave sisalana)**. 2020. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Ppgeq, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

WANG, Shen *et al.* Recent advances and future challenges of the starch-based bio-composites for engineering applications. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 307, p. 120627, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120627>

YANG, Jianli *et al.* Investigation of cellulose nanocrystals fabricated via sulfuric acid combined with deep eutectic solvent route. **Heliyon**, [S.L.], v. 10, n. 20, p. 39184-39184, out. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39184>.