



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS (PPGCEM-UFGA)



DAMARES DA CRUZ BARBOSA NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DAS FIBRAS DE COTIA E DOS
COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER**

ANANINDEUA/PA
2025

DAMARES DA CRUZ BARBOSA NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DAS FIBRAS DE COTIA E DOS
COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM-UFPA), do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará.

Orientador (a): Profa. Dra Verônica Scarpini Candido
Coordenador (a): Prof. Dr Michel Picanço Oliveira

Área de concentração: Caracterização, desenvolvimento e aplicação de materiais
Linha de pesquisa: Tecnologia dos Materiais

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)

- N244a Nascimento, Damares da Cruz Barbosa.
AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DAS FIBRAS DE COTIA E DOS COMPOSTOS DE MATRIZ POLIÉSTER / Damares da Cruz Barbosa Nascimento. — 2025.
129 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof^a. Dra. Verônica Scarpini Candido Coorientação: Prof^a. Dra. Michel Picanço Oliveira Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Ananindeua, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2025.
1. Fibras naturais. 2. Compósitos. 3. Fibra de Cotia. 4. Mercerização. 5. Amazônia. I. Título.

CDD 620

DAMARES DA CRUZ BARBOSA NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DAS FIBRAS DE COTIA E DOS
COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), do *Campus* Universitário de Ananindeua (CANAN), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre (a) em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Caracterização, desenvolvimento e aplicação de materiais
Linha de pesquisa: Tecnologia dos materiais

Banca examinadora

Profa. Dra: Verônica Scarpini Candido
Orientadora – (PPGCEM/UFPA)

Prof. Dr. Michel Picanço Oliveira
Coorientador – (PPGCL/UFES)

Prof. Dr Marcos Allan Leite dos Reis
Examinador interno – (PPGCEM/UFPA)

Prof. Dr. Felipe Perissé Duarte Lopes
Examinador externo – (PPGCEM/UENF)

Prof. Dr.: Henry Alonso Colorado Lopera
Examinador externo – (UdeA)

Aos meus pais, Orlando Nascimento, Neima Nascimento e Ivanildo Barbosa, por todo incentivo e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, criador de todas as coisas, por me permitir chegar aqui e alcançar o título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Aos meus pais, Orlando Nascimento, Neima Nascimento e Ivanildo Barbosa, por serem o meu maior alicerce e apoiarem incondicionalmente. Meus eternos agradecimentos.

Aos meus irmãos, sobrinhos e familiares por todo apoio e sustentação.

Aos meus amigos Edson Miranda, Diemison Lira e Miriane Pinheiro por terem tornado esse momento mais feliz e repleto de muito carinho. Obrigada por toda paciência e contribuição na minha formação profissional.

A Emily Pinheiro, Sarah Brandão, Paloma Lima e Joelly Vera por compartilharem as doces aventuras da vida acadêmica e tornarem essa jornada mais leve, divertida e feliz. Desejo sucesso.

A minha amiga e irmã Rayssa Souza pelo companheirismo e todo apoio durante toda essa trajetória. Obrigada.

Ao Grupo de Pesquisa em Materiais Compósitos (GPMCOMP), que me acolheu e, ao longo dos últimos 5 anos, se tornou minha família.

Ao Professor Alisson Rios pelo conhecimento compartilhados e momentos de descontração e alegria.

A Professora Verônica Scarpini pela excepcional orientação. Agradeço também por todo conhecimento compartilhado, aconselhamentos e felicidade. Obrigada por ser minha maior inspiração de um futuro cheio de pesquisa e realizações. Sou eternamente grata.

Aos laboratórios de práticas tecnológicas (LAPTEC) e caracterização de materiais (LACMAT) da Universidade Federal do Pará, por todo suporte e espaço disponibilizado.

A todos e todas, meus calorosos e sinceros agradecimentos.

*“Uma mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original. ”*

Albert Einstein

Resumo

A busca por materiais sustentáveis e de baixo custo tem impulsionado o uso de fibras naturais no desenvolvimento de compósitos poliméricos, devido às suas propriedades mecânicas e sustentáveis. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo estudar e caracterizar uma nova fibra natural, além de estudar as propriedades mecânicas dos compósitos confeccionados com fibras *in natura* (FC) e mercerizadas (FM) em percentual volumétrico de 10, 20 e 30%. As fibras e os compósitos foram caracterizados por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Termogravimetria (TGA), Calorimetria Exploratória (DSC), Energia Dispersiva (EDS) e Espectroscopia Raman, além de caracterização mecânica. A caracterização física das fibras indicou uma densidade média em torno de $0,34 \text{ g/cm}^3$. O FTIR das fibras FC e FM indicaram modificações químicas estruturais, que foram confirmadas com Raman, MEV e EDS. A estabilidade térmica da fibra de Cotia *in natura* aproximou-se das temperaturas de 145 e 272 °C. As propriedades mecânicas das fibras FC e FM apresentaram resistência média em torno de 151,32 e 99,98 MPa, respectivamente. O FTIR e o Raman dos compósitos apontaram poucas mudanças relacionadas à variação do tratamento químico, mas diferenças quando percentuais de fibras eram adicionadas. Os resultados de tração e flexão indicaram que as fibras FC são mais resistentes e rígidas, em relação a matriz, do que as fibras modificadas. O MEV confirmou a existência de defeitos e falhas que originaram a ruptura precoce dos compósitos com fibras FM. A ANOVA de F único e duplo confirmaram que ambos os fatores, modificação química e incremento em percentual volumétrico, tiveram impacto nas propriedades finais. Embora os resultados das fibras FM não tenham causado impacto positivo, as propriedades das fibras *in natura* destacam-se como reforços eficientes para aplicação em engenharia.

Palavras-chave: Fibras naturais; Compósitos; Fibra de Cotia; Mercerização; Amazônia.

ABSTRACT

The search for sustainable and low-cost materials has driven the use of natural fibers in the development of polymer composites, due to their mechanical and sustainable properties. The aim of this work is to study and characterize a new natural fiber, as well as to study the mechanical properties of composites made with in natura fibres (FC) and mercerized fibres (FM) in volumetric percentages of 10, 20 and 30%. The fibres and composites were characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), Thermogravimetry (TGA), Scanning Calorimetry (DSC), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and Raman Spectroscopy, as well as mechanical characterization. The physical characterization of the fiber indicated an average density of around 0.34 g/cm^3 . The FTIR of the FC and FM fibers indicated chemical structural changes, which were confirmed with Raman, SEM and EDS. The thermal stability of Cotia fiber in natura was close to 145 and 272 °C. The mechanical properties of the FC and FM fibers showed average strengths of around 151.32 and 99.98 MPa, respectively. The FTIR and Raman scans of the composites showed few changes related to the variation in chemical treatment, but differences when percentages of fibers were added. The tensile and flexural results indicated that the CF fibers were stronger and stiffer in relation to the matrix than the modified fibers. The SEM confirmed the existence of defects and flaws that caused early rupture of the composites with FM fibers. The single and double F ANOVA confirmed that both factors, chemical modification and increase in volume percentage, had an impact on the final properties. Although the results of the FM fibers did not have a positive impact, the properties of the in natura fibers stand out as efficient reinforcements for engineering applications.

Keywords: Natural fibers; Composites; Cotia fiber; Mercerization; Amazonian.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Estrutura química da resina poliéster insaturada.....	24
Figura 2 - Ilustração esquemática da seção transversal de microfibrilas.....	27
Figura 3 - Estrutura química da celulose.	28
Figura 4 - Estrutura química da Hemicelulose.....	28
Figura 5 - Estrutura química da lignina (a) e Pectina (b).	29
Figura 6 - Constituição elementar das fibras vegetais.....	30
Figura 7 - Infográfico da árvore de Cotia.Fonte: Adaptada de Falcão <i>et al</i> (2022).	34
Figura 8 - Classificação para vários tipos de materiais compósitos.....	38
Figura 9– Aplicação dos materiais compósitos.....	39
Figura 10 - Ilustração esquemáticas dos mecanismos de ligação interfacial. (a) Interdifusão, (b) adesão eletrostática, (c) ligação química e (d) intertravamento mecânico.	40
Figura 11- Árvore e fibras extraídas do tronco.	49
Figura 12 - Fluxograma das etapas experimentais para as fibras de Cotia.....	50
Figura 13 - Equipamento utilizado para medição geométrica das fibras de Cotia.....	51
Figura 14 – Máquina de ensaios universal.....	53
Figura 15- Fluxograma para as etapas experimentais.	55
Figura 16 - Dimensões (mm) dos corpos de prova para o ensaio de tração.	56
Figura 17 - Dimensões (mm) dos corpos de prova para o ensaio de flexão.	56
Figura 18 - Gráfico Frequência versus Intervalo de Diâmetro.	58
Figura 19 - Gráfico de Densidade por intervalo de Diâmetro.....	59
Figura 20 – FTIR obtido para as fibras FC e FM.....	60
Figura 21 – Espectro Raman obtidos para as fibras FC e FM.	62
Figura 22 – A perda de massa é indicada pela curva de (a) Termogravimétrica para a fibra de Cotia in natura e (b) calorimetria exploratória.	63

Figura 23- Morfologia superficial da fibra de Cotia em MEV: (a) seção longitudinal da fibra de Cotia, (b) seção transversal da fibra (c) seção longitudinal da fibra tratada quimicamente por NaOH.	65
Figura 24 - EDS das fibras de Cotia (a) FC e (b) FM.	67
Figura 25 – Aspectos visuais das fibras mercerizadas.	68
Figura 26 - Gráfico de resistência a tração em relação ao intervalo de diâmetro (a) e gráficos de módulo de Young aparente e deformação em relação ao intervalo de diâmetro.	68
Figura 27 – Curvas de tensão-deformação das fibras FC e FM.	70
Figura 28 – FTIR obtido para os compósitos reforçados com percentuais volumétricos de 0, 10, 20 e 30% de (a) FC e (b) FM.	72
Figura 29– Espectros Raman obtidos para os compósitos reforçados com percentuais volumétricos de 0, 10, 20 e 30% de (a) FC e (b) FM.	73
Figura 30 – Corpos de prova de tração para compósitos (a) FC e (b) FM.	74
Figura 31- Resistência a tração dos compósitos de matriz poliéster reforçados com (a) FC e (b) FM em composições de 0, 10, 20 e 30% vol.	75
Figura 32 – Módulo de Young e deformação dos compósitos reforçados com (a) FC e (b) FM.	77
Figura 33 – Análise da superfície da fratura por tração SEM dos compósitos reforçados com as fibras in natura de Cotia: (a) Matriz poliéster; (b) 10% de FC; (c) 20% de FC; (d) 30% de FC.	78
Figura 34 – Análise da superfície da fratura por tração dos compósitos reforçados com as fibras in natura de Cotia tratadas por NaOH: (a) 10% de FM; (b) 20% de FM; (c) 30% de FM.	79
Figura 35 – Resultados em flexão dos compósitos (a) FC e (b) FM em % vol de fibra.	81
Figura 36 – Análise da superfície da fratura por flexão MEV dos compósitos reforçados com as fibras de Cotia in natura: (a) Matriz pura, (b) 10% de FC, (c) 20% de FC, (d) 30% de FC.	83
Figura 37 – Análise da superfície da fratura por flexão MEV dos compósitos reforçados com as fibras de Cotia tratadas por NaOH: (a) 10% de FM; (b) 20% de FM; (c) 30% de FM.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e limitações das resinas poliméricas.....	22
Tabela 2 - Tipos de resinas poliésteres e suas características.	25
Tabela 3 - Propriedades das fibras naturais e sintéticas.	31
Tabela 4 - Propriedades da resina poliéster.	48
Tabela 6 - Relação fibra/resina e tratamento químico para cada corpo de prova.	54
Tabela 7 – Resultados das propriedades em tração das fibras de Cotia.	69
Tabela 8 – Resultados das propriedades mecânica das fibras FC e FM.....	71
Tabela 9. Propriedades de tração de compósitos de matriz poliéster, reforçados com fibras de Cotia <i>in natura</i> (FC) e Fibras mercerizadas (FM) e seus respectivos percentuais de 0, 10, 20 e 30% em volume de fibra.....	75
Tabela 10. Propriedades de flexão dos compósitos reforçados com fibras de Cotia <i>in natura</i> (FC), e Fibras tratadas alcalinamente (FM) em seus respectivos percentuais de 0, 10, 20 e 30% em volume.	81
Tabela 11. ANOVA de F único obtida para os resultados de tração versus o intervalo de diâmetro.	86
Tabela 12. Análise Tukey para os resultados de tração das fibras por intervalo de diâmetro.	87
Tabela 13. ANOVA de F único para os resultados mecânicos dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra de Cotia <i>in natura</i> (FC).....	89
Tabela 14. Tukey das médias dos compósitos de FC.....	90
Tabela 15. ANOVA de F único para os resultados mecânicos em tração dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra de Cotia mercerizadas (FM).....	91
Tabela 17. ANOVA de F único para os resultados mecânicos em flexão dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra de Cotia <i>in natura</i> (FC).....	92

Tabela 18. Tukey para as médias dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra de Cotia <i>in natura</i> (FC).	93
Tabela 19. ANOVA de F único para os resultados mecânicos em flexão dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra FM.	94
Tabela 20. Tukey para as médias dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra de Cotia tratadas alcalinamente (FM).	94
Tabela 24. ANOVA de resistência à tração dos compósitos FC/FM.	95
Tabela 27. ANOVA de resistência à flexão dos compósitos FC/FM.	96

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivo Específico	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Resinas poliméricas	21
3.1.1	Resina Poliéster	23
3.2	FIBRAS NATURAIS	26
3.2.1	Fibra de Cotia	34
3.3	TRATAMENTOS QUÍMICOS EM FIBRAS NATURAIS	35
3.3.1	Tratamento químico por Hidróxido de Sódio (NaOH)	36
3.4	MATERIAIS COMPÓSITOS	37
3.4.1	Materiais compósitos com reforçados com fibras	39
3.4.2	Materiais compósitos reforçados com fibras naturais	41
3.4.3	Materiais compósitos reforçados com fibras naturais mercerizadas	44
3.4.4	Sustentabilidade e Impacto ambiental	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1	Materiais	48
4.1.1	Resina Poliéster	48
4.1.3	Fibras de Cotia	48
4.2	Métodos	49
4.2.1	Fibras de Cotia	49
4.2.2	Caracterização dimensional	50
4.2.3	Determinação da densidade geométrica das Fibras de Cotia	51
4.2.4	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	51

4.2.5 Espectroscopia Raman	52
4.2.6 Termogravimetria (TGA) e calorimetria exploratória (DSC)	52
4.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)	52
4.2.8 Ensaio de Resistência a Tração na Fibra de Cotia	53
4.2.9 Tratamento químico das Fibras de Cotia	54
4.2.10 Compósitos	54
4.2.10.1 Confeção dos compósitos	54
4.2.10.2 Ensaio de Resistência à Tração	56
4.2.10.2. Ensaio de Resistência a Flexão	56
4.2.10.2 Análise Estatística	57
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE COTIA	58
5.1.1 Caracterização Dimensional	58
5.1.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier da Fibras	60
5.1.3 Espectroscopia Raman das Fibras	62
5.1.4 Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Exploratória (DSC)	63
5.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)	64
5.1.7 Caracterização Mecânica da Fibra de Cotia	68
5.1.7.1 Resistência a tração	68
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	71
5.2.1 Espectroscopia por transformada de Fourier dos Compósitos	71
5.1.2 Espectroscopia Raman dos compósitos	73
5.1.3 Caracterização Mecânica dos Materiais compósitos reforçados com fibras de Cotia	74
5.1.3.1 Propriedades mecânicas em Tração	74
5.1.3.1.1 Análise da região de fratura dos compósitos ensaiados por Tração	77

5.1.3.2 Propriedades mecânicas em Flexão	81
5.1.3.2.1 Análise da região de fratura dos compósitos ensaiados por Flexão.....	83
5.1.4 Análise Estatística (ANOVA)	86
5.1.4.1 ANOVA F Único - Tração das Fibras	86
5.1.4.2 ANOVA F Único - Tração dos Compósitos	89
5.1.4.3 ANOVA F Único - Flexão dos Compósitos.....	92
5.1.4.4 ANOVA F Duplo - Tração dos Compósitos	95
5.1.4.5 ANOVA F Duplo - Flexão dos Compósitos	96
6 CONCLUSÕES	98
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

1 INTRODUÇÃO

Os materiais são partes integrantes da vida humana, na formação de produtos que estão inserido em áreas comuns da sociedade. O desenvolvimento de pesquisas sobre materiais, com propriedades e características intrínsecas às suas particularidades, permite a evolução no campo da ciência e engenharia (Naik *et al.*, 2022). Os materiais compósitos, assim denominados, têm sido amplamente pesquisados com intuito de alavancar o comércio de novos materiais multifásicos, bem como ampliar e aprimorar os materiais já existentes para diversos campos de aplicações, melhorando suas propriedades específicas (Cavalcante & Fernandes 2023).

Os compósitos são fabricados utilizando uma matriz e um agente de reforço, com a intenção de aumentar as propriedades mecânicas do produto final. De modo geral, a matriz é uma fase contínua que visa proteger, organizar dimensionalmente e transferir os esforços mecânicos da fase matriz para fase dispersa (Kerni *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2022). O reforço constitui-se como uma fase dispersa que apresenta, juntamente com a matriz, resistência necessária para suportar tensões aplicadas, dependendo da forma, distribuição, orientação e tamanho das partículas. A combinação desses materiais, especificamente as variedades de reforços como fibras naturais, permitem um efeito sinérgico ou antagônico entre as fases (Jamir *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2022)

A utilização de fibras naturais como agente de reforço em compósitos poliméricos termofixos e termoplásticos tem ganhado o cenário mundial científico e industrial, por apresentar biodegradabilidade, abundância, baixo custo e gasto de energia no processamento. Suas características como alto módulo específico, leveza e resistência ao desgaste, confirmam sua utilidade na confecção e melhora de propriedades de materiais multifásicos (Aisyah *et al.*, 2020; Aisyah *et al.*, 2021). Além disso, se apoiam nos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) destacando-se o ODS 9, que promove o desenvolvimento de soluções ecológicas e sustentáveis na indústria, a ODS 12 por desenvolver materiais com consumo de matérias-primas responsável e a ODS 13, que

representam a utilização de fibras naturais sustentáveis, reduzindo a dependência de matérias-primas sintéticas.

Autores como Sabaruddin *et al* (2020) e Asrofi *et al* (2020), dissertam que fibras naturais de bambu, dendê, bagaço de cana-de-açúcar, juta e abacaxi têm expandido o campo de pesquisa e fabricação de materiais compósitos de matriz polimérica, pois melhoram as propriedades do compósito e são ambientalmente sustentáveis. Apesar da similaridade química, as fibras naturais são diferentes em termos de suas propriedades mecânicas e físicas em relação ao diâmetro, comprimento e peso específico (Lau *et al.*, 2018; Haris *et al.*, 2022).

As fibras lignocelulósicas (NFL's) apresentam estruturas formadas por grupos hidroxilas que, em contato com a umidade, tornam-se mais polares e hidrofílicas. Essa característica representa uma desvantagem, não apenas por reduzir a resistência mecânica das fibras, mas também na aplicação em matrizes poliméricas hidrofóbicas, limitando a adesão interface entre as fases (Sarker *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2019; Filho *et al.*, 2020).

Ainda que há extensa investigação sobre fibras naturais, há muito para ser explorado. A região Amazônica dispõe de um grande contingente de matérias-primas para estudo, fibras naturais e plantas com características e propriedades desconhecidas. Esse é o caso da fibra natural Cotia (*Dicorynia paraënsis*), oriunda da região de várzea localizada em áreas ribeirinhas do interior do estado do Pará, utilizadas preferencialmente no comércio local na confecção de cestarias e artesanatos (Adovasio, 2020).

A utilização da fibra de Coria visa estabelecer não só uma relação científica, mas também socioeconômica, promovida pela valorosa atividade que exerce em regiões ribeirinhas do estado do Pará, atrelada a sua abundância natural. Além disso, a utilização dessa fibra dispersa em uma matriz polimérica pode gerar produtos com características e propriedades únicas aplicáveis em diversas áreas da engenharia. Essas características e propriedades podem ser aprimoradas e melhoradas, considerando a utilização de métodos químicos que visam modificar estruturalmente a fibra natural.

Dessa forma, os materiais compósitos utilizando essa fibra podem ser uma nova alternativa ao desenvolvimento de materiais verdes e sustentáveis.

O tratamento de mercerização têm o potencial de aprimoramento das propriedades essenciais das fibras e dos compósitos resultantes. Assim, este estudo realiza uma investigação detalhada das características e propriedades mecânicas, morfológicas e microestruturais das fibras de Cotia. Além disso, avaliar as propriedades químicas e mecânicas do tratamento superficial por mercerização com hidróxido de sódio, bem como o desempenho mecânico de materiais compósitos reforçados com fibras *in natura* e mercerizadas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar, pela primeira vez, a fibra de Cotia, além de obter e avaliar mecanicamente os compósitos produzidos com a fibra *in natura* e mercerizada em matriz poliéster.

2.2 Objetivo Específico

- Estudar as propriedades físicas, químicas, morfológicas e térmicas das fibras de Cotia *in natura* e mercerizadas em hidróxido de sódio, por meio Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Termogravimetria (TGA), Calorimetria Exploratória (DSC), Energia Dispersiva (EDS) e Espectroscopia Raman.
- Estudar e avaliar as propriedades mecânicas das fibras de Cotia *in natura* e mercerizadas;
- Avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos a partir de fibras de Cotia *in natura* e mercerizadas por ensaios mecânicos de Tração e Flexão;
- Analisar microestruturalmente a região de fratura dos compósitos por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados conceitos relacionados ao objetivo de estudo, buscando o embasamento teórico e posterior entendimento prático.

3.1 Resinas poliméricas

Segundo Hsissou *et al* (2021) a utilização de resinas poliméricas desempenha um grande papel na substituição de materiais com alto teor corrosivo e alto desgaste, devido a excelente versatilidade e resistência química.

As resinas poliméricas foram difundidas com intuito de produzir novos materiais sintéticos, a partir de combinações de pré-polímeros e vários outros componentes ativados quimicamente (Ramakrishan *et al.*, 2022). Essas combinações conferem ao polímero cadeias longas e ligações que podem tornar o material duro ou maleável dependendo da condição térmica. Sua utilidade deve-se não só por baixos custos, mas também pelo alto desempenho e propriedades desejáveis para aplicações em diversos setores industriais (Momanyi *et al.*, 2019; Chyr & Desimoni, 2023).

Segundo Petershans (2018), as resinas poliméricas seguem aspectos fundamentais que as diferenciam e as tornam essenciais para aplicações em materiais compósitos. O quadro 1 descreve os aspectos fundamentais que caracterizam as resinas poliméricas.

Quadro 1 – Aspectos que caracterizam as resinas poliméricas.

Aspecto físico – químico	Ambiente ao qual o produto final será aplicado, dependendo diretamente da temperatura, umidade, reatividade, contração, nível de fumaça e características anti-chamas;
Aspectos mecânicos	Resistência a tração, flexão e impacto; rigidez; alongação;
Aspectos de manufatura	Viscosidade da resina; ambiente de operação; acabamento superficial

Aspectos econômicos	vida útil da resina, bem como o preço de aquisição; diferenças entre preços das resinas
---------------------	---

Fonte: Adaptado de Petershans, 2018.

Outras características e/ou aspectos e limitações das resinas poliméricas estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características e limitações das resinas poliméricas.

Resina	Característica	Limitações
Epóxi	Excelente propriedade em compósitos; boa resistência química e propriedades elétricas; boas propriedades térmicas baixa contração na cura	Longos ciclos de cura; Melhores propriedades obtidas em altas temperaturas de cura
Fenólica	Ótimas propriedades térmicas; boa resistência ao fogo; boas propriedades elétricas	Cor
Vinil	Boa resistência à fadiga	Emissão de estireno
Poliéster	Amplamente utilizada; fácil uso; Cura a temperatura ambiente; ótimas propriedades em compósitos; Boa resistência química; boas propriedades elétricas	Emissão de estireno; Contração durante a cura inflamável
Poliuretano	Boas propriedades em compósitos; muito boa resistência química; alta dureza (resistência ao impacto); boa resistência a abrasão	Cor; Isocianetos como agentes de cura
Silicone	Ótimas propriedades térmicas; excelente resistência química; ótimas propriedade elétricas; resistente a hidrólise e oxidação; boa resistência ao fogo; não tóxico	Adesão; longos ciclos de cura; cura somente a altas temperaturas
Ester	Excelentes propriedades em compósitos; boa resistência química; boa dureza	Contração durante a cura Inflamável

Fonte: Lopes, 2017.

Atreladas a esses aspectos e características, as resinas poliéster e epóxi são as mais utilizadas na confecção de materiais compósitos e em produtos, gerados para aplicações principalmente em áreas das indústrias navais e militares. Além disso, atuam efetivamente na estrutura do compósito como forma de proteção, organização e distribuição do reforço.

3.1.1 Resina Poliéster

As resinas poliésteres são polímeros com alto peso molecular, formadas por processos de policondensação entre diácidos com um diálcool, além de um monômero insaturado de estireno e ligações de ésteres e ácidos, que formam possíveis cadeias com diferentes ligações (Debowski *et al.*, 2019; García *et al.*, 2019). A utilização de resina poliéster está diretamente relacionada as boas propriedades, tais como, rigidez, tenacidade, resistência ao calor, estabilidade térmica, resistência a produtos químicos, além de boa adesão como matriz em materiais compósitos (Hofmann *et al.*, 2022).

A partir das suas particularidades, as resinas dividem-se em dois tipos, as resinas poliésteres saturadas e insaturadas, podendo apresentar característica termorrígida ou termoplástica (Higgins *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2021; Merlini, 2021).

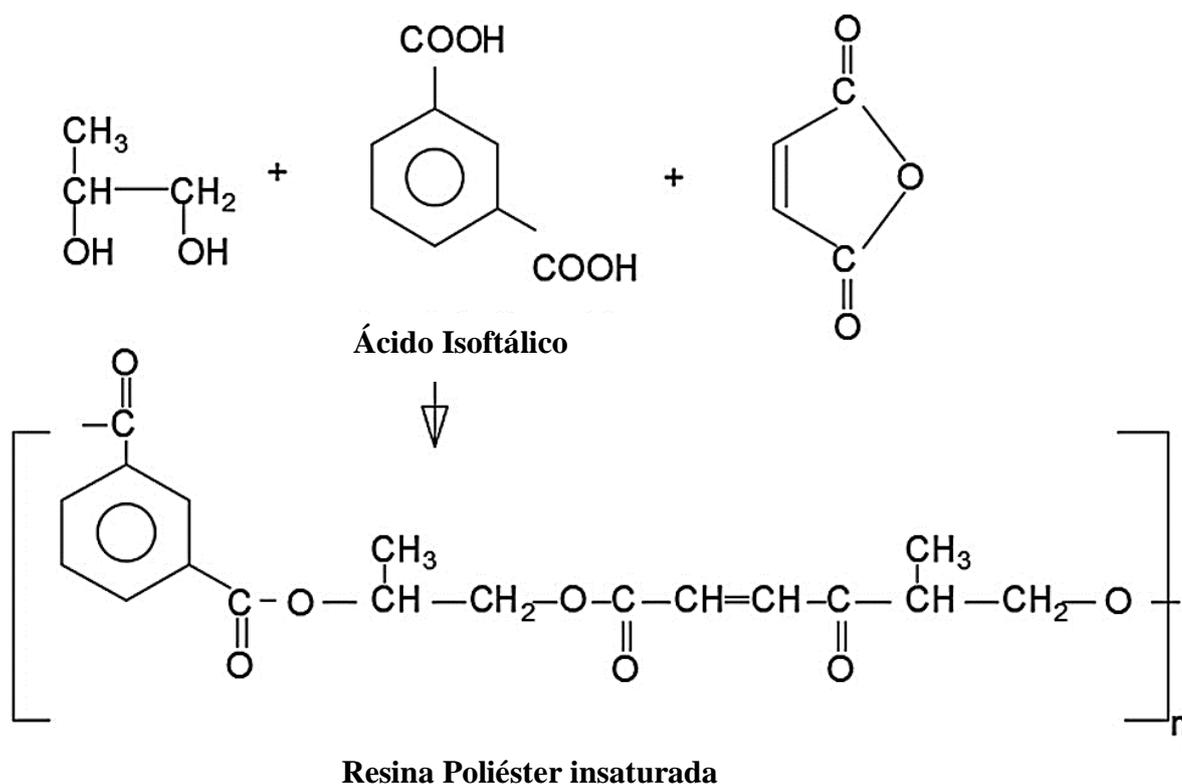
Poliésteres saturados, são obtidas por uma reação de policondensação que envolve um ácido, geralmente ácido dicarboxílico saturado, e um álcool, cuja a cadeia é composta apenas por ligações simples entre átomos de carbono, formando um polímero termoplástico. Os polímeros poliésteres saturados são utilizados principalmente na produção de filmes, compósitos com fibras sintéticas ou naturais, plastificantes e outros (Higgins *et al.*, 2020).

Por outro lado, os poliésteres insaturados são formados por uma reação de ligação dupla entre átomos de carbono, utilizando ácido saturado (determina o grau de espaçamento das moléculas entre os ácidos insaturados), ácidos insaturados (promove pontos reativos de ligações duplas) e um biálcool (Gao *et al.*, 2019; Quirino *et al.*, 2020). Os polímeros poliésteres insaturados são classificados como termorrígidos e podem ser utilizados em quase todos os tipos confecções de produtos (Molina *et al.*, 2019; Athawalw & Pandit, 2019).

Durante a etapa de cura das resinas poliméricas, vários endurecedores e aceleradores são utilizados. Os catalizadores pré-aceleram a mistura para produzir uma reação exotérmica, já o acelerador controla os picos exotérmicos da reação. A utilização de endurecedores ou aceleradores resultam em polímeros com elevada quantidade de ligações cruzadas na estrutura (Miah *et al.*, 2022).

O processo de cura ocorre com adição de agente de cura, um endurecedor, que, após um curto período, transforma fisicamente um estado líquido, viscoso e gelatinoso para um estado com formação de uma estrutura sólida termorrígida e irreversível (García *et al.*, 2019; Miah *et al.*, 2022). A Figura 1 apresenta as estruturas moleculares de uma resina poliéster curada e não curada.

Figura 1- Estrutura química da resina poliéster insaturada.



Fonte: Kumar *et al* (2021).

Em razão de tais ligações que ocorrem dentro da estrutura do material, podem ser divididas em vários tipos de resinas poliésteres, as principais são ortoftálicas, tereftálicas e isoftálicas. A Tabela 2 apresenta os tipos de resinas poliésteres e suas características.

Tabela 2 - Tipos de resinas poliésteres e suas características.

Tipos	Características
Ortoftálicas	Resina mais comum, de menor custo, para usos básicos .
Tereftálicas	Possui resistência física um pouco superior a ortoftálica, no entanto baixa resistência UV.
Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores.

Fonte: Lopes, 2017.

As resinas ortoftálicas não possuem boa resistência química e térmica, sendo produzidas a partir de ácidos ortoftálicos e divididas de acordo com sua utilidade, as mais comuns são as resinas cristal e ortoftálica *Standard*. As resinas ortoftálicas do tipo cristal contêm agentes tixotrópicos, que impedem o escoamento expressivo da resina em superficiais em posições verticais. São utilizadas principalmente em produção de telhas, domos, botões e outras aplicações. Em contrapartida, as resinas ortoftálicas *Standard* possuem variações proporcionais de anidrido maleico, além de trocas de glicóis, ocorrendo em menor ou maior tempo de reação. Podem ser utilizadas em diversos sistemas de produção por serem mais ou menos rígidas, elevadas ou baixas viscosidades e altas reatividades (Baggio, 2021).

As resinas tereftálicas são formuladas a partir de neopentilflicol, propileno glicol e ácido tereftálico. Apresentam excelentes resistência mecânica e em ambientes elétrico e térmico, superiores as resinas ortoftálicas (Lin *et al.*, 2022). São indicadas principalmente para ambientes que necessitam de maior resistência a corrosão, tais como, tanques, estruturas de tubulações, revestimento industriais e outros (Baggio, 2021).

As resinas poliéster isoftálicas são formuladas a partir de ácido isoftálico. Dividem-se em dois tipos: resinas isoftálicas comuns e as resinas neopentilglicol (NPG). As resinas isoftálicas comuns são formuladas a partir de um elemento básico conhecido como propileno glicol, que fornecem resistência química, superior as resinas ortoftálica (Baggio, 2021). Enquanto as resinas NPG, são

formuladas a partir de neopentilglicol e, por apresentarem boas resistência mecânica, química e térmica, são aplicadas em estruturas que envolvem ambiente corrosivos, tais como, tubulações, tanques e barcos (Mohan *et al.*, 2019).

Devido a excepcional capacidade termorrígida e os elevados potenciais dispersivos, a resina poliéster pode ser utilizada como matriz com ou sem reforço, apresentando boas propriedades físico-mecânicas, substituindo até mesmo materiais ferrosos (Baggio, 2021; Tayde *et al.*, 2023).

3.2 FIBRAS NATURAIS

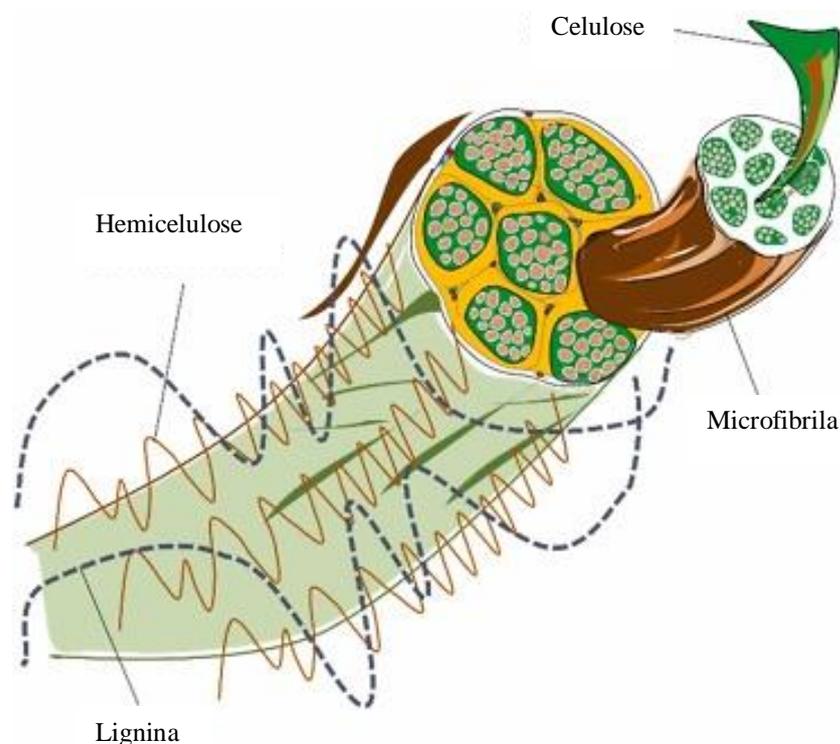
Nos últimos anos, as fibras naturais vêm sendo exploradas no meio técnico-científico para diversas aplicações em vários setores industriais, especialmente por serem materiais sustentáveis, biodegradáveis, baixo custo, recicláveis e não tóxicos (Gholambour & Ozbakkaloglu, 2020; Mousavi, *et al.*, 2022). Em razão a estas características, países utilizam fibras naturais como insumos para produção de móveis, embalagens e segmentos da construção civil, devido ao baixo custo de processamento e grande abundância (Klimek *et al.*, 2018).

No Brasil, considerado a capital mundial da floresta nativa amazônica, muitas são as plantas e matérias-primas naturais que apresentam características e propriedades fundamentais para estudos e aplicações. As fibras naturais, oriundas dessa biomassa, configuram como uma alternativa sustentável, substituindo fibras sintéticas como kevlar, fibras de vidro e fibras de carbono com alto valor de compra, matérias-primas com caráter ecológico (Ahmed *et al.*, 2021; Siddika *et al.*, 2020; Ribaski *et al.*, 2021).

As fibras vegetais ou lignocelulósicas são constituídas principalmente por celulose, hemicelulose, lignina e pectina, constituintes base que indicam as propriedades físicas finais das fibras naturais (Gholambour & Ozbakkaloglu, 2020; Shadhin *el at.*, 2023). A Figura 2 apresenta a geometria, na qual os constituintes estão distribuídos ao longo da planta. Pode-se observar que o

elemento celulose está conectado em microfibrilas, que serão revestidas pelas hemicelulose, originando uma estrutura com conformação de rede aberta.

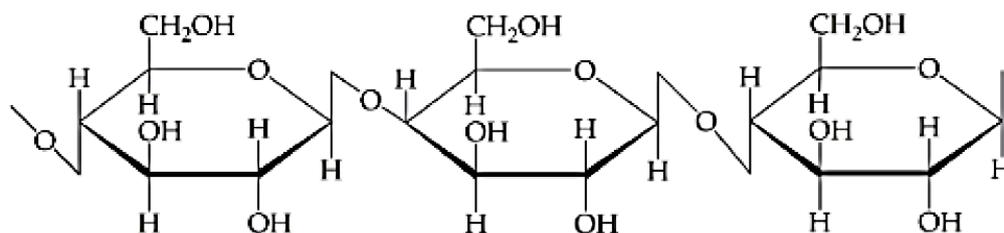
Figura 2 - Ilustração esquemática da seção transversal de microfibrilas.



Fonte: SHADHIN *et al* (2023).

A celulose, cuja a estrutura química apresentada na Figura 3, é responsável pela resistência e rigidez das fibras, apresenta como unidade elementar uma macromolécula de celulose constituída de anidro-*d*-glicose, a qual contém três radicais hidroxila (-OH). As hidroxilas resultam em ligações de hidrogênio dentro das moléculas (intra-molecular), que a tornam altamente hidrofílica e resistentes a ambientes alcalinos e oxidantes (Monteiro *et al.*, 2011; Koohestani *et al.*, 2018; Hasan *et al.*, 2020; Masson *et al.*, 2021).

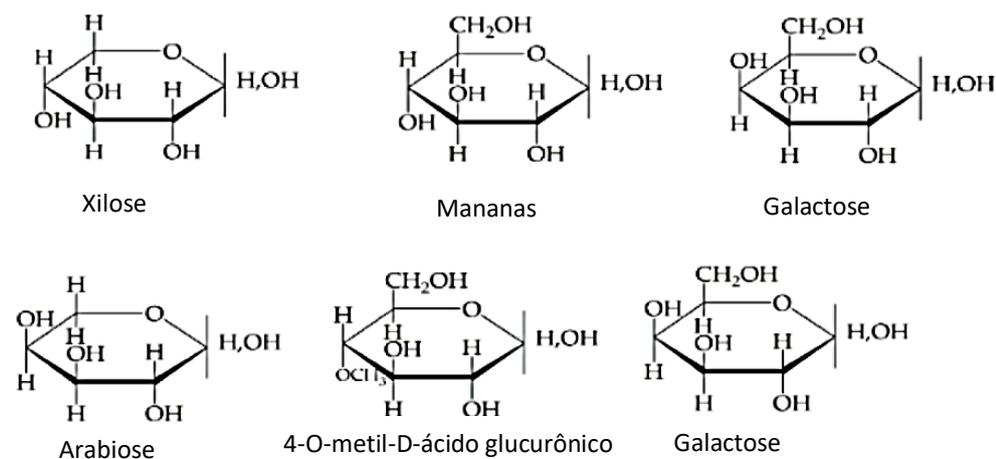
Figura 3 - Estrutura química da celulose.



Fonte: Adaptado de Thakur *et al* (2015) e Hasan *et al* (2020).

A hemicelulose inclui polissacarídeos formados por açúcares de cinco a seis anéis de carbonos, que formam as paredes vegetais. É hidrolisável e solúvel em álcalis, além de envolver as microfibrilas de celulose, conferindo flexibilidade e elasticidade a planta (Verma *et al.*, 2016; Koohestani *et al.*, 2018). São formações de macromoléculas de cadeias lineares e ramificadas que classificam-se como xilanas, mananas, arabinoxilanas e ramificações constituídas de ácido acético, pentoses, ácidos hexurônicos (Souza & Kawaguti, 2021). Embora presente nas plantas, o tipo de hemicelulose depende da espécie vegetal, e também da localização e estágio de desenvolvimento. A Figura 4 apresenta estrutura química da hemicelulose com a presença na cadeia principal de xilose, ramificações de grupos acetil, unidades de arabinose e ácido metilglucurônico.

Figura 4 - Estrutura química da Hemicelulose.

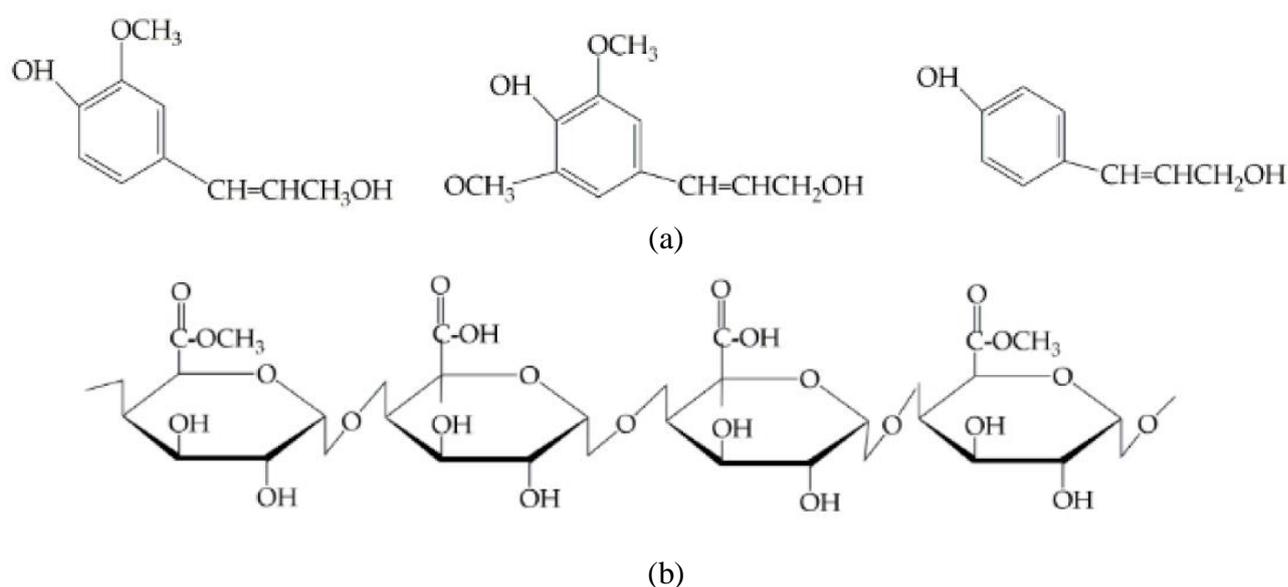


Fonte: Adaptado de Thakur *et al* (2015) e Hasan *et al* (2020).

O constituinte lignina é um copolímero tridimensional amorfo, hidrofóbico, heterogêneo, ramificado presente na parede celular das fibras. Quando combinado com a hemicelulose, envolve as microfibrilas de celulose e outros polissacarídeos. Devido a este fato, confere uma maior resistência, alto grau de polimerização, enrijecimento e fortalecimento em volta das microfibrilas. Já as pectinas, apresentam diferentes tipos de álcoois e fornecem flexibilidade às plantas (Koohestani *et al.*, 2018).

A Figura 5 apresenta a estrutura química da lignina e pectina.

Figura 5 - Estrutura química da lignina (a) e Pectina (b).



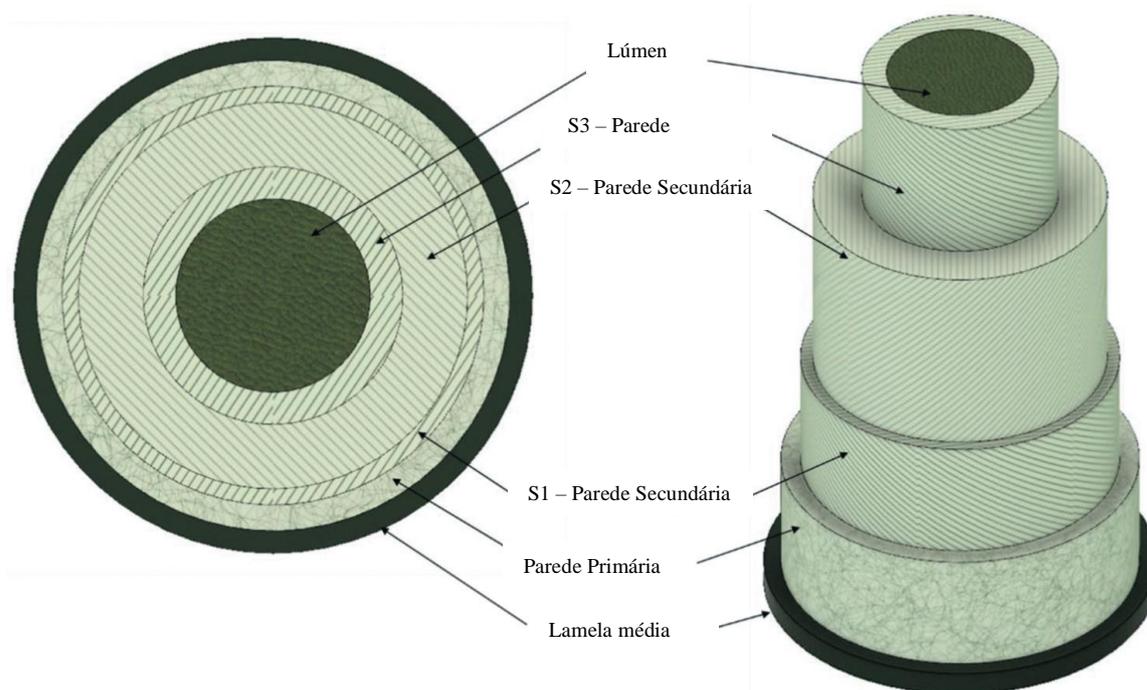
Fonte: Adaptado de Thakur *et al* (2015) e Hasan *et al* (2020).

As fibras naturais apresentam estruturas complexas compostas por um arranjo estrutural de multicamadas, com estrutura de lúmen e uma parede celular (Lyu *et al.*, 2021). As estruturas são formadas por cadeias primárias e secundárias, com cada camada ligada de acordo com espessura e composição química para cada tipo de fibra (Lotfi *et al.*, 2021). O lúmen é considerado um canal fundamental para transição de nutrientes, tais como, água e elementos primordiais para sobrevivência da planta. Os canais de distribuição sofrem variações para cada tipo de planta que, conseqüentemente,

podem causar anisotropia nos feixes de fibras, contribuindo continuamente para as diversas variações microestruturais das fibras (Shadhin *et al.*, 2023).

Segundo Brissac *et al* (2018) e Shadhin *et al* (2023), as fibras apresentam estrutura complexa a qual a camada primária fica envolta por uma camada secundária. A camada intermediária da parede secundária é formada por várias microfibrilas organizadas helicoidalmente por cadeias de celulose, em direção ao sentido da fibra. As microfibrilas são formações de cadeias de celulose estendidas, formando um empacotamento. A partir disso, são revestidas com hemicelulose e lignina, as quais, dependendo do ângulo fibrilar e, juntamente com a celulose, conferem as propriedades mecânicas das fibras naturais. A Figura 6 apresenta como as camadas e lúmen ficam dispostos em fibra vegetal.

Figura 6 - Constituição elementar das fibras vegetais.



Fonte: Adaptado de Chokshi *et al* (2020).

Silva *et al* (2018) e Praveena *et al* (2022) argumentam que as propriedades das fibras podem ser definidas de acordo com o teor de celulose presente, além do grau de polimerização e ângulo fibrilar, que podem desempenhar alta ou baixa resistência a tração e rigidez.

A Tabela 3 apresenta a algumas fibras naturais em relação as propriedades mecânicas de fibras sintéticas.

Tabela 3 - Propriedades das fibras naturais e sintéticas.

Fibras	Densidade (g/cm³)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de young (GPa)
Bambu	1,03 – 0,49	106	-
Banana	0,67 – 1,50	700 - 800	27- 32
Buriti	0,63 – 1,12	129 - 254	-
Curauá	0,57 – 0,92	117 - 3000	27 - 80
Juta	1,30 – 1,45	393 – 800	13 - 27
Piaçava	1,10 – 1,45	109 - 1750	5 - 6
Sisal	1,26 – 1,50	287 - 913	9 - 28
Vidro	2,50 – 2,58	2000 - 3450	70 - 73
Carbono	1,78 – 1,81	2500 - 6350	230 - 400
Aramida	1,44	3000 - 4100	63 - 131

Fonte: Monteiro *et al* (2011).

Alguns estudos com fibras naturais revelaram o potencial uso desse material como agente de reforço para materiais compósitos. Dalmis *et al* (2020), caracterizaram mecanicamente as propriedades da fibra do caule de *Chrysanthemum morifolium*, e obtiveram resistência à tração similar aos das outras fibras naturais. Além disso, observaram que baixo diâmetro da região central (lúmen) revela a diminuição da densidade e, conseqüentemente, alta resistência, alta hidrofobicidade e melhores propriedades de isolamento e absorção.

Perumal & Sarala (2020), caracterizaram uma nova fibra celulósica extraída do caule de *Derris Scandens*, observaram que as fibras apresentaram resistência superior as outras fibras naturais, em

razão ao elevado percentual de celulose como constituinte principal. Além disso, adicionam que a presença de rugosidades superficial da fibra pode contribuir para adesão química entre a matriz polimérica e, conseqüentemente, características desejáveis para aplicação em material compósito.

Silva *et al* (2020), investigaram as características física, química e mecânica de fibras extraídas do pseudocaulo de Bananeira de *Musa Sapientum*, visando aplicar como reforço em materiais compósitos. As investigações sobre as características indicam que as fibras de bananeira apresentam características hidrofílicas com baixa densidade, quando comparadas as fibras sintéticas. Além disso, observou-se que fibras de menores diâmetros apresentam maior resistência mecânica em relação a fibras de maior diâmetro, atreladas aos diversos defeitos microestruturais oriundos na estrutura da fibra de maior diâmetro.

Shiva *et al* (2020), investigaram a utilização e as propriedades das fibras naturais extraídas da fruta *Kigelia africana*. Os resultados apontaram que as fibras atuam efetivamente como agente de reforço em materiais compósitos para diversas aplicações, em razão dos potenciais mecânicos, leveza, baixo custo e ligação química entre a matriz e o reforço.

Tamanna *et al* (2021), avaliaram a propriedade em tração de uma nova fibra natural extraída do fruto *Corypha taliera*, e observaram que a alta quantidade percentual do constituinte celulósico proporcionou maior resistência mecânica, cerca de 55 MPa, e menor densidade. Tais características influenciam na confecção de compósitos relativamente leves e mais sustentáveis.

Gopinath *et al* (2021), estudaram as propriedades físico-químicas e térmicas da fibra extraída da casca da *Albizia Saman*. Os resultados mecânicos (381-1092 MPa) e térmicos foram superiores a várias fibras naturais encontradas na literatura, exibindo alta performance na aplicação em materiais compósitos de matriz polimérica. Além do mais, apresentam baixa densidade média e elevado teor de celulose, resultando em uma matéria-prima leve e de grande versatilidade.

Belouadah *et al* (2021), caracterizaram uma fibra lignocelulósica extraída da planta *Atriplex Halimus*. Observou-se que tratamentos químicos realizados na fibra as tornaram mais resistentes

mecanicamente (entre 229 MPa e 188 MPa) e melhoraram outras propriedades, tais como, estabilidade térmica química e os índices de cristalinidade. A fibra apresenta ampla disponibilidade que as qualificam para utilização em materiais compósitos.

Junio *et al* (2023), investigaram as propriedades mecânicas e morfológica da fibra natural de carnaúba, para possível produção de compósitos poliméricos. De acordo com os resultados de densidade, infere-se que diminuição da densidade está ligada ao aumento do diâmetro da fibra. Essa característica associa-se ao comportamento mecânico da fibra estudada. Os resultados de resistência a tração média para este estudo foram de $64,7 \pm 40,9$ MPa, módulo de Young de $1,37 \pm 0,80$ GPa e alongamento de $5,59 \pm 1,60\%$. Já a análise morfológica revelou a presença de defeitos e falhas comuns encontrados em fibras naturais. Dessa forma, segundo os autores, as fibras naturais de carnaúba apresentam elevado potencial para aplicação de compósito de matriz polimérica.

Pinheiro *et al* (2023), observaram as características e o comportamento mecânico de uma fibra natural da Amazônia conhecida com periquiteira, como possível substituição a fibra sintéticas. De acordo com os autores, as fibras de periquiteira apresentou densidade aparente próxima de $0,43 \text{ g/cm}^3$ e resistência média a tração igual a 178 MPa e variação no módulo de Young quando há um aumento no diâmetro. Outros resultados indicaram que o material estudado apresenta constituintes característicos de fibras naturais e aspectos morfológicos rugosos. Os autores concluem que a fibra de periquiteira apresenta grande potencial para atuar como agente de reforço em materiais compósitos de matrizes poliméricas.

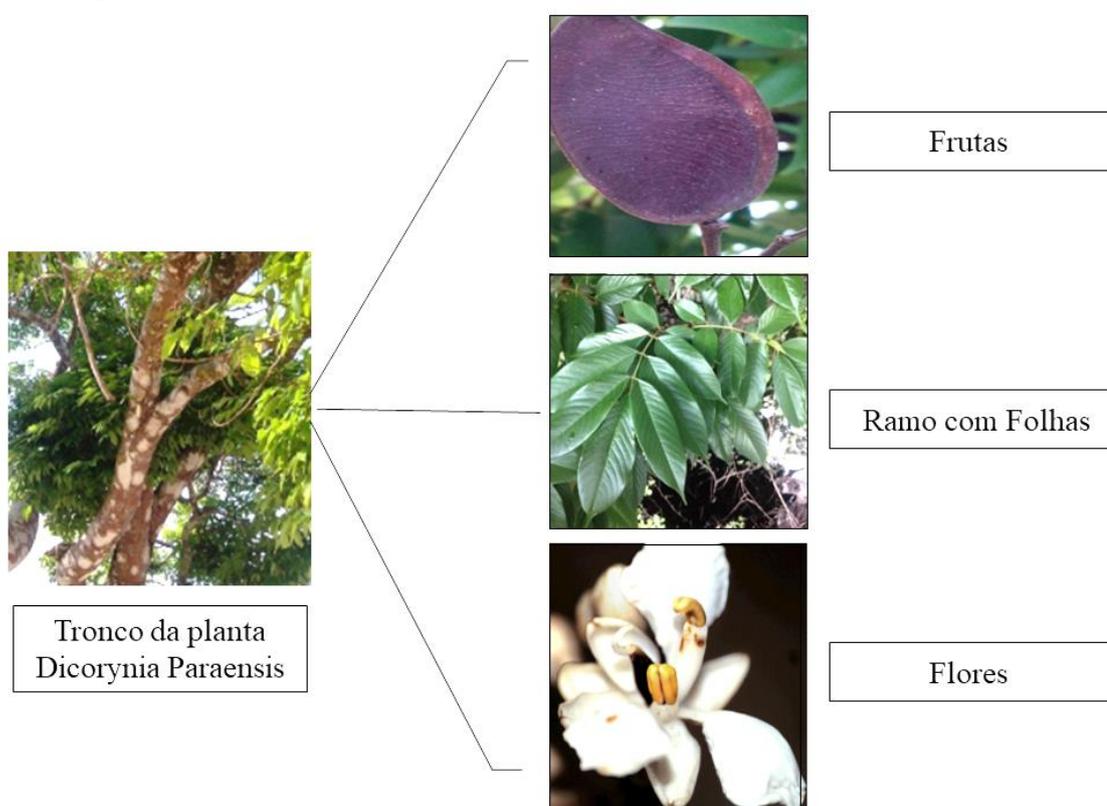
Dessa forma, devido ao baixo custo, boas propriedades mecânicas, baixa densidade, sustentabilidade e biodegradabilidade agregada a ocorrência em meio natural, as fibras naturais são constantemente preteadas no mercado consumidor de materiais compósitos (TIAN, *et al.*, 2021; MOUSAVI, *et al.*, 2022).

3.2.1 Fibra de Cotia

A natureza sofre ciclos regenerativos e constantes transformações visando proteger e equilibrar o ecossistema (Ducarme & Couvet, 2020). Atualmente, esse meio apresenta matérias-primas pouco conhecidas ou exploradas no meio técnico-científico. As fibras naturais de Cotia ou Cedro da família das fabaceae, oriunda da espécie do gênero *Dicorynia paraënsis*, são abundantes da região norte do Brasil, especificamente das bacias Amazônicas das regiões de várzeas e ribeirinhas do interior do estado do Pará (Falcão & Mansano).

A *Dicorynia paraënsis* apresenta formas variadas, contendo cerca de 5-13 folíolos, troncos entre 8 a 50 metros de altura, de cores marrom, cinza e listras vermelhas. Apresenta botões florais globosos, elípticos com coloração branca, com características assimétricas (Falcão *et al.*, 2022). A Figura 7 apresenta características da planta do gênero *Dicorynia paraënsis*, segundo Falcão *et al* (2022).

Figura 7 - Infográfico da árvore de Coti



Fonte: Adaptada de Falcão *et al* (2022).

Do tronco são retiradas as fibras e, em comunidades ribeirinhas e quilombolas, são popularmente utilizadas na confecção artesanal de cestos, cordas e objetos de pesca rudimentares. São matérias-primas biodegradáveis, renováveis, leves e de baixo custo (Jeyapragash *et al.*, 2020). Além disso, são materiais verdes, abrangem não só o meio científico, mas também, o meio social, ambiental e econômico, seguindo os requisitos 8, 9 e 12 estabelecidos pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Contudo, a investigação de uma nova fibra natural abre portas para o desenvolvimento de materiais compósitos verdes mais sustentáveis, ampliando o campo de pesquisa para novas aplicações tecnológicas.

3.3 TRATAMENTOS QUÍMICOS EM FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais apresentam estruturas formadas por elementos que favorecem suas condições físicas e químicas, tais como hemicelulose, pectina e lignina (RELAJA *et al.*, 2020). Essas estruturas são formadas por grupos de –OH, ligações polares que geram delaminações na estrutura das fibras e a matriz. Os grupos OH, em contato com umidade, promovem mais ligações químicas pelas quebras e ramificações químicas de OH, o que a torna mais hidrofílica (Arun *et al.*, 2022).

Tratamentos químicos são realizados para otimizar as condições mecânicas, químicas e físicas das fibras naturais, em conformidade a interação entre uma matriz hidrofóbica (Arun *et al.*, 2022). A adesão interfacial é uma linha que categoriza a funcionalidade final dos compósitos de matriz polimérica (Manimaran *et al.*, 2018; Jothi *et al.*, 2024). Uma ligação ineficiente, promove propriedades mecânicas fracas e de fácil ruptura (Gholampour *et al.*, 2020).

Algumas desvantagens relacionadas a sensibilidade das fibras por fatores externos como umidade e absorção de água, resulta na delaminação e redução da sinergia entre as fases. Além disso, diferentes condições ambientais, tais como solo, umidade, período de crescimento, tempo de colheita até o processamento e produção, podem afetar o desempenho estrutural das fibras naturais (Thakur *et al.*, 2014; Sathish *et al.*, 2021a). Alguns métodos utilizando tratamentos físicos, visam melhorar a

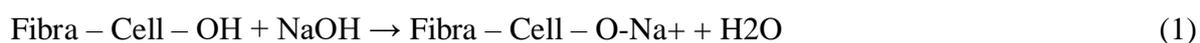
adesão interfacial sem modificar a estrutura química da fibra. Esse tratamento físico inclui a realização de plasma, ultravioleta e tratamentos térmicos, além de outros tratamentos que visam estabelecer a melhora na compatibilidade entre a matriz e o reforço (Sathish *et al.*, 2021b).

Os métodos mais comuns para a modificação ou alteração estrutural estão atrelados a condições químicas que as fibras naturais, dessa forma, os tratamentos, como acetilação, benzoilação, peróxido, isocianatos, acrilação e o mais comum, tratamento alcalino envolvendo álcali, são realizados com objetivo de remover constituintes amorfos ou impurezas que promovam a diminuição da resistência a esforços (Gholampour *et al.*, 2020; Sathish *et al.*, 2021b).

3.3.1 Tratamento químico por Hidróxido de Sódio (NaOH)

Os tratamentos químicos podem diminuir a hidrofiliabilidade das fibras, além de tornar a superfície mais reativa, rugosa ou lisa, o que reduz o teor de elementos e umidade presente na fibra e, assim, melhorar a interação interfacial entre as fases (Sathish *et al.*, 2021b).

O tratamento alcalino ou mercerização, consiste na utilização de reagente a base de álcali, como hidróxido de sódio (NaOH). O tratamento alcalino promove a quebra das ligações de hidrogênio, o que modifica a estruturas mais cristalinas da celulose, levando a formação de uma estrutura mais desorganizada. Nesse procedimento, as micromoléculas da celulose são separadas e preenchidas pelo conteúdo químico (Arun *et al.*, 2022). As moléculas do grupo –OH são rompidas e, com aumento da concentração de água pelo alcali, são separadas na estrutura da fibra. A partir daí é formada a uma estrutura de ligações de –O–Na integradas as demais cadeias, o que reduz a ligação –OH (Ali *et al.*, 2018). A equação 1 explica como as reações químicas ocorrem na estrutura da fibra.



Além de promover superfícies mais limpas, diâmetros reduzidos e uniformes, livres de impurezas e constituintes amorfos, tais como hemicelulose, lignina, pectinas, ceras e outras substâncias (Arun *et al.*, 2022). Embora a atividade química promovida pelo NaOH seja desejada, as

altas concentrações podem levar as deslignificação e enfraquecimento das fibras por danificações originadas (Sahu *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2024; Jothi *et al.*, 2024).

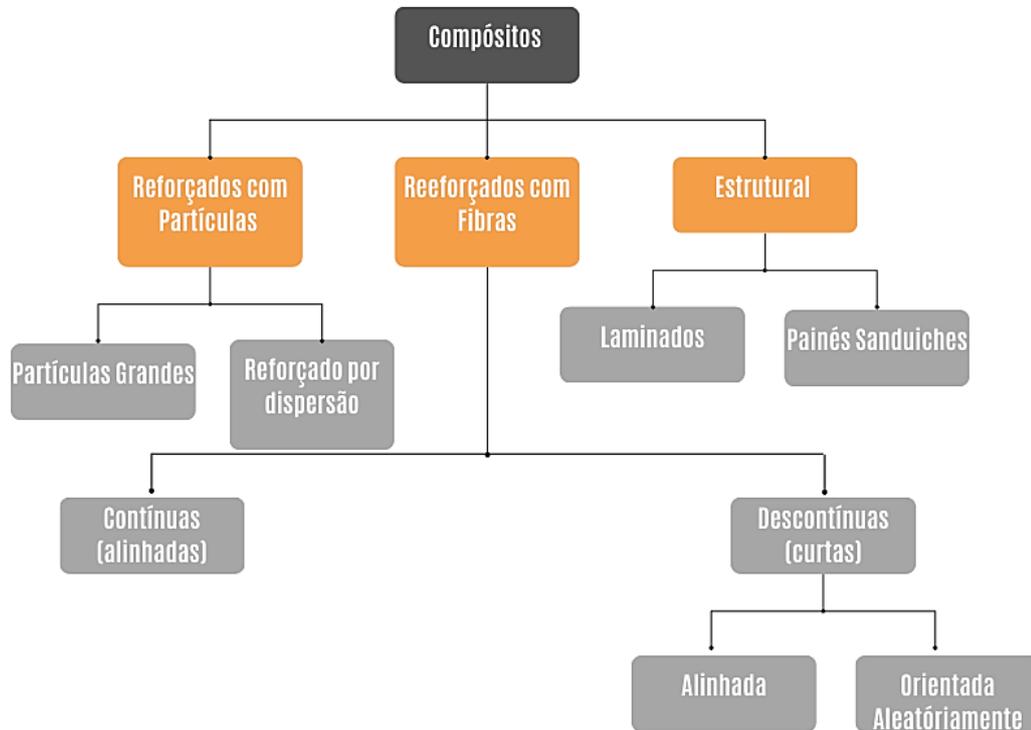
Investigações sobre fibras naturais visam identificar como os tratamentos químicos podem melhorar a instabilidade térmica, mecânica e adesão interfacial entre a matriz e o reforço natural.

3.4 MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos são formados a partir de dois ou mais constituintes, com distintas composições, estruturas e propriedades (Mussato *et al.*, 2016; Weli *et al.*, 2020; Sharkir *et al.*, 2021). As combinações de diferentes materiais visam produzir um material com propriedades e características únicas, em comparação aos constituintes iniciais. Dessa forma, possuem três divisões principais: compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e compósitos estruturais (Egbo, 2021). A fase dispersa é a qual o reforço fica disperso na fase matriz e apresenta como principal característica a absorção de tensões aplicadas ao material (Kumar *et al.*, 2022).

A fase matriz permite continuamente envolver, apoiar e distribuir a fase dispersa. Dividem-se em matriz metálica, cerâmica e polimérica, ambas apresentam propriedades e características diversas que as tornam únicas para determinadas aplicações e obtenções de novos produtos (Sharma *et al.*, 2020). A interação entre a composição química gera ligações fundamentais entre as fases matriz e reforço, para que haja adesão entre os constituintes e, conseqüentemente, melhoria na resistência mecânica do compósito (Mahesh *et al.*, 2019; QU *et al.*, 2022; Furjan *et al.*, 2022). A Figura 8 apresenta as classificações dos materiais compósitos.

Figura 8 - Classificação para vários tipos de materiais compósitos.



Fonte: Egbo, 2021

Compósitos reforçados com partículas: Esses materiais contêm partículas que ficam dispersas em uma matriz de característica metálica, polimérica ou cerâmica. O objetivo principal é melhorar propriedades específicas, como dureza, resistência ao desgaste ou estabilidade térmica. Por exemplo, o concreto, é formado por cimento, areia e agregados, amplamente utilizado na construção civil.

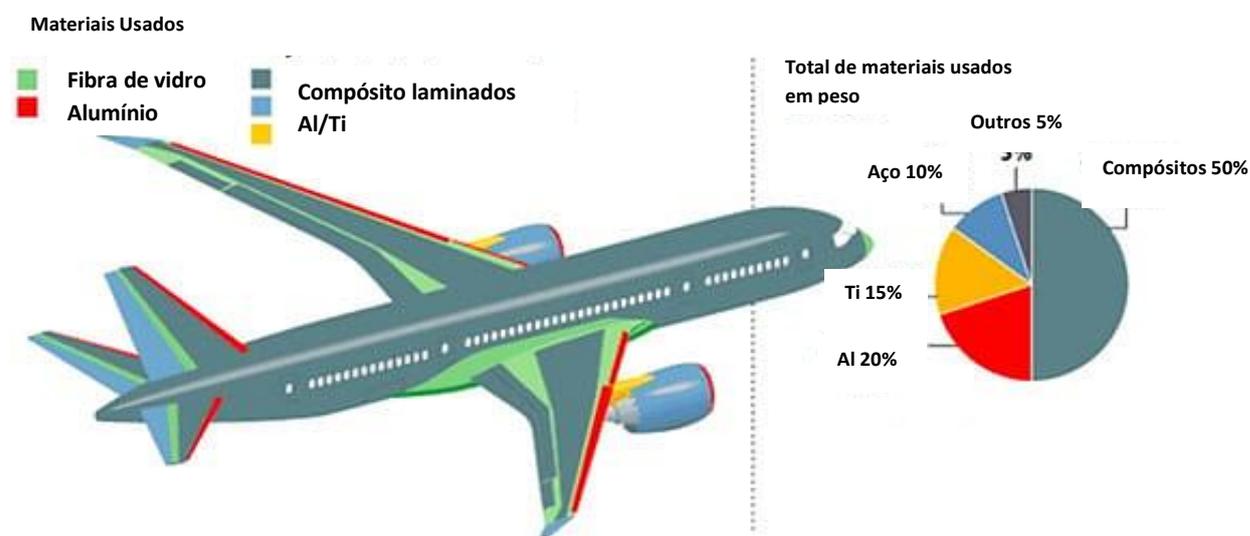
Compósitos estruturais: Compósitos estruturais incluem materiais laminados ou com núcleo-sanduiche, projetados para aplicações que exigem rigidez estrutural elevada com peso reduzido. Esses compósitos são utilizados principalmente em projetos aeroespaciais (Parveez *et al.*, 2022)

Compósitos reforçados com fibras: São compósitos reforçados com fibras contínuas ou descontínuas que atuam como reforço em uma matriz, conferindo alta resistência mecânica e rigidez ao material. As fibras podem ser sintéticas, como fibras de vidro e de carbono, ou naturais, tais como sisal, guarumã, juta e bambu. Os compósitos reforçados com fibras têm aplicação extensa em

estruturas leves e resistentes, como fuselagens de aeronaves, pás de turbinas eólicas e materiais esportivos (Bhong *et al.*, 2023; Nachtane *et al.*, 2023).

A relevância dos materiais compósitos se dá para aplicações de alto porte, devendo exclusivamente ao seu desempenho mecânico e leveza, ao substituir materiais de elevado peso. A Figura 9 apresenta o Boing 787, formado por 50% de materiais compósitos (Parveez *et al.*, 2022). Ainda existem várias soluções que visam tornar produtos altamente engenheirados, mais leves, econômicos e resistentes, utilizando reforços naturais inseridos em matrizes naturais e sintéticas. A Figura 9 apresenta a aplicação de materiais compósitos em fuselagens de aviões.

Figura 9– Aplicação dos materiais compósitos.



Fonte: Parveez *et al.*, 2022.

3.4.1 Materiais compósitos com reforçados com fibras

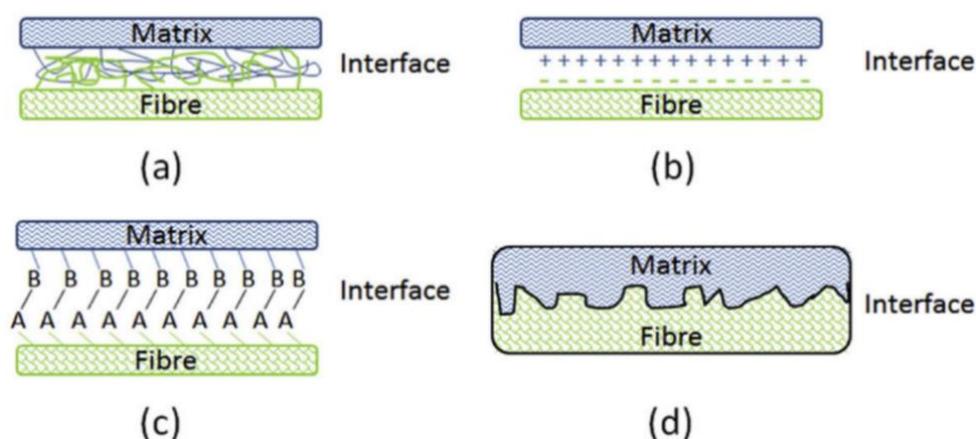
Os materiais compósitos tornam-se altamente pleiteados para diversas aplicações em vários ramos da tecnologia, particularmente os compósitos com fibras sintéticas e naturais, devido as suas propriedades mecânicas como alta rigidez e alta resistência (Omriani, 2016). Os compósitos reforçados com fibras são classificados quanto sua orientação, comprimento fibrilar e a disposição na matriz. O desempenho dos materiais compósitos reforçados com fibras depende exclusivamente de três componentes: matriz, fibra e interface (Lee *et al.*, 2021).

O desenvolvimento de materiais compósitos com fibras possui propriedades determinadas pela ligações e condições interfaciais entre uma matriz o reforço fibroso. A interface, fase intermediária formada pela ligação da matriz e fibra, permite que ocorra fortes ligações, permitindo que as tensões máximas sejam dissipadas sem que ocorra ruptura abrupta (Arulvel *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2021). As principais vantagens estão atreladas ao resistência e peso específico do material compósito, bem como a flexibilidade e resistência a corrosão.

Os principais mecanismos de ligações interfaciais entre fibras e matriz são apresentados a Figura 10, onde são incluídos adesão química, intertravamento mecânico, interdifusão e adesão eletrostática.

A interdifusão é resultado de forças Van der Waals a partir de interações intermoleculares entre as moléculas do substrato da fibra e a matriz utilizada. O mecanismo de adesão eletrostática ocorre por duas camadas de cargas opostas que sofrem constante atividade atrativa. A ligação química, por sua vez, permite a reação entre as ligações interatômicas e iônicas oriundas das características químicas do substrato presente na fibra e resina. Juntos, esses mecanismos têm total influência sobre a adesão entre a matriz e o reforço (Zhou *et al.*, 2016).

Figura 10 - Ilustração esquemáticas dos mecanismos de ligação interfacial. (a) Interdifusão, (b) adesão eletrostática, (c) ligação química e (d) intertravamento mecânico.



Fonte: Lee *et al* (2021).

Além das propriedades interfaciais, as fibras como agente reforço geram diversas características que influenciam as aplicações em materiais. Unterwegwe *et al* (2020), explica que as condições de processamento e o comprimento crítico das fibras têm grande impacto na aplicação em materiais compósitos. O mesmo é apresentado por Assis *et al* (2023), que argumentam que as fibras com comprimento superior ao comprimento crítico, diminuem consideravelmente falhas e defeitos oriundos de processamento. O efeito e sinergia entre a orientação e o comprimento das fibras envolvidas por uma matriz desempenham um papel fundamental no comportamento em tração e impacto em materiais compósitos (Unterwegwe *et al.*, 2020).

Os materiais compósitos reforçados com fibras apresentam vantagens essenciais, que os qualificam para serem utilizados em diversas aplicações estruturais, dentre essas, em edificações, produtos militares, móveis e em outros setores.

3.4.2 Materiais compósitos reforçados com fibras naturais

A utilização de fibras naturais como agente de reforço tem notável visibilidade científica e industrial devido aos efeitos positivos causados pelas suas características químicas, físicas, a grande disponibilidade, baixo custo e propriedades mecânicas (Shadhin *et al.*, 2023). Atreladas as condições da matriz, resultam em um material compósito com propriedades únicas melhoradas ou não (Hasan *et al.*, 2020). Devido a isto, as fibras naturais apresentam um desempenho notável, boa resistência mecânica, alta durabilidade (resistência a ambientes corrosivos), baixo custo, peso relativamente leve e melhoram ainda a capacidade da tecnologia verde (Sanmuham *et al.*, 2021; Fujan *et al.*, 2022; Radzi *et al.*, 2022).

Pinheiro *et al* (2019), avaliou a utilização de fibras alinhadas naturais de guarumã, comum da região Amazônica, na produção de compósitos de matriz polimérica epoxídica. Após os ensaios mecânicos para corpos de prova (CP's) com 10, 20 e 30% de fibras, foi possível concluir que os CP's apresentaram características semelhantes a matriz pura de epóxi, mesmo com a adição de fibras.

Análogo a isso, o módulo de young aumenta com aumento da quantidade de fibras, sugerindo que as fibras de guarumã aumenta a rigidez do compósito. Essa propriedade é dada devido ao modo de dispersão em que as fibras se apresentam. Dessa forma, concluiu-se que para uma nova fibra utilizada como reforço, apresentou custo-benefício e praticamente nenhuma variação significativa nas propriedades de tração do compósito.

Neuba *et al* (2020), avaliaram as propriedades mecânicas de um material compósito de matriz termofixa produzido a partir da fibra de Junça como agente de reforço. Observaram que os compósitos reforçados com fibra de junça apresentaram resistência à tração relativamente baixa, o que indica que as fibras provavelmente atuaram mais como defeitos na estrutura da interface fibra-matriz fraca. Em contrapartida, o aumento relativo da resistência ocorreu com o aumento da fração volumétrica das fibras na matriz.

Prasad *et al* (2021) investigaram o comportamento mecânico de um novo material compósito produzido a partir de fibras de Rambans incorporadas em matriz poliéster. Verificaram que o aumento relativo da fração volumétrica de fibra na matriz torna os resultados de resistência mecânica superior a matriz original. O aumento deve-se a capacidade no controle de propagação de fissuras, ocasionada pelo aumento de carregamento.

Vignesh *et al* (2021), estudaram as propriedades mecânicas de materiais compósitos de matriz termofixa incorporada por malva indiana como agente de reforço. Obtiveram resultados que indicaram que a inserção de fibras na matriz pode influenciar positivamente no aumento da resistência mecânica e térmica. Além disso, as fibras de malva indiana apresentaram boa adesão química a matriz poliéster, tornando-se um novo agente de reforço.

Ramesh *et al* (2021), observaram como uma nova fibra natural atuaria como agente de reforço em materiais compósitos em matriz termofixa. Verificaram que os compósitos produzidos a partir da fibra *Calotropis Gigantea* apresentaram resistência mecânica a flexão e à tração melhores quando comparados a matriz pura, em razão da capacidade de suporta cargas mais expressivas. Além do mais,

observaram que compósitos produzidos com o agente de reforço de fibra natural apresentou um bom desempenho mecânico, quando comparados aos outros compósitos encontrados na literatura.

Kumar *et al* (2021), investigaram as propriedades mecânicas de um material compósito híbrido, reforçado com cargas variadas de fibras naturais. Os resultados revelaram um aumento expressivo nas resistências a tração, flexão e impacto. Além disso, observaram boa adesão química entre as fibras naturais e a matriz de poliéster.

Sajin *et al* (2021), observou a influência do compósito produzido com diferentes comprimentos (5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm e 25 mm) de fibras de juta. Os compósitos foram produzidos por fusão com fibras dispersas aleatoriamente, moldados com pressão. Para avaliar essas propriedades foram realizados ensaios de tração e flexão, os quais destacaram que maior o comprimento das fibras haverá redução na resistência mecânica. Essa redução está ligada ao modo de alinhamento das fibras longas (≥ 5 mm) na matriz, ou seja, a orientação linear determina que a carga atue em apenas uma direção, diferentemente as fibras curtas (≤ 5 mm) que resistem suportando cargas em multidireções. Para este estudo as fibras de 5 mm foram as mais promissoras por encaixarem-se nos parâmetros citados.

Ribeiro *et al* (2022), produziu tecidos com fibras naturais lignocelulósicas de juta e malva utilizando resina poliéster, alinhadas e contínua, pela técnica de infusão e laminação. As análises para corpos de prova com 4,95, 14,92 e 24,48% para fibra de juta e 5,27, 15,45 e 23,90% para fibras de Malva revelaram maior resistência para os compósitos reforçados com fibras de juta e fibras de malva, em relação a matriz pura. Essa propriedade foi melhorada em razão do diâmetro das fibras, quanto menor o diâmetro maior será resistência. Além disso, quanto mais alinhada e organizada a fibra estiver na matriz, melhor será distribuição de forças e cargas que irão permitir o aumento da resistência.

Neuba *et al* (2023), realizaram uma investigação balística em placas produzidas a partir de um compósito, composto por uma matriz polimérica e uma fibra natural conhecida como fibra de junto

(*Cyperus malaccensis*). Os autores observaram a velocidade residual e análise da fratura dos compósitos em formulações de 10, 20 e 30% de incorporação de fibras. Os resultados mostraram que as composições de 10 e 20% apresentaram maior resultado de absorção de energia, em comparação a composição de 30%. Outros resultados indicaram que a utilização de fibras naturais de junto em matriz polimérica na confecção de compósitos, apresentam rupturas frágeis. Essa característica releva que a utilização da fibra natural pode ser um bom agente de reforço para esta aplicação, bem como a utilização da matriz polimérica.

3.4.3 Materiais compósitos reforçados com fibras naturais mercerizadas

Investigações visam interpretar como os parâmetros de concentração, tempo de imersão e temperatura de tratamento, podem proporcionar a melhora nas propriedades mecânicas e instabilidade térmica das fibras. Além disso, a melhora da molhabilidade é um fator crucial para adesão química das fases (Bunsell *et al.*, 2018).

Chin *et al* (2020), estudaram a influência da incorporação de fibra de bambu tratada quimicamente em três tipos de matrizes termofixas, tais como, epóxi, poliéster e éster vinílico. Observaram que a concentração 10% de NaOH aumentava continuamente a resistência à tração e módulo de Young, sendo observada a mesma característica para os compósitos. Além disso, os compósitos produzidos de fibra de bambu em matriz epóxi apresentaram maior resistência mecânica quando confeccionado há fração volumétrica de 40%.

Raju *et al* (2021), avaliaram o impacto do tratamento alcalino na melhoria das propriedades físico-químicas, mecânicas, térmicas e de superfície da fibra do caule de *Symphirema involucreatum* (SISF). Os resultados mostraram que, com um tempo mercerização de 60 minutos, o teor de celulose aumentou para 68,69% em peso. Além disso, o índice de cristalinidade e o tamanho do cristalito também aumentaram, enquanto a resistência à tração de $471,2 \pm 19,8$ MPa, o módulo de tração 5,82

$\pm 0,77$ GPa e a estabilidade térmica foi de 371 ° C. A fibra com superfície modificada é considerada como matéria-prima elementar para estruturas compósitas leves.

Boimau *et al* (2021), investigaram o efeito do tratamento alcalino e a orientação das fibras nas propriedades de impacto de compósitos de poliéster reforçados com fibras do fruto patola (*Luffa cylindrical*). As fibras foram previamente tratadas com soluções alcalinas de NaOH com concentrações de 5, 10 e 15% por 1 hora antes de serem usadas como reforço. Observaram que os tratamentos de 5 e 10% em NaOH apresentaram resistência mecânica superior, em comparação aos compósitos de fibras *in natural*.

Widodo *et al* (2023), observaram que o efeito da alcalinização em 5% de álcali nas propriedades mecânicas do biocomposito de fibra de Sansevieria apresentaram os melhores resultados, com maior exposição da celulose, aumento da resistência à tração e melhorias na estrutura cristalina das fibras.

Pardi *et al* (2024), estudaram as fibras de Eleocharis dulcis (purun tikus), utilizadas em artesanato, como material de reforço em compósitos de matriz de poliéster. Os tratamentos de superfícies modificaram a estrutura das fibras, melhorando a resistência mecânica e tornando mais reativa para ser utilizada como reforço em matriz poliéster.

Haryanti *et al* (2024), pesquisaram o desenvolvimento de materiais compósitos utilizando fibras de bambu (*donax canniformis*) foram quimicamente em 2, 3, 4 e 5% por períodos de 1, 2 e 3 horas. Esse estudo comprovou que o impacto do tratamento causou alterações significativas na estrutura fibra, como a remoção dos constituintes amorfos e diminuição do teor de água e aumento da densidade. O tratamento com NaOH a 5% por 2 horas apresentou os resultados mais promissores, demonstrando ser a condição ideal para maximizar as propriedades mecânicas do material.

Ismadi *et al* (2024), investigaram o teor de fibras nas propriedades físico-mecânicas de compósitos de fibra-poliéster de sisal mercerizado (*Agave Sisalana*). Esse estudo observou que o tratamento químico por mercerização em 5% de NaOH, melhorou a atividade superficial das fibras

de sisal. Essa atividade impulsionou positivamente as propriedades mecânicas dos compósitos em comparação aos materiais compósitos reforçados com fibras *in natura*.

Okky *et al* (2024), estudaram Efeito da fração de volume e do tratamento de alcalinização nas características de compósitos hidrofóbicos de palha e epóxi com método de revestimento. As frações de volume utilizadas foram 40, 50 e 60%, com fibras de 5 mm de comprimento. As variáveis de alcalinização envolvem soluções de NaOH a 5% e 10%, com períodos de imersão de 4 e 8 horas. Os resultados mostraram que a resistência mecânica diminuiu com o aumento da fração de volume da fibra, mas aumentou com o maior tempo de alcalinização.

3.4.4 Sustentabilidade e Impacto ambiental

A sustentabilidade no desenvolvimento de materiais tem aumento a necessidade de diminuir impactos ambientais recorrentes. A substituição de materiais sintéticos, tais como fibras sintéticas, por fibras naturais em compósitos utilizando matriz polimérica tem ganhado destaque como uma abordagem ecologicamente responsável e economicamente viável. As fibras naturais, além de serem renováveis, biodegradáveis e amplamente disponíveis, apresentam menor emissões de gases, comparáveis aos materiais sintéticos (Gholampour *et al.*, 2020; Bhardwaj *et al.*, 2023). Essa substituição não apenas reduz os impactos ambientais, mas também promove a possível aplicação em diferentes âmbitos, principalmente em setores que buscam soluções sustentáveis, como a construção civil, automotiva e embalagens (Nachtace *et al.*, 2023; RAJ *et al.*, 2020; Bhong *et al.*, 2023).

A utilização de tratamentos de superfície visa melhorar as propriedades mecânicas, químicas e físicas das fibras, melhorando também as propriedades específicas dos compósitos. O hidróxido de sódio e reagentes químicos avançados com alta área superficial e funcionalidade química, podem ser usados como mecanismos para aumentar a resistência das fibras e a sinergia com a matriz, fatores essenciais para aplicações industriais (Farjadian *et al.*, 2020).

A utilização de fibras naturais em compósitos também traz resultados positivos para a economia, especialmente por gerarem emprego e renda para regiões e localidades de onde são extraídas, ao mesmo tempo que diminuem a dependência por materiais sintéticos. Além disso, o reaproveitamento de matérias-primas oriundas do meio ambiental se alinha ao conceito de economia circular, promovendo a utilização eficiente de recursos e reduzindo a geração de resíduos sólidos.

A sustentabilidade e o impacto ambiental alinham-se ao desenvolvimento de novos materiais, como os compósitos reforçados com fibras naturais. Ao priorizar a inovação tecnológica atrelada à responsabilidade ambiental, é possível produzir novos materiais que sejam destinados para sociedade, sem comprometer os recursos naturais para as gerações futuras, e com isso, uma solução viável para enfrentar os desafios climáticos e ambientais gerados mundialmente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Materiais utilizados serão fibras naturais de Cotia e resina poliéster ortoftálica.

4.1.1 Resina Poliéster

A resina poliéster utilizada será a ortoftálica da marca, Confibras, localizada na cidade Belém, no estado do Pará. Como agente endurecedor, foi utilizado o endurecedor metil-etil-cetona (MEK), também adquirido na empresa Confibras. A Tabela 4 apresentam a resina polimérica e as propriedades da resina, respectivamente.

Tabela 4 - Propriedades da resina poliéster.

Características da resina poliéster	
Densidade	1,10 – 1,20 g/cm ³
Tempo de trabalho	15 min
Viscosidade	300 – 500 cP

Fonte: Confibras.

4.1.3 Fibras de Cotia

As fibras utilizadas neste trabalho foram extraídas do tronco da planta Cotia, coletadas em várzeas de regiões ribeirinhas localizadas no baixo Tocantins no município de Baião, Pará, em posição geográfica de latitude de 2° 47' 35' e longitude 49° 39' 46'. A extração ocorreu durante o verão Amazônico. A Figura 11 apresenta o tronco e fibras extraídas da árvore de Cotia.

Figura 11- Árvore e fibras extraídas do tronco.



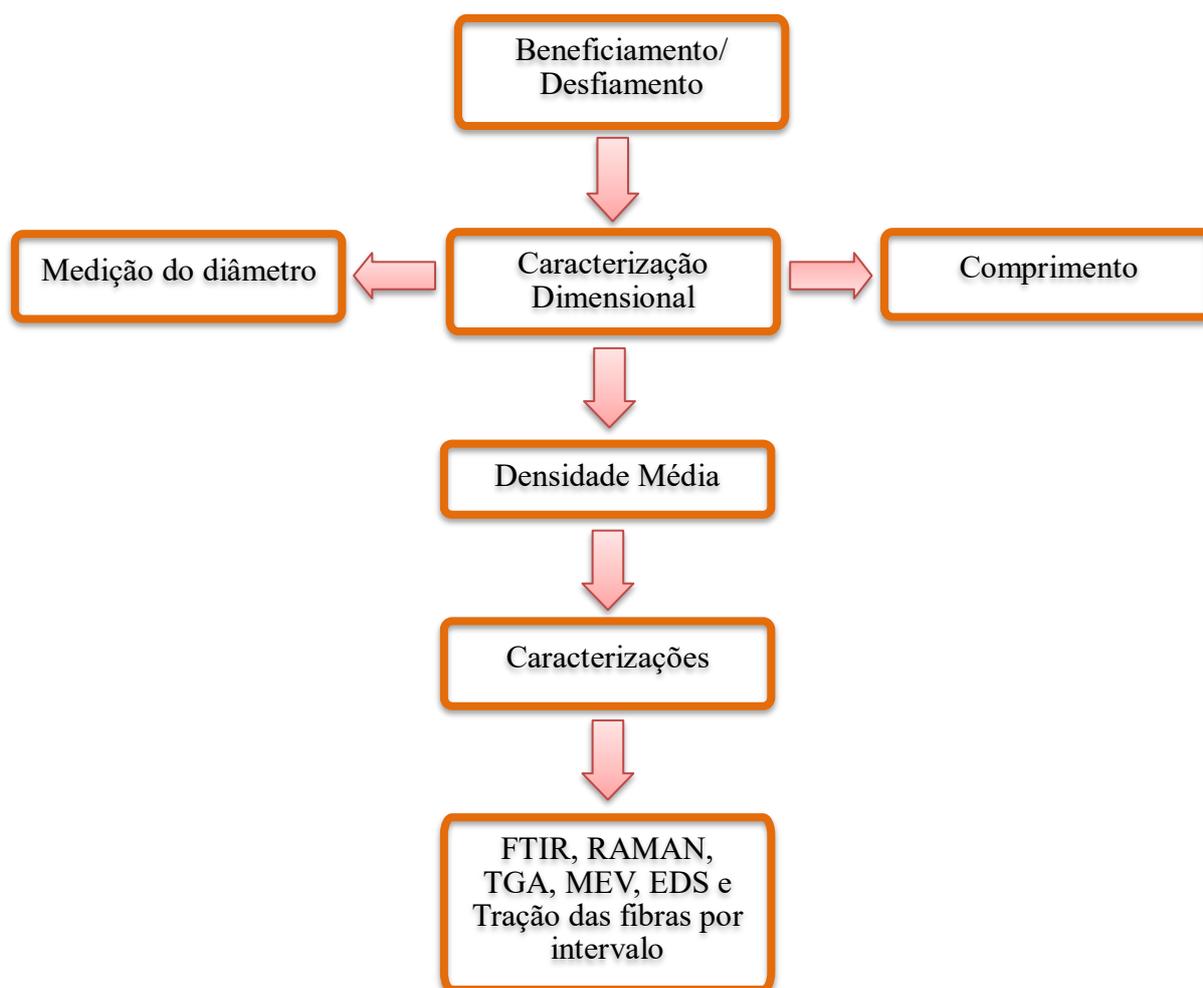
Fonte: Autora, 2025.

4.2 Métodos

4.2.1 Fibras de Cotia

As fibras de Cotia foram inicialmente limpas, separadas e colocadas em estado de repouso em água por 5 horas, e posteriormente desfibradas manualmente com auxílio de pinça metálica. A Figura 12 apresenta o fluxograma das etapas experimentais realizadas para preparação e caracterização das fibras de Cotia.

Figura 12 - Fluxograma das etapas experimentais para as fibras de Cotia.



Fonte: Autora, 2025.

4.2.2 Caracterização dimensional

Para esta análise foram separados 100 filamentos aleatoriamente e individualmente e, utilizando uma régua de 30 cm foi definido um comprimento médio de 21 cm. Esses filamentos foram analisados considerando seções elipsoidais. Inicialmente, mensurou-se o diâmetro de cada fibra em cinco diferentes pontos em dois ângulos, 0° e 90°. O equipamento utilizado foi um estereoscópio binocular modelo Even, afiliado ao software Future WinJoe, pertencente ao Laboratório de Caracterização do Materiais (LACMAT) da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua. A Figura 13 Apresenta o equipamento de medição para as fibras naturais de Cotia.

Figura 13 - Equipamento utilizado para medição geométrica das fibras de Cotia.



Fonte: Autora, 2025.

4.2.3 Determinação da densidade geométrica das Fibras de Cotia

A densidade (ρ) é resultado da relação entre massa, comprimento e os diâmetros em posições de 90 e 0°. A massa foi obtida utilizando a balança analítica de precisão $\pm 0,0001$ g da marca Chyo modelo JK, pertencente ao Laboratório de Química da Universidade Federal Pará, Campus Ananindeua.

Em seguida, utilizando a equação 2, calculou-se a densidade da fibra, considerando: m a massa da fibra, l o comprimento da fibra, ϕ diâmetro médio a 0° e o ϕ diâmetro médio a 90°.

$$\rho = \frac{4m}{\pi\phi_1\phi_2l} \quad (2)$$

4.2.4 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As análises de FTIR foram realizadas com objetivo de verificar os grupos químicos vibracionais presentes na estrutura da fibra. As análises foram realizadas no Laboratório de Espectroscopia Vibracional e Altas Pressões da Universidade Federal do Pará. As fibras de Cotia

utilizada nesta análise foram separadas em filamento e, em seguida, cortadas e fragmentadas em pistilo e almofariz. O FTIR foi realizado utilizando equipamento BRUKER, modelo VERTEX 70V. O espectro foi obtido por reflectância total atenuada (ATR), na região espectral de 4000 - 400 cm^{-1} , a 100 scans e resolução de 8 cm^{-1} .

4.2.5 Espectroscopia Raman

Para avaliar a estrutura do carbono, bem como as bandas D e G, é realizado espectroscopia Raman no Laboratório de Física da Universidade Federal do Pará (UFPA). As medidas de espectroscopia Raman para as fibras e para os compósitos foi realizada em um espectrômetro Raman marca HORIBA e modelo LabRAM hr Evolution, deslocamento de 600 – 3200 cm^{-1} , laser 633 nm

4.2.6 Termogravimetria (TGA) e calorimetria exploratória (DSC)

A caracterização térmica das fibras de Cotia foi realizada a partir da análise Termogravimétrica (TGA) e calorimetria exploratória (DSC) no Laboratório de Física da Universidade Federal do Pará (UFPA). As fibras foram cortadas e maceradas em almofariz e pistilo de porcelana com intuito de diminuir a granulometria da amostra. A caracterização foi realizada em um equipamento da NEXTA STA300, com análise térmica simultânea (STA), taxa de aquecimento de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, partindo da temperatura ambiente 30 $^{\circ}\text{C}$ até 600 $^{\circ}\text{C}$.

4.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

As superfícies das fibra de Cotia, bem como análise da fratura dos compósitos, foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura no Laboratório de Institucional Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi, utilizando um microscópio eletrônico marca TESCAN, modelo Mira3, com canhão de elétrons do tipo FEG (field emission gun), OXFORD INSTRUMENTS, com ampliação de 100 a 1.1x. As amostras foram metalizadas com ouro (Au) por

2”30”, depositando uma fina película na superfície da amostra. As imagens foram geradas por detecção de elétrons secundários, utilizando-se de voltagem 5,0 kV.

4.2.8 Ensaio de Resistência a Tração na Fibra de Cotia

A Caracterização mecânica em tração da fibra foi realizada no Laboratório de Caracterização dos Materiais (LABCMAT), na Universidade Federal do Pará. A determinação das propriedades mecânicas foi obtida a partir da separação de 100 filamentos da fibra estudada, seguindo a norma ASTM C1557 para preparo dos corpos de prova. Antes disso, as fibras foram fixadas em um papel de 90 m/g² com adesivo epóxi. O ensaio foi realizado em uma máquina Universal Eletromecânica iM50 (Mogi das Cruzes, São Paulo), célula de carga 5 kN e velocidade de 0,5 mm/min. A máquina universal utilizada é apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Máquina de ensaios universal.



Fonte: Autora, 2025.

4.2.9 Tratamento químico das Fibras de Cotia

Uma solução de 5% p/v de hidróxido de sódio foi preparada usando NaOH (êxodo, científica, Brasil) em formato de escamas, foi diluído em 200 mL de água. Em seguida, 1g de fibra de Cotia, previamente selecionada, foi imersa na solução alcalina e mantida em repouso por 1 hora em um becker de 500 mL. Após esse período, as fibras foram lavadas em água corrente até alcançar o pH neutro da solução. Finalmente, as fibras foram secas em estufa por 100 °C por 20 horas

4.2.10 Compósitos

4.2.10.1 Confeção dos compósitos

Os compósitos serão produzidos manualmente a partir da resina poliéster, fibras de Cotia com fração volumétrica de 10, 20 e 30% em volume de fibras. As fibras foram dispostas longitudinalmente de forma contínua em moldes de silicone. Foram produzidos 8 corpos de prova para cada ensaio mecânico de tração e flexão em cada fração volumétrica estudada. A nomenclatura foi definida de acordo com a relação resina/fibra em volume e o tipo de tratamento realizado, conforme apontado na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação fibra/resina e tratamento químico para cada corpo de prova.

Amostra	Sigla	Compósitos 0%	Compósitos 10%	Compósitos 20%	Compósitos 30%
Fibra <i>in natura</i>	FC	FC0	FC10	FC20	FC30
Fibras mercerizadas	FM	FM0	FM10	FM20	FM30

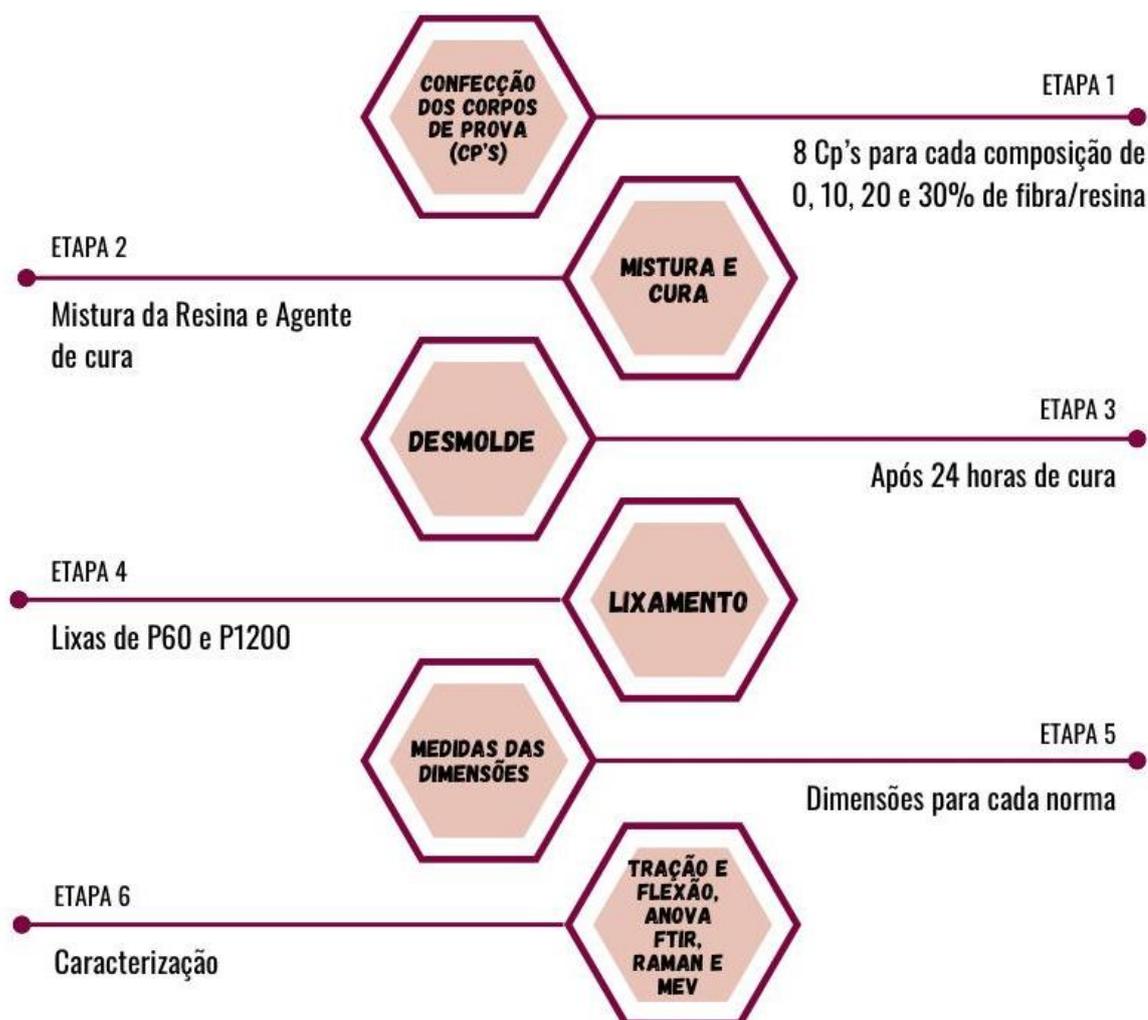
Fonte: Autora, 2025.

A confecção dos compósitos foi realizada seguindo procedimentos manuais. Inicialmente, segundo a regra da mistura, foi obtida a razão fibra e resina para cada composição estudada (10, 20 e 30%).

De posse das proporções, a resina foi misturada ao endurecedor e vertida em um molde de silicone, o qual estará preenchido com as proporções das fibras dispostas de forma contínua. Em seguida, os corpos de prova foram mantidos por 24 horas em repouso para processo de cura.

Prontamente, após o período de cura, os corpos de prova foram desformados, lixados em lixas de granulometria entre P60 e P1200 e medidos em paquímetro de precisão, de modo que as irregularidades superficiais fossem removidas e as dimensões dos corpos de prova estejam de acordo com as normas de cada ensaios, tração e flexão. Os procedimentos experimentais são melhor visualizados no fluxograma apresentado na Figura 15.

Figura 15- Fluxograma para as etapas experimentais.

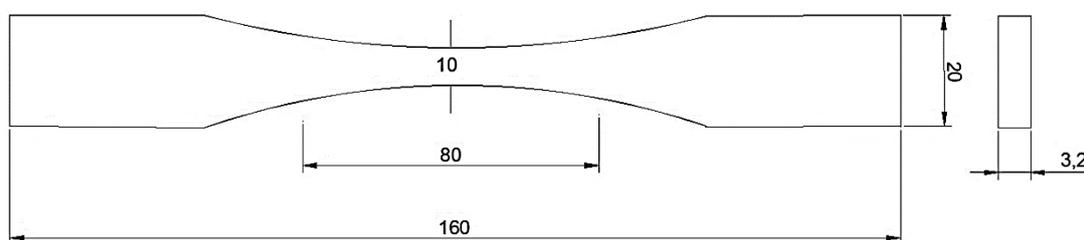


Fonte: Autora, 2025.

4.2.10.2 Ensaio de Resistência à Tração

Os ensaios de resistência a tração foram realizados no Laboratório de Caracterização do Materiais (LACMAT) da Universidade Federal do Pará, campus Ananindeua. Os testes foram realizados seguindo a norma da ASTM 638-22, em uma máquina Universal Eletromecânica iM50 (Mogi das Cruzes, São Paulo), considerando uma célula de carga de 5 kN a uma taxa de velocidade 0,5 mm/min. A Figura 16 apresenta as dimensões do corpo de prova.

Figura 16 - Dimensões (mm) dos corpos de prova para o ensaio de tração.

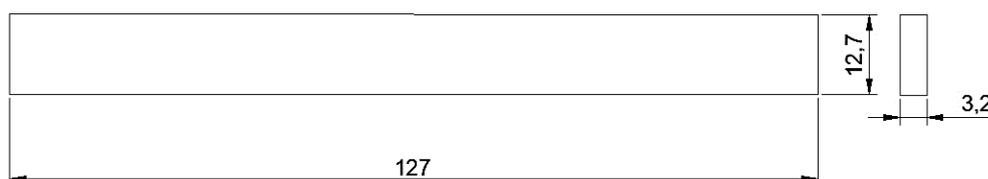


Fonte: Autora, 2025.

4.2.10.2. Ensaio de Resistência a Flexão

Os ensaios de resistência a flexão serão realizados no Laboratório de Caracterização do Materiais (LACMAT) da Universidade Federal do Pará, campus Ananindeua. Os testes de flexão foram realizados seguindo a norma da ASTM D 790 -17, em uma máquina Universal Eletromecânica iM50 (Mogi das Cruzes, São Paulo), considerando uma célula de carga de 5 kN a uma taxa de velocidade 2,0 mm/min. A Figura 17 apresenta as dimensões dos corpos de prova que utilizados neste ensaio.

Figura 17 - Dimensões (mm) dos corpos de prova para o ensaio de flexão.



Fonte: Autora, 2025.

4.2.10.2 Análise Estatística

A validação estatística dos dados de tração das fibras de Cotia foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA), com intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey. A validação dos dados mecânicos dos compósitos foi realizada segundo a análise de variância de fator duplo, considerando o fator tratamento químico e fibras *in natura* e o fator variação em percentual de fibras a matriz poliéster, considerando o nível de confiabilidade de 95% ($p < 0,05$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

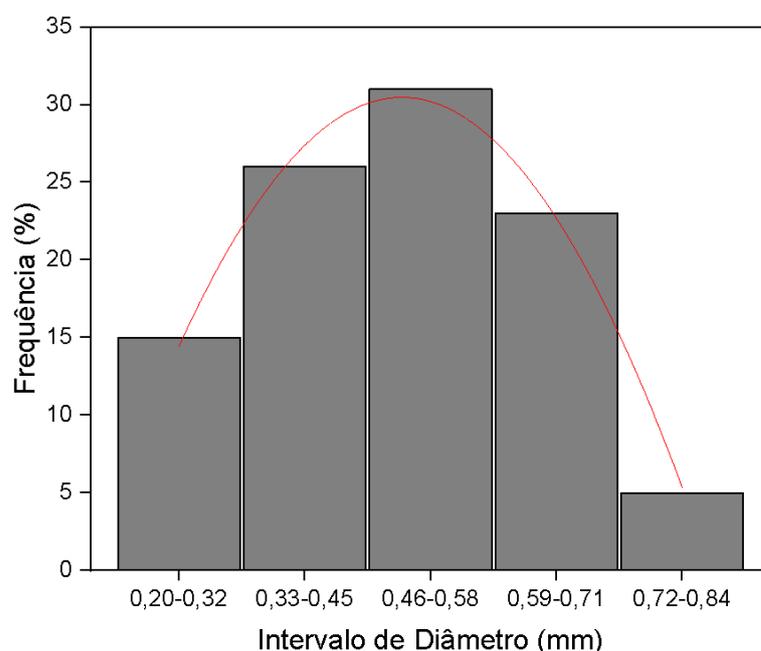
Serão discutidas as caracterizações obtidas para as fibras de Cotia nas condições *In natura* e mercerizadas, bem como os compósitos fabricados.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE COTIA

5.1.1 Caracterização Dimensional

A Figura 18 apresenta o padrão de distribuição da frequência da fibra *in natura* em função ao intervalo de diâmetro.

Figura 18 - Gráfico Frequência versus Intervalo de Diâmetro.



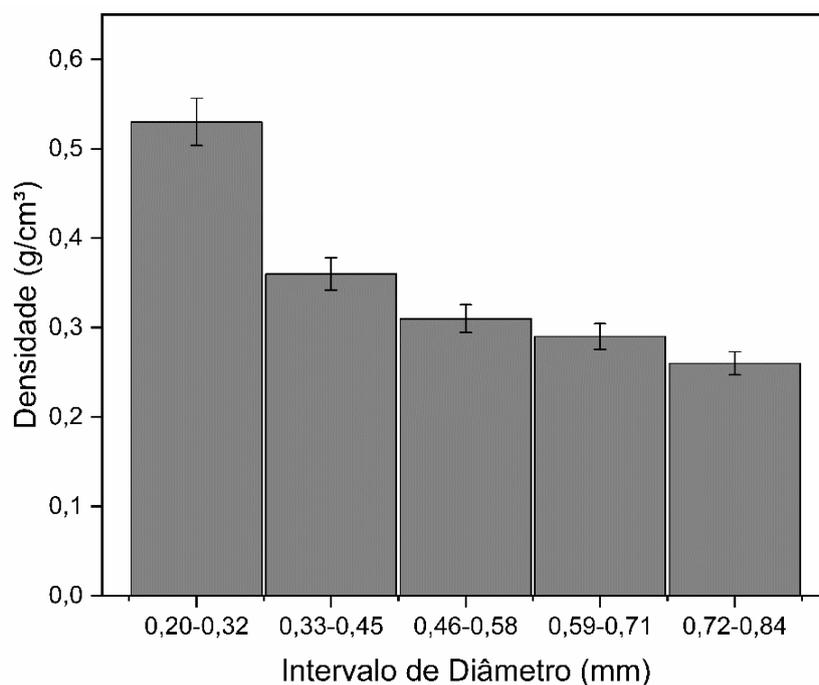
Fonte: Autora, 2025.

Os resultados indicam que na faixa de diâmetro entre 0,46 e 0,58 mm há maior número em concentração de fibras, apresentando uma distribuição próxima à normalidade, refletindo a uniformidade presente nas fibras. O diâmetro médio foi igual a 0,47 mm, considerado um resultado relativamente baixo, em relação as outras fibras naturais, assim como observado para fibra de periquiteira, segundo Pinheiro *et al* (2023). Esse resultado reflete possivelmente na menor quantidade de defeitos estruturais comuns encontrados nas fibras naturais, em razão da diminuição do diâmetro

(Tanasa *et al.*, 2020). Os padrões observados podem ser atribuídos aos fatores botânicos, territoriais, climáticos, forma do solo, métodos de extração e estruturas das plantas, durante o processo evolutivo (Thapliyal *et al.*, 2023; Jagadeesh *et al.*, 2021).

A densidade média das fibras naturais de Cotia foi obtida a partir do método geométrico. A Figura 19 apresenta o resultado de densidade para cada intervalo de diâmetro.

Figura 19 - Gráfico de Densidade por intervalo de Diâmetro.



Fonte: Autora, 2025.

O valor médio da densidade da fibra de Cotia é igual a $0,34 \text{ g/cm}^3$. Esse resultado é inferior ao encontrado em outras fibras naturais como Periquiteira e Ubim, conforme estudado por Marchi *et al* (2022) e Pinheiro *et al* (2023), respectivamente.

Observa-se que a medida que o intervalo de diâmetro aumenta, a densidade tende a diminuir continuamente. Essa característica indica que fibras de menor diâmetro apresenta menor número de vazios e poros, além de maior densidade em sua estrutura quando comparada as fibras de maior diâmetro. Fibras de maior diâmetro apresentam menor densidade e, conseqüentemente, podem apresentar maior número de vazios e poros em sua estrutura. Essa característica foi observada também

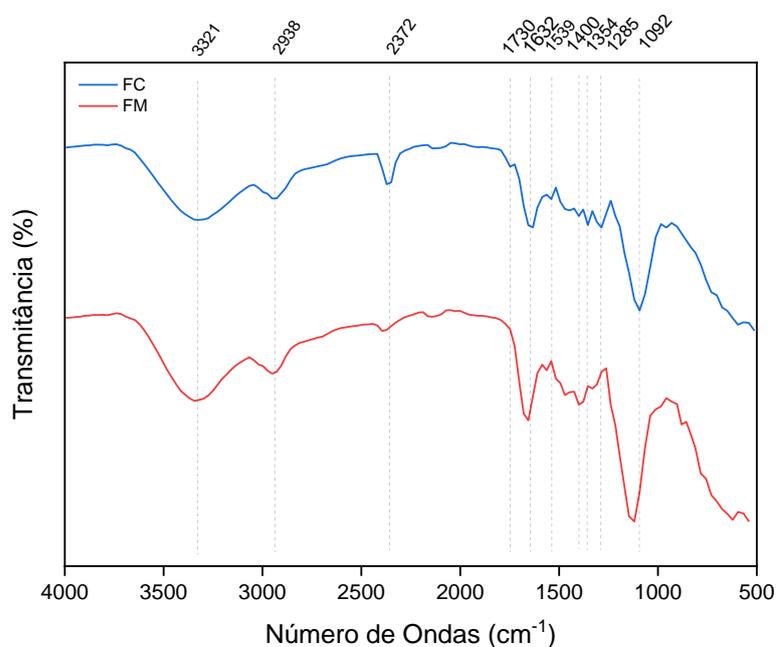
por e Reis *et al* (2019) e Pinheiro *et al* (2023) ao pesquisarem as densidades relativas para cada intervalo de diâmetro do Guarumã e Periquiteira, respectivamente.

Os resultados observados no diâmetro e densidade das fibras de Cotia implicam diretamente nas propriedades finais dos compósitos. A uniformidade do diâmetro e a alta densidade indicam uma menor quantidade de defeitos estruturais, o que pode melhorar a interface entre as fibras e a matriz polimérica, resultando em combinações com melhor desempenho mecânico e estabilidade. Além disso, fibras com distribuição de diâmetro em intervalos médios tendem a fornecer um equilíbrio entre resistência e flexibilidade, características fundamentais para aplicações em materiais sustentáveis.

5.1.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier da Fibras

O espectro por FTIR dos grupos presentes para as fibras de Cotia *in natura* (FC) e fibras mercerizadas (FM), é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – FTIR obtido para as fibras FC e FM.



Fonte: Autora, 2025.

Os FTIR's apresentam bandas de absorção características de diferentes grupos químicos funcionais, como celulose, hemicelulose e lignina. Em 3321 cm^{-1} observa-se o estiramento de ligação do grupo OH em todas as fibras, confirmando a presença de constituintes fundamentais como celulose, hemicelulose e lignina (Patel *et al.*, 2020; Selvaraj *et al.*, 2022). Essa banda se manteve constante para todas as fibras. A banda em 2938 cm^{-1} faz referência ao alongamento da ligação C-H alifáticas, pertencente ao componente da celulose (Madhua *et al.*, 2019; Moshi *et al.*, 2020). Essa banda se manteve constante com o tratamento alcalino. Em 1750 cm^{-1} banda característico de ácido carboxílicos referentes a hemicelulose e lignina. Embora imersão da fibra em solução alcalina tenha diminuído essa banda de absorção. A banda indicada por 1632 cm^{-1} é característica do estiramento C=O presente na hemicelulose ou grupo éster oriundo da absorção água pela celulose (Matykiewicz *et al.*, 2019; Sumrith *et al.*, 2020; Garcia *et al.*, 2023).

Bandas de absorção entre 1539 e 1265 cm^{-1} são associadas ao alongamento característico da lignina (Pejic *et al.* 2020; Yucheng *et al.*, 2021; Tamanna *et al.*, 2021). Em 1400 cm^{-1} é observada uma flexão simétrica referente ao CH_2 e alongamento da C=C em grupos aromáticos característicos da celulose (Vijay *et al.*, 2019). Observa-se ainda que essas bandas de absorção aumentam à medida que é feita a mercerização.

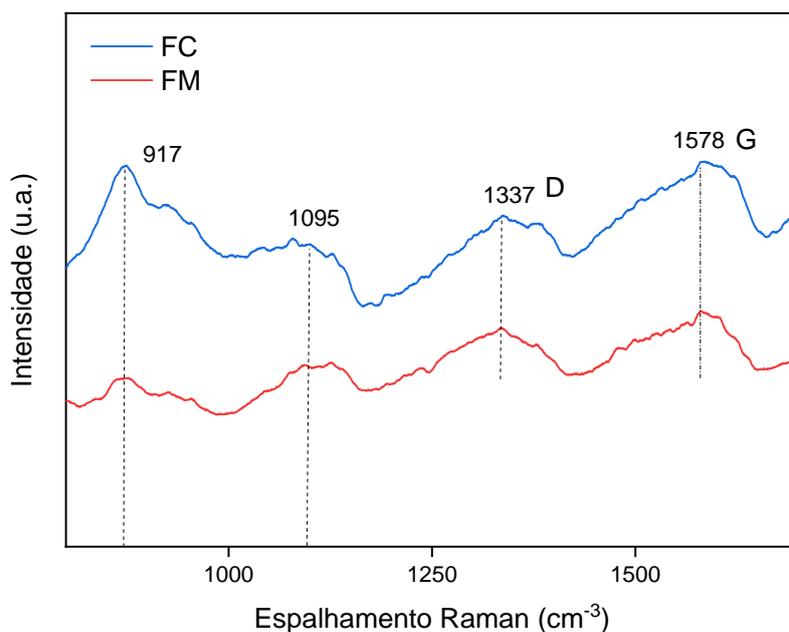
Em 1354 cm^{-1} pode ser característico da curvatura do CH dos polissacarídeos ou correspondem ao anel aromático atribuído a celulose. As bandas de absorção indicadas diminuem à medida que são realizados os tratamentos químicos. Por fim, a banda 1092 cm^{-1} é relacionado a flexão e vibração de C-H e C-O-C, atribuídos a anéis aromáticos e reorganização estrutural da celulose cristalina (Kathirselvam *et al.*, 2019; Yucheng *et al.*, 2021). O aumento dessa banda está atrelado a remoção de elementos amorfos da fibra.

O tratamento químico ou modificações nos constituintes podem promover uma nova relação de ligação interfacial entre a superfície das fibras e a inserção na matriz polimérica (Costa *et al.*, 2019).

5.1.3 Espectroscopia Raman das Fibras

A Figura 21 mostra os espectros Raman de fibras de Cotia *in natura* (FC) e fibras mercerizadas (FM).

Figura 21 – Espectro Raman obtidos para as fibras FC e FM.



Fonte: Autora, 2025.

Como evidenciado pelas bandas de absorção no tratamento químico alterou a rede estrutural da fibra natural. As bandas em 917 e 1095 cm⁻¹ são características da celulose do tipo I (Costa *et al.*, 2020).

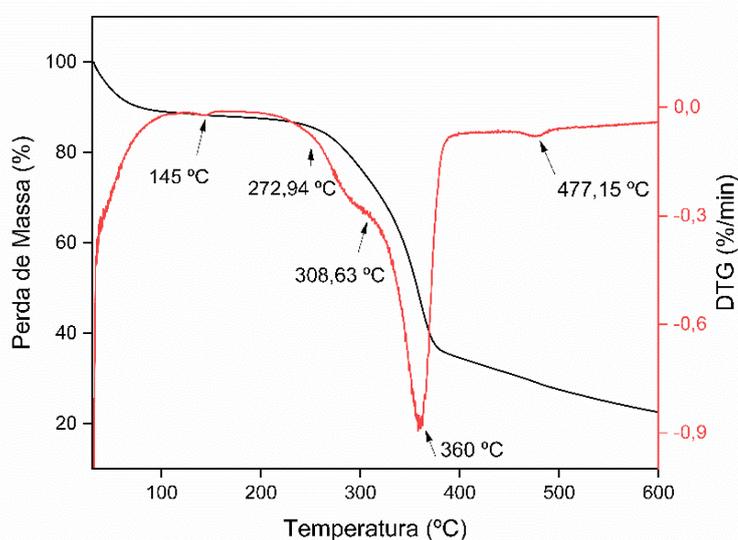
O espectro Raman indicou duas bandas em 1337 cm⁻¹, indicando a banda D, e em 1578 cm⁻¹ característica da banda G, com valor de ID/IG igual 0,84. Observa-se um sutil aumento na intensidade da banda D e pequena diminuição na intensidade da banda G, o que sugere que o tratamento químico com NaOH pode ter promovido a remoção de impurezas, melhorando possivelmente a reatividade superficial (Cuiffo *et al.*, 2021).

No contexto para aplicação em compósitos, essa quantidade moderada de defeitos pode ser vantajosa para melhorar a adesão entre a fibra e a matriz.

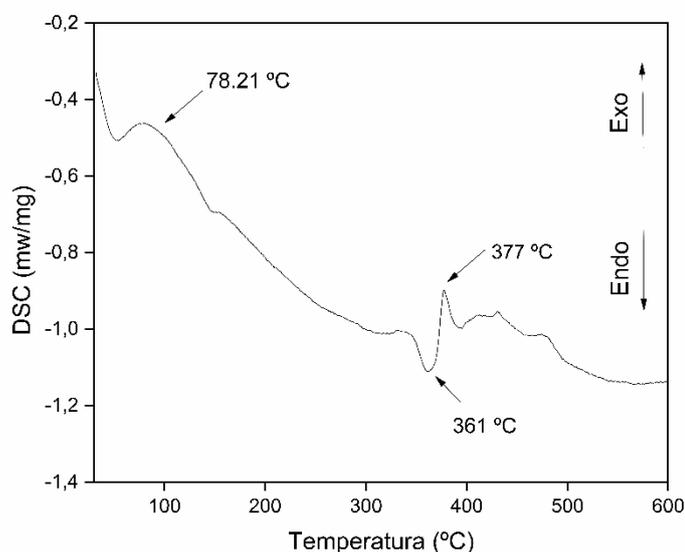
5.1.4 Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Exploratória (DSC)

A Figura 22 apresenta a curva Termogravimétrica (TG), Derivada (DTG) e calorimetria exploratória (DSC) obtidas para a fibra de *Cotia in natura*.

Figura 22 – A perda de massa é indicada pela curva de (a) Termogravimétrica para a fibra de *Cotia in natura* e (b) calorimetria exploratória.



(a)



(b)

Fonte: Autora, 2025.

Para esta análise foi possível observar a perda de massa da fibra *Cotia* em 3 faixas de temperatura. Na faixa de temperatura de 145 °C ocorre a primeira perda de massa da fibra. Essa primeira redução ou primeiro estágio ocorre quando há evaporação de água presente na fibra (Moshi *et al.*, 2020; Ganapathya *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2022).

O segundo estágio ocorre nas faixas de temperaturas entre 272,94 e 308,63 °C. Entende-se que nessa faixa de temperatura há a remoção de hemicelulose e celulose da fibra, próximo ao encontrado por Kathirselvam *et al* (2019), Narayanasamy *et al* (2020) e Chakravarthy *et al* (2020).

Último estágio ocorre acima de 360 °C onde as decomposições das cadeias celulósicas tornam-se mais proeminentes. O pico final em 477,15 °C confirma que houve a degradação da lignina e o conteúdo referente aos outros constituintes da fibra. Essas características também foram observadas por Mosh *et al* (2020), Vijay *et al* (2022), Oqla *et al* (2023).

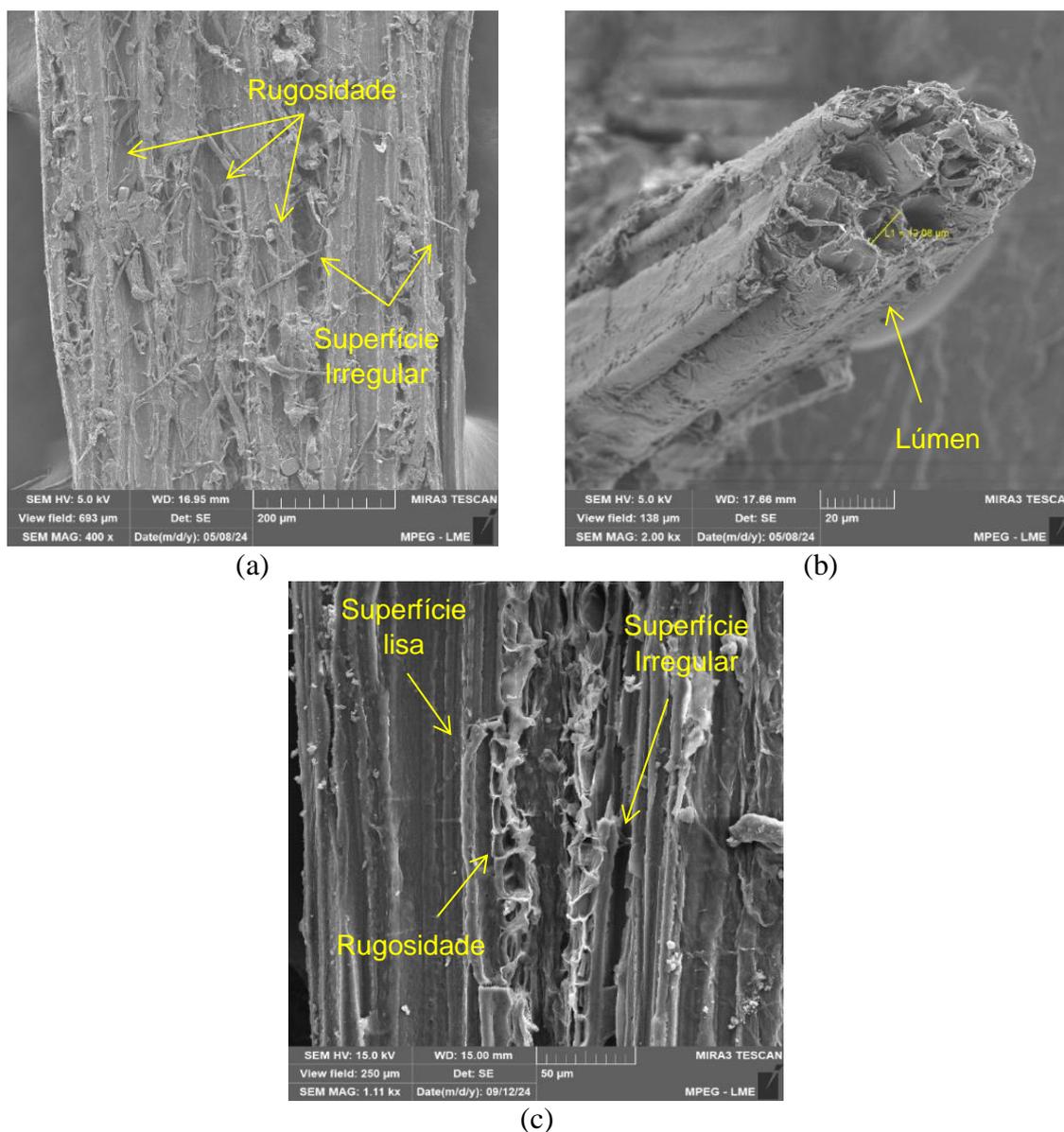
Os resultados obtidos são confirmados pelos eventos ocorridos no DSC apresentados na Figura 22b, no qual em 78 °C há a perda de umidade seguida da eliminação da água estrutural e degradação dos constituintes hemicelulose e celulose amorfa, indicadas no pico exotérmico em 145 °C. A degradação total da celulose ocorre em torno de 377 °C próximo ao pico endotérmico (Bharath *et al.*, 2020). Acima que 400 °C há gaseificação e a liquefação e degradação da lignina e outros constituintes das fibras.

Os resultados térmicos sugerem que as fibras de Cotia podem suportar altas temperaturas, sendo adequadas para aplicação como fase dispersa e fabricação de compósitos poliméricos (Tengsuthiat *et al.*, 2022).

5.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

As micrografias das fibras de Cotia, obtida por microscopia eletrônica de Varredura, são destacadas na Figura 23.

Figura 23- Morfologia superficial da fibra de Cotia em MEV: (a) seção longitudinal da fibra de Cotia, (b) seção transversal da fibra (c) seção longitudinal da fibra tratada quimicamente por NaOH.



Fonte: Autora, 2025.

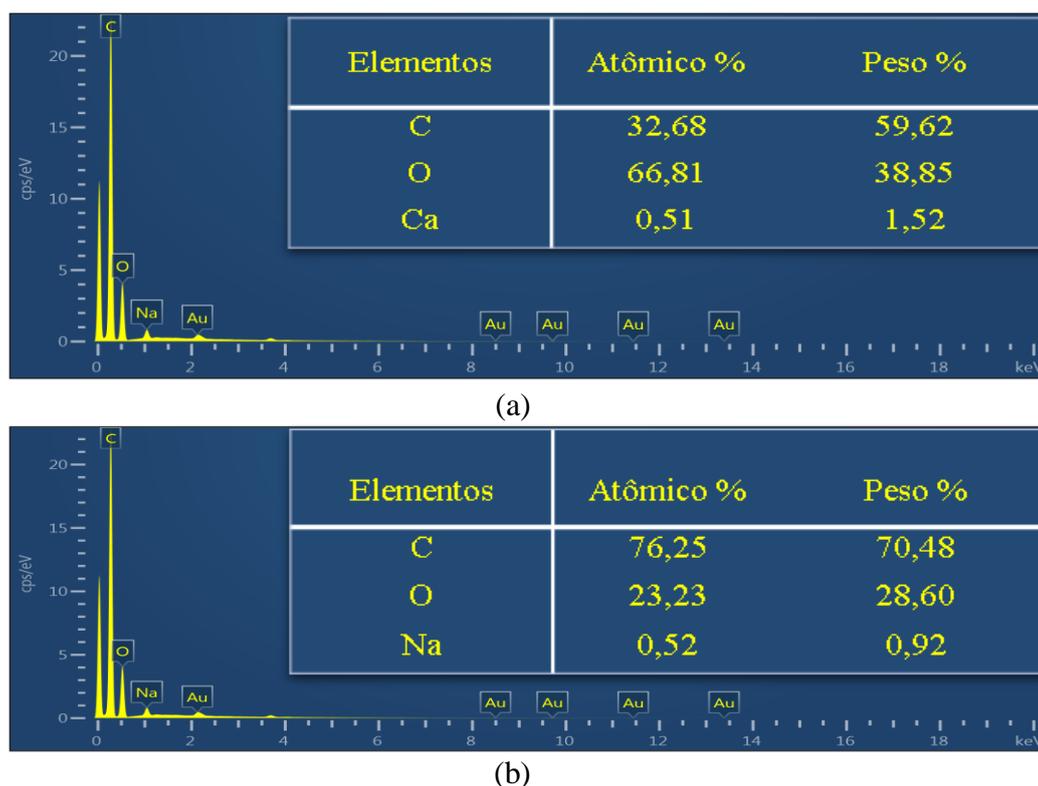
É possível observar na Figura 23a que, ao longo do comprimento longitudinal, a fibra natural de Cotia apresenta superfície altamente rugosa e porosa, com poucas regiões lisas. Ding *et al* (2022), observaram que a presença de superfícies rugosas e ceras, podem melhorar a adesão interfacial entre as fibras e a matriz polimérica. Além disso, os poros desempenham um papel significativo, não apenas influenciando as propriedades mecânicas das fibras, mas também promovendo uma melhor ancoragem entre a fibra e a matriz (Pemural *et al.*, 2022).

Observa-se também na Figura 23d, que o lúmen da fibra de Cotia é formado por feixes microfibrilares com diâmetro médio circular igual a 12 μm . As características morfológicas apresentadas para fibra de Cotia são semelhantes as NFL's reportadas na literatura (Pinheiro *et al.*, 2023; Eyupoglu *et al.*, 2022).

A mercerização, apresentada na Figura 23b, revelou que a superfície da fibra apresenta aspectos irregulares e rugosas, mas com áreas predominantemente mais lisas em comparação a fibra *in natura*. Esse comportamento sugere que a o tratamento químico impactou a superfície da fibra, o que pode ter modificado sua estrutura. A remoção de elementos não celulósicos pode, possivelmente, aumentar a cristalinidade e, conseqüentemente, melhorar a resistência mecânica da fibra (Boumazaa *et al.*, 2020 e Samai *et al.*, 2020), uma vez que a remoção de ceras, por exemplo, pode facilitar o ancoramento da fibra na matriz. Embora a superfície seja mais lisa em comparação a fibras *in natura*, defeitos como poros e fissuras foram observadas, indicando que o tratamento alcalino pode ter removido substâncias solúveis das camadas externas das fibras. Embora a superfície seja mais lisa em comparação a fibras *in natura*, defeitos como poros e ranhuras foram observadas, indicando que o tratamento alcalino pode ter removido substâncias solúveis das camadas externas das fibras (Salih *et al* 2020). Willy *et al* (2023), observaram que a superfície da fibra retirada da casca de *Hibiscus Tiliaceus* apresenta um aspecto liso, atribuído a perda de constituintes não celulósicos, tais como lignina e hemicelulose.

A análise por EDS, apresentada na Figura 24, permite identificar os elementos presentes na superfície da fibra de Cotia *in natura* e tratadas por NaOH.

Figura 24 - EDS das fibras de Cotia (a) FC e (b) FM.



Fonte: Autora, 2025.

As fibras naturais contêm, inicialmente, os elementos carbono, oxigênio e cálcio em sua composição, considerados dominantes na composição da fibra natural. Após o tratamento químico com NaOH, foi identificado a inclusão de sódio. As relações C/O das fibras *in natura* e tratadas quimicamente e 0,49 e 3,28 respectivamente.

O aumento do teor de carbono em relação à oxigênio nos tratamentos indica uma introdução de carbono na estrutura das fibras, provavelmente devido à remoção de grupos hidroxilados e às alterações estruturais resultantes do tratamento. Além disso, pode ser resultado de que houve a remoção de constituinte amorfos na superfície, como a lignina (Júnior *et al.*, 2024).

Esses resultados confirmam que a mercerização introduziu mais o elemento carbono e outros elementos na estrutura da fibra.

5.1.7 Caracterização Mecânica da Fibra de Cotia

5.1.7.1 Resistência a tração

A Figura 25 apresenta os aspectos visuais das fibras tratadas com NaOH.

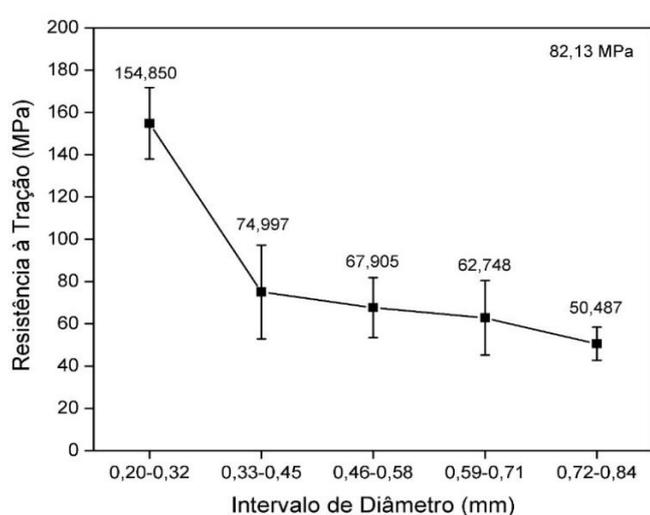
Figura 25 – Aspectos visuais das fibras mercerizadas.



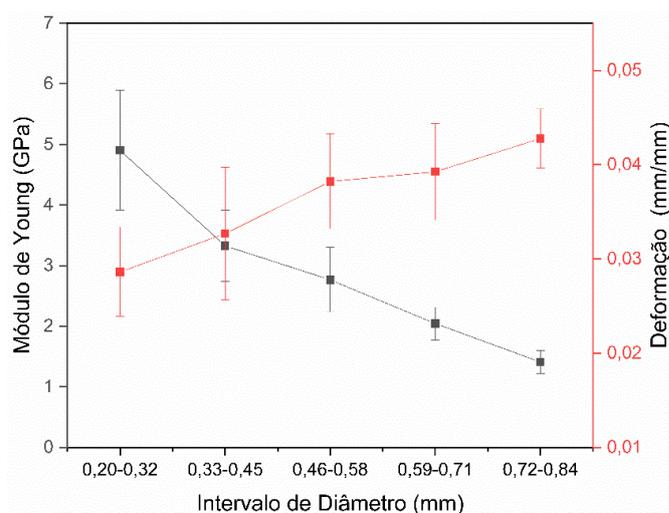
Fonte: Autora, 2025.

A Figura 26 apresenta os resultados das propriedades mecânicas em tração das fibras de Cotia em função do diâmetro fibrilar.

Figura 26 - Gráfico de resistência a tração em relação ao intervalo de diâmetro (a) e gráficos de módulo de Young aparente e deformação em relação ao intervalo de diâmetro.



(a)



(b)

Fonte: Autora, 2025.

A Tabela 6 apresenta os dados detalhados de resistência à tração, módulo de Young e deformação das fibras por intervalo de diâmetro.

Tabela 6 – Resultados das propriedades em tração das fibras de Cotia.

Intervalo de Diâmetro (mm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação (mm/mm)
0,20 – 0,32	154,85 ± 16,90	4,90 ± 0,98	0,028 ± 0,004
0,33 – 0,45	74,99 ± 22,21	3,32 ± 0,58	0,032 ± 0,007
0,46 – 0,58	67,59 ± 14,21	2,76 ± 0,53	0,038 ± 0,005
0,59 – 0,71	62,74 ± 17,65	2,04 ± 0,26	0,039 ± 0,005
0,72 – 0,84	50,48 ± 7,80	1,41 ± 0,18	0,042 ± 0,003

Fonte: Autora, 2025.

O valor médio de resistência à tração das fibras de Cotia foi de 82,13 MPa, um valor inferior ao encontrado para outras fibras naturais na literatura, como relatado por Lemita *et al* (2022), Ding *et al* (2022), Silva *et al* (2022) e Pinheiro *et al* (2023). No entanto, esse desempenho é superior ao de outras fibras naturais investigadas para aplicações em materiais compósitos, conforme os estudos de Khan *et al* (2022) e Venkatachalan *et al* (2023).

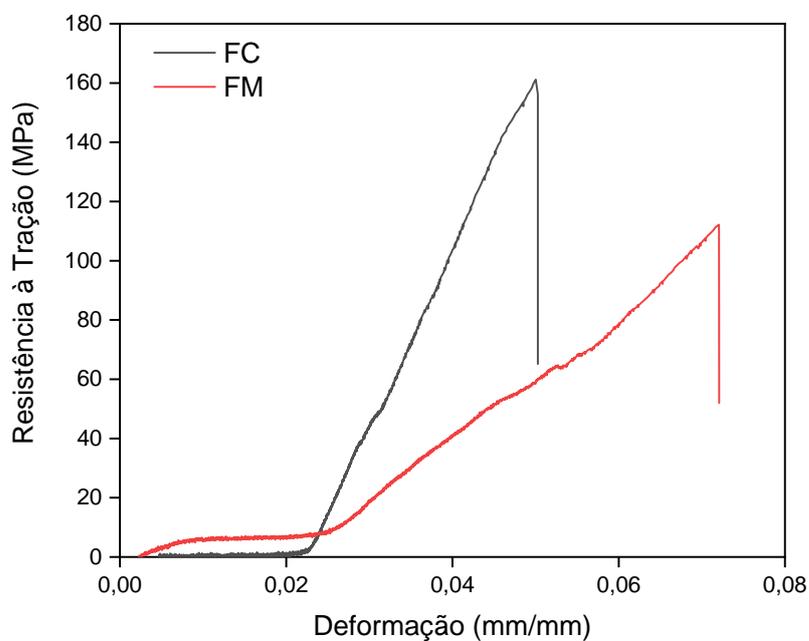
Com base nos dados apresentados na Figura 26a, observa-se que diâmetros menores apresentaram valor médio de resistência à tração igual a 154,85 MPa, enquanto diâmetros maiores apresentaram valor médio de resistência igual a 50,48 MPa. Esse resultado sugere que o aumento do diâmetro fibrilar diminui a resistência à tração das fibras, sugerindo que ambos são inversamente proporcionais ao diâmetro fibrilar. Yoganandam *et al* (2019) e Méndez *et al* (2022) sugerem que a diminuição da resistência a tração pode ser entendida pelo aumento de defeitos/elos fracos e não homogeneidade na estrutura das fibras.

Neuba *et al* (2022), sugere que a resistência máxima diminui à medida que o diâmetro aumenta, devido ao maior número de fibrilas presentes em fibras com maior espessura, que resulta em falhas e quebras prematuras, quando comparadas as fibras mais finas que apresentam quantidade de defeitos inferiores e são mais uniformes.

Os dados da Figura 26b apontam que o valor médio do módulo de Young é igual 3,04 GPa. É possível observar que, ao aumentar o diâmetro, o valor médio do módulo Young tende a diminuir. Essa característica indica que fibras menos espessas são mais rígidas quando comparadas as fibras mais espessas. O aumento da rigidez reflete a diminuição da deformação, ou seja, a tensão aplicada permite que a estrutura seja mais rígida a ponto de impedir mobilidade das cadeias e a capacidade deformativa das fibras de menor diâmetro. Esse comportamento, assim como observado nos valores de densidade na Figura 19, aponta que fibras finas são mais compactas, enquanto fibra grossas são menos compactas, o que justifica as propriedades mecânicas observadas para fibras em intervalos de diâmetros.

Para avaliar as propriedades mecânicas das fibras de Cotia *in natura* em função do tratamento por NaOH, foi realizado o ensaio mecânico de tração, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Curvas de tensão versus deformação das fibras FC e FM.



Fonte: Autora, 2025.

A Tabela 7 apresenta as propriedades de resistência média à tração das fibras naturais e tratadas quimicamente por NaOH.

Tabela 7 – Resultados das propriedades mecânica das fibras FC e FM.

Amostra	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)
FC	151,32 ± 11,56	5,17 ± 1,05
FM	99,36 ± 19,19	2,59 ± 0,84

Fonte: Autora, 2025.

A Figura 27 e a Tabela 8 indicam que as fibras FC e FM apresentam resistências médias à tração iguais a 151,32 e 99,36 MPa, e módulo Young igual a 5,17 e 2,59 GPa, respectivamente. Esse declínio pode ter sido influenciado pela fragilização da fibra e redução da lignina, como pode ser observado pela diminuição da curva de tensão-deformação. Zhang *et al* (2018), explicam que a diminuição da resistência mecânica das fibras mercerizadas pode ser resultado das altas concentrações de álcali, o que pode remover parcialmente a celulose.

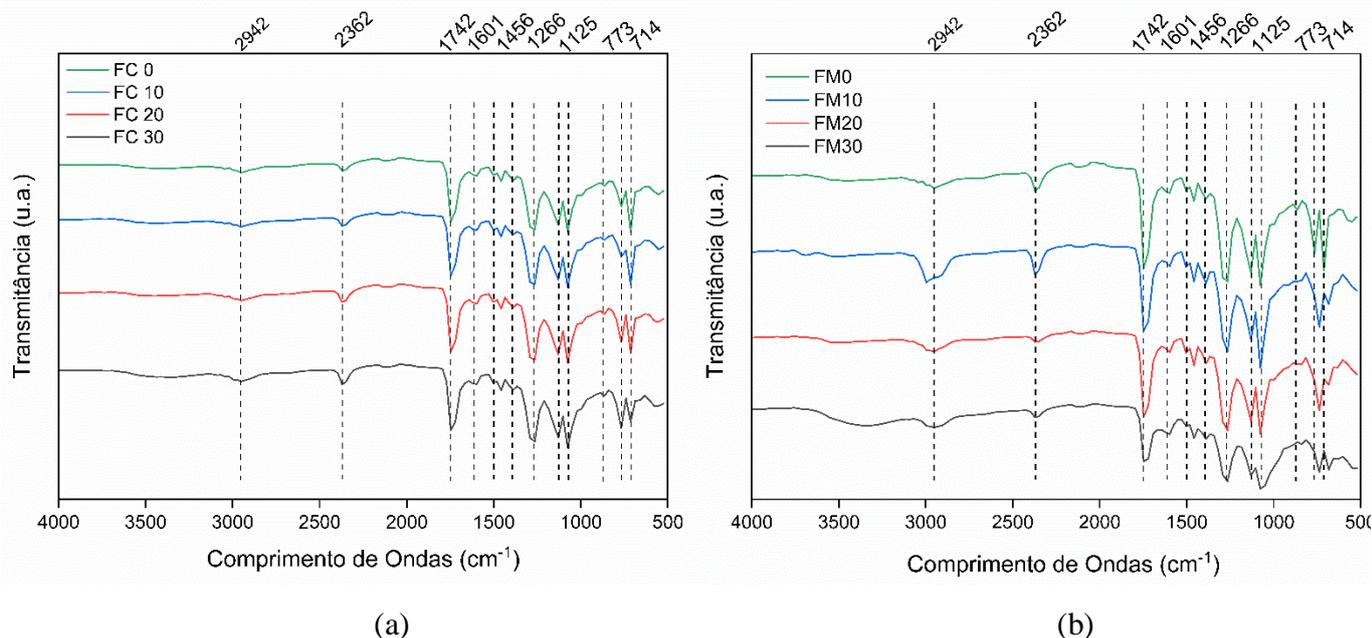
Javanshour *et al* (2021), explica que a variação média entre os resultados está intrinsicamente ligada a natureza e não homogeneidade das fibras, o que justifica os diferentes comportamentos observados para FC e FM.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

5.2.1 Espectroscopia por transformada de Fourier dos Compósitos

A Figura 28 apresenta o comportamento químico dos grupos funcionais dos compósitos de matriz poliéster.

Figura 28 – FTIR obtido para os compósitos reforçados com percentuais volumétricos de 0, 10, 20 e 30% de (a) FC e (b) FM.



Fonte: Autora, 2025.

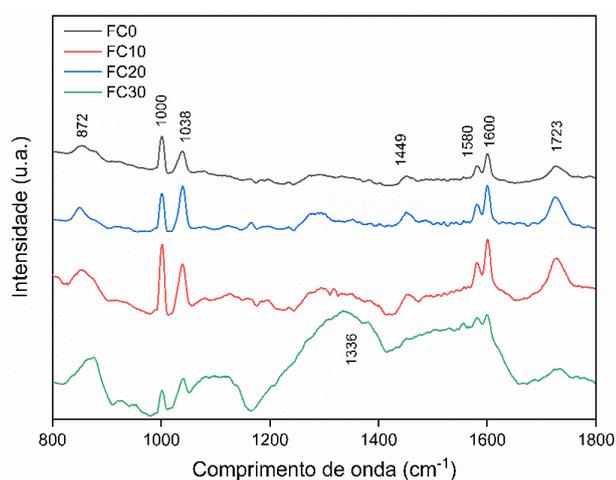
As bandas de absorção 2942 e 867 cm^{-1} correspondem a vibrações assimétricas do grupo CH indicando a presença de metil e metileno, característica de cadeias alifáticas referentes ao grupo hemicelulose, lignina e das cadeias de poliéster. A banda de absorção em 2368 cm^{-1} é atribuída ao grupo CO_2 , já a banda de 1753 cm^{-1} indica o tipo ligação entre átomos de $\text{C}=\text{O}$, característica do grupo de éster, além de ácido carboxílico, aldeído e cetona, características da hemicelulose e lignina (Hossain *et al.*, 2020). A banda absorção em 1601 cm^{-1} é característica do estiramento $\text{C}=\text{C}$, associada ao grupo poliéster. Já as bandas de 1456 e 1594 cm^{-1} podem ser atribuídas a deformações do grupo CH, CH_2 e CH_3 . Em 1266 cm^{-1} é referente ao alongamento de CO, característico de éster e também do constituinte hemicelulose. A banda de absorção observada em 1197 cm^{-1} é característica do estiramento de ligação C-O-C, que indica a presença da constituinte celulose. A banda de absorção observada em 1092 cm^{-1} faz referência as vibrações dos estiramentos $\text{C}=\text{C}$ e CCO do grupo acetil presente na estrutura na lignina, celulose e hemicelulose (Teli *et al.*, 2015; Adane *et al.*, 2022). Por fim, bandas de 773 e 714 cm^{-1} também forma observadas e correspondem a ligações do tipo $\text{C}=\text{H}$ (Farhad ali; Hossain, 2020).

A Figura 28b não mostram mudanças significativas nos compósitos de matriz de poliéster em relação ao tratamento alcalino e fibra *in natura* das fibras de Cotia, embora deslocamentos, diminuições e aumentos bandas tenham sido observadas. A adição de fibras à matriz polimérica provoca a diminuição das bandas observadas, indicando que houve interação entre a matriz e as fibras.

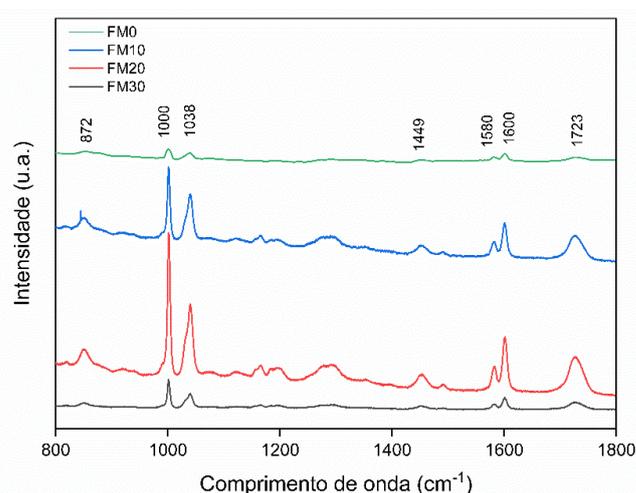
5.1.2 Espectroscopia Raman dos compósitos

A Figura 29 apresenta o espelhamento raman para os compósitos da fibra Cotia *in natura* e tratadas quimicamente por NaOH.

Figura 29– Espectros Raman obtidos para os compósitos reforçados com percentuais volumétricos de 0, 10, 20 e 30% de (a) FC e (b) FM.



(a)



(b)

Fonte: Autora, 2025.

A espectroscopia Raman apresentou bandas em torno de 872, 1000 e 1038 cm^{-1} para o compósito de FC, indicando estiramentos de ligações CC e CH. Em 1449 e 1580 cm^{-1} bandas referentes a deformações de grupos C=C ou estiramentos CH, já em 1725 cm^{-1} indica vibrações do tipo C=O. Os compósitos apresentados na Figura 29b apresentam picos de 1000 a 1038 cm^{-1} mais bem definidos, indicando que, possivelmente, o tratamento químico pode ter influenciado na estrutura. Vargas *et al.*, 2020, explicam que os espectros podem ter sido obtidos de um espaço vazio entre os constituintes e, no geral, são obtidos de materiais mais bem alinhados e próximo da

superfície. A sobreposição de átomos de carbono do tipo de ligação sp^3 pode ter limitado a visualização das bandas D e G.

O aumento de teor de fibras a matriz poliéster causou aumento e diminuição de bandas, indicando que esse fator teve mais influência e interações entre as fases matriz e reforço do que os tratamentos realizados, semelhante ao observado no FTIR.

5.1.3 Caracterização Mecânica dos Materiais compósitos reforçados com fibras de Cotia

5.1.3.1 Propriedades mecânicas em Tração

A Figura 30 apresenta os aspectos visuais dos corpos de prova produzidos para o ensaio de tração.

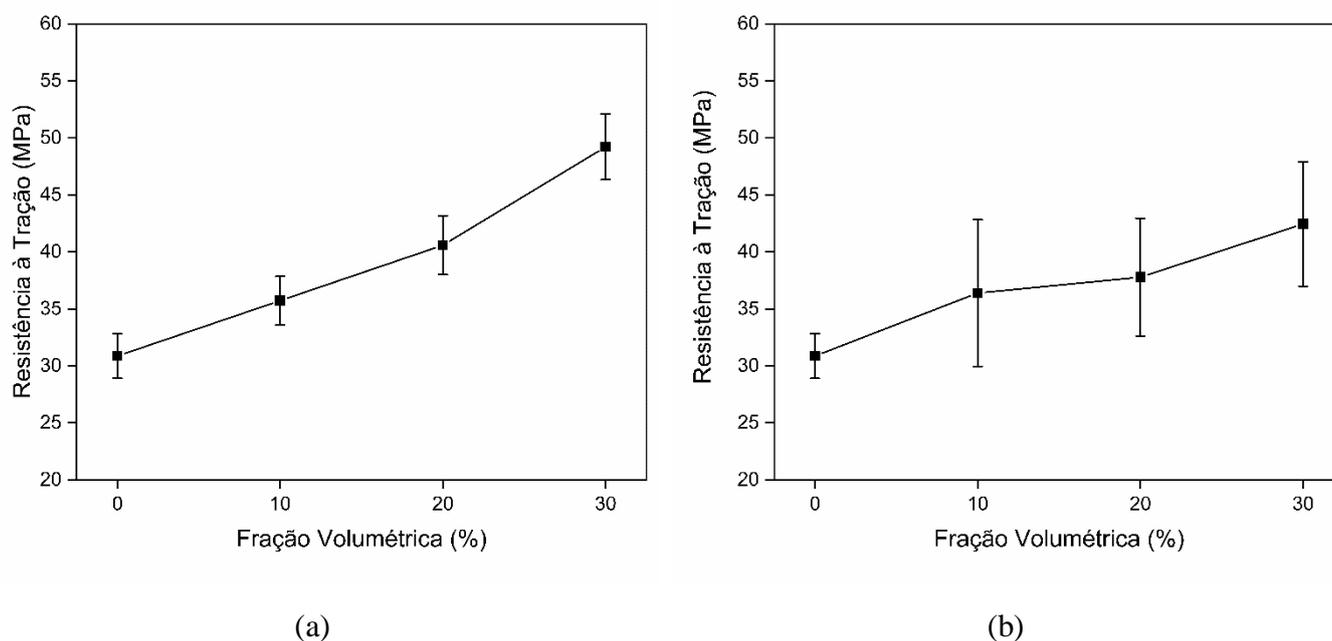
Figura 30 – Corpos de prova de tração para compósitos (a) FC e (b) FM.



Fonte: Autora, 2025.

A Figura 31 e a Tabela 8 apresentam as propriedades à tração dos compósitos de fibra natural e tratadas quimicamente.

Figura 31- Resistência a tração dos compósitos de matriz poliéster reforçados com (a) FC e (b) FM em composições de 0, 10, 20 e 30% vol.



Fonte: Autora, 2025.

Tabela 8. Propriedades de tração de compósitos de matriz poliéster, reforçados com fibras de Cotia *in natura* (FC) e Fibras mercerizadas (FM) e seus respectivos percentuais de 0, 10, 20 e 30% em volume de fibra.

Amostra	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação (mm/mm)
FC0	30,86 ± 1,95	0,79 ± 0,081	0,045 ± 0,004
FC10	35,71 ± 2,13	0,88 ± 0,035	0,040 ± 0,003
FC20	40,58 ± 2,58	0,96 ± 0,063	0,038 ± 0,003
FC30	49,21 ± 2,88	1,12 ± 0,066	0,030 ± 0,003
FM0	30,86 ± 1,95	0,79 ± 0,081	0,045 ± 0,004
FM10	36,39 ± 6,43	0,80 ± 0,106	0,044 ± 0,003
FM20	37,77 ± 5,16	0,83 ± 0,073	0,043 ± 0,002
FM30	42,44 ± 5,45	0,99 ± 0,170	0,037 ± 0,005

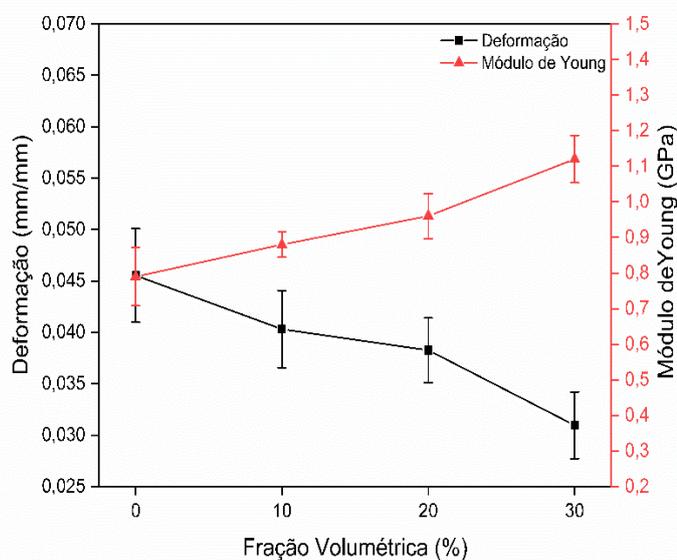
Fonte: Autores, 2025.

A Figura 31a indica que o incremento em percentual de reforço aumentou progressivamente a resistência mecânica do material compósito com fibra natural de Cotia, em relação a matriz pura. Considerando valores médios iguais a 35, 40 e 49 MPa para os compósitos de 10, 20 e 30 %, respectivamente. Esse progressivo aumento mecânico sugere uma boa dispersão e homogeneidade interfacial entre as fases. O padrão observado se assemelha a pesquisas com materiais compósitos reforçados com fibras do pedúnculo do coqueiro, Caraná e *Agave Angustifolia* (Bright *et al* 2022; Souza *et al.*, 2020; T. Ramakrishnan *et al.*, 2022). Hossain *et al* (2020), observaram o mesmo comportamento mecânico à medida que a fibra de banana e adicionada a matriz poliéster, a resistência mecânica e módulo de young dos compósitos aumentaram. Manivannan *et al* 2020 e Abidin *et al* 2023, investigando a caracterização de fibras como efeito de carga de fibras de favo de mel em matriz poliéster observaram comportamento semelhante.

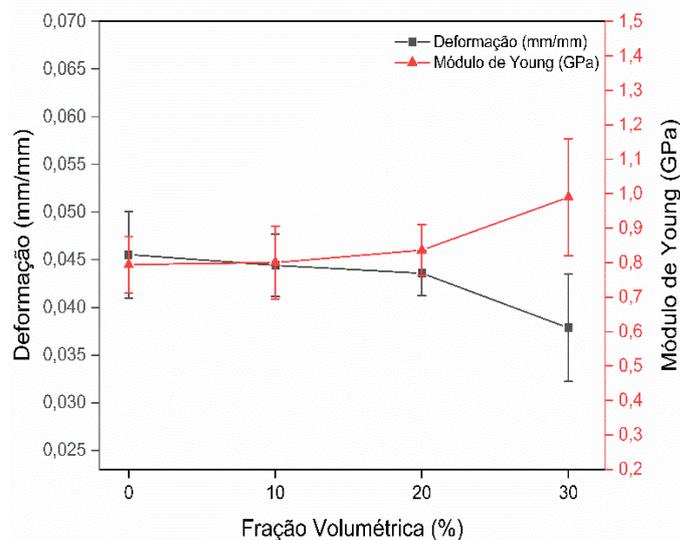
Os resultados dos compósitos com fibras tratada por NaOH, apresentado na Figura 31b, mantiveram o aumento a resistência à tração de acordo com o aumento em percentual de reforço a matriz polimérica, embora inferior aos compósitos com fibras *in natura*, o que pode inferir tratamento alcalino não apenas modificou a estrutura da fibra, mas impactou na resistência final o compósito, limitando o ganho esperado na resistência mecânica. Zwawi (2021), sugere que embora o tratamento alcalino possa melhorar a propriedades mecânicas, aumentando a concentração de celulose exposta das fibras, a alta concentração do álcali pode enfraquecer ou danificar a estrutura, limitando a capacidade transferência de tensão a matriz. Kharshiduzzaman *et al* 2024, observaram que as fibras de rattan tratadas 5% de NaOH melhoraram a resistência mecânica do compósito em relação a matriz polimérica.

A Figura 32 apresenta os resultados de módulo de Young e deformação dos compósitos de FC e FM.

Figura 32 – Módulo de Young e deformação dos compósitos reforçados com (a) FC e (b) FM.



(a)



(b)

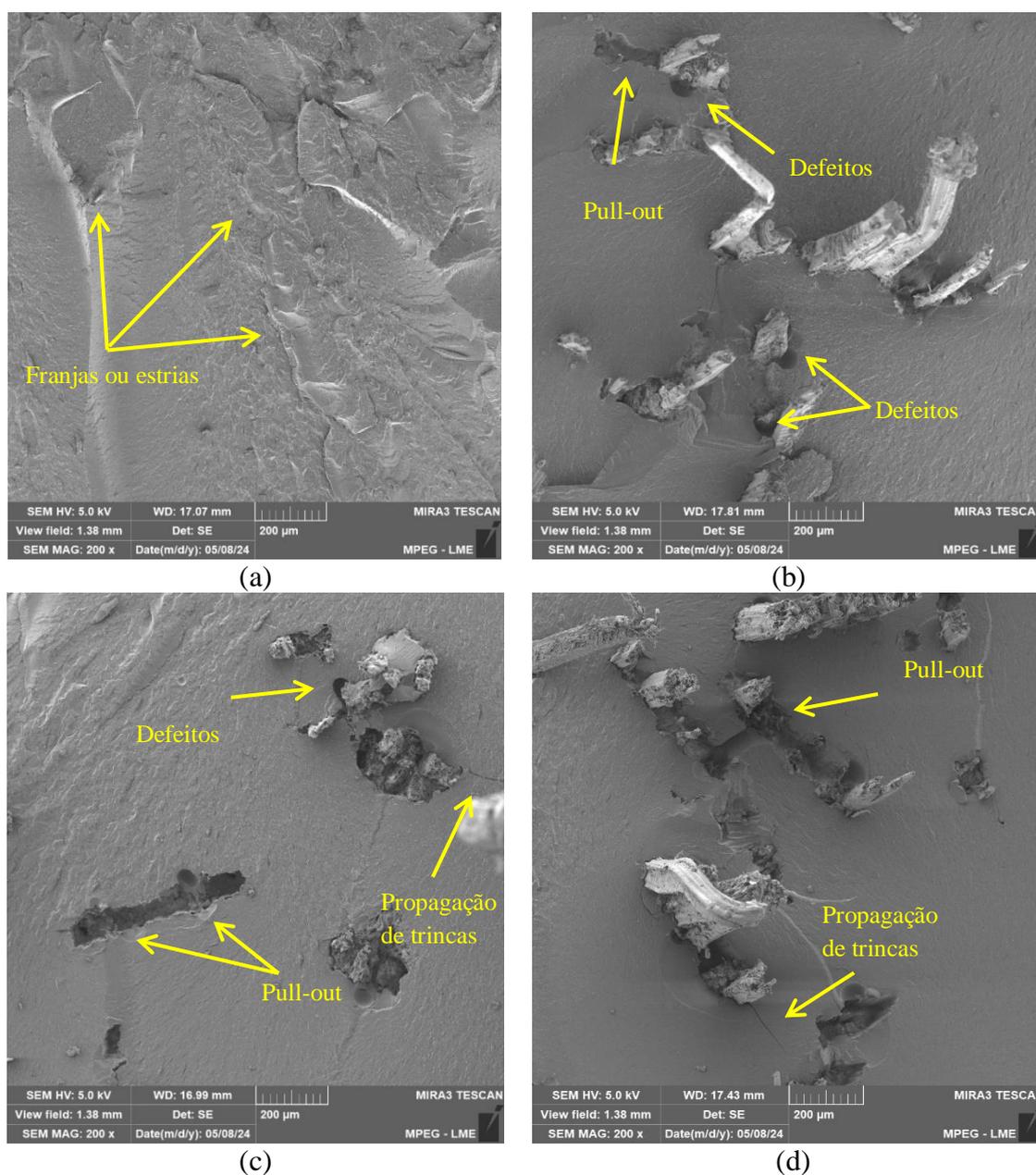
Fonte: Autora, 2025.

A incorporação de fibras à matriz de poliéster aumentou significativamente o módulo de Young em todas as condições apresentadas, conforme observado na Figura 32, acompanhadas por um aumento na resistência à tração e uma redução na deformação, indicando que são reforços eficazes em comparação a matriz pura. A relação entre as médias indica que os compósitos com incremento de 30% em reforço de FC e FM são mais rígidos em comparação a matriz pura. Além disso, a resposta ao aumento do módulo de Young é a diminuição da deformação, considerando a matriz de poliéster com maior capacidade de suportar carga até a ruptura, em comparação as demais composições. O incremento em percentual de reforço promove o aumento relativo de interfaces, diminuindo a capacidade de deformação do material.

5.1.3.1.1 Análise da região de fratura dos compósitos ensaiados por Tração

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas para avaliar a região da fratura dos compósitos reforçados por fibras *in natura* de Cotia são apresentadas na Figura 33.

Figura 33 – Análise da superfície da fratura por tração SEM dos compósitos reforçados com as fibras in natura de Cotia: (a) Matriz poliéster; (b) 10% de FC; (c) 20% de FC; (d) 30% de FC.



Fonte: Autores, 2025.

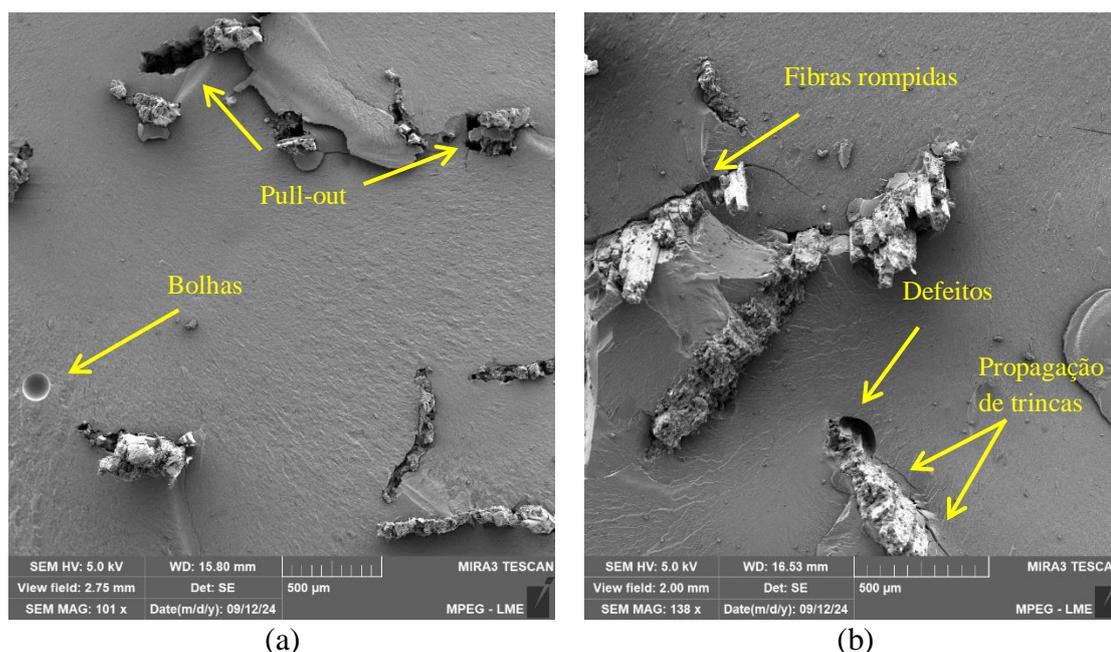
A Figura 33a revela a morfologia superficial da fratura da matriz pura, indicando uma superfície irregular composta pela presença de marcas de rio e franjas, sugerindo que a matriz de poliéster apresenta fratura do tipo frágil. Nota-se ainda, na Figura 33b, a presença de defeitos ao redor das fibras, indicando baixa adesão. Além disso, as Figuras 33c e 33d, indicadas para os compósitos FC20 e FC30%, apresentaram vazios característicos do efeito pull-out, além de

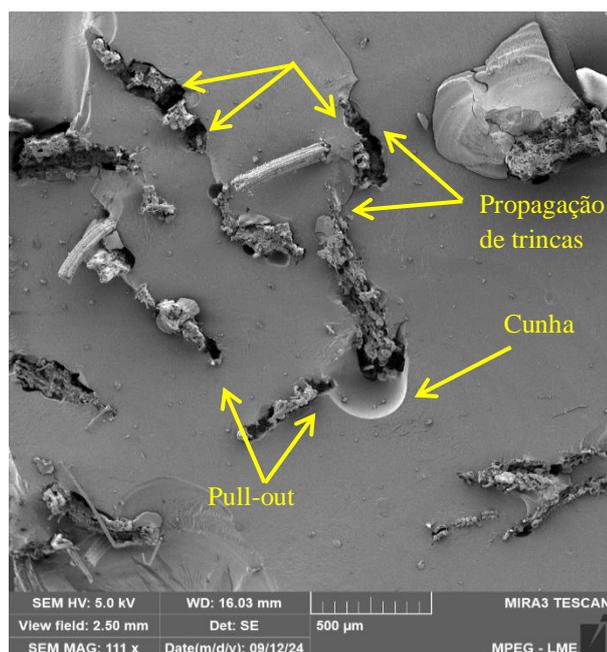
propagação de trincas. As falhas e defeitos observados indicam que o processo de fabricação, bem como baixa adesão interfacial podem ter impactado o resultado final dos compósitos. Esses aspectos podem ter comprometido o possível aumento da resistência mecânica dos compósitos reforçados com as fibras *in natura* de Cotia, por atuarem como concentradores de tensão e promoverem a ruptura precoce do material compósito.

Gapsari *et al* (2021) observaram o mesmo comportamento ao investigar a inserção de fibra de Timoho em matriz poliéster. De acordo com os resultados, as fibras em matriz poliéster apresentaram uma distribuição não uniforme, entretanto, adequada para melhor transferência de carga ao longo da matriz. Ao atingir a carga máxima há o aparecimento de defeitos como vazios e arrancamentos causados pelo aumento de carga da fibra a matriz polimérica. Essa característica promove o aumento da resistência, módulo de Young e menor deformação, assim como observado neste estudo.

As micrografias por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas para avaliar a região da fratura dos compósitos reforçados por fibras tratadas quimicamente por NaOH são apresentadas na Figura 34.

Figura 34 – Análise da superfície da fratura por tração dos compósitos reforçados com as fibras *in natura* de Cotia tratadas por NaOH: (a) 10% de FM; (b) 20% de FM; (c) 30% de FM.





(c)

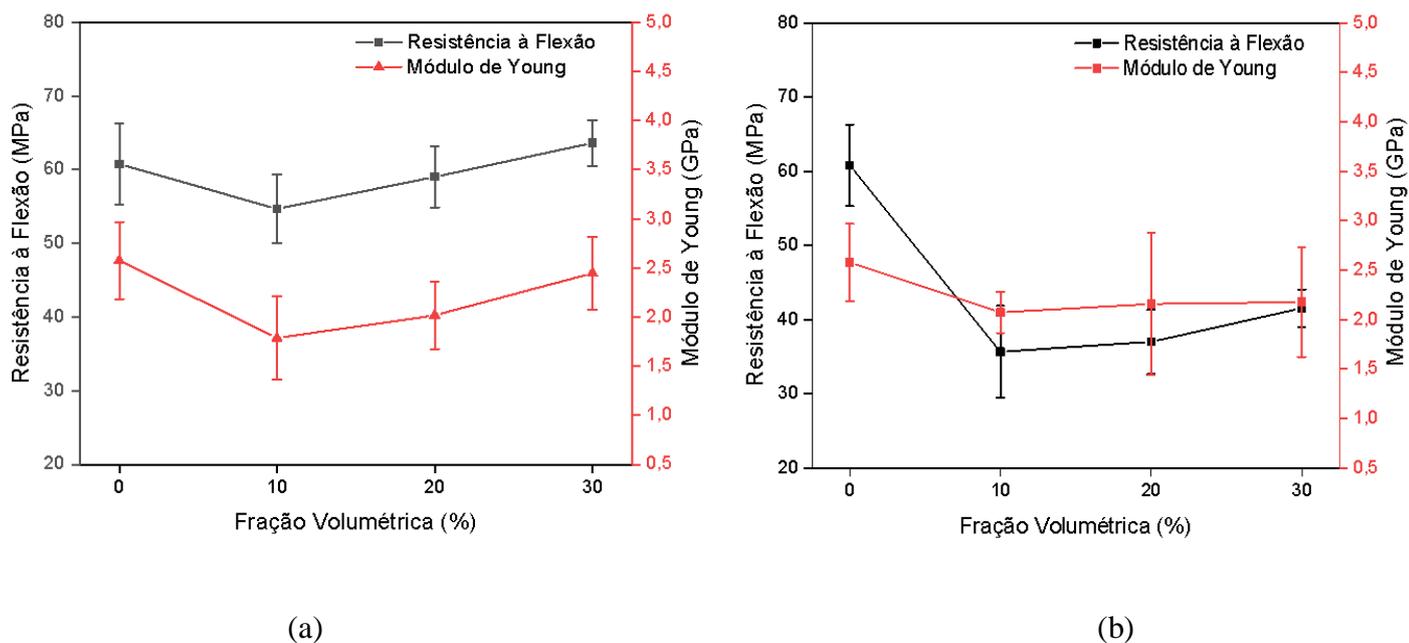
Fonte: Autores, 2025.

Através da Figura 34a, pode-se observar que o compósito FM10% apresentou regiões com defeitos, como efeito pull-out, vazios e bolhas. As Figuras 34b e 34c, indicadas para as fraturas dos compósitos FM20 e FM30%, revelam a presença de arracamentos das fibras, defeitos entre a fibra e a matriz, além de propagações de trincas e rupturas ao redor da fibra. A propagação de rupturas de fibras pode ser favorável para a melhora da resistência mecânica. A presença de defeitos, oriundos do processo de fabricação e pela baixa adesão interfacial entre a matriz e a fibra, explicam a pequena diminuição de resistência mecânica com aumento de reforço a matriz polimérica, em relação a resistência mecânica do compósito obtidos com fibras *in natura*. Esse comportamento também foi observado por Abiola *et al* (2021), quando investigaram o tratamento alcalino em compósitos reforçados com fibras naturais de *Ampelocissus cavicaulis* (ACNF). Relatam que a ocorrência de defeitos pode não ser necessariamente resultado do tratamento alcalino na fibra, mas também da presença residual de elementos amorfos ou da má adesão entre as fases matriz e reforço. Anaya *et al* 2022, observaram que os efeitos superficiais em fibras incorporadas em matriz polimérica apresentaram falhas, como pull-out e fissuras, o que pode ter diminuído a resistência mecânica dos materiais.

5.1.3.2 Propriedades mecânicas em Flexão

A Figura 35 e a Tabela 9 apresentam os resultados de resistência a flexão dos compósitos de fibras de Cotia (FC) e fibras tratadas mercerizadas (FM).

Figura 35 – Resultados em flexão dos compósitos (a) FC e (b) FM em % vol de fibra.



Fonte: Autora, 2025.

Tabela 9. Propriedades de flexão dos compósitos reforçados com fibras de Cotia *in natura* (FC), e Fibras tratadas alcalinamente (FM) em seus respectivos percentuais de 0, 10, 20 e 30% em volume.

Amostra	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de Young (GPa)
FC0	60,78 ± 5,50	2,57 ± 0,39
FC10	54,66 ± 5,50	1,78 ± 0,42
FC20	59,02 ± 4,15	2,01 ± 0,34
FC30	63,62 ± 3,09	2,44 ± 0,37
FM0	60,78 ± 5,50	2,57 ± 0,39
FM10	35,63 ± 6,19	1,86 ± 0,16
FM20	36,98 ± 4,34	1,89 ± 0,24
FM30	41,51 ± 2,52	1,95 ± 0,13

Fonte: Autora, 2025.

A Figura 35a mostra que os resultados de resistência à flexão e módulo de Young aumentam progressivamente com o incremento de fibras bruta. Neste caso, os compósitos de 20 e 30% ultrapassaram o valor da matriz poliéster, indicando melhora na eficiência com o incremento da fibra de Cotia. A melhoria nas propriedades mecânicas está ligada a melhor adesão entre a matriz e o reforço. Quando o esforço flexivo é aplicado, os compósitos tendem a sofrer uma carga compressiva superior, e com aumento adicional da carga a superfície tende a sofrer com a tensão aplicada e, conseqüentemente, a ruptura do material (Vinod *et al* 2020). Essa característica explica o resultado de maior resistência à flexão dos compósitos com aumento do incremento de fibras. Embora as médias apresentem um sutil aumento, os desvios indicam que esses aumentos não apresentam diferenças entre os resultados.

Para os compósitos FM, Figura 35b, nota-se um declínio na resistência à flexão e módulo de young em relação a matriz pura. Esse comportamento pode ser atribuído a dispersão irregular do reforço na fase matriz, bem como a baixa adesão interfacial promovida entre as fases (Islam *et al.*, 2024). Levando em consideração as barras de desvios padrão, é possível observar diferenças nos resultados em relação à média da matriz de poliéster e as composições estudadas.

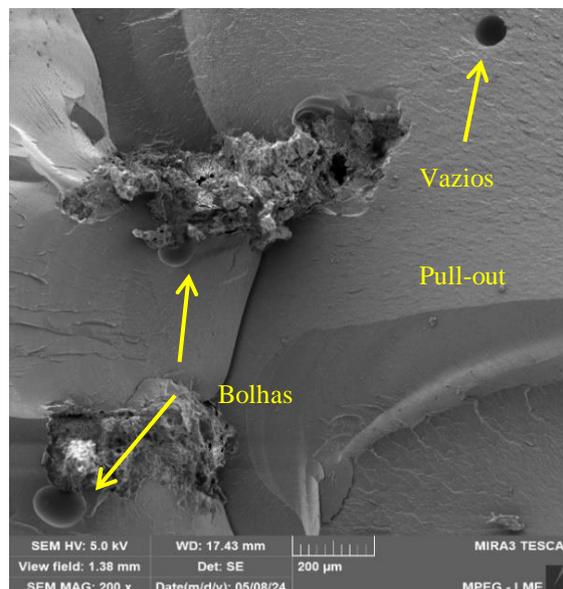
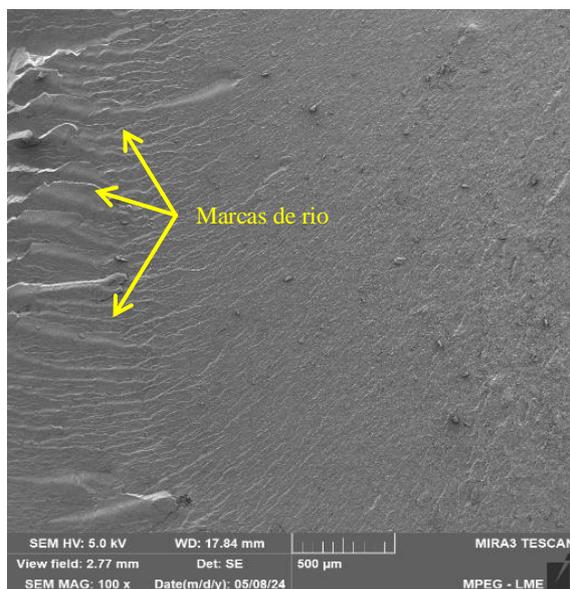
Benchouia *et al* 2023, ao investigarem um material isolante de matriz polimérica reforçado com fibras de tamareira tratadas quimicamente por NaOH e Benzoíla, observaram que os efeitos dos tratamentos diminuíram ligeiramente o módulo de Young de flexão dos materiais compósitos. Os resultados indicam que os tratamentos, embora importante para melhorar a adesão entre a matriz e o reforço, diminuíram ligeiramente a resistência mecânica. Ainda que esse comportamento não seja desejável, o material compósito ainda apresenta grande potencial para aplicação como isolante. Tolera *et al* (2019), ao investigarem as propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de caule de Ensete, observaram que o tratamento alcalino aumentou ligeiramente a resistência mecânica, em comparação as fibras *in natura*.

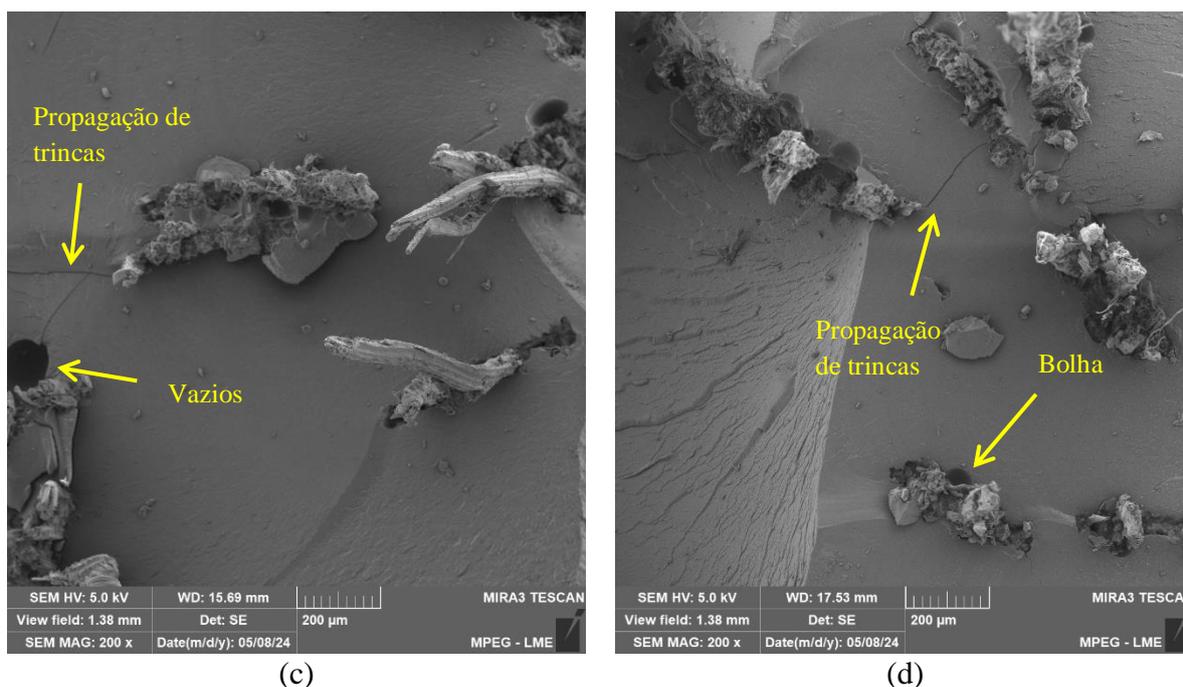
O impacto do tratamento alcalino na resistência mecânica por flexão é notório, considerando que os efeitos foram negativos em relação aos compósitos reforçados com fibras *in natura*. Além disso, a distribuição não homogênea, atrelada ao método de fabricação, pode ter gerado defeitos e originado a baixa adesão interfacial entre as fases investigadas. Mesmo que esses resultados não tenham alcançado o patamar esperado, os materiais obtidos podem apresentar potencial de aplicação em produtos que não exigirão muitos esforços flexivos e trativos.

5.1.3.2.1 Análise da região de fratura dos compósitos ensaiados por Flexão

As micrografias por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas para avaliar a região da fratura do ensaio de flexão dos compósitos reforçados por fibras *in natura* de Cotia são apresentadas na Figura 36.

Figura 36 – Análise da superfície da fratura por flexão MEV dos compósitos reforçados com as fibras de Cotia *in natura*: (a) Matriz pura, (b) 10% de FC, (c) 20% de FC, (d) 30% de FC.



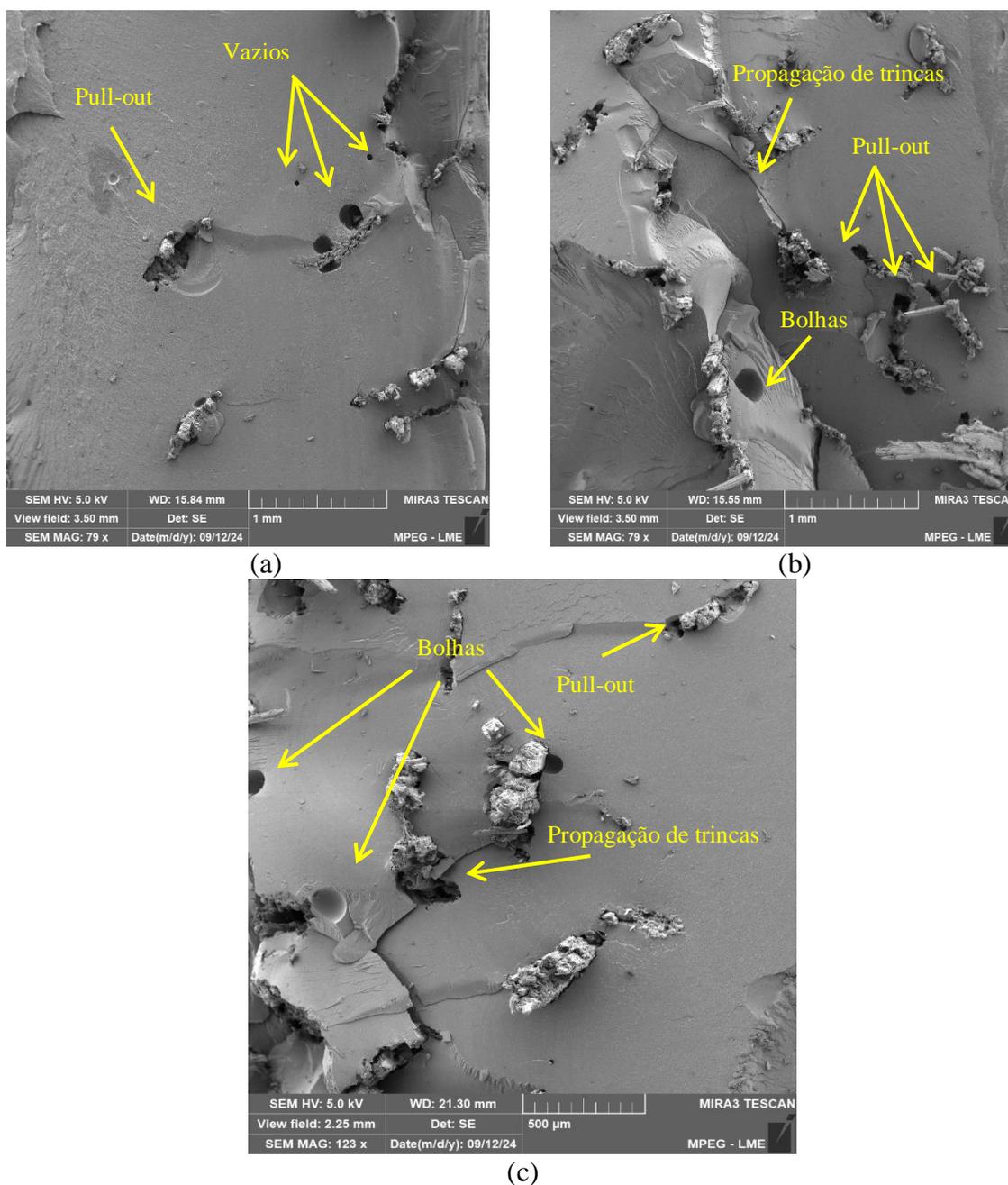


Fonte: Autores, 2025.

A Figura 36a mostra que a matriz de poliéster submetida a flexão apresenta marcas do tipo rio, sugerindo que a fratura sofreu ruptura do tipo frágil. A Figura 36b revela a fratura do compósito FC10%, indicando a presença de falhas como poros, e vazios que são característicos do arrancamento de fibras ou do efeito Pull-out. Além desses defeitos característicos, observam-se pontos que indicam a propagações de trincas. As Figuras 36c e 36d, indicadas para as fraturas dos compósitos FC20 e FC30%, apresentam defeitos semelhantes aos aspectos encontrados no compósito FC10%, tais como aspectos característicos do tipo rio, bolhas e propagações de trincas. Esses aspectos podem ser decorrentes o método de fabricação manual dos compósitos, o que provavelmente pode ter influenciados na melhora da adesão entre as fases. Mesmo que tenham apresentado essa característica, os resultados apresentam uma margem satisfatória em relação a outros resultados reportados na literatura.

As micrografias por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas para avaliar a região da fratura do ensaio de flexão dos compósitos reforçados por fibras tratadas quimicamente por NaOH, apresentadas na Figura 37.

Figura 37 – Análise da superfície da fratura por flexão MEV dos compósitos reforçados com as fibras de Cotia tratadas por NaOH: (a) 10% de FM; (b) 20% de FM; (c) 30% de FM.



Fonte: Autora, 2025.

A Figura 37 apresenta os aspectos das fraturas dos compósitos FM10, FM20 e FM30%, os quais indicam a presença de bolhas e vazios atribuídos ao efeito pull-out, além de fissuras associadas a dispersão de tensão ao longo da matriz poliéster, oriundas do processo de fabricação, que contribuiu para a propagação da tensão ao longo da matriz poliéster e efeito pull-out, que pode ser resultado da fraca adesão entre a fibra e a matriz. Esses resultados indicam que a adesão entre as fibras

mercerizadas e a matriz poliéster foi baixa, justificando a diminuição da resistência a flexão e módulo de Young.

Senthikumar *et al* (2019), observaram que o efeito alcalino nas propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos de fibras de abacaxi em matriz poliéster. A investigação apontou redução nas propriedades de flexão do compósito, atribuído a possível degradação ou ao efeito de fibrilação do tratamento alcalino e, conseqüentemente, resultou em baixa adesão das fibras a matriz polimérica.

5.1.4 Análise Estatística (ANOVA)

5.1.4.1 ANOVA F Único - Tração das Fibras

A Tabela 10 apresenta a análise de variância (ANOVA) da caracterização mecânica da fibra das fibras de Cotia em relação ao diâmetro.

Tabela 10. ANOVA de F único obtida para os resultados de tração versus o intervalo de diâmetro.

Resistência à Tração (MPa)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	96983,71	4	24245,93	83,133	$7,765 \times 10^{-25}$	2,513
Dentro dos grupos	18957,2	65	291,649			
Total	115940,9	69				
Módulo de Young (GPa)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	100,286	4	25,071	72,025	$3,57 \times 10^{-23}$	2,513
Dentro dos grupos	22,626	65	0,348			
Total	122,912	69				
Deformação (mm/mm)						

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	0,001	4	0,0004	16,591	2,04x10 ⁻⁰⁹	2,513
Dentro dos grupos	0,001	65	2,665x10 ⁻⁰⁵			
Total	0,003	69				

Fonte: Autora, 2025.

Os dados observados indicam que os valores de F calculados foram superiores aos valores de F crítico, para todos os tratamentos mecânicos, considerando um nível significância de 5%. A partir desta característica, rejeita-se a hipótese de nula, ou seja, há uma ou mais médias que diferem em relação a variação diametral. Com base nos resultados obtidos, foi realizado o teste Tukey para avaliar quais médias variam de acordo com o aumento diametral. Os resultados obtidos pelo teste tukey são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Análise Tukey para os resultados de tração das fibras por intervalo de diâmetro.

Resistência à Tração (m.s.d =18,028)					
	INT 1	INT 2	INT 3	INT 4	INT 5
INT 1	0	79,852	87,260	92,102	104,362
INT 2	79,852	0	7,407	12,249	24,509
INT 3	87,260	7,407	0	4,841	17,102
INT 4	92,102	12,249	4,841	0	12,260
INT 5	104,362	24,509	17,102	12,260	0

Módulo de Young (m.s.d = 0,626)					
	INT 1	INT 2	INT 3	INT 4	INT 5
INT 1	0	1,573	2,135	2,858	3,491

INT 2	1,573	0	0,562	1,285	1,918
INT 3	2,135	0,562	0	0,723	1,356
INT 4	2,858	1,285	0,723	0	0,633
INT 5	3,491	1,918	1,356	0,633	0
Deformação (m.s.d = 0,005)					
	INT 01	INT 02	INT 03	INT04	INT05
INT 1	0	0,004	0,009	0,010	0,014
INT 2	0,004	0	0,005	0,006	0,010
INT 3	0,009	0,005	0	0,001	0,004
INT 4	0,010	0,006	0,001	0	0,003
INT 5	0,014	0,010	0,004	0,003	0

Fonte: Autora, 2025.

A partir da ANOVA, obtém-se o valor da diferença mínima significava (dms), que representa o resultado absoluto das diferenças mínimas entre as médias de cada intervalo. Sendo assim, se as médias forem superiores ou iguais ao valor absoluto do dms, sugere-se que há diferença significativa entre as médias para cada intervalo. Caso a diferença entre as médias sejam inferiores ao dms, não há variabilidade significativa para o efeito de tratamento.

O valor de dms obtido para resistência à tração foi igual a 18,028, para módulo de Young e deformação total foram iguais a 0,626 e 0,005, respectivamente. As diferenças mínimas significativas para a resistência à tração, módulo de Young e deformação indicam que há efeito na variação do aumento do diâmetro fibrilar. A resistência à tração diminui à medida que as espessuras das fibras aumentam, o mesmo é observado para o módulo de Young. Em contrapartida, a deformação é inversamente proporcional as outras propriedades avaliadas. Pinheiro *et al* (2023), sugere que as

propriedades mecânicas das fibras naturais são diretamente proporcionais a densidade observada para cada variação diametral fibrilar.

5.1.4.2 ANOVA F Único - Tração dos Compósitos

A Tabela 12 apresenta a análise de variância (ANOVA) da caracterização mecânica dos compósitos reforçados com fibras FC.

Tabela 12. ANOVA de F único para os resultados mecânicos dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra de Cotia *in natura* (FC).

Resistência à Tração (MPa)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	1106,364	3	368,788	37,406	2,16 x10 ⁻⁰⁸	3,098
Dentro dos grupos	197,18	20	9,859			
Total	1243,071	23				
Módulo de Young (GPa)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	0,348	3	0,116	23,590	8,92x10 ⁻⁰⁷	3,098
Dentro dos grupos	0,098	20	0,004			
Total	0,447	23				
Deformação (mm/mm)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	0,0006	3	0,0002	13,203	5,57x10 ⁻⁰⁵	3,098
Dentro dos grupos	0,0003	20	1,66 x10 ⁻⁰⁵			
Total	0,0009	23				

Fonte: Autora, 2025.

A ANOVA F único revelou que o F calculado é superior ao F crítico com um nível significância de 5%. Nota-se que, para todas as propriedades observadas para os compósitos de FC, a hipótese nula foi rejeitada, em que pelo menos uma ou mais médias variam de acordo com o

incremento ou não de fibras. Por esse motivo, indicam que há diferença estatística entre os grupos investigados. A Tabela 13 apresenta os resultados Tukey para as médias de cada composição.

Tabela 13. Tukey das médias dos compósitos de FC.

Resistência à Tração (DMS =5,076)				
	FC0%	FC10%	FC20%	FC30%
FC0%	0	4,517	9,051	18,351
FC10%	4,517	0	4,534	13,834
FC20%	9,051	4,534	0	9,300
FC30%	18,351	13,834	9,300	0
Módulo de Young (DMS = 0,113)				
	FC0%	FC10%	FC20%	FC30%
FC0%	0	0,086	0,168	0,327
FC10%	0,086	0	0,081	0,240
FC20%	0,168	0,081	0	0,158
FC30%	0,327	0,240	0,158	0
Deformação (DMS = 0,006)				
	FC0%	FC10%	FC20%	FC30%
FC0%	0	0,005	0,007	0,014
FC10%	0,005	0	0,002	0,009
FC20%	0,007	0,002	0	0,007
FC30%	0,014	0,009	0,007	0

Fonte: Autora, 2025.

O resultado da análise Tukey revela que as diferenças mínimas significativas (DMS) para a resistência à tração, módulo de Young e deformação foram iguais a 5,076, 0,113 e 0,006, respectivamente. Ao estabelecer uma comparação entre os compósitos, as composições destacadas apresentam médias superiores ao DMS. Esses achados confirmam que o efeito da adição do reforço da fibra *in natura* de Cotia a matriz poliéster, resultou no aumento significativo da resistência à tração do material compósito, o mesmo comportamento foi observado para o módulo de Young, confirmando que o material torna-se mais rígido e resistente. Nota-se ainda que enquanto o material

torna-se mais resistente e rígido, sua capacidade de deformação diminui. Esse fato, atrelado a resistência mecânica das fibras, indicam que as fibras promoveram um reforço efetivo na matriz polimérica, impactando diretamente o desempenho mecânico do compósito.

A Tabela 14 apresenta a análise estatística realizada para os compósitos de matriz poliéster incorporados com fibras FM.

Tabela 14. ANOVA de F único para os resultados mecânicos em tração dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra de Cotia mercerizadas (FM).

Resistência à Tração (MPa)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	247,712	3	82,570	2,719	0,071	3,098
Dentro dos grupos	607,360	20	30,368			
Total	855,073	23				
Módulo de Young (GPa)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	0,157	3	0,052	3,012	0,054	3,098
Dentro dos grupos	0,348	20	0,017			
Total	0,505	23				
Deformação (mm/mm)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	0,0001	3	$4,13 \times 10^{-05}$	2,154	0,125	3,098
Dentro dos grupos	0,0003	20	$1,92 \times 10^{-05}$			
Total	0,0005	23				

Fonte: Autora, 2025.

A ANOVA para os resultados mecânicos em tração nos compósitos reforçados com fibras tratadas alcalinamente, apresentaram um resultado F calculado inferior ao F crítico, com nível de significância superior ao 5%. Isso é um indicativo de que o teor de FM na matriz polimérica não fornece uma variabilidade significativa suficiente dentro e entre os grupos, esse fator é comprovado pelo p-valor superior a 5%. Esses resultados diferem dos achados para os compósitos FC.

5.1.4.3 ANOVA F Único - Flexão dos Compósitos

Análise de fator único obtido para os resultados de ensaio de flexão para os compósitos FC, são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. ANOVA de F único para os resultados mecânicos em flexão dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra de Cotia *in natura* (FC).

Resistência à Flexão (MPa)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	253,385	3	84,461	3,559	0,032	3,098
Dentro dos grupos	474,589	20	23,729			
Total	727,975	23				
Módulo de Young (GPa)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	2,443	3	0,814	4,611	0,013	3,098
Dentro dos grupos	3,532	20	0,176			
Total	5,976	23				

Fonte: Autora, 2025.

A ANOVA de fator único em flexão para os compósitos reforçados com fibras *in natura* um F calculado superior ao F crítico, indicando que há diferença significativa entre uma ou mais médias observadas, rejeitando a hipótese nula. A Tabela 16 apresenta a análise Tukey para identificar quais média iriam diferir.

Tabela 16. Tukey para as médias dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra de Cotia *in natura* (FC).

Resistência à Flexão (DMS = 7,601)				
	FC0%	FC10%	FC20%	FC30%
FC0%	0	6,117	1,755	2,839
FC10%	6,117	0	4,361	8,956
FC20%	1,755	4,361	0	4,595
FC30%	2,839	8,956	4,595	0
Módulo de Young (DMS = 0,680)				
	FC0%	FC10%	FC20%	FC30%
FC0%	0	0,790	0,558	0,129
FC10%	0,790	0	0,231	0,661
FC20%	0,558	0,231	0	0,429
FC30%	0,129	0,661	0,429	0

Fonte: Autora, 2025.

O resultado da análise Tukey revela que as diferenças mínimas significativas (DMS) para a resistência à flexão e módulo de Young foram iguais a 7,601 e 0,680 respectivamente. A partir desta análise, foi possível confirmar que compósitos de composições com 30 e 10% de adição de fibras *in natura* apresentam diferenças entre si, sugerindo que o incremento de foi um fator significativo para estas composições. O mesmo comportamento foi observado para as composições de 0 e 10% para a propriedade de elasticidade.

Embora essa diferença seja mínima, os compósitos apresentaram uma leve tendência ao aumento da resistência e módulo de Young.

A Tabela 17 apresenta os resultados da ANOVA de fator único para os compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras tratadas alcalinamente por NaOH.

Tabela 17. ANOVA de F único para os resultados mecânicos em flexão dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra FM.

Resistência à Flexão (MPa)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	2441,117	3	813,705	28,879	1,81x10 ⁻⁰⁷	3,098
Dentro dos grupos	563,520	20	28,176			
Total	3004,637	23				

Módulo de Young (GPa)						
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Entre grupos	2,072	3	0,690	8,796	0,0006	3,098
Dentro dos grupos	1,570	20	0,078			
Total	3,643	23				

Fonte: Autora, 2025.

Os resultados observados para a ANOVA de fator único indicam que tanto o F calculado quanto o F crítico dos resultados de resistência a flexão e módulo de young rejeitam a hipótese nula, considerando um nível de significância de 5%. A Tabela 18 apresenta a análise Tukey para identificar quais médias diferiam.

Tabela 18. Tukey para as médias dos compósitos de matriz poliéster incorporados com fibra de Cotia tratadas alcalinamente (FM).

Resistência à Flexão (DMS = 8,581)				
	FC0%	FC10%	FC20%	FC30%
FC0%	0	25,149	23,803	19,272
FC10%	25,149	0	1,346	5,876
FC20%	23,803	1,346	0	4,530
FC30%	19,272	5,876	4,530	0

Módulo de young (DMS = 0,453)				
	FC0%	FC10%	FC20%	FC30%
FC0%	0	0,714	0,685	0,621
FC10%	0,714	0	0,028	0,093
FC20%	0,685	0,028	0	0,064
FC30%	0,621	0,093	0,064	0

Fonte: Autora, 2025.

O resultado da análise Tukey revela que as diferenças mínimas significativas (DMS) para a resistência à flexão e módulo de young foram iguais a 8,581 e 0,453 respectivamente. Estes resultados confirmam que todas as composições diferiram em relação a matriz poliéster. Essa diferença confirma que o incremento em percentual de fibras tratadas quimicamente impactou as propriedades observadas. Os resultados destacados das propriedades apresentaram resultados distantes em relação a matriz, confirmando a diminuição das propriedades observadas.

Os resultados da ANOVA de fator único para as propriedades de flexão foram corroborados pela ANOVA de dois fatores, para verificar, além da adição em percentual de fibra, qual o impacto dos tratamento alcalino em relação a fibra *in natura*.

5.1.4.4 ANOVA F Duplo - Tração dos Compósitos

A Tabela 19 apresenta a análise de variância (ANOVA) de fator duplo dos resultados mecânicos dos compósitos reforçados com fibras de Cotia *in natura* e mercerizadas.

Tabela 19. ANOVA de resistência à tração dos compósitos FC/FM.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Amostra	106,776	1	106,776	5,713	0,0216	4,084
Colunas	1144,133	3	381,37	20,407	3,50x10 ⁻⁰⁸	2,838
Interações	206,497	3	68,832	3,683	0,0196	2,838
Dentro	747,513	40	18,687			
Total	2204,920	47				

A análise de fator duplo observa o efeito de dois fatores independentes. Os termos amostra e coluna referem-se, respectivamente, ao fator tratamento químico da fibra e ao percentual de fibras adicionadas à matriz de poliéster. A interação significativa entre os dois fatores é representada pelo termo interações.

Os valores de F calculados foram superiores aos valores de F críticos, indicando que há diferença significativa para todas as condições de tratamento, considerando o nível de significância de 5%. Esses resultados sugerem que o tratamento alcalino, bem como o incremento em percentual de fibra e a interação entre eles, tiveram um efeito significativo no comportamento mecânico dos materiais compósitos de FC e FM. Neste caso, a interação significativa indica que os fatores não são independentes, ou seja, o impacto do percentual de fibras nas propriedades mecânicas depende do tipo de tratamento químico realizado nas fibras.

Ao analisar isoladamente o comportamento mecânico dos compósitos FM, a ANOVA de fator duplo indicou que tanto o tratamento químico quanto o percentual de fibras significativas diferenças significativas. Por outro lado, a ausência de interação significativa sugere que os dois fatores não dependem um do outro. Isso indica que o comportamento mecânico dos compósitos está relacionado as particularidades de cada fator.

Esses resultados confirmam que tanto os fatores individuais quanto sua interação influenciam significativamente os resultados de resistência a tração dos compósitos.

5.1.4.5 ANOVA F Duplo - Flexão dos Compósitos

A Tabela 20 apresenta as análises de variância (ANOVA) de fator duplo dos resultados mecânicos dos compósitos reforçados com fibras de Cotia *in natura* e mercerizadas.

Tabela 20. ANOVA de resistência à flexão dos compósitos FC/FM.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F (calculado)	valor-P	F (crítico)
Amostra	2774,872	1	2774,872	105,082	$9,4 \times 10^{-13}$	4,084
Colunas	1505,866	3	501,955	19,008	$8,06 \times 10^{-08}$	2,838
Interações	974,896	3	324,965	12,306	$7,64 \times 10^{-06}$	2,838
Dentro	1056,266	40	26,406			
Total	6311,9	47				

Os valores de F calculados foram superiores aos valores de F críticos, apresentados nas Tabelas 20, indicando que há diferença significativa para todas as condições observadas, considerando o nível de significância de 5%. Esses resultados sugerem que tanto os tratamentos químicos e o incremento no percentual de fibra tiveram um efeito significativo no comportamento mecânico dos materiais compósitos de FM, em comparação as fibras *in natura*. As interações entre os fatores não são independentes, confirmando que tanto o fator tratamento químico e o fator variação em percentual volumétrico, tiveram impacto no material compósito.

Em contrapartida, o comportamento mecânico dos compósitos FM, indicam que o fator coluna apresentam diferença significativa, em comparação ao fator amostra. As interações confirmam que ambos os fatores não tiveram impacto entre eles. Isso indica que os comportamentos mecânicos dos compósitos em flexão, assim como nos resultados de tração, estão relacionados as particularidades de cada fator.

As caracterizações químicas e mecânicas realizadas, bem como os tratamentos químicos, promoveram diferenças estruturais negativas na estrutura das fibras de Cotia. Essas diferenças foram confirmadas a partir das análises estatísticas de variância, que observaram que não só o impacto dos tratamentos, mas também a influência do incremento de fibras a matriz polimérica, modificaram ou atuaram na estrutura final do material compósito.

6 CONCLUSÕES

As caracterizações químicas e mecânicas revelaram que:

Os FTIR's revelaram a presença de grupos funcionais típicos das fibras naturais, que sofreram modificações à medida que as fibras foram submetidas ao tratamento alcalino. O Raman confirmou que as estruturas formadas por carbono foram modificadas pela mercerização. A TGA revelou que a fibra de Cotia é mais estável até 300 °C.

As observações por MEV indicaram que os tratamentos modificaram a superfície das fibras *in natura*, o que levou a formação de regiões mais lisas e livres de impureza. O FTIR e o Raman dos compósitos revelaram mudanças de grupos químicos e estruturais, de acordo com a adição de fibras.

A caracterização mecânica das fibras Cotia *in natura* por intervalo de diâmetro revelou que, a resistência média das fibras de Cotia foi de 82,44 MPa, quando comparada a literatura. Fibras de menor intervalo diâmetro apresentaram maior resistência, e fibras de maior intervalo diâmetro apresentaram menor resistência. O aumento relativo do módulo de Young quando menor for o intervalo de diâmetro, em contrapartida, diminuição na deformação quanto menor for o intervalo de diâmetro.

Nos compósitos, os melhores resultados de resistência à tração, flexão e módulo de Young foram apresentados nos compósitos reforçados com fibras *in natura*. Esses resultados foram atribuídos à menor quantidade de defeitos observados nas análises de MEV, indicando uma adesão interfacial mais eficaz entre as fibras naturais e a matriz de poliéster. Por outro lado, os compósitos reforçados com fibras mercerizadas apresentaram desempenho inferior, devido à maior quantidade de defeitos, que indicam uma adesão mais fraca entre a fibra e a matriz.

A ANOVA de fator duplo para a resistência a tração e flexão dos compósitos confirmaram que tanto as fibras *in natura* e mercerizadas quanto o aumento do percentual de fibras influenciam significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos.

A descoberta da fibra natural de Cotia representa um avanço significativo para o desenvolvimento de materiais compósitos mais sustentáveis e de alto desempenho. A fibra de Cotia, quando reforçada na matriz de poliéster, apresentou propriedades mecânicas superiores em comparação com fibras mercerizadas, o que confirma que os tratamentos químicos atuaram negativamente na estrutura da fibra. Embora essa queda mecânica, as fibras de Cotia in natura apresentam grande potencial de aplicação.

A fibra de Cotia oferece uma alternativa mais ecológica e de baixo custo em comparação aos materiais sintéticos, como também abre novas possibilidades para a obtenção de novos materiais compósitos de bom desempenho e com menor impacto ambiental.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar as condições termomecânicas por DMA;
- Caracterizar mecanicamente por impacto;
- Analisar por TGA e DSC as perdas de massa dos compósitos;
- Aplicar em produtos;
- Obter e caracterizar materiais compósitos em outras matrizes como a matriz epóxi.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEYI, A.J.; ADEYI, O.; OKE, E.O.; OLALERE, O.A.; OYELAMI, S.; OGUNSOLA, A.D. **Effect of varied fiber alkali treatments on the tensile strength of Ampelocissus cavicaulis reinforced polyester composites: Prediction, optimization, uncertainty and sensitivity analysis.** *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(1), 29–40, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.12.002>.

AHMED A.; GUO S.; ZHANG Z.; SHI C.; ZHU D. **A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete** *Constr. Build. Mater.*, 256, 2020. 10.1016/j.conbuildmat.2020.119484.

AHMED, A.; ADAK, B.; BANSAL, T.; MUKHOPADHYAY, S. **Green Solvent Processed Cellulose/Graphene Oxide Nanocomposite Films with Superior Mechanical, Thermal, and Ultraviolet Shielding Properties.** *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12(1), 1687–1697, 2020. DOI: 10.1021/acsami.9b19686.

AISYAH H.A.; PARIDAH M.T *et al.* **A comprehensive review on advanced sustainable woven natural fibre polymer composites**, *Polymers*, 13, 2021. 10.3390/polym13030471

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **D 6110 Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics.** ASTM, Pennsylvania, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, D 790 – **Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating**. ASTM, Pennsylvania: 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. D 638 – **Standard Test Method 88 for Tensile Properties of Plastics**. Pennsylvania: ASTM, 2022.

ANAYA-RAMIREZ R. C.; RIOS-SOBERANIS C. R.; HERRERA-FRANCO P. J. **Effect of fiber surface treatments in HDPE-henequen short fiber-reinforced composites: Static characterization and fatigue**. *J. Mater. Sci.*, 57, 15762–15776, 2022.

<https://doi.org/10.1007/s10853-022-07608-8>.

ARKER, F.; KARIM, N.; AFROJ, S.; KONCHERRY, V.; NOVOSELOV, K.S.; POTLURI, P. **High-Performance Graphene-Based Natural Fiber Composites**. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 10, 34502–34512, 2018.

ARULVEL S *et al.* **A comprehensive review on mechanical and surface characteristics of composites reinforced with coated fibres**, *Surfaces and Interfaces*, 27, 101449, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101449>.

ARUNACHALAM, S. J.; SARAVANAN, R.; ANBUCHAZHIYAN, G. **An overview on chemical treatment in natural fiber composites**. *Materials Today: Proceedings*, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.108>.

ASKELAND, D.R.; PHULÉ, P.P. *Ciência e Engenharia dos Materiais*. 2. Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

ASYRAF M.R.M *et al.* **Potential application of green composites for cross arm component in transmission tower: a brief review**. *Int J Polym Sci*, 2020, 1-15, 2020. 10.1155/2020/8878300.

ATHANASOULIA, I.-G.; GIACHALIS, K.; KORRES, D.; TODOROVA, N.;
GIANNAKOPOULOU, T.; TARANTILI, P. A.; TRAPALIS, C. **Study of thermomechanical, structural and antibacterial properties of poly(lactic acid) reinforced with graphene oxide nanoparticles via melt mixing.** *Polymer International*, 69(9), 981–991, 2020.
<https://doi.org/10.1002/pi.6054>.

ATHAWALE, A.A., PANDIT J.A, **Unsaturated Polyester Resins, Blends, Interpenetrating Polymer Networks.** Composites, and Nanocomposites, 1-42, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816129-6.00001-6>.

ABIDIN, N. M. Z., SULTAN, M. T. H., SHAH, A. U. MD, SHAHAR, F. S., NAJEEB, M. I., ALI, M. R., BASRI, A. A., BALOOR, S. S., GAFF, M., & HUI, D. **The evaluation of the mechanical properties of glass, kenaf, and honeycomb fiber-reinforced composite.** *Reviews on Advanced Materials Science*, 61(1), 2023, 1-20. DOI: [10.1515/rams-2022-0299](https://doi.org/10.1515/rams-2022-0299)

BAGGIO, Airton. **Estudo da viabilidade do emprego de microesferas de vidro em compósitos de resina poliéster insaturada com base em suas propriedades mecânicas, físicas e considerações econômicas.** 173f. 2021. Tese (doutorado em engenharia mecânica) – Universidade estadual Paulista, Bauru, 2021.

BARCELOS, M. A.; SIMONASSI, N. T.; MARGEM, F. M.; BRAGA, F. O.; MONTEIRO, S. N. **Under pressure processed polyester composites with high amount of curaua fibers for improved tensile properties.** *Materials Science Forum*, 869, 255–259, 2016.

BELOUADAH Z *et al.* **Characterization of ligno-cellulosic fiber extracted from Atriplex halimus L. plant,** *International Journal of Biological Macromolecules*, 168, 806-815, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.142>.

BENCHOUIA H. E.; GUERIRA B.; CHIKHI M.; BOUSSEHEL H.; TEDESCHI C. **An experimental evaluation of a new eco-friendly insulating material based on date palm fibers and polystyrene.** *J. Build. Eng.*, 65, 105751, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105751>.

BHARATH, K. N.; MADHU, P.; GOWDA, T. G. Y., et al. **Alkaline Effect on Characterization of Discarded Waste of Moringa oleifera Fiber as a Potential Eco-friendly Reinforcement for Biocomposites.** *Journal of Polymer Environments*, 28, 2823–2836, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01818-4>.

BHARDWAJ, A. R.; VAIDYA, A. M.; MESHARAM, P. D.; BANDHU, D. **Machining behavior investigation of aluminium metal matrix composite reinforced with TiC particulates.** *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*, 2023, pp. 1–15.

BOIMAU, K.; SELAN, R. N.; MANIMALAY, D. A. **Pengaruh Perlakuan Alkali dan Orientasi Serat Buah Patola Terhadap Sifat Impak Komposit Poliester.** *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, 6(1), 101, 2021.

BORODULINA, S.; MOTAMEDIAN, H. R.; KULACHENKO, A. **Effect of fiber and bond strength variations on the tensile stiffness and strength of fiber networks.** *International Journal of Solids and Structures*, 154, 19–32, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.12.013>.

BOUMAAZA M.; BELAADI A.; BOURCHAK M. **O efeito do tratamento alcalino no desempenho mecânico do gesso reforçado com fibras naturais: otimização usando RSM.** *J. Nat. Fibers*, 1–21, 2020. doi:10.1080/15440478.2020.1724236.

BRIGHT, B. M.; SELVI, B. J.; ABU HASSAN, S.; JAAFAR, M. M.; SUCHART, S.; MAVINKERE RANGAPPA, S.; KURKI NAGARAJ, B. **Characterization of natural cellulosic fiber from Cocos nucifera peduncle for sustainable biocomposites.** *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 9373–9383, 2022. <https://doi.org/10.1002/app.52245>.

BRISSAC D.C.O.; DALONSO N.; SOUZA O.; SELLIN N.; WISBECK E.; GERN R.M.M.

Deslignificação do pseudocaule da bananeira pelo caldo de cultivo enzimático de *Pleurotus sajor-caju*, *Matéria*, 23:4, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0554>

C, A.M.; ZAKI, S.A.; HASSAN, M.Z.; ILYAS, R.A.; JAMALUDIN, K.R.; DAUD, M.Y.M.;

AZIZ, S.A. **Bamboo-Fiber-Reinforced Thermoset and Thermoplastic Polymer Composites: A Review of Properties, Fabrication, and Potential Applications**. *Polymers*, 14, 1387, 2022.

<https://doi.org/10.3390/polym14071387>.

CAVALCANTE W.M.; FERNANDES M.A. *As tecnologias e processos de Produção Industrial: Produção de materiais compósitos a base de resíduos lignocelulósicos: inovações recentes, técnicas e potenciais aplicações*, 2 ED. Cap 5. Minas Gerais, Synapse 2023.

CECCONELLO, V.; POLETTO, M. **Assessment of graphene oxide coated polyester fiber reinforced cementitious composites**. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 8216–8227, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.266>.

CHAHARMAHALI, M.; HAMZEH, Y.; EBRAHIMI, G.; ASHORI, A.; GHASEMI, I. **Effects of nano-graphene on the physico-mechanical properties of bagasse/polypropylene composites**. *Polymer Bulletin*, 71, 337–349, 2014.

CHAKRAVARTHY U. K.; MADHU S.; JUVVI S.N.R.; JABIHULLA S. **Characterization of novel natural cellulosic fiber extracted from the stem of *Cissus vitifolia* plant**, *International Journal of Biological Macromolecules*, 161, 1358-1370, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.230>.

CHAKRAVARTHY, S. K.; MADHU, S.; RAJU, J. S. N.; SHARIFF, J. M. D. **Characterization of novel natural cellulosic fiber extracted from the stem of *Cissus Vitifolia* plant**. *International*

Journal of Biological Macromolecules, 161, 1358–1370, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.230>.

CHANDAR J.V.; SHANMUGAN S.; MURUGAN P.; MUTHARASU D.; SUDESH K. **Análise Estrutural de Nanopartículas de ZnO Reforçadas com Composto Bioplástico P (3HB-co-15 mol% 3HHx)**. *J. Polim. Meio Ambiente*, 25, 1251–1261, 2016.

CHIN S.C, KONG F.T.; FOO S.T *et al.* **Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced composites**. *Materials Today Communications*, 23, 100876, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100876>.

CHYR G.; DESIMONE J.M. **Review of high-performance sustainable polymers in additive manufacturing**, *Green Chem.*, 25, 453. 2023. DOI: 10.1039/d2gc03474c.

COSTA U *et al.* **Mechanical properties of composites with graphene oxide functionalization of either epoxy matrix or curaua fiber reinforcement**. *Journal of Materials Research and Technology*, 9:6, 13390-13401, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.035>.

CUIFFO M.; JUNG H. J.; SKOCIR A. *et al.* **Thermochemical degradation of cotton fabric under mild conditions**. *Fash. Text.*, 8, 25, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40691-021-00263-8>.

DALMIS R.; KILIC G.B.; SEKI Y *et al.* **Characterization of a novel natural cellulosic fiber extracted from the stem of *Chrysanthemum morifolium***. *Cellulose*, 27, 8621–8634, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03385-2>.

DEBOWSKI M.J.; PLICHTA A.; KOWALCZYK S.; FLOJANCZYK. **Chemical recycling of polyesters**, *polymers*, 64: 764-776, 2019.

DING L.; XIAOSHUAI H.; LIHUA C *et al.* **Characterization of natural fiber from manau rattan (*Calamus manan*) as a potential reinforcement for polymer-based composites**, Journal of Bioresources and Bioproducts, 7:3, 190-200, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.11.002>.

DRESSELHAUS M.; JORIO A.; HOFMANN M.; DRESSELHAUS G.; SAITO R. **Perspectives on carbon nanotubes and graphene raman spectroscopy**. Nano Lett., 10(3), 751–758, 2010. doi:10.1021/nl904286r.

DUCARME, F., COUVET, D. **What does ‘nature’ mean?**. Palgrave Commun 6, 14, 2020. <https://doi.org/10.1057/s41599-020-0390-y>.

EGBO M. K. **A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering**, Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 33:8, 557-568, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>.

FALCÃO M.A.; TORKE B.M.; MANSANO V.F. **A Taxonomic Revision of the Amazonian Genus *Dicorynia* (Fabaceae: Dialioideae)**. Phytotaxa, 554 (1): 001–03, 2022. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.554.1.1>.

FALCÃO M.J.A.; MANSANO V.F. **Dicorynia in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB78670> >. Acessado em: 28 de maio de 2023.

FARJADIAN, F.; ABBASPOUR, S.; SADATLU, M. A. A.; MIRKIANI, S.; GHASEMI, A.; HOSEINI-GHAHFAROKHI, M.; MOZAFARI, N., et al. **Recent developments in graphene and graphene oxide: Properties, synthesis, and modifications—A review**. *ChemistrySelect*, 5(36), 11282–11302, 2020. <https://doi.org/10.1002/slct.202002501>.

FURJAN M.S.H.; SHAN L.; SHEN X.; ZAREI M.S *et al.* **A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced rolymer composites**.

Journal of Materials Research and Technology, 19, 2930-2959, 2022

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.008>.

GANAPATHY T.; SATHISKUMAR R.; SENTHAMARAIKANNAN P.; SARAVANAKUMAR S.; ANISH K. **Characterization of raw and alkali treated new natural cellulosic fibres**

extracted from the aerial roots of banyan tree, International Journal of Biological

Macromolecules, 138, 573-581, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.136>.

GAO Y.; PEDRO R.; HONGLIANG Z.; MAN H.; FENG L. **Unsaturated polyester resin concrete: A review**. Construction and Building Materials, 228, 116709, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116709>.

GARCÍA C.; LÓPEZ E.; MUÑOZ A.; PEÑAS P. (2019). **Resina de poliéster**. Ingenia Materiales, (1), 54-57.

GARCÍA C.P.; MARRERO M.D, BENÍTEZ A.N, PAZ R. **Valorization of *Pennisetum setaceum*: From Invasive Plant to Fiber Reinforcement of Injected Composites**. Plants, 12:9,1777, 2023.

<https://doi.org/10.3390/plants12091777>.

GARCIA FILHO, F. C.; OLIVEIRA, M. S.; PEREIRA, A. C.; NASCIMENTO, L. F. C.;

MATHEUS, J. R. G.; MONTEIRO, S. N. **Ballistic behavior of epoxy matrix composites**

reinforced with piassava fiber against high energy ammunition. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1734–1741, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.060>.

GARGALA, A. N.; POLYDOPOULOUS, P. V.; TSERPES, K. **Experimental Investigation of Bio-Based Polymers Reinforced with Graphene Oxide**. *Applied Composite Materials*, 2024.

<https://doi.org/10.1007/s10443-024-10274-5>.

GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. **A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications.** *Journal of Materials Science*, 55, 829–892, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>.

GHOMLAMBOUR A.; OZBAKKALOGLU T. **A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications,** *J Mater Sci*, 55, 829–892, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>.

GOPINATH R.; BILLIGRAHAM P.; SATHISHKUMAR T.P. **Physicochemical and Thermal Properties of Cellulosic Fiber Extracted from the Bark of *Albizia Saman*,** *Journal of Natural Fibers*, 19:13, 6659-6675, 2022. DOI: [10.1080/15440478.2021.1929654](https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1929654).

HARYANTI, N. H.; MANIK, T. N.; SIREGAR, S. S.; ZAHARA, A. W. L.; SAPUTRA, Y. **Modificação da fibra de bemban (*Donax canniformis*) com variações na concentração de NaOH e tempo de imersão.** *Journal of Physics: Conference Series*, 2866, 012003, 2024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2866/1/012003>.

HASAN K.M.F.; HORVÁTH P.G.; ALPÁR T. **Potential Natural Fiber Polymeric Nanobiocomposites: A Review.** *Polymers*. 12(5):1072, 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12051072>.

HIGGINS C.; CAHILL J.; JOLANKI R.; NIXON R. (2020). Polyester Resins. In: John, S., Johansen, J., Rustemeyer, T., Elsner, P., Maibach, H. (eds) *Kanerva's Occupational Dermatology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68617-2_54.

HOFMANN M.; ABU T. S.; MARINA M.; MÁRIO G.; JOÃO C.B.; JOÃO R.C, **GFRP biocomposites produced with a novel high-performance bio-based unsaturated polyester resin.** *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 161, 107098, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107098>.

HOSSAIN, M. S.; MOBARAK, M. B.; RONY, F. K., et al. **Fabrication and characterization of banana fiber reinforced unsaturated polyester resin-based composites.** *Nano Hybrids and Composites*, 29, 84–92, 2020.

ISLAM, M.Z.; SABIR, E.C.; SYDUZZAMAN, M. **Experimental investigation of mechanical properties of jute/hemp fibers reinforced hybrid polyester composites.** *SPE Polymer Research*, 5(2), 192–205, 2024. doi:10.1002/pls2.10119.

ISMADI; JUWONO, Ariadne L.; MUNAWAR, Sasa Sofyan. **Investigação do conteúdo de fibras nas propriedades físico-mecânicas de compósitos de fibra-poliéster de sisal mercerizado (Agave Sisalana).** *Anais da Conferência AIP*, 2973, 060007, 2024.
<https://doi.org/10.1063/5.0184729>.

JAGADEESH P.; SANJAY M.R *et al.* **Sustainable recycling technologies for thermoplastic polymers and their composites: A review of the state of the art.** *Polymer Composite*, 43(9), 5831-5862, 2022. <https://doi.org/10.1002/pc.27000>.

JAGADEESH, P.; PUTTEGOWDA, M.; MAVINKERE RANGAPPA, S.; SIENGCHIN, S. **A review on extraction, chemical treatment, characterization of natural fibers and its composites for potential applications.** *Polymer Composites*, 42, 6239–6264, 2021.
<https://doi.org/10.1002/pc.26312>.

JAVANSHOUR, F.; RAMAKRISHNAN, K.R.; LAYEK, R.K.; LAURIKAINEN, P.; PRAPAVESIS, A.; KANERVA, M.; KALLIO, P.; VAN VUURE, A.W.; SARLIN, E. **Effect of graphene oxide surface treatment on the interfacial adhesion and the tensile performance of flax epoxy composites.** *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 142, 2021, 106270, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106270>.

JEYAPRAGASH R.; SRINIVASAN V.; SATHIYAMURTHY S. **Mechanical properties of natural fiber/particulate reinforced epoxy composites—A review of the literature.** Mater. Today Proc, 22, 1223–1227, 2020.

JURAKULOV S.; ZAFARJON O. **Physico-chemical properties of polymer composites.** American Journal of Applied Science and Technology, 3(10), 25–33, 2023
<https://doi.org/10.37547/ajast/Volume03Issue10-06>.

JUVI, Siva Naga Raju; DEPOURES, Melvin Victor; KUMARAN, P. **Comprehensive characterization of raw and alkali (NaOH) treated natural fibers from Symphirema involucreatum stem.** *International Journal of Biological Macromolecules*, 186, 886–896, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.061>.

KATHIRSELVAM, M., A. KUMARAVEL, V. P. ARTHANARIESWARAN, and S. S. SARAVANAKUMA. **Characterization of cellulose fibers in Thespesia populnea barks: Influence of alkali treatment.** *Carbohydrate Polymers*, 217:178–89, 2019.
doi:10.1016/j.carbpol.2019.04.063.

KHAN A.; VIJAY R.; DLENIN S.; SANJAY M.R.; Suchart S.; MO AMMAD J. *et al.* **Extraction and Characterization of Cellulose Fibers from the Stem of Momordica Charantia,** *Journal of Natural Fibers*, 19:6, 2232-2242, 2022 DOI: [10.1080/15440478.2020.1807442](https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1807442).

KHAN, Z. U.; KAUSAR, A.; ULLAH, H.; BADSHAH, A.; KHAN, W. U. **A review of graphene oxide, graphene buckypaper, and polymer/graphene composites: Properties and fabrication techniques.** *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 32(4), 336–379, 2016.
doi:10.1177/8756087915614612.

KHARSHIDUZZAMAN D.; HAQUE M. R.; BHUIYAN D. S.; ALAM S.; MASHUK D.; AHMED S. N.; AFGANI S. H.; GAFUR M. E. **Evaluation of the mechanical properties of a**

novel hybrid composite composed of rattan and date palm fiber: An experimental study. J.

Compos. Sci., publicado em: 24 de agosto de 2024. DOI: 10.1155/2024/2130443.

KLIMEK D.R.; KING J.A.; MISKIOHLU I.; PINEDA E.J.; ODEGARD G.M. **Determination and Modeling of Mechanical Properties for Graphene Nanoplatelet/Epoxy Composites**, polymer composite, 39:6,1845-1851, 2018.

KOOHESTANI B.; DARBAN A.K.; MOKHTARI P *et al.* **Comparison of different natural fiber treatments: a literature review.** Int. J. Environ. Sci. Technol. 16, 629–642, 2019.

<https://doi.org/10.1007/s13762-018-1890-9>.

KOTSYUBYNSKY, V. O.; BOYCHUK, V. M.; BUDZULYAK, I. M.; RACHIIY, B. I.; HODLEVSKA, M. A.; KACHMAR, A. I.; HODLEVSKY, M. A. **Síntese de óxido de grafeno usando o método Tour modificado.** *Advances in natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 12(3), 035006, 2021. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/ac204f>.

KUMAR S.; ALAKESH M.; RAKESH D. **A review on applications of natural Fiber-Reinforced composites (NFRCs)**, Materials Today: Proceedings, 50:5, 1632-1636, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.131>.

KUMAR, S.; PRASAD, L.; PATEL, V.K. *et al.* **Physical and Mechanical Properties of Natural Leaf Fiber-Reinforced Epoxy Polyester Composites.** Polymers 2021, 13, 1369.

<https://doi.org/10.3390/polym13091369>.

LAU K.; HUNG P.; ZHU D. **Hui Properties of natural fibre composites for structural engineering applications.** Compos B Eng, 136, 222-233. 2018.

10.1016/j.compositesb.2017.10.038.

LEE C.H.; KHALINA A.; LEE S.H. **Importance of Interfacial Adhesion Condition on Characterization of Plant-Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review.** *Polymers*, 13:3: 438, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13030438>.

LEE, C. H.; KHALINA, A.; LEE, S. H. **Importance of Interfacial Adhesion Condition on Characterization of Plant-Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review.** *Polymers (Basel)*, 13(3), 438, 2021. doi:10.3390/polym13030438.

LEMITA N.; DEGHBODJ S.; ROKBI M.; REKBI FML.; HALIMI R. **Characterization and analysis of novel natural cellulosic fiber extracted from Strelitzia reginae plant.** *Journal of Composite Materials*, 56(1):99-114. 2022 doi:10.1177/00219983211049285.

LIMA LOPES JUNIOR, J.; RODRIGUES BRABO, D.; LEANDRO SANTOS AMARAL, E., et al. **Characterization of the natural fibers extracted from the aninga's stem and development of a unidirectional polymeric sheet.** *Scientific Reports*, 14, 24780, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72781-6>.

LIMA, A.M.; PINO, G.G.; RIVERA, J.L.V.; CHONG, K.B.; MACÊDO NETO, J.C.; VALENZUELA, M.G.S.; DEHAINI, J.; DÍAZ, F.V. **Characterization of polyester resin nanocomposite with curauá fibers and graphene oxide.** *Revista de Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 28, 1–10, 2019.

LIN F.; ORDINOLA-ZAPATA R.; FOK ASL.; LEE R. **Influence of minimally invasive endodontic access cavities and bonding status of resin composites on the mechanical property of endodontically-treated teeth: A finite element study.** *Dent Mater*. 38:2:242-250, 2022. doi: 10.1016/j.dental.2021.12.007. Epub 2021 Dec 18.

LIU, Y.; DING, Y.; LI, Y.; WANG, X.; SUN, Y.; CHEN, C. **A comprehensive review of recent advances in delignification technology.** *The Journal of The Textile Institute*, 115(12), 2489–2504, 2024. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2296691>.

LOPES B.L.S. **Polímeros reforçados por fibras vegetais – um resumo sobre esses compósitos.** ISBN: 9788580392920. EBOOK 1ª edição 44p. 2017

LOTFI A.H.; LI D.V.; DAO G. PRUSTY. **Natural fiber–reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability.** *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 34:2, 238-284, 2021. [10.1177/0892705719844546](https://doi.org/10.1177/0892705719844546).

LYU Y.; ZHANG X.; WANG C. H.; **Degumming methods for bast fibers—A mini review.** *Ind. Crops Prod.*, 174, 2021.

MACIEJ D.; ANNA I.; ANDRZEJ P.; SEBASTIAN K.; ZBIGNIEW F. **Chemical recycling of polyesters.** *Polimery*, 64, 11-12, 2019. [dx.doi.org/10.14314/polimery.2019.11.5](https://doi.org/10.14314/polimery.2019.11.5).

MADHU P, M.R. SANJAY, S. PRADEEP, K. SUBRAHMANYA BHAT, B. YOGESHA, SUCHART SIENGCHIN. **Characterization of cellulosic fibre from Phoenix pusilla leaves as potential reinforcement for polymeric composites,** *Journal of Materials Research and Technology*, 8:3, 2597-2604, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.03.006>.

MAHESH V.; JOLADARASHI S.; KULKARNI S.M. **An experimental study on adhesion, flexibility, interlaminar shear strength, and damage mechanism of jute/rubber-based flexible ‘green’ composite.** *J Thermoplast Compos Mater*, 35:2, 149-176. 2019. [10.1177/0892705719882074](https://doi.org/10.1177/0892705719882074).

MANIVANNAN J.; RAJESH S.; MAYANDI K.; RAJINI N.; ISMAIL S. O.; MOHAMMAD F.; AL-LOHEDAN H. A. **Animal fiber characterization and fiber loading effect on mechanical**

behaviors of sheep wool fiber reinforced polyester composites. J. Nat. Fibers, 19(11), 4007–4023, 2020. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848743>.

MARCHI BZ.; OLIVEIRA MS.; BEZERRA WBA.; SOUSA TG.; CANDIDO VS.; SILVA ACR.; MONTEIRO SN. **Ubim Fiber (*Geonoma baculífera*): A Less Known Brazilian Amazon Natural Fiber for Engineering Applications.** Sustainability, 14(1):421, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14010421>.

MASSON, T. J., OLIVEIRA, F. DE, & J, A. H. M. **Characteristics and properties of burii polypropylene fiber composites with octadecylamine addition.** Brazilian Journal of Development, 7(4), 42582–42601, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-631>.

MÉNDEZ R.F.G *et al.* **Thermochemical and Tensile Mechanical Properties of Fibers Mechanically Extracted from Leaves of *Agave angustifolia* Haw,** Journal of Natural Fibers, 19:9, 3171-3185, 2022. DOI: 10.1080/15440478.2020.1840480.

MERLINI, Claudia. *Ciência e Tecnologia dos Compósitos Poliméricos.* São Paulo: Artliber, 2021. 328 p.

MIAH M.H.; DHARMAHINDER S. C.; GURMAIL S, M. **Development process of epoxy resin using nano-layered Boron Nitride to enhance the mechanical properties and thermal conductivity,** Materials Today: Proceedings, 68: 4, 1148-1157. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.123>.

MOHAN R.R. (2019). **Corneal transparency restoration by gene therapy.** Acta Ophthalmol, 97:. <https://doi.org/10.1111/j.1755-3768.2019.8248>.

MOLINA J *et al.* **Neural Networks Are Promising Tools for the Prediction of the Viscosity of Unsaturated Polyester Resins,** Frontiers in Chemistry, 7, 2019. DOI=10.3389/fchem.2019.00375.

MONTEIRO, S. N., et al. **Natural lignocellulosic fibers as engineering materials—An overview.** *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42, 2963–2974, 2011.

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; BARBOSA, A. P. B.; BEVITORI, A. B.; DA SILVA, I. L. A.; DA COSTA, L. L. **Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering Materials - An Overview.** *Metallurgical And Materials Transactions A*. Vol. 42A, pp.2963-2974, 2011.

MOSHI A.M.; RAVINDRAN D.; SUNDARA S.R.; PADMA S.R.; INDRAN S.; DIVYA D.;
Characterization of natural cellulosic fiber extracted from Grewia damine flowering plant's stem, *International Journal of Biological Macromolecules*, 164,1246-1255, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.225>.

MOUSAVI S.R.; ZAMANI M.H.; ESTAJI S. *et al.* **Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: a review of recent case studies.** *J Mater Sci* 57, 3143–3167, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06854-6>.

MR, S.; SIENGCHIN, S.; PARAMESWARANPILLAI, J.; JAWAID, M.; PRUNCU, C. I.; KHAN, A. **A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites.** 2018.

MULENGA, T. K.; UDE, A. U.; VIVEKANANDHAN, C. **Techniques for Modelling and Optimizing the Mechanical Properties of Natural Fiber Composites: A Review.** *Fibers*, 9, 6, 2021. <https://doi.org/10.3390/fib9010006>.

NACHTANE, M.; TARFAOUI, M.; ABICHOU, M. A.; VETCHER, A.; ROUWAY, M.; AÂMIR, A.; NAANANI, H. **An overview of the recent advances in composite materials and artificial intelligence for hydrogen storage vessels design.** *Journal of Composite Science*, 7(3), 119, 2023.

NAIK T.P.; INDERDEEP S, APURBBA K.S, **Processing of polymer matrix composites using microwave energy: A review**, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 156, 106870, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106870>.

NAKAJIMA, T.; MABUCHI, A.; HAGIWARA, R. **Um novo modelo de estrutura de óxido de grafite**. *Carbon*, 26, 357–361, 1988.

NARAYANASAMY P.; BALASUNDAR P.; SENTHIL S *et al.* **Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Calotropis gigantea* fruit bunch for ecofriendly polymer composites**, Int. J. Biol. Macromol, 150, 793-801, 2020. 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.134.

NATESAN, R.; KRISHNASAMY, P. **Fiber and matrix-level damage detection and assessments for natural fiber composites**. *Journal of Materials Science*, 59, 16836–16861, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-10191-9>.

NEGAWO T. A.; POLAT Y.; BUYUKNALCACI F. N.; KILIC A.; SABA N.; JAWAID M. **Mechanical, morphological, structural and dynamic mechanical properties of alkali treated Ensete stem fibers reinforced unsaturated polyester composites**. *Compos. Struct.*, 207, 589–597, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.043>.

NEUBA L.D.M.; JUNIO R.F.P.; SOUZA A.T.; RIBEIRO M.P *et al.* **Mechanical Properties, Critical Length, and Interfacial Strength of Seven-Islands-Sedge Fibers (*Cyperus malaccensis*) for Possible Epoxy Matrix Reinforcement**. *Polymers*, 14, 3807. 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14183807>.

NEUBA M, L *et al.* **Promising Mechanical, Thermal, and Ballistic Properties of Novel Epoxy Composites Reinforced with *Cyperus malaccensis* Sedge Fiber**. *Polymers*, 12, 1776, 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12081776>.

O Boeing 787 Dreamliner: projetando uma aeronave para o futuro. *Journal of Young Investigators*, 2020. Disponível online: <https://www.jyi.org/2010-august/2010/8/6/the-boeing-787-dreamliner-designing-an-aircraft-for-the-future>.

OMRANI E; MENEZES P. L.; ROHATGI P. K. **State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world.**

Engineering Science and Technology, an International Journal, 19 (2), 717-736, 2016.

OQLA FARIS M.A.L.; MOHAMMED T. H.; MU'AYYAD M. A.L. **Thermal stability analysis and mechanical performance of Mediterranean lignocellulosic fiber reinforced polypropylene sustainable composites**, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.12.053>.

PARDI, P.; HERAWATI, H. **Pengaruh Penambahan Serat Purun Tikus (*Eleocharis Dulcis*) Pada Komposit Poliester Terhadap Sifat Fisika.** *Journal of Healthcare Technology and Medicine*, 10(1), 156–167, 2024.

PARVEEZ, B.; KITTUR, M. I.; BADRUDDIN, I. A.; KAMANGAR, S.; HUSSIEN, M.; UMARFAROOQ, M. A. **Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: A review.** *Polymers*, 14, 5007, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14225007>.

PATEL, U.; RAY, R.; MOHAPATRA, A. *et al.* **Effect of Different Chemical Treatments on Surface Morphology, Thermal and Traction Strength of Bauhinia Vahlii (BV) Stem Fibers**, *Journal of Natural Fibers*, 2020. DOI:10.1080/15440478.2020.1739591.

PAULCHAMY, B.; ARTHI, G.; LIGNESH, B. D. **A simple approach to stepwise synthesis of graphene oxide nanomaterial.** *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 6(1), 1, 2015.

PERUMAL I.C.; SARALA R. **Characterization of a new natural cellulosic fiber extracted from *Derris scandens* stem.** International Journal of Biological Macromolecules, 165, Part B, 2303-2313, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.086>.

PETERHANS H. RTM: resin transfer moulding. 2. ed. Blumenau: Nova Letra. C. May, Epoxy Resins: Chemistry and Technology, Routledge, (2018).

PINHEIRO MA, Ribeiro MM, Rosa DLS, Nascimento DDCB, da Silva ACR, Dos Reis MAL, Monteiro SN, Candido VS. Periquiteira (*Cochlospermum orinocense*): **A Promising Amazon Fiber for Application in Composite Materials.** Polymers. 2023 Apr 28;15(9):2120. doi: 10.3390/polym15092120. PMID: 37177266; PMCID: PMC10181227.

PINHEIRO, M. A.; GOMES, L. G.; SILVA, A. C. R. DA. *et al.* **Guaruman: a Natural Amazonian Fiber with Potential for Polymer Composite Reinforcement,** Materials Research. 2019; 22(suppl.1): e20190092, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR2019-0092>.

POOJA YENAGOLLA, K. SANDEEP, J.V.S SHARMA. **Natural polymers and its applications- a review.** EPRA International Journal of Research and Development (IJRD), 7(1), 6–15, 2022. <http://eprajournals.net/index.php/IJRD/article/view/3>.

POTTATHARA, Y. B.; BOBNAR, V.; GORGIEVA, S.; GROHENS, Y.; FINŠGAR, M.; THOMAS, S.; KOKOL, V. **Mechanically strong, flexible and thermally stable graphene oxide/nanocellulosic films with enhanced dielectric properties.** *RSC Advances*, 6, 49138–49149, 2016.

PRASAD L *et al.* **Physical and Mechanical Properties of Rambans (Agave) Fiber Reinforced with Polyester Composite Materials.** Journal of Natural Fibers, 19:13, 6104-6118, 2022. DOI: [10.1080/15440478.2021.1904481](https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1904481).

PRAVEENA B A.; ABDULRAJAK B.S.N.; VIKRAM K.V, JAIBHEEM H.H.D. **Study on characterization of mechanical, thermal properties, machinability and biodegradability of natural fiber reinforced polymer composites and its Applications, recent developments and future potentials: A comprehensive review.** *Materials Today: Proceedings*, 52: 3, 1255-1259, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.049>.

QU *et al.* **Effects of cryo-thermal cycling on interlaminar shear strength and thermal expansion coefficient of carbon fiber/graphene oxide-modified epoxy composites.** *Compos Commun*, 32, 101180, 2022. [10.1016/j.coco.2022.101180](https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101180).

QUIRINO RL.; MONROE K.; FLEISCHE C.H.; BISWAS E.; KESSLER M.R. **Thermosetting polymers from renewable sources,** *Polymer International*, 70: 2, 167-180, 2020.

RAJ, I. L. P.; VALANARASU, S.; HARIPRASAD, K.; PONRAJ, J. S.; CHIDHAMBARAM, N.; GANESH, V.; KHAIRY, Y. **Enhancement of optoelectronic parameters of Nd-doped ZnO nanowires for photodetector applications.** *Optical Materials*, 109, 110396, 2020.

RAMAKRISHNAN T.; MOHAN G.M. D.; CHITRADEVi S *et al.* **"Study of Numerous Resins Used in Polymer Matrix Composite Materials"**. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022: 8, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1088926>.

RAO, J.; LV, Z.; CHEN, G.; PENG, F. **Hemicellulose: Structure, chemical modification, and application.** *Prog. Polym. Sci.*, 140, 101675, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101675>

RATH, A. P.; KRISHNAN, P. S. G.; KANNY, K. **A comparison of physical, morphological, and mechanical properties of bio-polyester hybrid nanocomposites.** *Polymers for Advanced Technologies*, 23(9), 2024. <https://doi.org/10.1002/pat.6566>.

RAZAQ, A.; BIBI, F.; ZHENG, X.; PAPADAKIS, R.; JAFRI, S. H. M.; LI, H. **Review on Graphene-, Graphene Oxide-, Reduced Graphene Oxide-Based Flexible Composites: From Fabrication to Applications.** *Materials*, 15(1012), 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15031012>.

REDDY, R. A.; YOGANANDAM, K.; MOHANAVEL, V. **Effect of chemical treatment on natural fiber for use in fiber reinforced composites – Review.** *Materials Today: Proceedings*, 33(7), 2996–2999, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.982>.

REIS R.H.M.; CÂNDIDO V.S.; NUNES L.F.; MONTEIRO S.N. **Chemical and Morphological Characterization of Guaruman Fiber.** The Minerals, Metals & Materials Series (2019). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10383-5_12.

RIBASKI N.G.; FRITOLI C.L.; SALINO R.E.; BELINI U.L. **Lignocellulosic resources: Applications in panels and composites.** *Brazilian Journal of Development*, 7(1), 1262–1275, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-086>.

RITESH B.; NANJANGUD M.; SATHYASHANKARA S.; ASHU P.; AGASTYA P.; KENI, D.S. **Mechanical testing and microstructure characterization of glass fiber reinforced isophthalic polyester composites.** *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (4), 3653-3661, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.003>.

RUESS, G. **Über das grafitoxihidroxido (grafitóxido).** *Monatsh Química*, 76, 381–417, 1946.

SABARUDDIN F.A.; PARIDAH M.T.; SAPUAN S.M.; ILYAS R.A.; LEE S.H.; ABDAN K.; MAZLAN N.; ROSELEY A.S.M.; ABDUL KHALIL H.P.S. **The Effects of Unbleached and Bleached Nanocellulose on the Thermal and Flammability of Polypropylene-Reinforced Kenaf Core Hybrid Polymer Bionanocomposites.** *Polymers*. 2021; 13(1):116. <https://doi.org/10.3390/polym13010116>

SAHU, P.; GUPTA, M. **A review on the properties of natural fibres and its bio-composites:**

Effect of alkali treatment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L:*

Journal of Materials: Design and Applications, 234(1), 198–217, 2020.

<https://doi.org/10.1177/1464420719875163>.

SALIH, A.; ZULKIFLI, R.; AZHARI, C.H. **Tensile Properties and Microstructure of Single-**

Cellulosic Bamboo Fiber Strips after Alkali Treatment. *Fibers*, 8, 26, 2020.

<https://doi.org/10.3390/fib8050026>.

SALIM M.O & QAXXOROVA B.A. **Polymer and Composition Materials.** *Texas Journal of*

Engineering and Technology, 9, 103–106, 2022.

<https://zienjournals.com/index.php/tjet/article/view/2012>.

SAMAEI, S.; MAHABADI, H.; MOUSAVI, S.; KHAVANIN, A.; FARIDAN, M.; TABAN, E.

The influence of alkaline treatment on acoustical, morphological, tensile and thermal properties of Kenaf natural fibers. *Journal of Industrial Textiles*, 1–25, 2020.

doi:10.1177/1528083720944240.

SANMUHAM, V.; SULTAN, M.T.H.; RADZI, A.M.; SHAMSURI, A.A.; SHAH, A.U.M.; SAFRI,

S.N.A.; BASRI, A.A. **Effect of Silver Nanopowder on Mechanical, Thermal and Antimicrobial Properties of Kenaf/HDPE Composites.** *Polymers*, 13, 3928, 2021.

SARKER, F.; KARIM, N.; AFROJ, S.; KONCHERRY, V.; NOVOSELOV, K. S.; POTLURI, P.

Compósitos de fibras naturais de alto desempenho à base de grafeno. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10, 34502–34512, 2018. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b13018>.

SARKER, F.; POTLURI, P.; AFROJ, S.; KONCHERRY, V.; NOVOSELOV, K. S.; KARIM, N.

Graphene-enhanced natural fiber composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(23),

21166–21176, 2019. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b04696>.

SATHISH, S.; KARTHI, N.; PRABHU, L.; GOKULKUMAR, S.; BALAJI, D.;

VIGNESHKUMAR, N., et al. **A review of natural fiber composites: Extraction methods, chemical treatments and applications.** *Materials Today: Proceedings*, 45, 8017–8023, 2021.

SATHISH, S.; PRABHU, L.; GOKULKUMAR, S.; KARTHI, N.; BALAJI, D.;

VIGNESHKUMAR, N. **Extraction, treatment and applications of natural fibers for bio-composites—a critical review.** *International Polymer Processing*, 36(2), 114–130, 2021.

SCHOLZ, W.; BOEHM, H. P. **Óxido de grafite. 6. Estrutura do óxido de grafite.** *Z Anorg Allg Chem*, 369, 327–340, 1969.

SENTHILKUMAR K.; RAJINI N.; SABA N. et al. **Effect of alkali treatment on mechanical and morphological properties of pineapple leaf fibre/polyester composites.** *J. Polym. Environ.*, 27, 1191–1201, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01418-x>.

SETHI, S.; RAY, B. C. **Environmental effects on fibre reinforced polymeric composites: Evolving reasons and remarks on interfacial strength and stability.** *Advances in Colloid and Interface Science*, 217, 43–67, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.12.005>.

SHADHIN MD *et al.* **Natural biomass & waste biomass fibers – Structures, environmental footprints, sustainability, degumming methods, & surface modifications.** *Industrial Crops and Products*, 204, 117252, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117252>.

SHARMA H.; ARJAN VAN DER VEGTE. 21 - Engineered bamboo for structural applications. In *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Nonconventional and Vernacular Construction Materials (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 597-623, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00021-4>.

SHIN D. S.; KIM H. G.; AHN H. S.; JEONG H. Y.; KIM Y. J.; ODKHUU D.; KIM B. H.

Distribution of oxygen functional groups of graphene oxide obtained from low-temperature

atomic layer deposition of titanium oxide. RSC Adv., 7(23), 13979–13984, 2017.

<https://doi.org/10.1039/C7RA00114B>.

SHRUTI V.; CHIHO K.; ANAND C.; RAMPI R. **Critical Assessment of the Hildebrand and Hansen Solubility Parameters for Polymers,** Journal of Chemical Information and Modeling, 59 (10), 4188-4194, 2019. DOI: 10.1021/acs.jcim.9b00656.

SIDDIKA A.; MAMUN M.A.A.; FERDOUS W.; ALYOUSEF R. **Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – a state-of-the-art review** Eng. Fail. Anal., 111, 104480. 2020. 10.1016/j.engfailanal.2020.104480.

SILVA C.O.; SILVA F.N.; BANNA W.R.E.; NASCIMENTO W.A. **Utilização de fibras de caroço de açaí como fase dispersa em compósitos de matriz termoplástica: uma revisão bibliográfica.** Brazilian Journal of Development, 8:4, 28654–28679, 2022.

<https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-384>.

SILVA F.S *et al.* **Physical, Chemical, Mechanical, and Microstructural Characterization of Banana Pseudostem Fibers from Musa Sapientum.** Macromolecular Symposia, 394:1, 2000052, 2020. doi:10.1002/masy.202000052

SILVA G.C.; LOPES J.L.; SANTOS M.R.; LOPES R.J.F. **Tratamento enzimático sobre as fibras recicladas de papelão ondulado,** artigo técnico / technical article o papel, 79:7, 80 – 86, 2018

SILVA R.; VALARMATHI T.N. *et al.* **Study on a Novel natural cellulosic fiber from Kigelia africana fruit: Characterization and analysis.** Carbohydrate Polymers, 244, 116494, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116494>.

SILVA R.N.A.; DE MACEDO NETO J.C.; KIMURA S.P.R. **Natural fiber for reinforcement in matrix polymeric.** Indep. J. Manag. Prod. 13, 154–167, 2022.

SINGH J.K.; ROUT A.K. **Characterization of raw and alkali-treated cellulosic fibers extracted from *Borassus flabellifer* L..** Biomass Conv. Bioref. (2022). <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03238-x>

SOUZA A. A.; GRANJA R.C. B.; MELO E.C.C *et al.* **Biodegradable synthetic polymers in biomedical application: A review: Polímeros sintéticos biodegradáveis em aplicação biomédica: a review.** Brazilian Journal of Health Review, 5(6), 24628–24644, 2022. <https://doi.org/10.34119/bjhrv5n6-217>.

SOUZA T.S.P.; KAWAGUTI H.Y. **Cellulases, Hemicellulases, and Pectinases: Applications in the Food and Beverage Industry.** Food Bioprocess Technol, 14, 1446–1477, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02678-z>.

SOUZA, A.T.; PEREIRA JÚNIO, R.F.; NEUBA, L.D.M.; CÂNDIDO, V.S.; DA SILVA, A.C.R.; DE AZEVEDO, A.R.G.; MONTEIRO, S.N.; NASCIMENTO, L.F.C. **Caranan Fiber from Mauritiella armata Palm Tree como novo reforço para compósitos epóxi.** *Polímeros*, 12, 2037, 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12092037>.

SUMRITH, N.; TECHAWINYUTHAM, L.; SANJAY, M.R.; DANGTUNGEE, R.; SIENGCHIN, S. **Characterization of Alkaline and Silane Treated Fibers of ‘Water Hyacinth Plants’ and Reinforcement of ‘Water Hyacinth Fibers’ with Bioepoxy to Develop Fully Biobased, Sustainable Ecofriendly Composites.** J. Polym. Environ. 28, 2749–2760, 2020.

TAMANNA T.A.; BELAL S.A.; SHIBLY M.A.H. *et al.* **Characterization of a new natural fiber extracted from *Corypha taliera* fruit.** Sci Rep, 11, 7622, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87128-8>

TAYDE S.; SATDIVE A.; TOKSHA B.; CHATTERJEE A. **Polyester Resins and Their Use as Matrix Material in Polymer Composites: An Overview.** *Polyester-Based Biocomposites*, 1-23, 2023.

TEKLAL, F.; DJEBBAR, A.; ALLAOUI, S.; HIVET, G.; JOLIFF, Y.; KACIMI, B. **A review of analytical models to describe pull-out behavior – Fiber/matrix adhesion.** *Composite Structures*, 201, 791–815, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.091>.

TELI, M. D.; JADHAV, A. C. **Efeito da alcalinização nas propriedades da fibra lignocelulósica de Abelmoschus manihot.** *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5, 2277–4106, 2015.

THAKUR V.K.; THAKUR M.K. **Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites.** *Carbohydr. Polym*, 109, 102–117, 2015.

THAPLIYAL, D.; VERMA, S.; SEN, P.; KUMAR, R.; THAKUR, A.; TIWARI, A. K.; SINGH, D.; VERROS, G. D.; ARYA, R. K. **Natural Fibers Composites: Origin, Importance, Consumption Pattern, and Challenges.** *Journal of Composite Science*, 7, 506, 2023. <https://doi.org/10.3390/jcs7120506>.

TIAN W.; YANG K.; WU S *et al.* **Impact of hydration on the mechanical properties and damage mechanisms of natural silk fibre reinforced composites.** *Compos A Appl Sci Manufact* 147,106458, 2021.

UNTERWEGER C *et al.* **Impact of fiber length and fiber content on the mechanical properties and electrical conductivity of short carbon fiber reinforced polypropylene composites.** *Composites Science and Technology*, 188, 107998, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.107998>.

VARGAS, J.; AKRAMI, R.; MARÍN-ALZATE, N.; MESA, S. M.; IDARRAGA, G.; ISAZA, C. A.; YANG, L.; MEZA, J. M. **Determination of Adhesion Between Modified PLA Matrix and Natural Fibers Using SEM and Micro-Raman Spectroscopy.** *Microscopy and Microanalysis*, 29(Supplement_1), 1250–1252, 2023. <https://doi.org/10.1093/micmic/ozad067.641>.

VENKATESAN R.; SANTHAMOORTHY M.; ALAGUMALAI K.; HALDHAR R *et al.* **Novel Approach in Biodegradation of Synthetic Thermoplastic Polymers: An Overview.** *Polymers*, 14, 4271, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14204271>.

VIGNESH V., BALAJI A.N. *et al.* **Indian mallow fiber reinforced polyester composites: mechanical and thermal properties.** *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 274-284, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.023>.

VIJAY R.; KUMARAN P.; POTTATHIL S.; JAFREY D.J.D.; GUNDA Y *et al.* **Influence of Parthenium Hysterophorus and Impomea Pes-caprae Fibers Stacking Sequence on the Performance Characteristics of Epoxy Composites.** *Journal of Natural Fibers* 19:12, 4456-4466, 2022.

VIJAY, R.; SINGARAVELU, D. L.; VINOD, A. *et al.* **Characterization of Novel Natural Fiber from Saccharum Bengalense Grass (Sarkanda),** *Journal of Natural Fibers*. 2019, doi.org/10.1080/15440478.2019.1598914

VINOD, A.; VIJAY, R.; SINGARAVELU, D.L., *et al.* **Effect of alkali treatment on performance characterization of Ziziphus mauritiana fiber and its epoxy composites.** *Journal of Industrial Textiles*, 51(2_suppl), 2444S–2466S, 2022. doi:10.1177/1528083720942614.

WANG, Q.; ZHANG, Y.; LIANG, W.; WANG, J.; CHEN, Y. **Improved mechanical properties of the graphene oxide modified bamboo-fiber-reinforced polypropylene composites.** *Journal of Materials Science*, 41(9), 2020. <https://doi.org/10/s11041-020-02513-0>.

WELI S.S.; ABBOOD I.S.; HASAN K.F.; JASIM M.A. **Effect of steel fibers on the concrete strength grade: a review**. Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 888, 2020. 10.1088/1757-899X/888/1/012043.

WESDEMIOTIS C.; KAYLA N.W.P.; KEATING A.R.; MCGEE A.S.; BOCHENEK C. **Mass spectrometry of polymers: A tutorial review**. Mass Spec Rev, 1:50, 2023.

WIDODO, E.; AKBAR, A.; PUTRA, B. I. **The Effect of Alkalization on the Mechanical Properties of Sansevieria Fiber Bio-Composit**. *Academia Open*, 8(2), 10.21070/acopen.8.2023.7237, 2023. <https://doi.org/10.21070/acopen.8.2023.7237>.

WIRAWAN W. A.; SABITAH A.; CHOIRON M. A.; MUSLIMIN M.; ZULKARNAIN A.; BUDIARTO B. W. **Effect of chemical treatment on the physical and thermal stability of Hibiscus Tiliaceus Bark Fiber (HBF) as reinforcement in composite**. Results Eng., 18, 101101, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101101>.

YOGANANDAM K.; GANESHAN P.; NAGARAJA GANESH B.; RAJA K. **Characterization studies on *Calotropis procera* fibers and their performance as reinforcements in epoxy matrix**. J. Nat. Fibers, 12, 1706–1718, 2019.

YUCHENG LIU, WEIDONG JIA, QIZHI YANG, YUNHAI MA *et al.* **Physical, Mechanical, and Environmental Properties of Corn Stalk Fiber Reinforced Braking Composites Prepared by Wet Granulation**. Journal of Natural Fibers 19:16, 14515-14524, 2022.

ZHANG, K.; WANG, F.; LIANG, W.; WANG, Z.; DUAN, Z.; YANG, B. **Propriedades térmicas e mecânicas de compósitos epóxi reforçados com fibras de bambu**. *Polímeros*, 10, 608, 2018.

ZHOU Y.; MIZI F.; LIHUI C. **Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview**. Composites Part B: Engineering, 101, 31-45., 2016
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.055>.

ZAWWI, M. **A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications.** *Molecules*, 26, 404, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26020404>.