



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais

JOSIMAR TORRES DE OLIVEIRA MACHADO

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA
À BASE DE RESINA EPÓXI REFORÇADO POR FIBRAS DA PALHA DO MILHO**

SALVADOR

2023

JOSIMAR TORRES DE OLIVEIRA MACHADO

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA
À BASE DE RESINA EPÓXI REFORÇADO POR FIBRAS DA PALHA DO MILHO**

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

Área de Concentração: Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Processamento de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Estevam Coelho

SALVADOR

2023

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

M149o Machado, Josimar Torres de Oliveira

Obtenção e caracterização do compósito de matriz polimérica à base de resina epóxi reforçado por fibras da palha do milho / Josimar Torres de Oliveira Machado; orientador Rodrigo Estevam Coelho -- Salvador : IFBA, 2023.

131 p.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) -- Instituto Federal da Bahia, 2023.

1. Fibras da palha de milho. 2. Compósitos. 3. Resina epóxi. 4. Resistência mecânica. 5. Caracterização microestrutural. I. Coelho, Rodrigo Estevam, orient. II. TÍTULO.

CDU 631.572

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

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGEM

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO DE MATRIZ
POLIMÉRICA À BASE DE RESINA EPÓXI REFORÇADO POR FIBRAS DA
PALHA DO MILHO**

Josimar Torres de Oliveira Machado

Produto (s) Gerado (s): **Relatório Final de Pesquisa**

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Estevam Coelho

Banca examinadora:

 Documento assinado digitalmente
RODRIGO ESTEVAM COELHO
Data: 09/10/2023 21:24:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Estevam Coelho – Orientador

 Documento assinado digitalmente
RUI CARLOS DE SOUSA MOTA
Data: 10/10/2023 17:19:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rúi Carlos de Sousa Mota – Examinador IFBA

 Documento assinado digitalmente
RAIMUNDO JORGE SANTOS PARANHOS
Data: 11/10/2023 09:43:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Raimundo Jorge Santos Paranhos – Examinador IFBA

 Documento assinado digitalmente
EDSON TETSUO KOGACHI
Data: 10/10/2023 22:30:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edson Tetsuo Kogachi — Examinador Externo UNIVASF

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca examinadora em 06/10/2023

Dedico este trabalho a minha mãe Joilvana, a meu pai José Batista (*in memorian*), a minha esposa Irani, a meu filho Luan, a minha irmã Jacimare, familiares e a amigos, pois foram eles a fonte de motivação para lutar em busca dos meus ideais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, e a minha família, que me deu todo apoio necessário, por entender e fortalecer, renovando o estímulo, nos momentos de maiores dificuldades.

Agradeço em especial ao orientador, Professor Dr. Rodrigo Estevam Coelho, pelo apoio dado, formulando ideias no incentivo constante durante o desenvolvimento deste estudo.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – PPGEM/IFBA, por oferecer este curso de Mestrado.

Ao Instituto Federal da Bahia *Campus* Simões Filho, na figura de seus diretores e coordenadores, pela oportunidade de realização do Mestrado possibilitando a utilização dos laboratórios e equipamentos para realização dos experimentos deste trabalho.

Aos Professores Dr. Rui Carlos de S. Mota , Dr. Raimundo Jorge S. Paranhos e Dr. Edson Tetsuo Kogachi pela aceitação do convite na participação da banca de avaliação.

A Técnica Carina Soares, na qual possibilitou a realização das análises de MEV e DSC no Laboratório de Caracterização de Materiais do IFBA *Campus* Salvador.

Aos colegas Leonardo Abreu e Lucian Mendes do IFBA/Simões Filho e do PPGEM/IFBA, por estarem presentes no dia a dia compartilhando ideias no processo de desenvolvimento do projeto proposto, incentivando e estimulando nos momentos mais complexos da pesquisa.

Obrigado a todos!

“A imaginação é mais importante que o conhecimento, porque o conhecimento é limitado, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro”.

Albert Einstein

RESUMO

A busca por alternativas mais ecológicas para produção de materiais é um dos grandes pólos de discussão no planeta. Estudos apontam, a utilização de fibras vegetais como reforço para substituir as fibras sintéticas em materiais compósitos, já que as fibras vegetais possuem inúmeras vantagens, tais como: baixa densidade, biodegradabilidade, baixos custos dentre outras. O objetivo da pesquisa é apresentar a viabilidade técnica de um compósito, utilizando as fibras da palha do milho (*Zea mays*) como reforço, e uma matriz polimérica à base de resina epóxi para ser aplicados em elementos estruturais. Para isso, as fibras foram selecionadas, tratadas com carbonato de sódio e secadas. Os compósitos foram fabricados por laminação manual com orientação de fibras aleatórias na formulações percentuais de 5, 10 e 20%, com objetivo de caracterizar pelos ensaios mecânicos realizados de tração uniaxial, flexão em três pontos, impacto, pelos ensaios físicos de absorção de água, densidade e envelhecimento, caracterização microestrutural através da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaio térmico por calorimetria exploratória diferencial (DSC). Diante dos resultados, provou a viabilidade técnica desse compósito para todas as formulações analisadas, apresentando boa vantagem em relação a sua baixa densidade, em torno de $1,27 \text{ g/cm}^3$. Foi demonstrado que o compósito de 20% de carga apresentou melhores resultados de resistência mecânica, principalmente na absorção de impacto. E o compósito com carga de 5% com melhores resultados aos testes de envelhecimento, e rápida saturação indicando que o compósito pode ser utilizados em locais de alta umidade devido sua boa resistência à água da matriz epóxi. Comprovando que o compósito desenvolvido podem ser utilizados na prática como substitutivos de outras fibras vegetais de forma eficiente e satisfatória para ter aplicação estrutural principalmente em peças de pouca solicitação mecânica, tais como, reservatórios, tubulações, prateleiras, telhas, entre outros.

Palavras-Chave: Fibras da palha do milho; Compósitos; Resina epóxi; Resistência mecânica; Caracterização microestrutural.

ABSTRACT

The search for more ecological alternatives for the production of materials is one of the major areas of discussion on the planet. Studies point to the use of vegetable fibers as reinforcement to replace synthetic fibers in composite materials, as vegetable fibers have numerous advantages, such as: low density, biodegradability, low costs, among others. The objective of the research is to present the technical feasibility of a composite, using corn straw fibers (*Zea mays*) as reinforcement, and a polymeric matrix based on epoxy resin to be applied to structural elements. For this, the fibers were selected, treated with sodium carbonate and dried. The composites were manufactured by manual lamination with random fiber orientation in percentage formulations of 5, 10 and 20%, with the aim of characterizing them through mechanical tests carried out on uniaxial traction, three-point bending, impact, physical water absorption tests, density and aging, microstructural characterization through scanning electron microscopy (SEM) analysis and thermal testing by differential scanning calorimetry (DSC). Given the results, it proved the technical viability of this composite for all formulations analyzed, presenting a good advantage in relation to its low density, around 1.27 g/cm³. It was demonstrated that the 20% filler composite presented better results in mechanical resistance, especially in impact absorption. And the composite with a 5% filler showed better results in aging tests, and rapid saturation, indicating that the composite can be used in places with high humidity due to its good water resistance of the epoxy matrix. Proving that the developed composite can be used in practice as substitutes for other plant fibers in an efficient and satisfactory way to have structural application mainly in parts with little mechanical stress, such as reservoirs, pipes, shelves, tiles, among others.

Keywords: Corn straw fibers; Composites; Epoxy resin; Mechanical properties; Microstructural characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de classificação dos materiais compósitos com reforço/carga.	27
Figura 2: Processo de laminação manual (Hand Lay Up).	29
Figura 3: Estrutura do anel epóxico.....	31
Figura 4: Reação do Bisfenol A e Epicloridrina com formação de resina epóxi.	32
Figura 5: Mecanismo de falha dos compósitos.....	36
Figura 6: Mecanismo de falhas em materiais compósitos.	37
Figura 7: Classificação das fibras sintéticas.	39
Figura 8: Classificação das fibras naturais.	40
Figura 9: Representação estrutural de fibra vegetal.	43
Figura 10: Fibras brasileiras: A) Bagaço de cana-de-açúcar, B) Juta, C) Curauá, D) Bananeira, E) Carnaúba, F) Sisal, G) Coco, H) Palha de arroz, I) Palha de milho e J) Trigo.	44
Figura 11: Cultivo do milho (Zea Mays).	46
Figura 12: Plantio da Safra de milho em 2022 indicada pela Conab.	48
Figura 13: Palhas secas produzidas da safra de milho.	49
Figura 14: Esquema do pêndulo da máquina de Charpy.	56
Figura 15: Imagem de uma fratura de uma fibra obtida pelo MEV.	59
Figura 16: Processo manual de corte, desfiação e exposição solar das fibras.	60
Figura 17: Tratamento alcalino das fibras com barrilha.....	61
Figura 18: (a) Limpeza das fibras com água fervente. (b) Secagem na estufa.	62
Figura 19: Projetor de Perfil Pantec DC-3000, medição do diâmetro das fibras.....	63
Figura 20: Tração da fibra na máquina de ensaio.	63
Figura 21: (a) Balança analítica. (b) Fibras submersas em água destilada no picnômetro.....	64
Figura 22: (a) Microscópio eletrônico de varredura (MEV). (b) Metalizador de ouro. ...	65
Figura 23: (a) Amostras pesadas na balança. (b) Cadinho colocado no forno MUFLA.	66

Figura 24: (a) Massas de cinzas esfriando no dessecador. (b) Massas de cinzas pesadas.....	67
Figura 25: Resina epóxi GY-260 e endurecedor ARADUR 2963.	68
Figura 26: (a) Cera de carnaúba. (b) Álcool desmoldante.....	69
Figura 27: Fluxograma de obtenção do compósito.....	70
Figura 28: Seleção de materiais e equipamentos na fabricação do compósito.	70
Figura 29: (a) Massa de fibras sendo pesada. (b) Aplicação do desmoldante.	71
Figura 30: Placas de compósitos. (a) CP0. (b) CP5. (c) CP10. (d) CP20.....	72
Figura 31: Processo de corte dos corpos de prova.	73
Figura 32: (a) Lixamento manual. (b) Lixamento mecânico.....	73
Figura 33: Ensaio de tração na Máquina de 20 KN.	74
Figura 34: Corpos de provas para ensaio de flexão.	75
Figura 35: (a) Ensaio de Flexão do CP. (b) Máquina com software de ensaio.....	75
Figura 36: (a) Máquina para ensaio de impacto. (b) Corpos de provas ensaiados.	76
Figura 37: (a) Aferição do corpo de prova com paquímetro. (b) Massa do corpo de prova pesada em balança analítica.	77
Figura 38: CPs em água destilada e do mar. (a) CP0. (b) CP5. (c) CP10. (d) CP20. ..	78
Figura 39: Exposição das amostras para ensaio de envelhecimento.....	79
Figura 40: Equipamento de marca Shimadzu modelo DSC-60.	80
Figura 41: Microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca TESCAN.	80
Figura 42: Curva tensão x deformação de tração das fibras. (a) Fibras sem tratamento. (b) Fibras tratadas.	82
Figura 43: Comportamento comparativo médio da curva tensão x deformação das fibras.....	83
Figura 44: Análise morfológica da seção transversal da fibra de palha do milho.	86
Figura 45: Análise microscópica da seção longitudinal da fibra da palha do milho.	87
Figura 46: Gráfico comparativo da densidade do compósito com outros já estudados.90	
Figura 47: Gráfico comparativo da absorção do compósito com outros já estudados. 92	
Figura 48: Comportamento gráfico da absorção. (a) Água destilada; (b) Água do mar.93	

Figura 49: Gráfico comparativo da perda de massa por envelhecimento das formulações do compósito e de outros estudos.	95
Figura 50: Envelhecimento. (a) Início do ensaio. (b) Após 12 meses de ensaio.	96
Figura 51: Resultados do ensaio de tração das formulações dos compósitos. (a) 0%; (b) 5%; (c) 10%; (d) 20%.	98
Figura 52: Comportamento médio comparativo da curva tensão x deformação das formulações dos compósitos.	99
Figura 53: Resultados do ensaio de flexão das formulações dos compósitos. (a) 0%; (b) 5%; (c) 10%; (d) 20%.	102
Figura 54: Comportamento médio comparativo da curva tensão x deformação das formulações dos compósitos.	103
Figura 55: Comportamento da energia de impacto do compósito e da matriz epóxi. .	105
Figura 56: Curvas do ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para as amostras: 0%, 5%, 10% e 20%.	107
Figura 57: MEV (100x) da região de fratura do ensaio de tração para o compósito CP5.	109
Figura 58: MEV (160x) da região de fratura do ensaio de tração para o compósito CP5.	110
Figura 59: MEV (70x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP5.	110
Figura 60: MEV (350x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP5.	111
Figura 61: MEV (190x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP5.	111
Figura 62: MEV (270x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP5.	112
Figura 63: MEV (24x) da região de fratura do ensaio de tração para o compósito CP10.	112
Figura 64: MEV (244x) da região de fratura do ensaio de tração para o compósito CP10.	113
Figura 65: MEV (60x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP10.	113

Figura 66: MEV (370x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP10.	114
Figura 67: MEV (130x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP10.	114
Figura 68: MEV (200x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP10.	115
Figura 69: MEV (165x) região tracionada do CP20.	116
Figura 70: MEV (500x) região tracionada do CP20.	116
Figura 71: MEV (114x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP20.	117
Figura 72: MEV (285x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP20.	117
Figura 73: MEV (110x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP20.	118
Figura 74: MEV (268x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP20.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas de uma resina epóxi.	33
Tabela 2: Aplicação das fibras em vários setores da indústria.	34
Tabela 3: Composição química de fibras naturais.	41
Tabela 4: Propriedades mecânicas de importantes fibras lignocelulósicas.	42
Tabela 5: Vantagens e desvantagens das fibras vegetais.	44
Tabela 6: Tabela anatômica e interações dimensionais de fibras da palha do milho (<i>Zea mays</i>) in natura.	50
Tabela 7: Composição química da palha do milho.	51
Tabela 8: Densidade de fibras vegetais para comparação.	52
Tabela 9: Especificações da resina epóxi do tipo DGEBA ARALDITE GY-260.	68
Tabela 10: Especificações do endurecedor amínico cicloalifático ARALDUR 2963.	68
Tabela 11: Compósitos formulados com resina epóxi.	72
Tabela 12: Variações de diâmetros das fibras da palha de milho.	81
Tabela 13: Média dos resultados para Tração das fibras.	83
Tabela 14: Valores comparativos de densidade de fibras da planta do milho.	85
Tabela 15: Valores comparativos de teor de cinzas de fibras da planta do milho. ...	88
Tabela 16: Densidade aparente média da fibra e das formulações do compósito. ..	90
Tabela 17: Resultados do ensaio de absorção para os dois meios aquosos.	92
Tabela 18: Resultados da variação de perda de massa do ensaio de envelhecimento.	94
Tabela 19: Resultado comparativo médio da curva tensão x deformação dos compósitos.	99
Tabela 20: Resultado comparativo médio da curva tensão x deformação dos compósitos.	103
Tabela 21: Resultados da absorção de impacto dos compósitos e da matriz.	105
Tabela 22: Dados do DSC da matriz epóxi e das amostras de compósitos.	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIB	Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Sociedade Americana de Ensaios de Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
ARADUR	Endurecedor à base de anilina aromática 2963
CP	Corpo de prova
CP0	Compósito com 100% de matriz epóxi e 0% de fibra da palha do milho
CP5	Compósito com 5% de fibra da palha do milho
CP10	Compósito com 10% de fibra da palha do milho
CP20	Compósito com 20% de fibra da palha do milho
CONAB	Conselho Nacional de Abastecimento
DEAGRO	Departamento de Desenvolvimento Rural Sustentável
DGEBA	Diglicidil Éter de Bisfenol A
DRX	Difração de raios X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>)
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
FN	Fibras Naturais
FS	Fibras Sintéticas
GY-260	Resina epóxi à base de bisfenol A Araldite
IFBA	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia
ISO	Organização Internacional para Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MOEF	Módulo de Elasticidade na Flexão
MOET	Módulo de Elasticidade na Tração
NBR	Norma Brasileira

PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PET	Poli-tereftalato de etileno
PP	Polipropileno
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais
PRFV	Polímero reforçado com fibra de vidro
PS	Poliestireno
RE	Resina Epóxi
RF	Resistência à Flexão
RT	Resistência à Tração
SI	Sistema Internacional de Unidades
SINTRAFSE	Sindicato dos trabalhadores rurais e agricultores familiares de Santo Estevão-Ba.
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (<i>United States Department of Agriculture</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

Latino	Descrição	Unidade
AA%	Absorção de água	%
E	Módulo de elasticidade	Gpa
F _{máx}	Força máxima	KN
LR	Limite de resistência	MPa
m	Massa	g
m _s	Massa inicial	g
m _u	Massa final	g
S _o	Área da seção	mm ²
T	Temperatura	°C
v	Volume	cm ³

Grego	Descrição	Unidade
ϵ	Deformação	mm
Δ_l	Variação do comprimento	mm
Δt	Variação da temperatura	°C
ΔH	Variação da entalpia	J
σ	Tensão	MPa
\emptyset	Diâmetro	mm
P	Densidade aparente	g/cm ³
ϕ	Fluxo de calor	mW

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Geral	22
1.2.2 Específicos	22
1.3 JUSTIFICATIVA	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	24
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	26
2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS	28
2.3.1 Laminação Manual (<i>Hand Lay Up</i>)	28
2.4 MATRIZES POLIMÉRICAS	29
2.4.1 Polímeros	30
2.4.2 Resina Epóxi	31
2.5 APLICAÇÃO DOS COMPÓSITOS	34
2.6 MECANISMO DE FALHA	35
2.7 FIBRAS	38
2.7.1 Fibras Sintéticas	39
2.7.2 Fibras Naturais	40
2.8 MILHO (<i>Zea mays</i>)	45
2.8.1 Histórico	46
2.8.2 Cultura do Milho	47
2.9 PALHA DO MILHO	48
2.10 ANATOMIA DA PALHA DO MILHO	50
2.10.1 Composição química	51
2.11 FIBRAS DA PALHA DO MILHO	51
2.12 PROPRIEDADES MECÂNICAS	52
2.12.1 Resistência à Tração	53
2.12.2 Resistência à Flexão	54
2.12.3 Resistência ao Impacto	56
2.12.4 Densidade Aparente	56
2.12.5 Absorção de Água	57
2.12.6 Envelhecimento (Degradação)	58
2.13 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)	58
2.14 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	58
3. MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1 PREPARAÇÃO DAS FIBRAS DA PALHA DE MILHO	60

3.1.1 Tratamento das Fibras	61
3.1.2 Caracterização Dimensional das Fibras	62
3.1.3 Ensaio de Tração das Fibras	63
3.1.4 Determinação da Densidade da Fibra	64
3.1.5 Morfologia da Fibra	65
3.1.6 Determinação do Teor de Cinzas	66
3.2 PREPARAÇÃO DO COMPÓSITO.....	67
3.2.1 Resina epóxi e endurecedor	67
3.2.2 Desmoldante.....	69
3.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO	69
3.4 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	74
3.4.1 Ensaio de Tração uniaxial.....	74
3.4.2 Ensaio de Flexão em três pontos.....	75
3.4.3 Ensaio de Impacto Charpy.....	76
3.4.4 Densidade Aparente	76
3.4.5 Absorção de Água	78
3.4.6 Envelhecimento (Degradação)	79
3.5 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC).....	80
3.6 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	80
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS	81
4.1.1 Diâmetro médio das Fibras de Palha do Milho.....	81
4.1.2 Ensaio de Tração das Fibras.....	82
4.1.3 Densidade das Fibras.....	84
4.1.4 Morfologia da Fibra	86
4.1.5 Teor de Cinzas	87
4.2 ENSAIOS FÍSICOS	89
4.2.1 Densidade Aparente	89
4.2.2 Absorção de Água	91
4.2.3 Envelhecimento (Degradação)	94
4.3 ENSAIOS MECÂNICOS	97
4.3.1 Ensaio de Tração uniaxial	97
4.3.2 Ensaio de Flexão em três pontos	101
4.3.3 Ensaio de Impacto Charpy.....	105
4.4 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC).....	107
4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	109
5. CONCLUSÕES	120
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
REFERÊNCIAS.....	123

1. INTRODUÇÃO

A busca por alternativas mais ecológicas, biodegradáveis e naturais para produção de materiais é um dos grandes pólos de discussão no planeta. Há uma diminuição na geração de resíduos e a preservação ambiental vêm sendo tópicos dos desafios colocados à sociedade, com foco na reciclagem. Assim, existe uma tendência mundial em buscar recursos naturais alternativos em substituição às fibras sintéticas, que sejam ecologicamente corretos, desenvolvendo novos produtos, gerando emprego e renda, utilizando o desenvolvimento de novas tecnologias para a construção civil e em outras áreas onde isto torna-se possível (SOUZA, 2020).

Embora os polímeros e seus derivados tenham historicamente feito grandes contribuições para o desenvolvimento tecnológico global e melhorado a qualidade de vida das pessoas modernas, o uso contínuo destes materiais tem causado preocupação social. Isso porque, em grande medida, são menos recicláveis e têm maior capacidade de acumulação na biosfera, principalmente devido à sua baixa biodegradabilidade, são fontes não renováveis, materiais sintéticos derivados da indústria petroquímica (FROEHLICH; BITENCOURT, 2016). Os compósitos poliméricos reforçados com fibras apresentam uma ampla gama de aplicações de engenharia, incluindo construção civil, indústria automotiva, aeroespacial e blindagem balística (ZHANG, *et al.*, 2020; OLIVEIRA, 2022)

Neste contexto, é cada vez maior a necessidade de encontrar materiais alternativos com elevado desempenho técnico, ambiental, social e econômico, tornando cada vez mais frequente os estudos com fibras vegetais. A substituição de fibras sintéticas, que são recursos não renováveis por fibras vegetais de recursos renováveis é uma realidade importante na produção de compósitos. (MOREIRA; SEO, 2016).

As fibras sintéticas apresentam algumas desvantagens em comparação às fibras vegetais, incluindo: são abrasivas, possui alto consumo de energia durante a produção, desgaste nos equipamentos de processamento e não biodegradáveis, o que leva a problemas no manuseio e descarte destes materiais. Conforme Ramos (2019), “a palha de milho é uma fibra natural do tipo lignocelulósica”. Essas fibras tem

como vantagens: baixa densidade, boas propriedades mecânicas específicas, não é abrasiva e são biodegradáveis (PEREIRA, 2015).

Os resíduos gerados pela agroindústria brasileira na maioria dos casos não agregam valor comercial ao produto final e não têm destino adequado para descarte. Porém, é possível converter esse resíduo agroindustrial em matéria-prima para a fabricação de produtos adequados a diversos setores industriais. Outro aspecto que contribui o estudo e desenvolvimento do presente trabalho é que o Brasil é um dos maiores produtores de fibras vegetais, o que aumenta a expectativa de inclusão destas, no reforço de materiais poliméricos (MOREIRA; SEO, 2016).

Assim, a utilização das fibras da palha do milho para produção de compósitos é uma alternativa em potencial para humanidade, sendo a Bahia um dos grandes produtores de milho do mundo e tal produção é aproveitada em boa parte, com poucas partes do milho não aproveitadas (AZEVEDO *et al.*, 2016).

A palha do milho de nome científico (*Zea mays*), tem propriedades específicas que são poucas aproveitadas no Brasil, onde estas partes são descartadas. Além disso, esses resíduos descartados podem ainda serem utilizados como reforço de resina sintética, que é utilizada para obtenção de materiais compósitos (FOGUESATTO *et al.*, 2018).

Esses materiais compósitos são aqueles formados a partir da mistura de dois ou mais constituintes em escala macroscópica que não se misturam e possuem características diferentes na sua forma e composição (FERREIRA *et al.*, 2022). Assim, a utilização das fibras da palha do milho reforçado com resina sintética, visando a fabricação de materiais de forma mais ecológica mostra-se um estudo de relevante valor.

Nesse sentido, a produção baseada em produtos biodegradáveis pode ser aplicada com a utilização de matérias-primas locais. Na Bahia, o milho é sem dúvidas um desses produtos, por ser o Estado um grande produtor. Sendo assim, utilizar as fibras da palha do milho nessa produção é um caminho que une a utilização de compostos biodegradáveis à produção local, utilizando uma das partes do milho que costuma ser descartada, o que traria grandes benefícios à sociedade, gerando emprego e rentabilidade aos produtores.

A produção do milho concentra-se, geralmente, em áreas de pequenos produtores, com predomínio do trabalho familiar, sendo, portanto, importante agente de fixação do homem à região semiárida nordestina; serve também como atividade de apoio à pecuária a nível das fazendas, pelo uso direto da planta na alimentação dos bovinos ou através da pastagem nativa nas áreas exploradas com a cultura. A utilização da fibra da palha do milho como reforço/carga em materiais compósitos, na confecção de artigos artesanais, decorativos e componentes automotivos, proporciona uma considerável demanda funcional, fazendo que a potencialização do uso da fibra de milho seja uma tendência estratégica para o desenvolvimento do Brasil, haja visto que o milho é uma das plantas que podem tornar produtivo o semiárido nordestino, proporcionando grande empregabilidade.

Buscando novas alternativas para utilização de compósitos poliméricos, a partir de matriz de resina sintética epóxi com reforço/carga de fibras da palha do milho, o presente estudo teve a finalidade de obter, caracterizar e encontrar possíveis aplicações para o material concebido.

Este trabalho visa apresentar a viabilidade técnica de um compósito utilizando material descartado da lavoura de milho, qual seja a fibra da palha do milho, reforçado com resina sintética epóxi, tendo aplicação estrutural, principalmente em peças de pouca solicitação mecânica, tem vindo a desenvolver-se de forma única, o que tem levado à que um número cada vez maior de pesquisadores procurar novos materiais e melhorar processos já existentes de obtenção de fibras, bem como métodos de fabricação das mais diversas estruturas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Obter, caracterizar e apresentar a viabilidade técnica de um compósito de matriz polimérica de resina epóxi e carga material descartado da lavoura de milho, qual seja a palha do milho (*Zea mays*), para ter aplicação estrutural, principalmente em peças de pouca solicitação mecânica, tais como, reservatórios, tubulações, prateleiras, telhas entre outros.

1.2.2 Específicos

- Desenvolver um compósito com fibras da palha do milho;
- Estudar a viabilidade técnica com as formulações 5, 10 e 20% de reforço;
- Obter compósito e definir seu nível de saturação quanto à absorção de água;
- Determinar as propriedades físicas e mecânicas desse compósito;
- Verificar as características térmicas do compósito pela análise do DSC;
- Analisar a microscopia de fratura do compósito;
- Caracterizar o compósito pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV).

1.3 JUSTIFICATIVA

Há uma grande preocupação mundial com os efeitos negativos da atual forma de produção e composição da maior parte dos produtos por seu impacto na natureza. Assim, mostra-se fundamental buscar alternativas biodegradáveis para continuar o crescimento e desenvolvimento econômico, mas sem ignorar os impactos negativos causados por eles.

Nesse sentido, a produção baseada em produtos biodegradáveis pode ser aplicada com a utilização de matérias-primas locais. Na Bahia o milho é sem dúvidas um desses produtos, por ser o Estado um grande produtor.

A palha de milho, cujo nome científico é *Zea mays*, é considerada um resíduo agrícola, geralmente incinerado ou utilizado como cama nos criadouros de aves nas propriedades rurais brasileiras, sendo um material abundante, porém pouco aproveitado de forma a gerar renda, exceto quando destinado à produção do artesanato. Esta parte anatômica da espiga do milho representa cerca de 10% do peso da espiga seca, o que permite a estimativa de produção global, em 2018, de 7 milhões de toneladas, aproximadamente, considerando o volume de milho produzido mundialmente no mesmo ano de 995 milhões de toneladas (FIESP, 2019). No Brasil, este total produzido em 2018 pode ser estimado em 6 milhões de toneladas de palha seca, utilizando a mesma base de percentual da espiga (FIESP, 2019).

Assim, utilizar as fibras da palha do milho na produção de compósitos é um caminho que une a utilização de compósitos biodegradáveis a produção local, utilizando uma das partes do milho na aplicação do artesanato e outra parte que costuma ser descartada o que traria grandes benefícios à sociedade, tendo mais uma fonte de renda e empregabilidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta as principais e necessárias condições que os materiais devem atender para que possam ser utilizados na obtenção de compósitos, a fim de quantificar sua eficiência para fins de fabricação.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são resultantes da combinação entre dois ou mais materiais de modo a formar um novo produto com características diferentes dos constituintes originais, e surgem como uma alternativa para atender as demandas apresentadas por materiais com propriedades mecânicas satisfatórias.

Materiais compósitos é uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais diferentes que possuem uma interface distinta entre eles, ou seja, é heterogêneo, resultando em um material com propriedades e características específicas. Seus constituintes mantêm suas identidades, características e propriedades sinérgicas. A combinação de diferentes materiais possibilita a obtenção de um novo material o compósito, com um conjunto de propriedades especiais que seus constituintes não possuem isoladamente. As partes do compósito são denominadas de matriz e a outra parte reforço ou carga (OLIVEIRA, 2015).

A norma ASTM D3878 (2020) define compósito como uma substância que consiste de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia útil, exibindo certas propriedades que não se encontram nos materiais isoladamente.

As combinações e as faixas das propriedades dos materiais foram, e ainda estão sendo, ampliadas pelo desenvolvimento de materiais compósitos. De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exhibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, de modo que é obtida melhor combinação de propriedades. De acordo com esse princípio da ação combinada, melhores combinações de propriedades são obtidas por

uma combinação adequada de dois ou mais materiais distintos. Um equilíbrio entre propriedades também é feito para muitos materiais compósitos (CALLISTER, 2016).

A principal motivação dessa grande evolução foi a possibilidade de se produzir compósitos com altas propriedades mecânicas e baixas densidades que, potencialmente, poderiam substituir materiais usualmente utilizados como o aço e sintéticos (OLIVEIRA, 2015). Alguns tipos de compósitos já foram discutidos; estes incluem as ligas metálicas, as cerâmicas e os polímeros multifásicos. Muitos compósitos também ocorrem na natureza. Por exemplo, a madeira consiste em fibras de celulose resistentes e flexíveis, que estão envolvidas e aglutinadas por um material mais rígido, chamado lignina (SANTOS, 2021).

O componente matriz tem a função de garantir a coesão, orientação e proteção do material de reforço, conectando seus elementos e transmitindo a eles as tensões a que o material está submetido. O reforço pode ser de natureza cerâmica, metálica ou polimérica. Geralmente estão presentes na forma de partículas, fibras, bastonetes, flocos ou plaquetas. As nervuras de reforço têm a função de garantir a rigidez, resistência mecânica e isolamento térmico do material (FERREIRA *et al.* 2022).

De acordo com Arruda (2020), “os substratos mais usados são os polímeros sintéticos”. O processamento de compósitos de matriz polimérica não requer necessariamente alta pressão, nem altas temperaturas. Além disso, em comparação aos compósitos poliméricos, os problemas associados à degradação do reforço durante a fabricação não são significativos em comparação com compósitos com outras matrizes (metal, concreto, etc.).

A fase contínua, nos materiais compósitos, denominada matriz, tem a função de manter as fibras orientadas conforme sua distribuição e o espaçamento entre elas, além de transmitir as forças de cisalhamento entre as diversas camadas das fibras, atribuindo assim a este compósito, resistência ao dobramento e as torções por ele submetidas e protegê-las das possíveis agressões do ambiente exterior (MARTINS, 2016).

A qualidade da interface entre a matriz e o reforço é fator fundamental no desempenho mecânico do compósito. Para que ocorra interação entre componentes de naturezas químicas diferentes e de quaisquer dimensões ou formas, é essencial a existência de uma área de contato entre elas (OLIVEIRA, 2016). Em um compósito

reforçado com fibras, por exemplo, pode-se dizer que existem três fases: a superfícies da fibra, a interface fibra/matriz e a matriz (OLIVEIRA, 2015).

Os avanços nas pesquisas sobre a modificação desses materiais (polímeros, cerâmicas e metais) têm proporcionado a busca por uma melhor otimização de dispositivos componentes que estejam prontamente disponíveis para reduzir custos otimizando potencial de uso, boa funcionalidade e um bom desempenho na aquisição de novos materiais compósitos para torná-los mais competitivos (MARTINS, 2016).

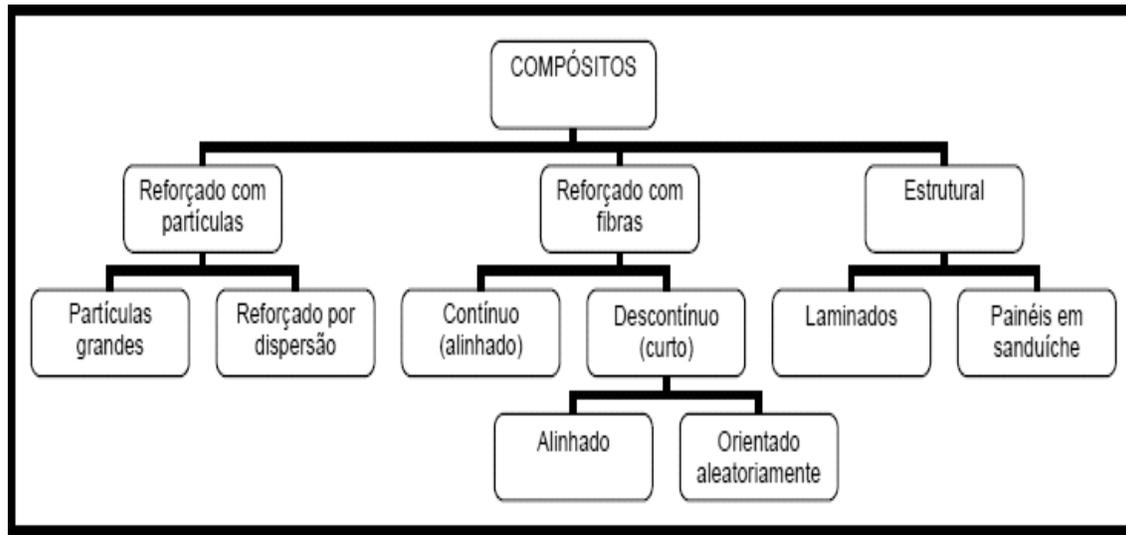
A busca por um material que combine resistência mecânica, térmica e acústica suficiente tem sido enfatizada em pesquisas científicas recentes. Para tanto, materiais compósitos têm sido utilizados em larga escala, principalmente aqueles que contêm resíduos em sua composição. Esse aspecto é impulsionado pela busca de minimizar os efeitos nocivos da exposição desses resíduos à natureza, causando danos irreparáveis (BRILHANTE, 2020).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos são classificados em função do tipo de matriz, da natureza e da geometria do elemento do reforço. Em relação ao componente matricial pode ser classificada como polimérica, cerâmica ou metálica. Em função do elemento de reforço/carga, os compósitos podem ser classificados como reforçados por partículas ou por fibras (SILVA, 2014).

Os compósitos devem ser heterogêneos, superando cada fase de sua composição. Uma dessas fases deve ser o ligante e a outra um reforço/preenchimento, caracterizando essas fases respectivamente (ARAÚJO, 2022). Devido à grande variedade de materiais que podem formar diferentes fases, os compósitos são divididos em três grandes categorias com base no reforço: compósitos de reforço carregados por partículas, compósitos de reforço carregados com fibras e compósitos estruturais, conforme a figura 1.

Figura 1: Esquema de classificação dos materiais compósitos com reforço/carga.



Fonte: Adaptado Callister (2016).

Muitos materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases; uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase, frequentemente chamada de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são função das propriedades das fases constituintes, de sua quantidade relativa e da geometria da fase dispersa (CALLISTER, 2016).

Callister (2016), classifica os materiais compósitos com base na estrutura formada pelos materiais componentes, conforme a descrição apresentada a seguir:

- **Compósitos reforçados com partículas** - os compósitos com partículas grandes e os compósitos reforçados por dispersão são as duas subclassificações dos compósitos reforçados com partículas.
- **Compósitos reforçados com fibras** - os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa está na forma de uma fibra. Esses compósitos reforçados são classificados, considerando o comprimento das fibras.
- **Compósitos híbridos** - a hibridização de reforços de fibras sintéticas e vegetais é utilizada de modo a obter produtos com propriedades intermediárias.
- **Compósitos estruturais** - é um compósito multicamada e em geral de baixa massa específica, usado em aplicações que exigem integridade estrutural, resistências à tração, compressão e torção e rigidez normalmente elevadas.
- **Compósitos laminados** - é composto por lâminas ou camadas bidimensionais

que estão coladas uns aos outros por camadas.

- **Painéis-Sanduiche** - Os painéis-sanduiche, considerados como uma classe de compósitos estruturais, são projetados para serem vigas ou painéis de baixo peso, com rigidez e resistência relativamente elevadas.

2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

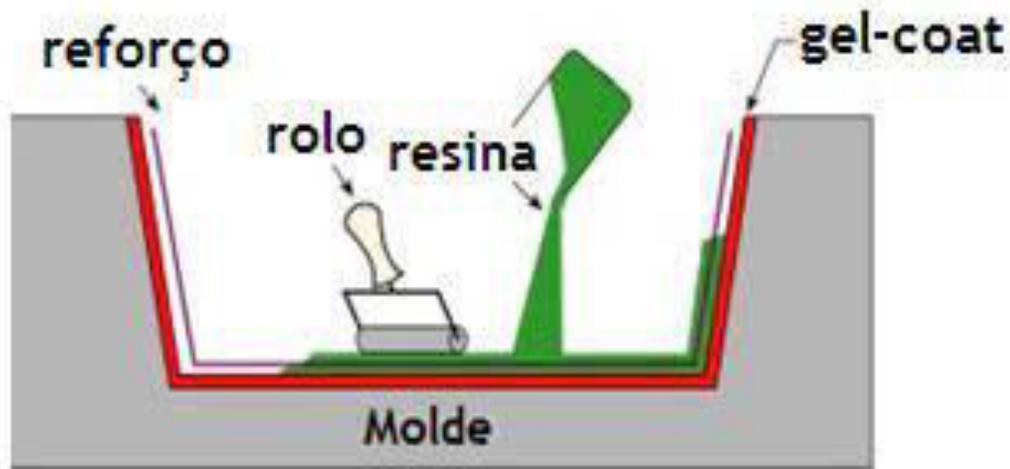
O Desenvolvimento e preparação para obtenção da forma final do material compósito incluem mistura, impregnação, compactação e moldagem. Existem vários processos para a fabricação de materiais compósitos, como pultrusão, moldagem por transferência de resina, infusão, enrolamento de filamentos, laminação manual e moldagem por compressão. A laminação manual que é o método pertinente ao objeto desta pesquisa, é o processamento de laminação mais viável para os pequenos produtores, visto que, é o processo mais simples e barato para fabricação de uma peça reforçada com fibras. Comparado com outros processos mais complexos, como por exemplo laminação à vácuo e por compressão, sua maior vantagem é o baixo investimento inicial e a pouca exigência de conhecimentos técnicos aprofundados.

2.3.1 Laminação Manual (*Hand Lay Up*)

Na laminação manual, a superfície do molde é devidamente preparada com aplicação de uma cera desmoldante a base de carnaúba ou álcool desmoldante, no qual é colocada uma manta de fibras que são laminadas manualmente. Os moldes são impregnados com resina devidamente preparada, com auxílio de um pincel, e para melhorar o processo de impregnação, são utilizados rolos de alumínio para facilitar a eliminação de bolhas de ar. Na sequência coloca-se as camadas de reforço, até se obter a espessura desejada do compósito. O procedimento de cura ocorre em temperatura ambiente.

De acordo com Oliveira (2022), o processo de *hand lay-up* é amplamente utilizado na produção de protótipos, gabaritos de controle, modelos e moldes. Também é muito utilizado em revestimentos e reparos, onde são obtidas peças com superfícies lisas e excelente acabamento superficial. A figura 2 demonstra o processo de laminação manual.

Figura 2: Processo de laminação manual (*Hand Lay Up*).



Fonte: Fibreglas (2014).

2.4 MATRIZES POLIMÉRICAS

As matrizes dos materiais compósitos que são classificadas em cerâmicas, metálicas, cimentícias e poliméricas tem como finalidade básica atuar como um meio de transferência de carga para os reforços através do cisalhamento e proteger este reforço da abrasão mútua, danos e meio de degradação na qual venha a sofrer (MARTINS, 2016).

A matriz polimérica, pertinente a este objeto pesquisado, é um componente orgânico de alto peso molecular formado através do processo de síntese química de polimerização, formado pela união de várias moléculas pequenas. A polimerização é realizada por adição ou condensação de diferentes componentes químicos. Eles têm baixa resistência e baixo ponto de fusão, mas são significativamente mais dúcteis que as fibras (MENEZES, 2018). A matriz polimérica deve ser dúctil, resistente a abrasão, as reações químicas e as intempéries da natureza (JÚNIOR, 2017). De acordo com Callister (2016), “seu objetivo é proteger a integridade do material utilizado como carga de reforço, seja para partículas, fibras ou outros materiais estruturados na fase dispersa do compósito, como barreira de vedação”.

2.4.1 Polímeros

Polímeros são macromoléculas compostas por muitas (dezenas de milhares) de unidades repetidas chamadas meros, ligadas por ligações covalentes. As matérias-primas para a produção de polímeros são monômeros, ou seja, moléculas com (mono) unidades repetitivas. Polímeros são sintetizados por reações de polimerização a partir de dois monômeros (MARTINS, 2016).

Segundo Callister (2021), as características mecânicas dos polímeros podem ser divididos em três grupos:

- Termoplásticos
- Termorrígidos
- Elastômeros

Os polímeros termoplásticos têm a propriedade de se tornarem fluidos à medida que a temperatura aumenta e depois solidificarem à medida que a temperatura diminui, e podem ser moldados várias vezes, portanto, derretidos várias vezes. São exemplos o polietileno (PE), polipropileno (PP), poli (tereftalato de etileno) (PET), policarbonato (PC) e outros. (GOMES, 2015).

Os polímeros termorrígidos ou termofixos, não se tornam fluidos com o aumento da temperatura, permanecem muito estáveis e apresentam fratura frágil. Depois de serem curados, eles não têm capacidade de se fundir novamente. Devido a esta característica, a sua reciclagem é complicada (CARVALHO, 2015).

Os elastômeros são uma classe intermediária, não são fundíveis e não são rígidos como os termorrígidos. Eles apresentam alta elasticidade e são incapazes de se fundir, dificultando, dessa forma, sua reciclagem. São exemplos mangueiras de borracha e vedações (HIRANOBE, 2020). As borrachas possuem longa faixa de elasticidade na temperatura ambiente, baixo módulo e deformações elevadas.

Em resumo, o que difere os elastômeros dos outros polímeros é sua capacidade de deformação e retorno ao tamanho original.

As resinas poliméricas mais amplamente utilizadas e mais baratas são os poliésteres e os ésteres vinílicos. Os epóxios são mais caros e, além de aplicações comerciais, também são empregados em compósitos poliméricos para aplicações aeroespaciais; eles apresentam melhores propriedades mecânicas e maior resistência à umidade do que as resinas poliésteres e vinílicas (SILVA, 2014).

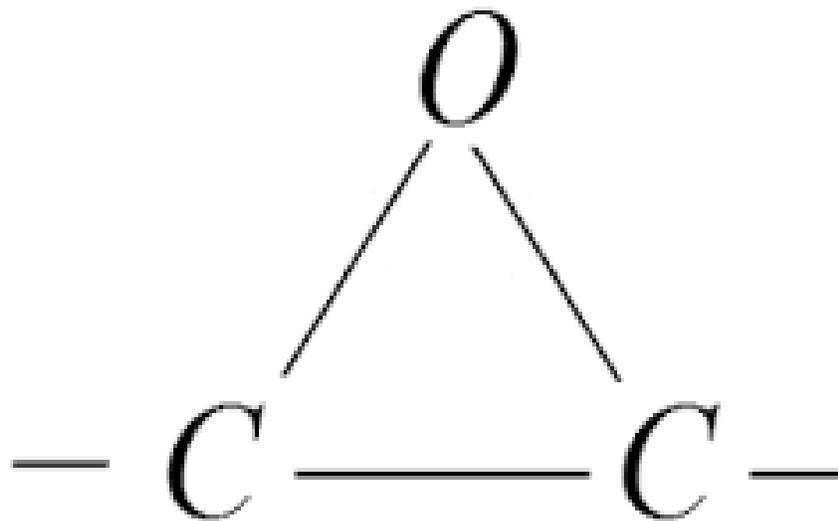
2.4.2 Resina Epóxi

“A resina epóxi (também chamada de poliepóxido ou resina epoxídica), referente à esta pesquisa, é um polímero termofixo que endurece quando é misturada com um agente catalisador, cuja produção geralmente é realizada pela reação entre epicloridrina e bisfenol A”, (COELHO, 2018).

Quimicamente, a epóxi é classificada como polímero termofixo e tem bastante utilidade por ser considerada polivalente e por suas propriedades. Essa resina endurece quando é misturada com um agente catalisador ou endurecedor (BARBOSA, 2019).

Os epóxios são constituídos a partir de monômeros nos quais o grupo éter toma a forma de um anel de três compostos que é conhecido como anel epóxido, sendo esse anel, que faz parte da epicloridrina, bastante reativo e muito importante na produção da resina epóxi (COELHO, 2018), mostrado na figura 3.

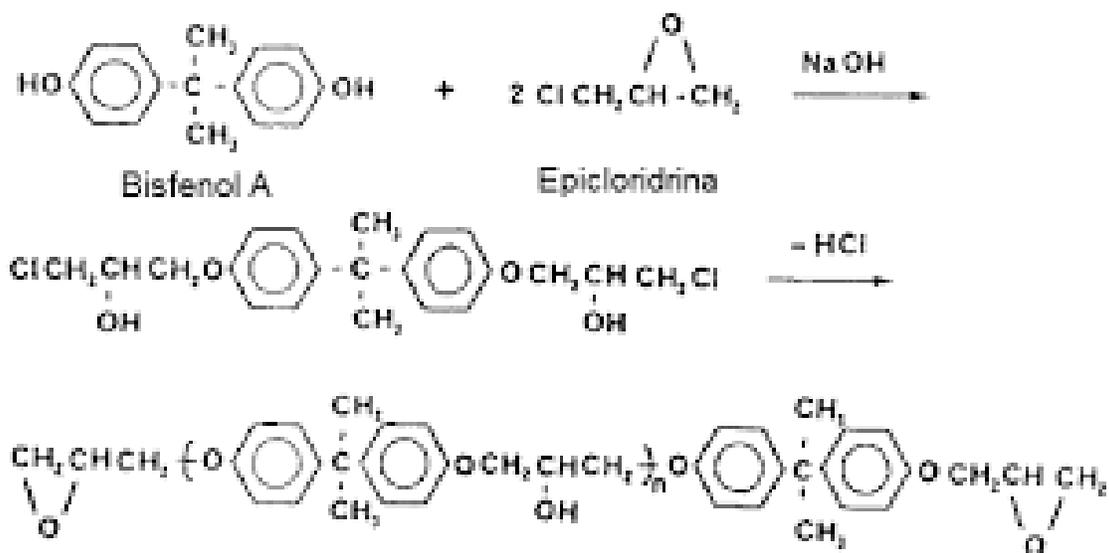
Figura 3: Estrutura do anel epóxido.



Fonte: Coelho (2018).

De acordo Missiagia (2018), essas resinas epóxi pertencem à família das resinas sintéticas, compostas pela reação de qualquer diol de alto peso molecular com epícloridrina, conforme mostra a figura 4.

Figura 4: Reação do Bisfenol A e Epícloridrina com formação de resina epóxi.



Fonte: Missiagia (2018).

Os polímeros termoplásticos apresentam grande vantagem pela capacidade de serem remoldados a altas temperaturas (LUCHERELLI, 2022). Fatores como densidade de reticulação, temperatura e/ou tempo de cura e umidade são fatores que afetam diretamente a temperatura vítrea da resina epóxi. Sabendo disso, é importante monitorar o processo de cura, bem como controlar o ambiente de produção (CASTRO, 2019).

Em seu estudo, Castro (2019), verificou o efeito da temperatura e do tempo no desempenho de cura sem bolhas de ar ou vazios internos em uma matriz de resina epóxi.

As resinas epóxi são as resinas mais utilizadas nos compostos de alta qualidade, fundamentalmente porque possuem melhores propriedades físicas e mecânicas que as resinas de poliéster e viniléster (MACIEL, 2017).

Segundo Maciel (2017), dentre as matrizes termofixas, as epoxidicas apresentam vantagens, tais como:

- Boa adesão em diversos tipos de cargas, reforços e substratos.
- Ampla variedade de resinas e agentes de cura, que proporcionam as mais diversas propriedades físico-químicas após a cura;
 - Na reação de cura com o endurecedor não há formação de água e ocorre a liberação de poucos produtos voláteis que propicia uma menor contração em relação a algumas resinas;
 - Resinas curadas possuem alta resistência química e bom isolamento elétrico.
 - A cura se dá rapidamente (entre 5° e 150°C) a depender do agente utilizado;
 - Baixa viscosidade da resina e do endurecedor, ou seja, fácil manuseio; e
 - Ocorre baixa contração durante a cura (3%).

Rana; Fanguero (2016), afirma que “as resinas epóxi são os polímeros termofixos mais comumente usados na construção de aeronaves”. A tabela 1 mostra algumas propriedades mecânicas das resinas epóxi.

Tabela 1: Propriedades mecânicas de uma resina epóxi.

Propriedades mecânicas (resina comercial)

Resistência à tração	67 MPa
Resistência à flexão	124 MPa
Resistência ao cisalhamento	19,3 MPa
Limite de Elasticidade	207 MPa
Dureza	69,0

Fonte: Adaptado Maciel (2017).

Por apresentarem baixa resistência à intempéries, a aplicação é restrita para uso interno ou áreas de pouca exposição à luz ultravioleta (MISSIAGIA, 2018). Além disso, possuem boa estabilidade dimensional, são facilmente processadas, possuem baixo custo e possuem boa adesão para uma variedade de fibras.

2.5 APLICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Na Tabela 2, é apresentado a aplicação das fibras por indústrias de vários setores.

Tabela 2: Aplicação das fibras em vários setores da indústria.

Fibra	Aplicação
Cânhamo	Produtos de construção, têxteis, cordéis, papel e embalagens, móveis, elétricos, e fabricação de tubos
Palmeira de dendê	Materiais de construção como janelas, batentes de portas, sistemas de construção de painéis isolados, tapume, vedações, telhados, decks e outros materiais de construção
Madeira	Moldura da janela, painéis, persianas, decks, sistemas de trilhos e cercas
Linho	Quadro de janela, painéis, decks, sistemas de corrimão, esgrima, raquete de tênis, quadro de bicicleta, garfo, snowboard, e laptops
Casca de Arroz	Materiais de construção, tijolos, batentes de janelas, painéis, decks, sistemas de corrimão e vedações
Bagaço	Moldura da janela, painéis, decks, sistemas de trilhos e cercas
Sisal	Na indústria da construção, como painéis, portas, placas de fechamento e chapas de cobertura; também fabricação de papel
Kenaf	Material de embalagem, estojos móveis, sacos, isolamentos, pano de vestuário, misturas de vasos sem solo, camas de animais e material que absorve óleo e líquidos
Algodão	Indústria de móveis, têxteis e fios
Fibras de coco	Painéis de construção, persianas, telhas, tanque de armazenamento, material de embalagem, capacetes e caixas de correio, tampas de projetor, tampa de estabilizador de tensão, estofado do assento, escovas e vassouras, cordas e fios para redes, bolsas e esteiras, bem como acolchoamento para colchões.
Rami	Use em produtos como linha de costura industrial, materiais de embalagem, redes de pesca e panos. Também é feito em tecidos para mobiliário doméstico (estofados, telas) e roupas, fabricação de papel.
Juta	Painéis de construção, telhas, batentes de portas, persianas, embalagens.

Fonte: Mohammed *et al.* (2015).

Atualmente, os materiais compósitos são amplamente utilizados em diferentes tipos de indústria, dentre elas segundo Júnior (2020), temos:

- **Indústria aeroespacial e militar** – Rigidez mecânica e baixa densidade são critérios essenciais e determinantes. Principais peças estruturais (flap e aerofólio, hélices e freios aerodinâmicos), fuselagem das aeronaves, pás do rotor e etc.
- **Indústria da construção civil** – Algumas aplicações de compósitos nesse ramo são: Painéis, fôrmas para concreto, reservatórios de água, peças sanitárias, itens funcionais (caixas de correio, caixas de medidores), artigos decorativos, argamassa, pré-fabricado e etc.
- **Indústria automotiva** – Nessa área, as propriedades que geralmente são almejadas são resistência à temperatura, rigidez e resistência à fadiga. Peças do interior (cockpit, assentos, painéis de instrumentos), painéis de carroceria, partes do motor e componentes mecânicos, componentes elétricos e eletrônicos e etc.

2.6 MECANISMO DE FALHA

A definição de "falha" em um elemento estrutural depende das exigências especificadas para o desempenho do produto. Em algumas aplicações, uma pequena deformação pode ser considerada como falha, enquanto em outras, somente a fratura total constitui uma falha. A interface fibra-matriz, orientação, concentração, adesão, tamanho crítico e distribuição da fibra têm efeitos significativos na resistência dos compósitos reforçados com fibra vegetal. Portanto, é de extrema importância estudar o mecanismo de falha desses materiais, principalmente a mecânica da fratura. Quando a falha ocorre na interface, é chamada de falha coesiva; quando a falha ocorre na matriz, é chamada de falha adesiva (MORAES, 2021).

Existem muitos fatores que afetam os danos materiais, como a natureza e a direção da tensão aplicada, propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras e da matriz, processo de fabricação, configuração do material, temperatura de operação e a porcentagem de fibras e vazios no material (PINHEIRO, 2022). O efeito desses danos internos no comportamento macroscópico da estrutura só pode ser observado a partir das aparentes alterações em suas propriedades.

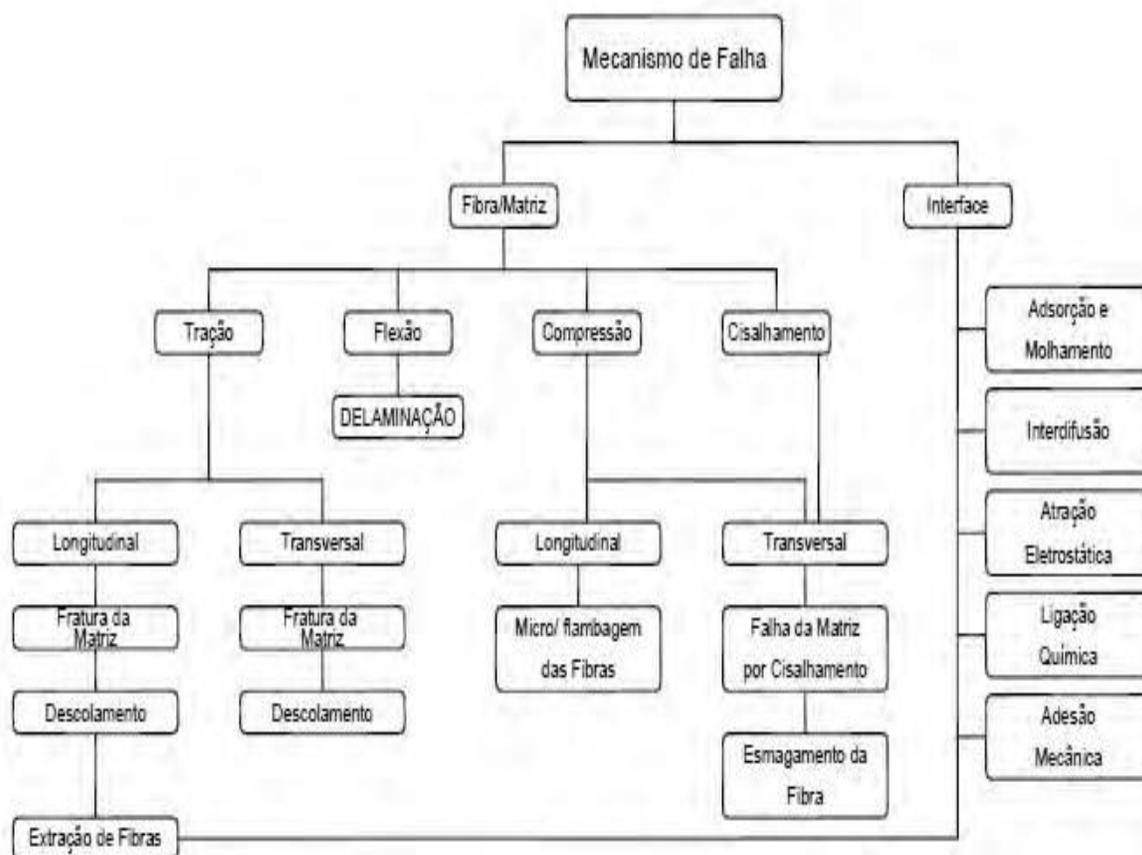
Em estruturas compósitas sujeitas a cargas de compressão, as fibras são propensas a sustentar a maior parte da carga. No entanto, o material da matriz tem um papel crucial de proporcionar estabilidade lateral às fibras, evitando ou até mesmo

adiando a ocorrência de flambagem. Este tipo de instabilidade tende a induzir deformações na matriz, que pode ser de cisalhamento ou na extensão das fibras (OPLET *et al*, 2018).

O comprimento da fibra é outro fator determinante nas propriedades do compósito. Normalmente as fibras apresentam um comprimento crítico que contribui para um aumento efetivo na resistência e na rigidez do compósito. Este comprimento é dependente do diâmetro da fibra, do limite de resistência à tração e da resistência da ligação fibra-matriz (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

A trinca na matriz, a ruptura de fibra e o deslocamento na interface da fibra matriz são tipos de danos que podem ocorrer em qualquer material compósito fibroso, porém a delaminação ocorre em compósitos laminados (MOTA, 2010). A figura 5 apresenta o mecanismo de falha dos compósitos.

Figura 5: Mecanismo de falha dos compósitos.

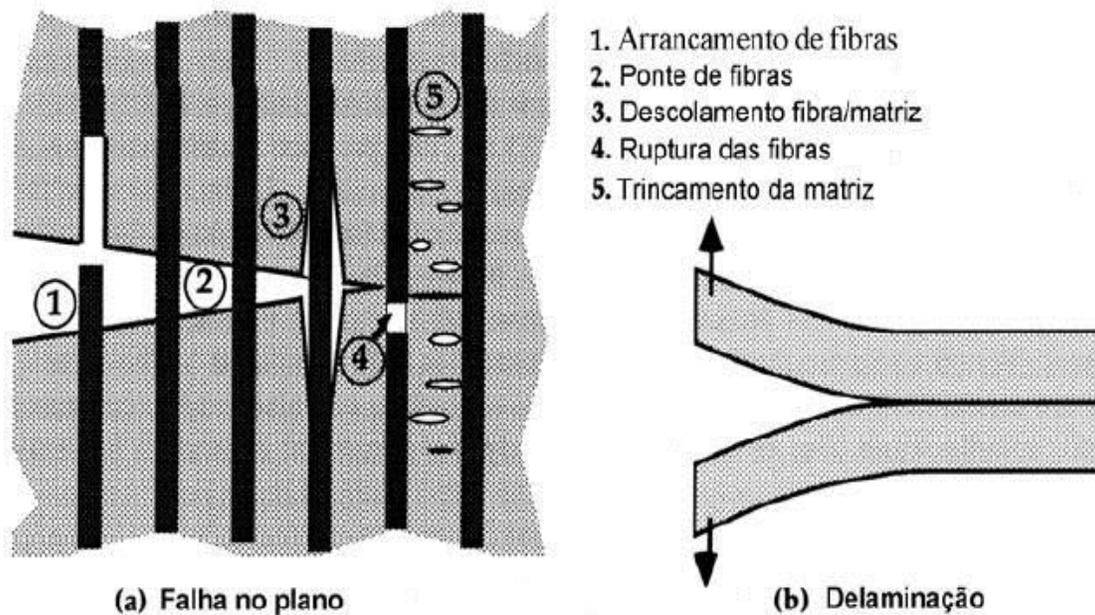


Fonte: Adaptado de Correia (2011).

Muitos elementos estruturais em compósitos são laminados multidirecionais, constituídos por várias camadas ou folhas com fibras unidirecionais (TINÔ *et al*, 2022). Neste caso, cada camada é um compósito unidirecional e forma a base construtiva desses laminados. Portanto, é importante estudar os modos de falha mais comuns em compósitos unidirecionais. Teoricamente, em compósitos poliméricos reforçados unidirecionalmente, assume-se que todas as fibras têm a mesma resistência e a falha.

Os principais tipos de danos encontrados nos materiais compósitos laminados são: arrancamento da fibra, deslocamento na interface da fibra matriz, delaminação, microflambagem, trincamento na matriz, exemplificados na figura 6.

Figura 6: Mecanismo de falhas em materiais compósitos.



Fonte: Adaptado de Pereira (2013).

As falhas começam em microescala e só podem ser detectadas usando algumas técnicas não destrutivas, como microscopia eletrônica de varredura, imagens térmicas, testes eletromagnéticos e ultrassônicos, etc.

2.7 FIBRAS

As fibras como sendo flexíveis, macroscopicamente homogêneas, com alta relação entre comprimento e seção transversal e as classificade acordo com sua origem em fibras sintéticas ou fibras vegetais (MACIEL, 2017).

O reforço de fibra de um material compósito consiste em milhares de filamentos individuais com diâmetro da escala micrométrica dispersos em uma matriz polimérica. As propriedades mecânicas das fibras são maiores do que as dos polímeros que elas reforçam. Portanto, a matriz não deve apenas desempenhar a função de dar ao compósito uma forma estável, mas também garantir a transmissão de forças para as fibras e proteger suas superfícies (SOUZA, 2020). As fibras devem então possuir:

- Módulo de elasticidade superior ao do polímero a reforçar;
- Tensão de ruptura superior à do polímero a ser reforçado;
- Geometria adequada para uma boa adesão à matriz;
- Resistência à deterioração em contato com a matriz.

Classificam as fibras como curtas ou longas, também conhecidas como fibras descontínuas ou contínuas, respectivamente.

De acordo com Oliveira (2022), o número de fibras, sua orientação e seu comprimento são propriedades que afetam principalmente as propriedades dos polímeros reforçados com fibras. Verificou-se que as propriedades mecânicas são melhoradas à medida que a fração volumétrica das fibras aumenta para um determinado valor. As principais vantagens oferecidas pelas fibras como materiais de reforço são: a resistência do material produzido por fibras de pequeno diâmetro é sempre mais elevada quando comparadas a outras com maiores diâmetros.

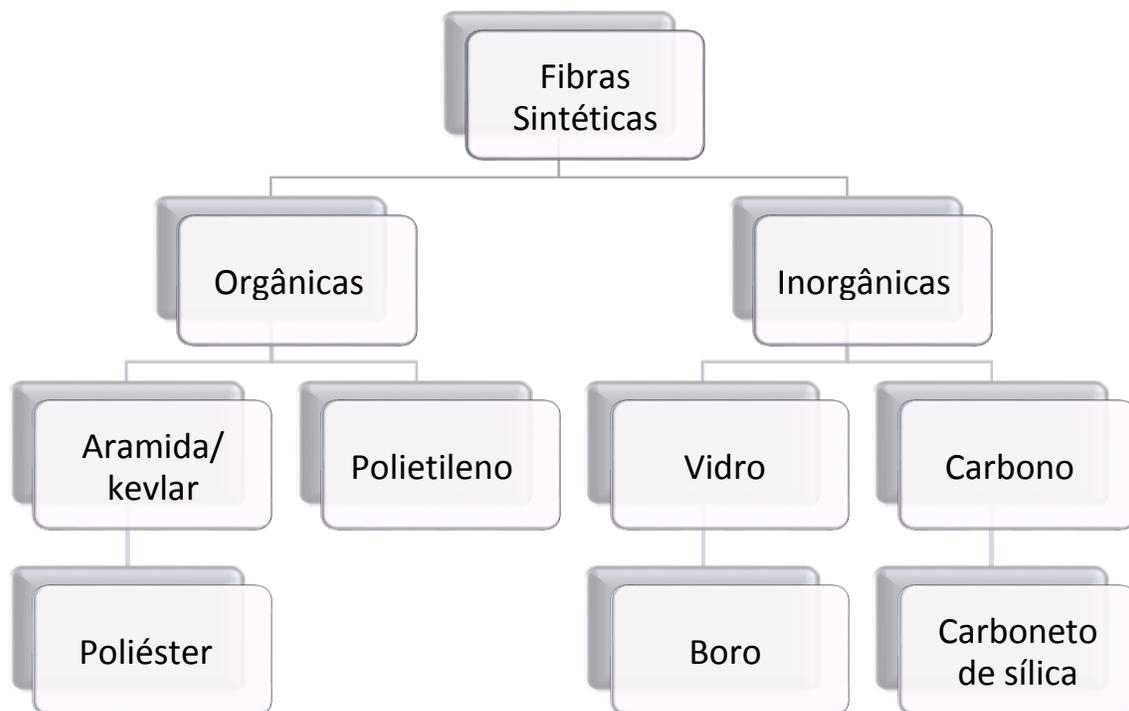
As propriedades finais de um material compósito dependem também do tipo de fibras escolhido para o reforço. Os principais tipos de fibras podem ser divididos em dois grandes grupos, sintéticas e naturais. As fibras naturais podem ser obtidas a partir de plantas, animais e minerais, já as fibras sintéticas, se dividem em fibras orgânicas e fibras inorgânicas (GOMES, 2015).

2.7.1 Fibras Sintéticas

As fibras sintéticas são fibras que geralmente apresentam valores de resistência e módulo de elasticidade mais elevados. Alguns exemplos de fibras sintéticas são fibra de carbono, fibra de Kevlar, fibra de vidro A, vidro AR, vidro C, vidro E e vidro S. Normalmente, essas fibras são caras e, quando inseridas em uma matriz polimérica, possuem propriedades como resistência mecânica, corrosão, alta temperatura, alcalinidade e similares (CALLISTER, 2016).

De acordo com Balasubramanian (2013), fibras sintéticas são fibras de alta performance. Algumas das fibras sintéticas mais comuns incluem as fibras de vidro, boro, carbono, aramida, alumina e carboneto de silício e essas se dividem em orgânicas e inorgânicas conforme representado na figura 7.

Figura 7: Classificação das fibras sintéticas.

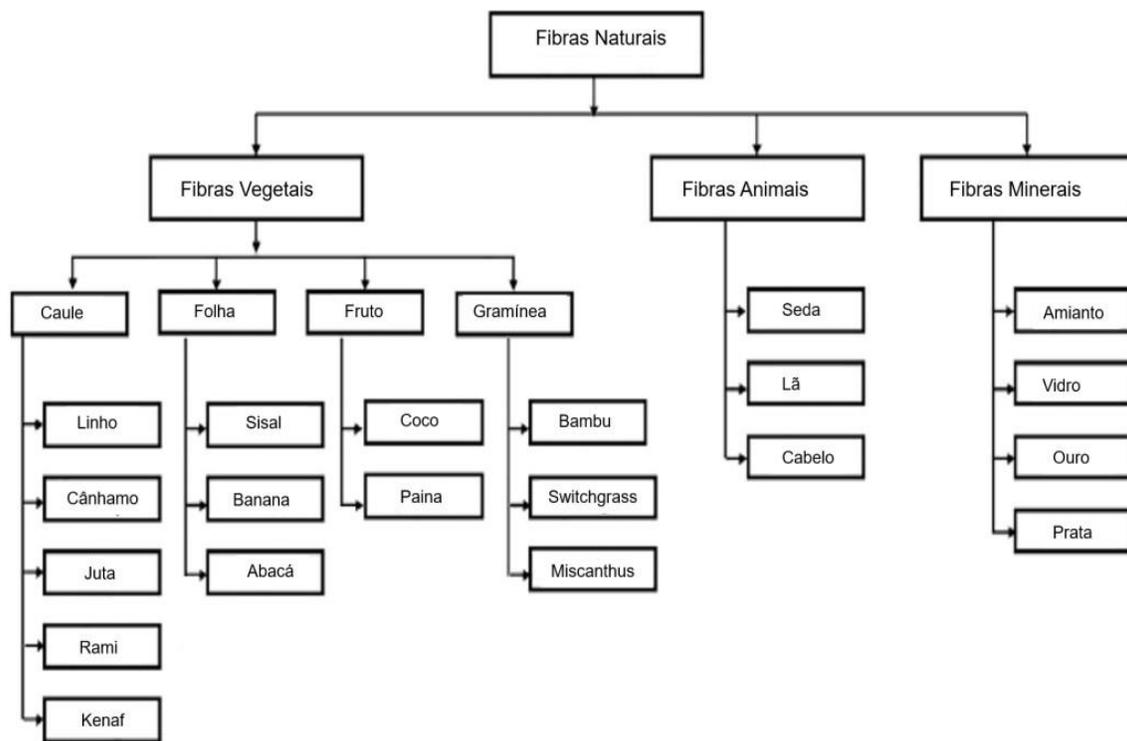


Fonte: Gomes (2015).

2.7.2 Fibras Naturais

Atualmente, devido ao grande apelo ambiental para utilização de materiais de fontes renováveis, o uso de fibras naturais em diferentes aplicações tem crescido constantemente. Essas fibras são classificadas de acordo com a fonte de extração em: vegetal, animal ou mineral (GIRALDELLI, 2020). Fibras vegetais são constituídas principalmente por celulose, hemicelulose e lignina e são fibras de grande importância comercial, que podem ser aplicadas como reforço em materiais compósitos, na construção civil e como filtro para a retenção de metais pesados. Fibras naturais são substâncias produzidas por plantas (celulose ou lignocelulose), animais (proteínas) e minerais (MUKHTAR *et al*, 2016). São encontradas em muitas fontes, a subdivisão é baseada em suas origens, como mostrado na figura 8.

Figura 8: Classificação das fibras naturais.



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

Os principais componentes das fibras lignocelulósicas (celulose, hemicelulose e lignina) dispostos em fibras em uma estrutura física complexa. Conhecimento de

cada um desses componentes e como eles estão dispostos na estrutura. As fibras são extremamente necessárias no desenvolvimento do uso de fibras como reforços de material compósito (BENIN *et al*, 2020). A maior parte das fibras naturais vegetais é originária de plantas que incluem abacá, coco, algodão, linho, cânhamo, juta, rami e sisal; estas são as fibras naturais mais comuns.

Na Tabela 3 estão descritos os dados de composição química de algumas das principais fibras lignocelulósicas utilizadas como reforço em compósitos poliméricos. Os valores foram obtidos a partir de vários estudos científicos conduzidos por diferentes pesquisadores nos últimos anos.

Tabela 3: Composição química de fibras naturais.

Fibra	Celulose (%p)	Hemicelulose(%p)	Lignina (%p)
Bagaço de cana de açúcar	55	17	25
Bambu	26-43	30	21-31
Caule de milho	43	24	17
Linho	71	19-21	2
Kenaf	72	20	9
Cânhamo	68	15	10
Juta	41-48	21-24	18-22
Óleo de palma	65	-	29
Ramos de pinheiro	32	32	21
Bolacha de arroz	35-45	19-25	20
Palha de arroz	41-57	33	8-19
Sisal	65	12	10
Palha de trigo	38-45	15-31	12-20

Fonte: Yang *et al.* (2019).

O desenvolvimento de novos materiais viu um enorme progresso tecnológico, e o uso de fibras vegetais começou a declinar. Com o advento das fibras sintéticas, o consumo de fibras vegetais caiu significativamente (YANG *et al.*, 2019). Com o passar dos anos, diversos estudos têm sido realizados para que fibras naturais sejam alternativas para substituição de fibras sintéticas (CHANDGUDE; SALUNKHE, 2020).

A utilização de matérias-primas provindas de fontes renováveis como curauá, coco, sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar, juta, abacaxi e milho como reforço em materiais poliméricos vem sendo de grande interesse em diversas pesquisas científicas e estudos devido ao seu grande potencial em substituição aos produtos sintéticos (OLIVEIRA, 2018).

As fibras lignocelulósicas tem três categorias principais de acordo com a parte da planta a partir da qual elas são extraídas (GOMES, 2015):

- Fibras do caule (juta, linho, cânhamo, rami, kenaf, etc);
- Fibras das folhas das plantas (sisal, banana, milho, etc.);
- Fibras de sementes das plantas (algodão, fibra de coco, óleo de palma, etc.);

Na Tabela 4 apresentam-se as propriedades mecânicas e físicas, de algumas fibras vegetais lignocelulósicas comumente utilizadas em compósitos encontrados na literatura técnica. Essas propriedades dependem da idade da planta, do local do cultivo, das condições climáticas e da microestrutura das fibras.

Tabela 4: Propriedades mecânicas de importantes fibras lignocelulósicas.

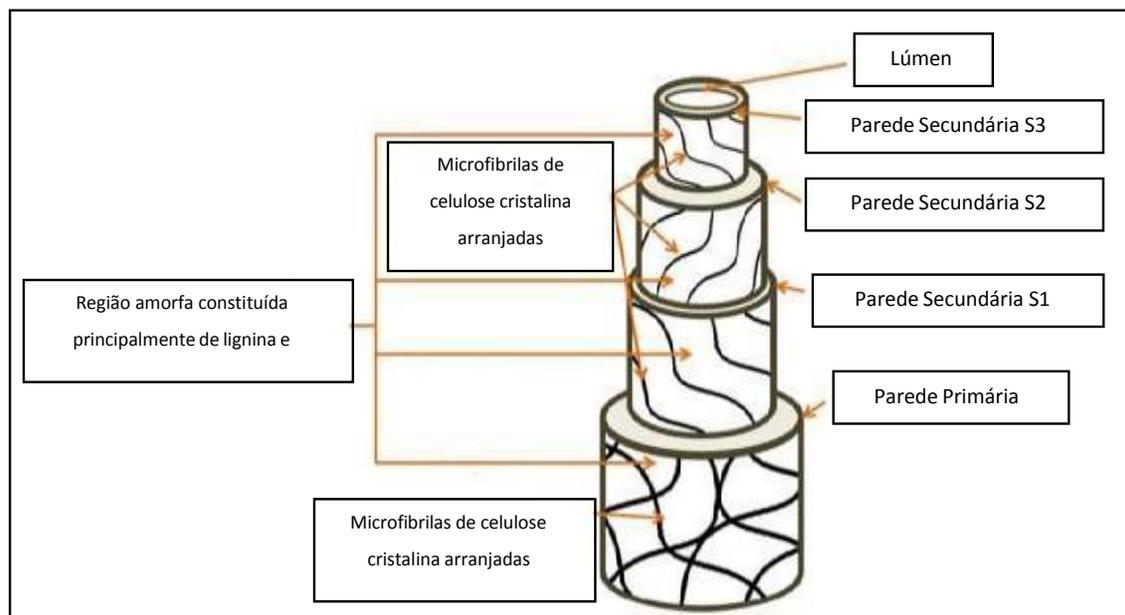
Fibra Vegetal	E (GPa) Módulo de Elasticidade	σ_T(MPa) Resistência à Tração	ϵ_R(%) Alongamento na Ruptura	ρ(g/cm³) Massa Específica
Sisal	19,5	570	4	1,45
Abacaxi	58,5	1627	2,3	1,44
Coco	22,5	200	17,5	1,37
Bagaço da cana	17	250	5,11	1,25
Bambu	36,5	450	3,22	1,5
Juta	29	300	1,7	1,03
Algodão	9,05	442	7,5	1,55
Ramie	94,7	669	3,7	1,5
Curauá	28	600	3,02	1,347
Licuri	23,87	500	2	0,54
Folha da bananeira	20	550	5,5	1,35
Piaçava	5,6	140	5	1,05
Linho	27,6	690	2,95	1,5
Bambu	25	289	3,2	1,5
Canhâmo	34	900	3,5	1,5

Fonte: Brebu (2020).

Segundo Dhaliwal (2019), as propriedades físicas, mecânicas e químicas das fibras vegetais dependem muito da colheita e são influenciadas por fatores como clima, localização, propriedades do solo, condições climáticas, idade da planta, etc. De fato, essas propriedades também são influenciadas pelo processamento e incorporação da fibra em compósitos em termos de manuseio, impregnação e consolidação.

A lignina é resistente a ácidos e pouco resistente a soluções alcalinas, esta é a responsável pela rigidez e sustentação das plantas. A hemicelulose ocorre principalmente na parede celular primária e tem polímeros ramificados de estrutura química variada. As microfibrilas de celulose ligam-se às moléculas de hemicelulose da parede celular através de ligações de hidrogênio formando assim uma rede (OLIVEIRA, 2018). A figura 9 apresenta os componentes estruturais das paredes celulares e orientações das microfibrilas numa fibra vegetal.

Figura 9: Representação estrutural de fibra vegetal.



Fonte: Gholampour; Ozbakkaloglu (2020).

Conforme Gholampour; Ozbakkaloglu (2020), as fibras lignocelulósicas apresentam características como baixo consumo de energia, baixa densidade, natureza não abrasiva, baixo custo, renovabilidade, biodegradabilidade, ampla disponibilidade e boas propriedades mecânicas. As fibras naturais oferecem algumas vantagens sobre as fibras sintéticas, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Vantagens e desvantagens das fibras vegetais.

Vantagens	Desvantagens
- Baixo peso específico resulta em uma maior resistência específica e rigidez do que o vidro;	- Menor resistência, especialmente resistência ao impacto;
- Fontes renováveis, produção necessita de pouca energia e baixa emissão de CO ₂ ;	- Qualidade varia em função do tempo;
- Processo não desgasta ferramentas e não irrita a pele;	- Baixa resistência à umidade, o que faz com que as fibras incham;
- Bom isolamento acústico e térmico;	- Temperatura máxima de processamento restrita;
- Biodegradável;	- Menor durabilidade, baixa resistência ao fogo;
- Reciclagem é possível;	- Baixa adesão fibra/matriz;

Fonte: Adaptado Gomes (2015).

A Figura 10 mostra algumas fibras cultivadas no Brasil que são utilizadas na produção de materiais compósitos, gerando rentabilidade aos produtores rurais e benefícios para a indústria.

Figura 10: Fibras brasileiras: A) Bagaço de cana-de-açúcar, B) Juta, C) Curauá, D) Bananeira, E) Carnaúba, F) Sisal, G) Coco, H) Palha de arroz, I) Palha de milho e J) Trigo.



Fonte: Calegari; Oliveira (2016).

2.8 MILHO (*Zea mays*)

O milho é uma espécie diplóide e alogênica pertencente à família Poaceae. É uma planta de curto período de vários tamanhos e variedades até 3,5 m de altura, com cachos de raízes, folhas alternas lanceoladas, caules cheios, separados por nós; geralmente uma a três espigas, inflorescências femininas emergindo das axilas das folhas, e caules na qual as extremidades são pontas de flecha, ou seja, espigas compostas de estames (LIMA, 2020). O milho é uma planta monóica e o principal tipo de polinização é a polinização anemófila, ou seja, pelo vento. É um dos cereais mais cultivados e produzidos no mundo devido a grande capacidade de adaptação às diferentes condições ambientais e ao valor nutricional, sendo destinado tanto para a alimentação humana quanto animal e também pela geração de renda, principalmente pela produção de grãos (SILVEIRA, 2015).

A alta produtividade do milho, independente da região de cultivo, é consequência do emprego de várias tecnologias como: correção e fertilização adequada do solo, plantio direto, manejo integrado de plantas invasoras, doenças e pragas, assim como da adoção de sementes de qualidade genética superior, como as geneticamente modificadas. O milho é uma das variedades com maior investimento em tecnologia. Muitas vezes, as variedades são escolhidas para lidar com a alta tecnologia que deve ser aplicada à cultura (EICHOLZ *et al.*, 2016).

Conforme Romão (2015), “a palha de milho é uma fibra natural do tipo lignocelulósica”. Os materiais lignocelulósicos são constituídos basicamente por celulose (polissacarídeo formado por unidades de monossacarídeos β -D-glucose), lignina (substância química que confere rigidez à parede das células e, nas partes da madeira, age como um agente permanente de ligação entre as células gerando uma estrutura resistente ao impacto, compressão e dobra), polioses ou hemicelulose (polímeros de baixo peso molecular formados por uma variedade de unidades de açúcar como β -D-xilose, β -D-manose, β -D-arabinose, entre outros) e constituintes menores.

Os aspectos vegetativos e reprodutivos da planta de milho podem ser modificados através da interação com os fatores ambientais que afetam o controle da ontogenia do desenvolvimento (ROMÃO, 2015).

A figura 11 mostra o fruto do milho, cultivado por produtores agrícolas de Santo Estevão Bahia, microrregião de Feira de Santana.

Figura 11: Cultivo do milho (*Zea mays*).



Fonte: Sintrafse (2023).

2.8.1 Histórico

O milho pertence à família Poaceae e é uma espécie originária da América do Norte, com centro de origem genética no México, sendo destinada ao consumo in natura para alimentação animal e humano, tendo ainda utilização industrial diversificada.

A produção global de milho foi de 957,1 milhões de toneladas na safra 2021/22, sendo a mais expressiva entre os principais cultivos agrícolas no mundo (USDA, 2022). Os Estados Unidos é o país que mais cultiva milho na agricultura mundial, com mais de 30 milhões de hectares a cada ano, seguido da China. Há estimativas que indicam que nos anos 1941-1944 os produtores de milho dos Estados Unidos tenham

colhido acima de 50 milhões de toneladas a mais, por terem utilizado híbridos em vez de variedades de polinização livre (USDA, 2022).

O milho é composto por várias espécies que se diferenciam em cor, espessura, tamanho e formato. Atualmente podemos encontrar cerca de 150 espécies de milho sendo utilizadas de várias maneiras de consumo. Atualmente, o milho e a soja brasileiros trazem índices de produtividade altos, contribuindo para a economia do país e para o agronegócio brasileiro, destacando o país como um dos maiores produtores agrícolas do mundo (SILVEIRA, 2015).

2.8.2 Cultura do Milho

O milho é considerado uma das plantas cultivadas mais antigas e uma das hortaliças superiores mais estudadas, com caracterizações genéticas mais detalhadas entre as espécies cultivadas. Suas origens têm sido estudadas extensivamente, e várias hipóteses têm sido propostas, mas as mais consistentes são aquelas que demonstram que o milho se originou do sorgo, uma gramínea sem espigas que pode hibridizar naturalmente com o milho e produzir descendentes férteis (ROMÃO, 2015).

A cultura do milho encontra-se amplamente disseminada no Brasil. Isto se deve tanto à sua multiplicidade de usos na propriedade rural quanto à tradição de cultivo desse cereal pelos agricultores brasileiros. No Brasil tem alto potencial produtivo devido às suas características fisiológicas. O plantio do milho é feito através do plantio direto respondendo bem a um cultivo mecanizado.

De acordo com o Ministério da Agricultura (2022), o principal destino da safra são as indústrias de rações para animais, sendo a menor parte destinada para o consumo interno como alimento. Cultivado em diferentes sistemas produtivos, o milho é plantado principalmente nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul. O grão é transformado em óleo, farinha, amido, margarina, xarope de glicose e flocos para cereais matinais.

Por suas características fisiológicas, a cultura do milho tem alto potencial produtivo, já tendo sido obtida produtividade superior a 16 t ha⁻¹, em concursos de produtividade de milho conduzidos por órgãos de assistência técnica e extensão rural e por empresas produtoras de sementes (CONAB, 2022). Para esta safra, a expectativa de aumento de área se confirmou, registrando 576,4 mil hectares, 16,3%

maior que na safra anterior. Esse incremento de área poderia ser mais representativo se não fosse as intempéries climáticas ocorridas no mês de fevereiro, período da janela ideal de plantio, nas principais regiões produtoras do estado.

De acordo com as estimativas do sétimo levantamento de safras divulgado pela Conab (2022), a área total destinada à cultura de milho no estado da Bahia, é de 1.415,9 hectares, configurando-se na maior área para cultura nos últimos 20 anos.

Figura 12: Plantio da Safra de milho em 2022 indicada pela Conab.



Fonte: Conab (2022).

2.9 PALHA DO MILHO

A palha de milho é um resíduo agrícola que geralmente é incinerado ou utilizado como cama nos criadouros de aves nas propriedades rurais brasileiras, sendo um material abundante, porém pouco aproveitado de forma a gerar renda, exceto quando destinado à produção do artesanato (RAMOS, 2019). Esta parte anatômica da espiga do milho representa cerca de 10% do peso da espiga seca, o que permite a estimativa de produção global, em 2022, de 16 milhões de toneladas, aproximadamente, considerando o volume de milho produzido mundialmente no

mesmo ano de 695 milhões de toneladas (FAOStat, 2022). No Brasil, este total produzido em 2022 pode ser estimado em 6 mil toneladas de palha seca, utilizando a mesma base de percentual da espiga.

As palhas do milho consistem em fibras muito macias, flexíveis, leves e resistentes. Por isso, têm sido muito usadas na arte da cestaria. A figura 13 mostra as palhas de milho secas para uso do artesanato.

Figura 13: Palhas secas produzidas da safra de milho.



Fonte: Faostat (2022).

A palha do milho é comumente usada para fazer bolsas, utensílios, móveis e objetos de decorações. Este artesanato é desenvolvido em moldes de madeira que vão moldando cada peça, permitindo a criação de múltiplas alternativas a partir desta fina fibra. A palha deve ser colhida de espigas de milho maduras em tempo seco. Deve ser armazenado em local seco e ventilado para evitar mofo e traças. Se molhar, pode desenvolver fungos e deixar manchas, tornando-o impróprio para artesanato.

“A palha de milho tem potencial econômico e ambiental para a produção de bioetanol como uma substituição da gasolina e, portanto, fornece um substituto para o combustível fóssil” (ABIB, 2022).

2.10 ANATOMIA DA PALHA DO MILHO

O Brasil destaca-se como o terceiro maior produtor de milho (47,8 milhões de toneladas), ficando atrás da China (114,2 milhões) e dos E.U.A. (256,9 milhões). As toneladas de palhas de milho que são produzidas, também são descartadas (FIESP,2019). Levando-se em conta este potencial de aproveitamento e a disponibilidade dos resíduos agrícolas, tem-se o objetivo de caracterização da palha de milho com interesse na quantificação do teor de celulose existente para utilizá-la no preparo de compósito.

A Tabela 6 apresenta os valores totais, médios, desvios padrões e as interações dimensionais referentes aos valores mensurados em cada uma das dimensões de interesse das fibras de palha de milho, explicando o comportamento ou qualidade esperada da polpa produzida com as fibras.

Tabela 6: Tabela anatômica e interações dimensionais de fibras da palha do milho (*Zea mays L.*) in natura.

PALHA DE MILHO IN NATURA				
	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
Comprimento (mm)	3,411	0,857	1,790	0,575
Largura (µm)	68,058	19,089	40,701	11,637
Diâmetro do Lume (µm)	45,653	8,944	21,314	8,496
Espessura da Parede (µm)	18,980	4,574	9,693	2,481
Fração parede (%)	68,071	29,965	48,869	8,821
Coef. de flexibilidade (%)	70,035	31,929	51,131	8,821
Índice de Runkel	2,132	0,428	1,017	0,366

Fonte: Romão (2015).

2.10.1 Composição química

A composição química da matéria prima é um parâmetro de grande importância para os processos de polpação. Os teores de holocelulose estão relacionados ao rendimento do processo, enquanto que os teores de lignina e extrativos totais, que são considerados constituintes indesejáveis durante o processo de produção de celulose, se relacionam com a quantidade de sólidos gerados e a demanda de carga alcalina para se atingir determinados níveis de deslignificação (COSTA, 2011).

A composição química da palha de milho são encontrados na Tabela 7:

Tabela 7: Composição química da palha do milho.

	Extrativos Totais	Lignina Insolúvel	Lignina Solúvel	Lignina Total	Holocelulose	Cinzas
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Média	17,22	9,41	3,36	12,77	69,37	0,64

Fonte: Romão (2015).

2.11 FIBRAS DA PALHA DO MILHO

As fibras das palhas do milho consistem em fibras muito macias, flexíveis, leves e resistentes. Moreira; Seo (2016), demonstra as densidades de algumas fibras vegetais, apropriadas para utilização em compósitos poliméricos descritas na tabela 8, comparando-se com as fibras de milho, observa-se que há semelhança entre elas.

As fibras da palha do milho são classificadas como curta - longa, ficando entre as folhosas e coníferas. A densidade da fibra da palha de milho foi de 1,36 g/cm³ conforme mostrado na tabela 8.

Tabela 8: Densidade de fibras vegetais para comparação.

Tipo de fibra	Densidade (g/cm³)
Estigma do milho (cabelo)	1,46
Palha do milho	1,36
Curauá	1,10
Algodão	1,50
Juta	1,30
Linho	1,50
Sisal	1,50

Fonte: Adaptado de Moreira; Seo (2016).

2.12 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As características presentes nos compósitos reforçado com fibras naturais vegetais como a fibra da palha do milho temos: Resistência à tração específica, módulo de elasticidade específico, estabilidade térmica, alta rigidez, baixa ou alta taxa de transferência de calor, condutividade (ou não) elétrica, resistência à corrosão, facilidade de forma na fabricação, reduzida manutenção, além de serem biodegradáveis. Outros fatores que contribuem para essa crescente utilização são de ordens estética, funcional dentre outros (MENEZES, 2018).

As propriedades mecânicas do compósito podem ser consideradas entre as propriedades da matriz, da fibra e das interfaces fibra/matriz e estão diretamente ligadas à sua avaliação de desempenho segundo os seguintes parâmetros (LEITE, 2022).

- característica dos materiais componentes fibra e matriz;
- geometria das fibras, seção transversal e comprimento;
- arranjo das fibras;
- proporção entre materiais ou fração volumétricas dos componentes.
- características das interfaces dos materiais.

Dentre as propriedades mecânicas de maior interesse no comportamento dos compósitos analisados neste estudo estão as de resistência à tração e flexão, bem como as constantes elásticas, obtidas por ensaios mecânicos de tração e flexão em três pontos. Na maioria dos casos, peças ou produtos são projetados para estados elásticos, portanto, este estudo será baseado no comportamento elástico de materiais compósitos reforçados com fibras vegetais da palha do milho.

2.12.1 Resistência à Tração

Este ensaio tem como objetivo levantar as características mecânicas do material, bem como observar a resistência à tração (RT), a deformação máxima e o módulo de elasticidade (MOET), dureza e a tenacidade do material. Estas características estão compreendidas no ensaio de tração onde são aplicadas uma força longitudinal nas extremidades do corpo de prova até o mesmo realizar a sua ruptura, segundo Callister (2021). Para realização destes dados são calculados por meio das equações 1,2 e 3.

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{S_0} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Onde:

σ = Limite de resistência;

F_{\max} = Tensão máxima aplicada;

S_0 = Área inicial.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (GPa)} \quad (2)$$

Onde:

E = é o MOE ou módulo de Young em MPa ou N mm^{-2} ;

σ = Tensão aplicada medida em pascal ou N m^{-2} ,

ε = Deformação elástica longitudinal do corpo de prova (adimensional).

Por sua vez, a deformação do corpo de prova é caracterizada pelo alongamento relativo, isto é, o comprimento final do corpo de prova em relação ao seu comprimento inicial. Deste modo, a equação 3 representa a deformação.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

Onde:

ε = deformação;

Δl = é variação do comprimento do CP;

l_0 = comprimento inicial do CP.

2.12.2 Resistência à Flexão

O ensaio de flexão em três pontos ocorre por meio da aplicação de uma força na região perpendicular ao eixo do corpo e uma outra força aplicada paralela à força atuante. Em resumo, este ensaio consiste em aplicar uma carga crescente em determinados pontos específicos em um corpo de prova, onde o valor desta força inicial é igual a zero, e gradativamente vai aumentando levemente até provocar a ruptura no corpo de prova, de acordo com Callister (2021).

A rigidez de flexão é um critério de medição de deformabilidade. A rigidez à flexão de uma estrutura é uma função baseada em duas propriedades essenciais: o primeiro é o módulo de elasticidade do material que o compõem; e a segunda é o momento de inércia, uma função da geometria da secção transversal. Comparando as propriedades de flexão do compósito de fibra de juta/Matriz mostra que a matriz de resina com pré-impregnação da fibra produz um aumento significativo na resistência à flexão, por causa destes compostos formarem boa interface fibra-matriz (MENEZES, 2018).

As principais propriedades obtidas do ensaio de flexão são: tensão de ruptura em flexão (σ_f), módulo de elasticidade em flexão (MOEF). Os resultados podem variar com a temperatura, velocidade de aplicação da carga, defeitos superficiais e geometria da seção (CALLISTER, 2016).

Através da expressão matemática a equação (4) permite calcular a tensão máxima de flexão a qual um corpo pode ser submetido.

$$\delta = \frac{M.c}{I} \quad (4)$$

Onde:

M = Momento interno resultante máximo;

c = Distância perpendicular entre a linha neutra e o ponto de $\sigma_{máx}$;

I = Momento de inércia da área da seção transversal.

A multiplicação entre a força aplicada ao corpo e a distância entre o ponto de aplicação dela e os dois apoios, tem-se que a tensão máxima de flexão é dada pela equação (5).

$$\sigma = \frac{3pl}{2bh^2} \quad (5)$$

Onde:

σ = tensão de flexão (Mpa);

p = máxima carga aplicada (N);

l = distância entre os apoios;

b = largura do CP (mm);

h = espessura dos corpos de prova.

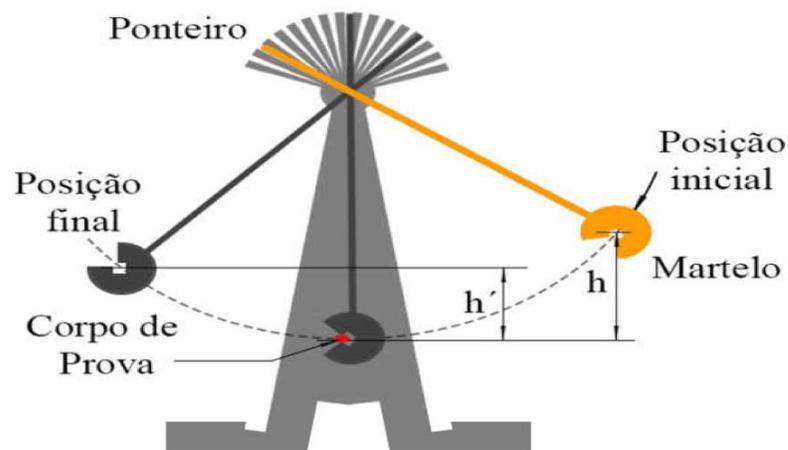
O comportamento mecânico do compósito polimérico submetido a uma tensão σ , no qual, para cada tensão σ aplicada ao compósito ele sofre uma deformação (ϵ), até que haja o rompimento do compósito. A interação fibra à matriz impede que a matriz se deforme mais que a fibra, havendo então uma deformação global do compósito.

2.12.3 Resistência ao Impacto

Consiste em um método padronizado para medida de resistência de impactos e deformação de um material medindo a taxa de destruição e o quanto esse material foi resiliente. No ensaio de impacto *Charpy*, a massa do martelo, a aceleração da gravidade e a altura inicial são conhecidas. A única variável desconhecida é a altura final, que é obtida pelo ensaio. O mostrador da máquina, simplesmente registra a diferença entre a altura inicial e a altura final, após o rompimento do corpo de prova, numa escala relacionada com a unidade de medida de energia adotada (VARELA, 2017).

De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de energia utilizada no ensaio de impacto charpy é o joule (J) e a máquina utilizada para se fazer esse ensaio é dotada de uma escala, que indica a posição do pêndulo e é calibrada de modo a indicar a energia potencial (FAGUNDES, 2018).

Figura 14: Esquema do pêndulo da máquina de Charpy.



Fonte: Júnior (2017).

2.12.4 Densidade Aparente

A densidade é estabelecida através da relação entre a massa de uma substância ou de um determinado material e o volume que por ela é ocupado, resultando assim na identificação da concentração molecular de uma determinada solução (CALLISTER, 2016). Esta relação é apresentada através da equação (6).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

Onde:

ρ = densidade aparente (g/cm³);

m = massa (g);

v = volume (cm³).

A densidade aparente é projetada para indicar o peso da peça em estudo e para definir as dimensões de uma peça que será fabricada em tamanho real em uma aplicação de projeto. Além disso, a densidade pode identificar a cristalinidade de um material.

2.12.5 Absorção de Água

A absorção de água ocorre por meio da difusão ativa, onde consistem na capacidade física de um determinado corpo absorver líquidos por meio do contato direto. A penetração da água pode ocorrer de forma gradiente, quando esse corpo é submergido em meio aquoso (JUNIOR, 2017). Para determinar o grau de absorção de umidade de um determinado material, dá-se relação matemática expressa, para isso é estabelecido o quociente entre a massa de água absorvida e a massa do material antes da imersão, subtraído de uma unidade. Para obter este valor em porcentagem é necessário multiplicar o resultado por cem (100), conforme a equação (7).

$$AA\% = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

AA%=Absorção de água;

m_s = Massa inicial ;

m_u = Massa final do material;

2.12.6 Envelhecimento (Degradação)

Em compósitos poliméricos, a degradação pode ocorrer como um todo ou apenas em uma parte dele, como a matriz ou o reforço. Para analisar o desgaste dos materiais compósitos em uso, são realizados ensaios de envelhecimento, que podem ser envelhecimento natural ou envelhecimento acelerado (VARELA, 2017).

Segundo Callister (2016), é importante ressaltar que o processo de degradação envolve fenômenos físicos e químicos; e a partir desses, ocorre uma perda de integridade estrutural do material.

2.13 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

De acordo a norma ASTM D3418 (2021), o ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC), por meio da curva de DSC é possível obter temperaturas de transição dos polímeros como as de fusão (endotérmica), cristalização (exotérmica) e transição vítrea (mudança de linha base), e ainda o calor específico, entalpia de fusão, cinética de reação e estabilidade.

A Calorimetria Exploratória Diferencial determina a temperatura e o fluxo de calor de transições nos materiais, em função do tempo e temperatura de um forno. Nessa análise é possível obter temperaturas de transição dos polímeros como de fusão (endotérmica), cristalização (exotérmica) e transição vítrea (mudança de linha de base), e além de conseguir medir o calor específico, entalpia de fusão, cinética de reação e estabilidade (KUHL, 2021).

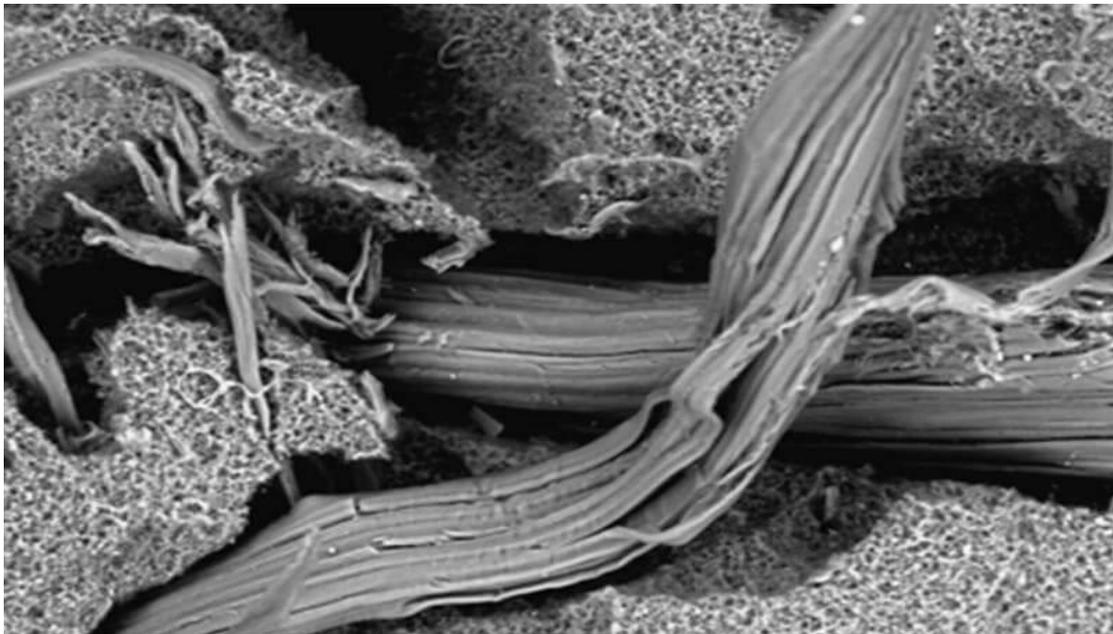
2.14 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A principal função do microscópio é tornar visível ao olho humano estruturas, organismos e superfícies com dimensões microscópicas. Os microscópios podem ser do tipo óptico e eletrônico. Trata-se de um tipo de microscópio utilizado para a caracterização e análise da microestrutura de amostras, podendo ser empregado em diversos campos do conhecimento, pois, além de gerar imagens com aspecto tridimensional e com alta resolução, fornece informações sobre a natureza química do

material, além de permitir a identificação da estrutura, da morfologia, dos elementos químicos e da topografia da superfície da amostra (HENRIQUES, 2019).

O princípio de funcionamento do ensaio tem a ver com a forma como os elétrons interagem com a matéria. Os microscópios eletrônicos de varredura contêm uma fonte que produz um feixe de elétrons que é continuamente disparado sobre uma amostra durante o teste, realizando uma varredura sobre sua superfície (SANTOS, 2022). Assim, com os detectores do aparelho, é possível analisar as energias dos elétrons durante sua interação com a superfície, que são interpretadas pelo aparelho e geram imagens de alta definição como mostra a figura 15.

Figura 15: Imagem de uma fratura de uma fibra obtida pelo MEV.



Fonte: Afinko (2020).

O MEV é uma ferramenta para o estudo do mecanismo de dano, identifica a interação e adesão entre a fibra e matriz. Os mecanismos de danos são: *Fissura na matriz* – são fissuras que ocorrem apenas na matriz do compósito; *Ruptura da fibra* – corresponde a quebra da fibra é conhecida como fratura coesiva; *Desaderência fibra matriz*: ocorrida pela falta de aderência entre fibra e matriz (GOMES 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Apresentam-se os materiais e métodos utilizados para obtenção e caracterização mecânica, física e térmica do compósito de matriz epóxi e carga de fibra da palha do milho.

Todo o desenvolvimento do projeto foi realizado nos laboratórios de ensaios mecânicos, ensaios metalográficos e de materiais não metálicos do IFBA - Unidade de Ensino de Simões Filho e no laboratório de caracterização de materiais da unidade de Salvador

3.1 PREPARAÇÃO DAS FIBRAS DA PALHA DE MILHO

As palhas do milho foram retiradas das espigas, adquiridas e colhidas de um material descartado das lavouras de cooperativa rural situada na região agrícola de Santo Estevão na Bahia, de forma manual, e com auxílio de uma tesoura foram seccionadas em tamanho padrão de 100 a 160mm. As fibras foram desfiadas utilizando-se uma escova de aço em um processo manual; e foram colocadas em exposição solar para uma pré-secagem de aproximadamente 2 dias.

Figura 16: Processo manual de corte, desfição e exposição solar das fibras.



Fonte: Autor (2023).

3.1.1 Tratamento das Fibras

Com base na revisão da literatura, as fibras naturais têm sido submetidas a algum tipo de tratamento com a finalidade de obter melhor adesão entre a matriz e a fibra. Após a secagem as fibras foram adicionadas em um recipiente de vidro, e imersas em uma solução de carbonato de sódio (Na_2CO_3), produto conhecido no mercado como barrilha. A barrilha tem como aplicação equilibrar o pH da água de piscinas, na fabricação de sabão e detergentes e limpeza de fibras têxteis. Portanto, diluindo-se uma maior concentração do produto obtém-se um meio alcalino. Preparada uma solução contendo 100 gramas de barrilha em um litro de água. Mergulharam-se as fibras nessa solução por um período de 12 horas, visando causar inchaço nas fibras e a remoção parcial dos extrativos, lignina, e ceras impregnadas na superfície celulósica das fibras para uma melhor adesão na interface.

Figura 17: Tratamento alcalino das fibras com barrilha.



Fonte: Autor (2023).

Tratamento das fibras com água fervente por 30 minutos, realizado para eliminar ceras em torno das fibras com a finalidade de melhorar a adesão da interface fibra/matriz, figura 18 (a).

As fibras foram lavadas repetidas vezes com água corrente e friccionadas em uma peneira para limpeza e remoção do excesso de resíduos aderidos na fibra. Após a lavagem, a secagem das fibras por exposição ao sol por 24 horas, deu-se em aberto ao ar livre como processo de desumidificação natural. Após a secagem solar, as fibras

foram levadas a uma estufa de circulação de ar a uma temperatura de 50° Celsius por 8 horas para secagem figura 18 (b). As fibras secas foram armazenadas juntamente com sílica-gel em recipientes plásticos, hermeticamente fechadas a fim de mantê-las totalmente secas até o dia que foram utilizados para confecção dos compósitos.

Figura 18: (a) Limpeza das fibras com água fervente. (b) Secagem na estufa.



(a)

(b)

Fonte: Autor (2023).

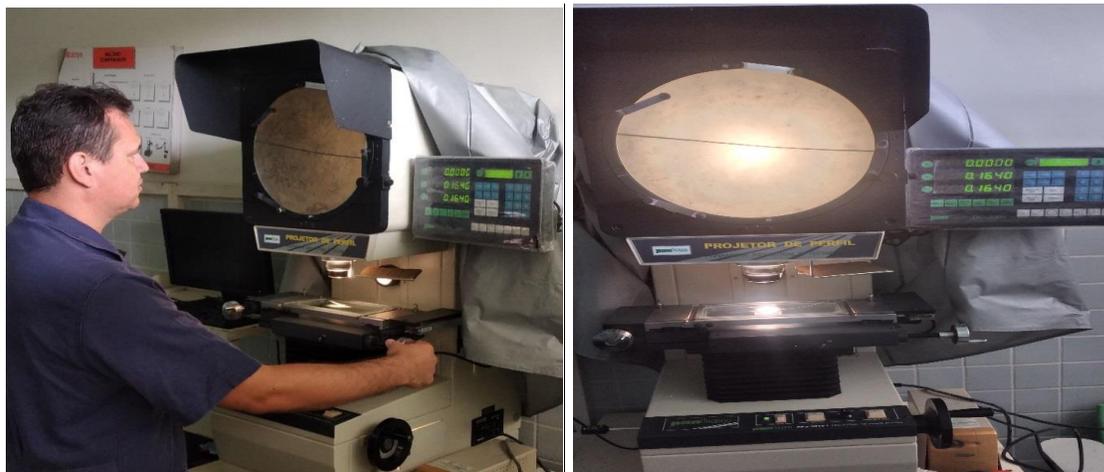
3.1.2 Caracterização Dimensional das Fibras

Retirou-se, aleatoriamente, 20 fios de fibras da palha do milho e realizou-se a caracterização dimensional (comprimento e diâmetro).

A determinação do comprimento médio das fibras foi feita utilizando uma régua graduada de metal. As fibras foram seccionadas em tamanho padrão de 100 a 160mm.

O diâmetro médio das fibras foi feito com auxílio de um Projetor de Perfil da marca Pantec pertencente ao Laboratório de Metrologia do IFBA *campus* Simões Filho, com um aumento de 50 vezes. O diâmetro médio da fibra da palha de milho foi obtido de forma aleatória com 20 (vinte) fibras e nelas foram feitas três medidas ao longo do comprimento de cada fibra, 2 nas extremidades e 1 no centro da fibra para verificação de variação dos diâmetros. A figura 19 mostra o ensaio realizado para caracterização dimensional das fibras.

Figura 19: Projetor de Perfil Pantec DC-3000, medição do diâmetro das fibras.



Fonte: Autor (2023).

3.1.3 Ensaio de Tração das Fibras

O ensaio de tração conforme figura 20, foi realizado nas fibras sem tratamento e nas fibras tratadas de acordo com a norma ASTM 3822 (2014). O ensaio foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos do Instituto Federal da Bahia (IFBA) do *campus* Simões Filho, utilizando-se uma máquina universal de ensaios da Time Group, modelo WDW-20E com uma velocidade de 2mm/min. Para cada caso, 10 fibras foram testadas com a distância entre garras de 100mm. Foram determinada a resistência à tração e módulo de elasticidade das fibras tracionadas.

Figura 20: Tração da fibra na máquina de ensaio.

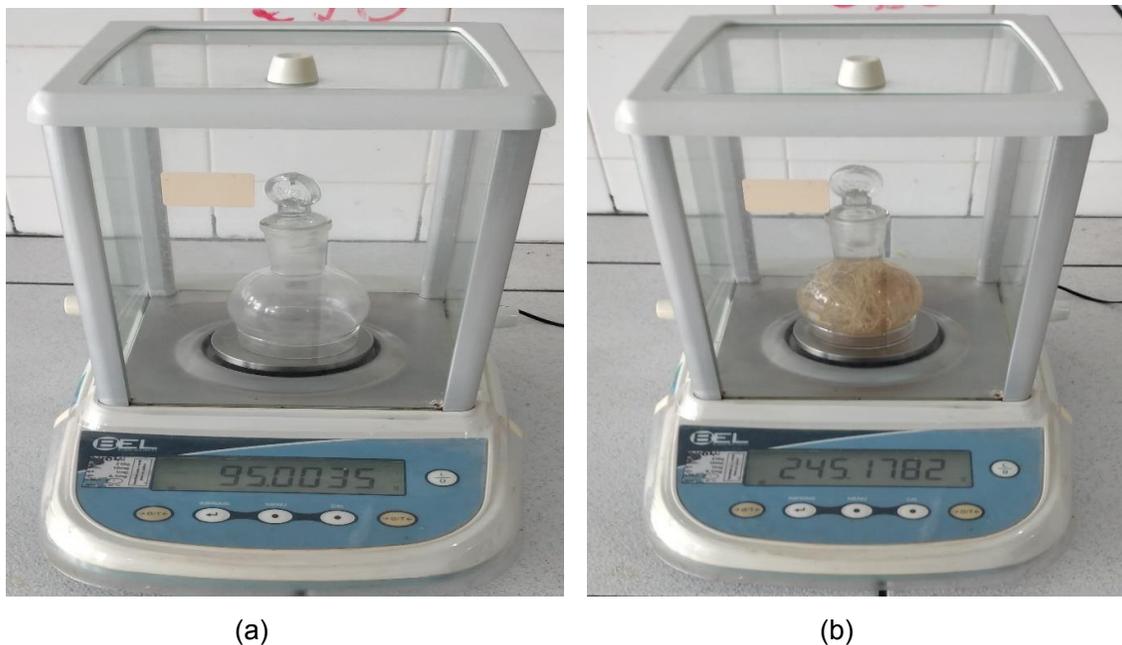


Fonte: Autor (2023).

3.1.4 Determinação da Densidade da Fibra

Para determinação da densidade das fibras da palha do milho, foram avaliadas as fibras tratadas com a barrilha (Figura 17). A determinação da densidade da fibra baseou-se no princípio de Arquimedes e na norma ASTM D792 (2020). As fibras secas tratadas, foram inseridas no picnômetro e depois submersas em água destilada a 25°C, figura 21 (a). A massa foi determinada com auxílio de uma balança analítica da marca BEL modelo M 214 Ai, figura 21 (b).

Figura 21: (a) Balança analítica. (b) Fibras submersas em água destilada no picnômetro.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com os valores obtidos de massa e volume no picnômetro, foi possível calcular a densidade da fibra, de acordo com a equação 8.

$$\rho = \frac{mb - ma}{(md - ma) - (mc - mb)} \quad (8)$$

ρ = Densidade da fibra (g/cm^3);

m_a = Massa do picnômetro (g);

m_b = Massa do picnômetro + amostra (g);

m_c = Massa do picnômetro + amostra + água (g);

m_d = Massa do picnômetro + água (g).

3.1.5 Morfologia da Fibra

A morfologia das fibras foi observada em microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o microscópio TESCAN, modelo LMU-Vega 3 figura 22 (a), localizado no laboratório de caracterização de materiais do IFBA *campus* Salvador, a fim de verificar o efeito do tratamento com a barrilha na superfície da fibra da palha de milho.

Nesta análise uma pequena amostra de fibra da palha do milho foi fixada, de forma transversal e longitudinal, em um suporte metálico e metalizada com ouro, com o metalizador da Quorum modelo Q150R, para que a análise estrutural das fibras e suas características individuais fossem feitas, conforme a figura 22 (b).

Figura 22: (a) Microscópio eletrônico de varredura (MEV). (b) Metalizador de ouro.



(a)



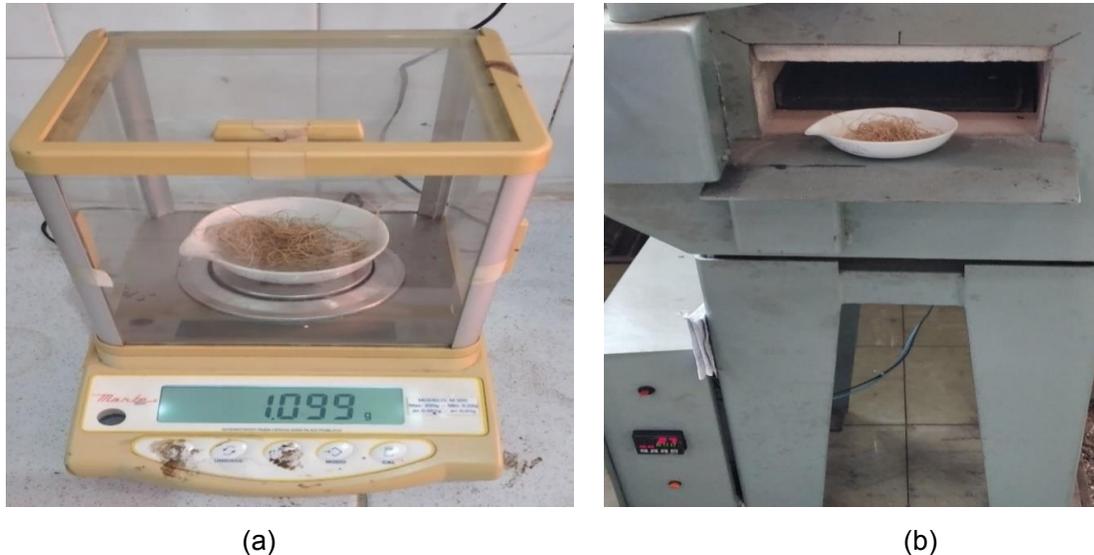
(b)

Fonte: Autor (2023).

3.1.6 Determinação do Teor de Cinzas

Pesou-se na balança analítica da marca Marte Slim modelo M200 figura 23 (a), cerca de $1,0\text{g} \pm 0,1\text{mg}$ da amostra de fibras secas em um cadinho de porcelana e foram colocados no forno Mufla para serem calcinados até a mesma atingir a temperatura de 600°C , figura 23 (b).

Figura 23: (a) Amostras pesadas na balança. (b) Cadinho colocado no forno MUFLA.



Fonte: Autor (2023).

O material foi carbonizado por 1 hora com taxa de aquecimento à $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$. O cadinho ficou por 24 horas e retirado após forno atingir 40°C , posteriormente colocado para resfriar em um dessecador e depois pesado, obtendo-se a massa das cinzas, figura 24 (a) e (b). Por diferença de massa o teor de cinzas foi determinado conforme equação 9:

$$\text{Cinzas \%} = \frac{m_c}{m_f} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

% = Porcentagem das cinzas;

m_c = Massa das cinzas (g);

m_f = Massa da fibra seca (g).

Figura 24: (a) Massas de cinzas esfriando no dessecador. (b) Massas de cinzas pesadas.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2023).

3.2 PREPARAÇÃO DO COMPÓSITO

Para confecção dos corpos de provas, foi adotado padrões no processo de obtenção, dimensões, caracterização e tipos de ensaios físicos, químicos e mecânicos já utilizados em trabalhos anteriores, com desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra vegetal.

A fase de fabricação das placas do compósito, consistiu no método de *hand lay-up*, onde a superfície do molde foi preparado com aplicação de uma cera desmoldante a base de carnaúba e álcool desmoldante, no qual é colocada uma manta de fibras da palha do milho, em torno de 100 à 160mm, laminadas com a resina epoxi e um endurecedor para acelerar a cura da matriz.

3.2.1 Resina epóxi e endurecedor

Neste estudo foi utilizada resina epóxi do tipo DGEBA de marca Araldite GY 260, fabricada pela Centerglass Indústria Comércio Resinas e Fibras Ltda. Esta resina é líquida, não modificada, de alta viscosidade, formulada a base de Bisfenol A, sendo que as suas especificações são fornecidas através da Tabela 9, a seguir:

Tabela 9: Especificações da resina epóxi do tipo DGEBA ARALDITE GY-260.

PROPRIEDADES	UNIDADES	RESULTADOS
VISCOSIDADE a 25°C	mPa	12.000 – 16.000
TEOR DE EPÓXI	Eq/kg	5,10 – 5,40
COR	Gardner	≤ 3
DENSIDADE	g/cm ³	1,20

Fonte: Fabricante (2023).

O endurecedor utilizado é a amina cicloalifática Aradur 2963 para cura a frio, é livre de fenol e baixa viscosidade, as especificações encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10: Especificações do endurecedor amínico cicloalifático ARALDUR 2963.

PROPRIEDADES	UNIDADES	RESULTADOS
VISCOSIDADE a 25°C	mPa	100 – 300
EQUIVALENTE ativo h+	g/Eq	94
COR	Gardner	≤ 4
DENSIDADE	g/cm ³	1,05

Fonte: Fabricante (2023).

A figura 25 mostra a resina epóxi e o endurecedor, utilizados na fabricação das placas.

Figura 25: Resina epóxi GY-260 e endurecedor ARADUR 2963.

Fonte: Autor (2023).

3.2.2 Desmoldante

O desmoldante utilizado na matriz utilizada para retirar as placas dos compósitos fabricados foi a cera de carnaúba e o álcool desmoldante, utilizados como facilitador para remover a placa do compósito e melhorar o acabamento superficial das amostras.

Foram necessárias duas passagens da cera de carnaúba e uma demão de álcool desmoldante para evitar dificuldades durante a desmoldagem das placas de compósito quando retiradas da matriz. Com a aplicação do desmoldante era verificado uma redução do tempo de lixamento por evitar a presença de rebarbas e facilidade de retirada da placa da matriz. A figura 26 mostra os desmoldantes utilizados.

Figura 26: (a) Cera de carnaúba. (b) Álcool desmoldante.



(a)

(b)

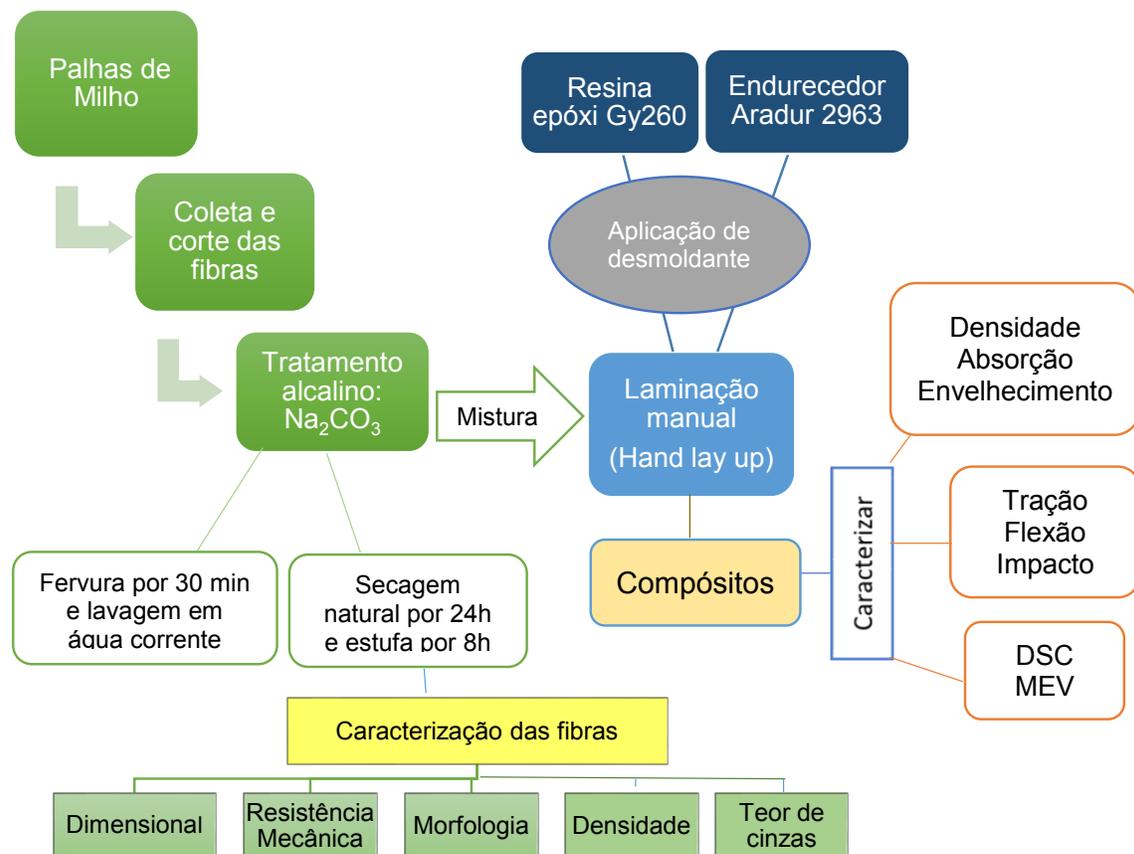
Fonte: Autor (2023).

3.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO

São apresentados os procedimentos experimentais usados na fabricação dos compósitos, os materiais utilizados e os métodos de fabricação e análise empregados.

O fluxograma da figura 27 sintetiza os procedimentos utilizados para obtenção e caracterização do compósito.

Figura 27: Fluxograma de obtenção do compósito.



Fonte: Autor (2023).

Na produção dos compósitos, foram utilizados basicamente os materiais e equipamentos apresentados na figura 28.

Figura 28: Seleção de materiais e equipamentos na fabricação do compósito.



Fonte: Autor (2023).

Primeiro, a massa de fibra foi pesada e calculada com base nos percentuais volumétricos para definição do volume de matriz e carga para esses compósitos. A conversão de massa para volume entre os constituintes pode ser realizada utilizando suas densidades através da equação 10.

$$\rho_f = \frac{m_f}{v_f} \quad (10)$$

Sendo ρ_f a densidade da fibra, m_f a massa total da fibra e v_f o volume total da fibra.

Figura 29: (a) Massa de fibras sendo pesada. (b) Aplicação do desmoldante.



Fonte: Autor (2023).

A aplicação do desmoldante é essencial, pois ele facilita a remoção do compósito curado de dentro do molde, garantindo integridade à placa do compósito. A aplicação do desmoldante é feita em três demãos intercaladas por 30 minutos. Com auxílio de um pincel, o desmoldante é espalhado pelo molde.

A fabricação do compósito com as fibras da palha de milho, teve como princípio o cuidado de distribuir bem as fibras dentro do limite do molde com o objetivo de alcançar a melhor homogeneidade possível.

Definir as proporções utilizadas nas composições dos compósitos permitiu

estabelecer suas formulações, assim como definir os quantitativos mais viáveis para desenvolver e confeccionar um compósito reforçado com fibras. Sendo assim, foram determinadas as proporções de massa de fibras para produção das placas desse compósito, com as formulações de 5, 10 e 20% da massa de fibras, e 95, 90 e 80% do volume da matriz epóxi, conforme apresentados na tabela 11.

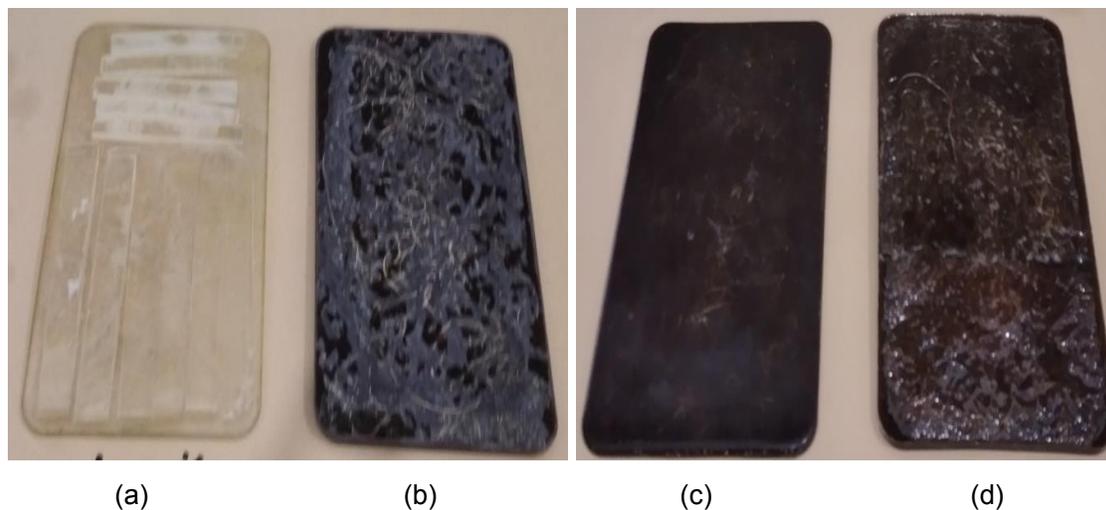
Tabela 11: Compósitos formulados com resina epóxi.

Compósitos Formulados	Quantidade de Fibras (% massa)	Quantidade de Resina epóxi (% massa)	Massa total do Compósitos (g)
CP 0	0	100	400
CP 5	5	95	400
CP 10	10	90	400
CP 20	20	80	400

Fonte: Autor (2023).

Conforme mostra a figura 30, após o processo de laminação e cura, retira-se a placa de compósito do molde com dimensões de (300 x 200 x 10mm).

Figura 30: Placas de compósitos. (a) CP0. (b) CP5. (c) CP10. (d) CP20.



Fonte: Autor (2023).

O passo seguinte foi a marcação e corte dos corpos de prova de acordo com

as normas dos respectivos ensaios a serem realizados, numa máquina de serra fita modelo Beccaro L2.34, figura 31, localizado no laboratório de materiais não metálicos do IFBA *campus* Simões Filho.

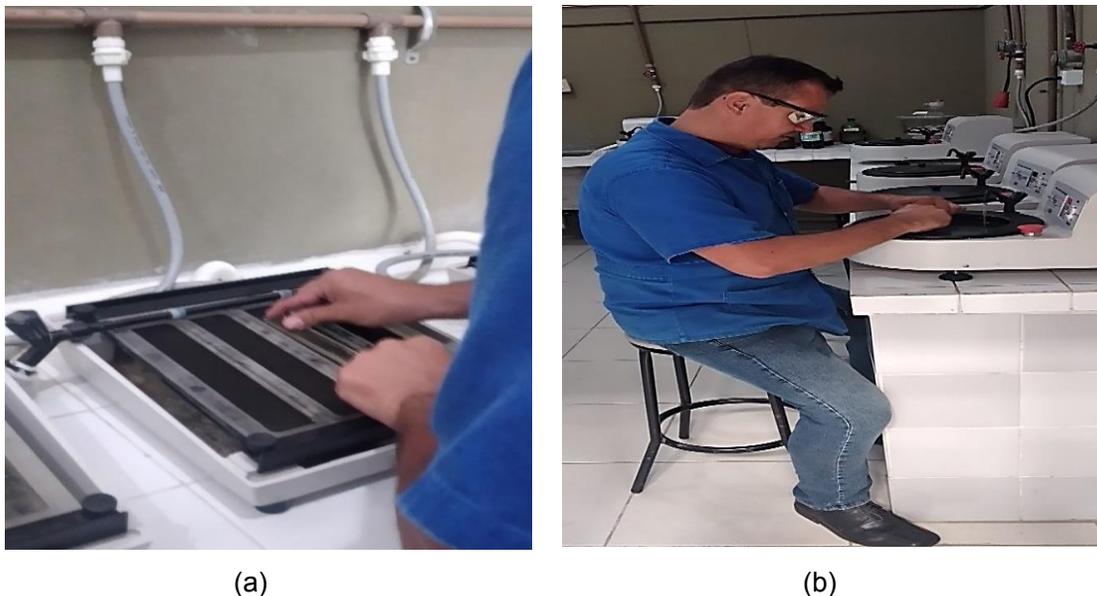
Figura 31: Processo de corte dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2023).

Por fim os corpos de prova resultantes do processo de corte eram submetidos às etapas de lixamentos e polimento, de acordo as técnicas metalográficas conforme mostrado na figura 32. Foram usadas respectivamente as lixas d'água 220, 400, 600 e 1000 *mesh* e o pano de polimento metalográfico.

Figura 32: (a) Lixamento manual. (b) Lixamento mecânico.



(a)

(b)

Fonte: Autor (2023).

3.4 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

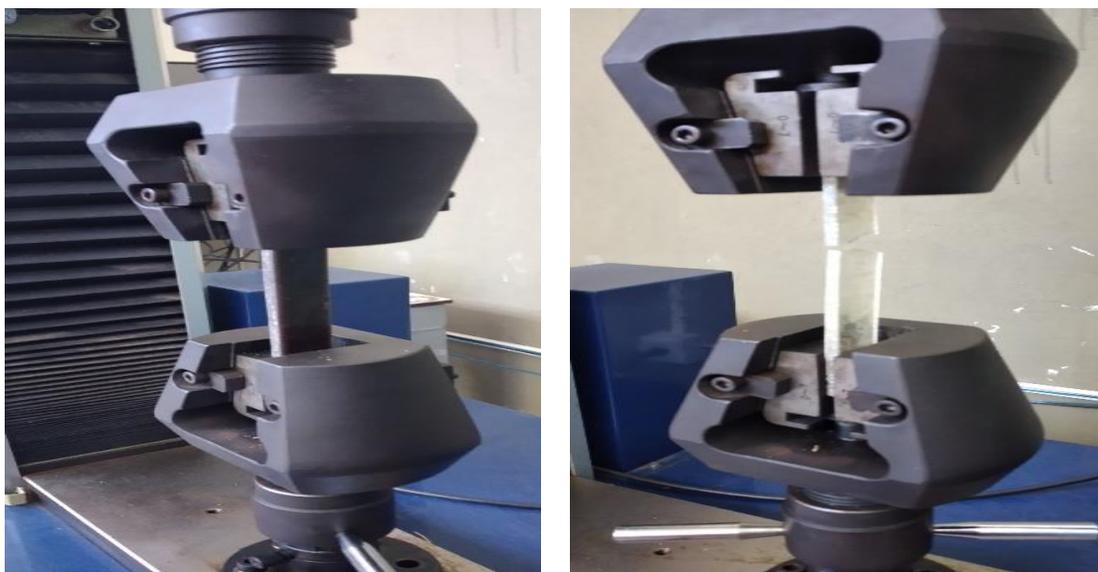
Com o objetivo de caracterizar os compósitos pesquisados, realizou-se uma série de ensaios físicos, químicos e mecânicos para determinar as características das formulações fabricadas para esse material.

3.4.1 Ensaio de Tração uniaxial

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios do IFBA *campus* Simões Filho, as placas foram cortadas para a obtenção dos corpos de prova com dimensões de 165 x 19 x 6mm seguindo a norma ASTM D 638 (2014).

Foram 5 corpos de provas para cada formulação do compósitos e testadas na máquina de ensaio universal da *Time Group* WDW-20E, com capacidade de 20 KN, e uma velocidade de 2,0mm/min e comprimento útil de 105mm conforme figura 33.

Figura 33: Ensaio de tração na Máquina de 20 KN.



Fonte: Autor (2023).

Durante a realização do ensaio, os corpos de prova são ajustados nas garras, a fim de evitar problemas de deslizamento dos mesmo no momento do carregamento inicial da célula de carga.

3.4.2 Ensaio de Flexão em três pontos

Para verificar as propriedades flexivas dos compósitos, como resistência a flexão e módulo de elasticidade, foi realizado o ensaio de flexão em três pontos. Para isso, o ensaio foi realizado na mesma máquina do ensaio de tração seguindo a norma ASTM D790 (2017), com 5 corpos de provas para cada formulação, nas dimensões 125 x 12,7 x 6mm, conforme mostrado na figura 34.

Figura 34: Corpos de provas para ensaio de flexão.



Fonte: Autor (2023).

Neste ensaio, os corpos de prova foram flexionados a uma velocidade de 2,0mm/min, vão de 80mm defletidos até a ocorrência de ruptura na superfície superior ao carregamento do cutelo, figura 35 (a).

Figura 35: (a) Ensaio de Flexão do CP. (b) Máquina com software de ensaio.



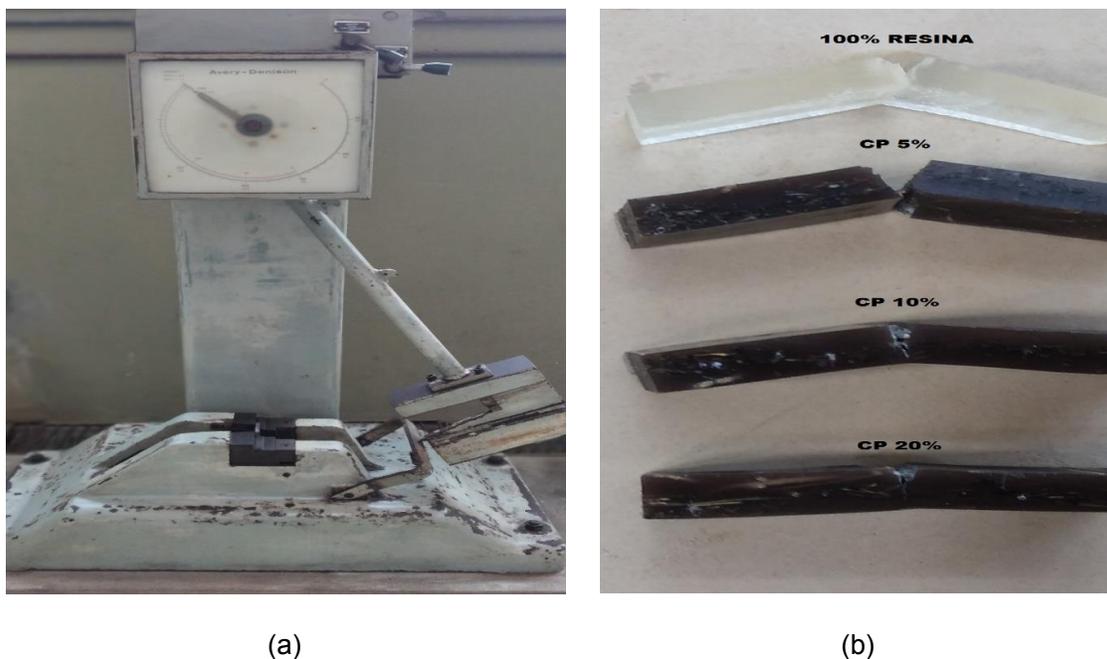
Fonte: Autor (2023).

Os dados referentes ao ensaio de flexão do corpo em análise, são registrados no software de máquina de ensaio universal, figura 35 (b), sendo esses dados que descrevem as características dos compósitos quanto a resistência à flexão, tração, módulo de elasticidade e deformação até a quebra.

3.4.3 Ensaio de Impacto Charpy

Para o ensaio de impacto *Charpy*, foi utilizado a norma ASTM D6110 (2010), utilizando um equipamento conhecido como máquina com pêndulo analógico da *Avery-Denison* de 300J, conforme figura 36 (a). Foram confeccionados 5 corpos de prova para cada formulação do compósito nas dimensões 125 x 10 x 10mm com entalhe de 2mm e 45° de angulação e raio de 0,25mm, figura 36 (b). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do IFBA *campus* Simões Filho.

Figura 36: (a) Máquina para ensaio de impacto. (b) Corpos de provas ensaiados.



Fonte: Autor (2023).

3.4.4 Densidade Aparente

Para a determinação da densidade aparente do material compósito investigado, foram utilizados 5 corpos de prova para cada formulação do volume de fibras de acordo a norma ASTM D792 (2020), com dimensões de 25 x 25 x 7mm, utilizando-se um paquímetro para aferição das medidas, conforme figura 37 (a).

Com base na massa do corpo de prova pesada na balança analítica da marca BEL modelo M 214 AI, com precisão de 0,01mg mostrado na figura 37 (b), e das dimensões desse corpo de prova, foram calculados o volume a partir da equação (11), e determinar a densidade aparente de acordo a equação (12).

$$v = L1 \times L2 \times h \quad (11)$$

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (12)$$

Onde:

L1 e L2 = Dimensões dos lados do corpo de prova (mm);

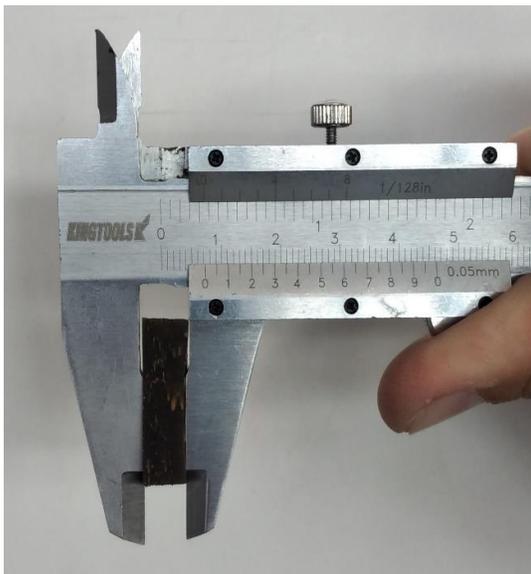
h = Espessura do corpo de prova;

ρ = Densidade aparente (g/cm^3);

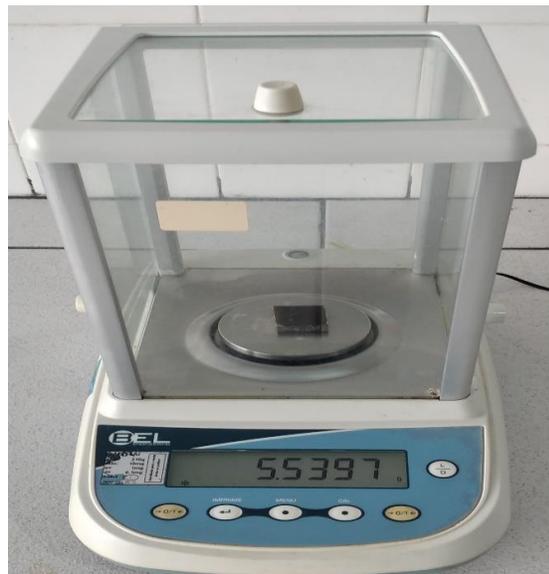
m = Massa (g);

v = volume (cm^3).

Figura 37: (a) Aferição do corpo de prova com paquímetro. (b) Massa do corpo de prova pesada em balança analítica.



(a)



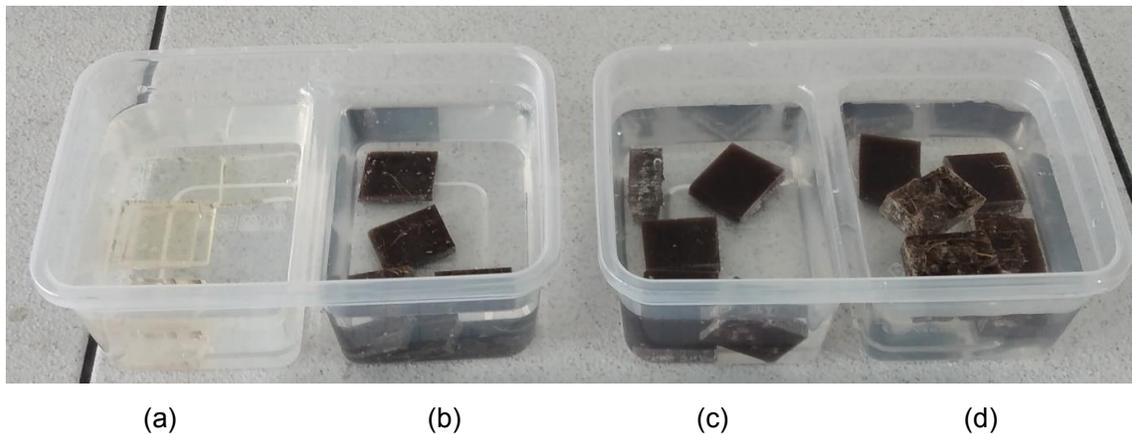
(b)

Fonte: Autor (2023).

3.4.5 Absorção de Água

Para o ensaio de absorção de água, foram confeccionados 5 corpos de prova para cada concentração de fibra, com dimensões de 25 x 25 x 7mm. Foram pesados com uma balança analítica de precisão de 0,01mg da marca BEL modelo M 214, e colocados em recipientes plásticos submergidos com água destilada e com água do mar, em temperatura ambiente. Após 2h de imersão, os corpos foram retirados com auxílio de um pegador metálico e enxugados com papel toalha, e logo depois foram pesados novamente para a aferição da massa. Por fim, foi observado a absorção por parte do compósito a cada 24h durante período de 4 dias, e em decorrência do tempo de imersão até a sua saturação, as amostras teve a massa aferida a cada 7 dias até o final dos 60 dias, seguindo a norma ASTM D 570 (2018).

Figura 38: CPs em água destilada e do mar. (a) CP0. (b) CP5. (c) CP10. (d) CP20.



Fonte: Autor (2023).

Foi determinada a porcentagem de absorção pela equação 13.

$$AA\% = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

AA%=Absorção de água;

m_s = Massa inicial ;

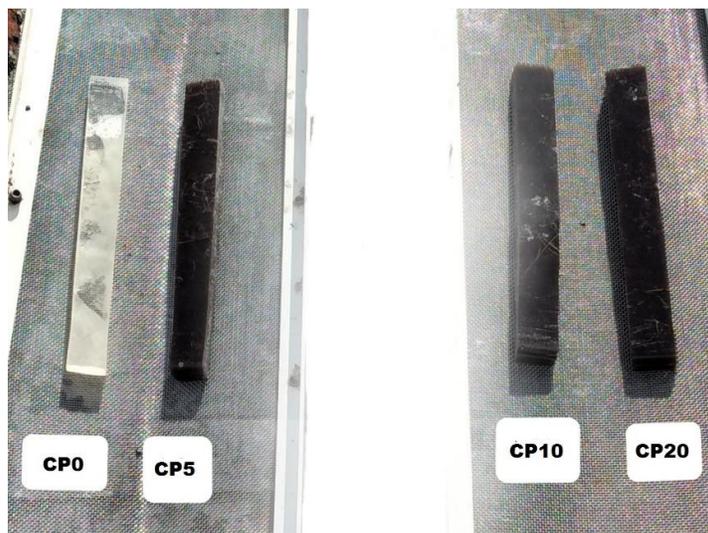
m_u = Massa final do material;

3.4.6 Envelhecimento (Degradação)

Um dos objetivos do ensaio de envelhecimento natural foi analisar a influência do meio da degradação das propriedades mecânicas do compósito. Neste trabalho, um corpo de prova de cada formulação do compósito foram confeccionados nas dimensões 125 x 13 x 6mm e expostos ao envelhecimento natural no período de 12 meses, passando pelas quatro estações do ano, com exposição a raios solares e condições intempéries. As amostras foram colocadas na cidade de Simões Filho, do lado externo do Laboratório de ensaios do IFBA no dia 28 de março de 2022, figura 39, em uma atmosfera com clima tropical e perto do mar, sobre uma bancada ao ar livre, e retirado no dia 30 de março de 2023.

Antes e após da exposição, um corpo de prova de cada concentração volumétrica CP0, CP5, CP10 e CP20, foram pesadas e fotografadas para análise da degradação superficial. O procedimento para o ensaio seguiu de acordo com a norma ASTM D1435 (2013).

Figura 39: Exposição das amostras para ensaio de envelhecimento.



Fonte: Autor (2023).

A partir dessa análise, foi calculada a perda de massa dos corpos de prova das quatro formulações investigadas na pesquisa.

3.5 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

O ensaio térmico do material compósito foi realizado por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), foi realizada em um equipamento de marca Shimadzu modelo DSC-60, figura 40. As amostras foram analisadas em um cadinho de alumínio tampado com cerca de 3 mg de amostra em uma faixa de temperatura de 20° a 500°C sob atmosfera de N₂ (fluxo de 50 ml/min) e uma taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹.

Figura 40: Equipamento de marca Shimadzu modelo DSC-60.



Fonte: Autor (2023).

3.6 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para verificar a frutografia, as amostras dos compósitos foram colocadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca TESCAN, modelo LMU-Vega 3 figura 41, localizado no laboratório de caracterização de materiais do IFBA *campus* Salvador.

Figura 41: Microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca TESCAN.



Fonte: Autor (2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS

4.1.1 Diâmetro médio das Fibras de Palha do Milho.

O diâmetro médio das fibras de palha do milho foi obtido de forma aleatória com 20 (vinte) fibras com auxílio de um Projetor de Perfil da marca Pantec pertencente ao Laboratório de Metrologia do IFBA *campus* Simões Filho, e nelas foram feitas três medidas ao longo do comprimento de cada fibra, 2 nas extremidades e 1 no centro da fibra para verificação de variação dos diâmetros, conforme apresentado na tabela 12.

Tabela 12: Variações de diâmetros das fibras da palha de milho.

Fibras n°	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	Ø3 (mm)	Ømédio (mm)
1	0,165	0,163	0,161	0,163
2	0,169	0,170	0,172	0,170
3	0,155	0,163	0,167	0,161
4	0,160	0,162	0,161	0,161
5	0,165	0,164	0,167	0,165
6	0,164	0,164	0,163	0,164
7	0,164	0,165	0,165	0,165
8	0,169	0,171	0,169	0,170
9	0,170	0,168	0,166	0,168
10	0,162	0,161	0,163	0,162
11	0,163	0,162	0,161	0,162
12	0,166	0,169	0,167	0,167
13	0,165	0,164	0,164	0,164
14	0,169	0,167	0,168	0,168
15	0,166	0,169	0,169	0,168
16	0,163	0,164	0,161	0,162
17	0,164	0,166	0,166	0,165
18	0,161	0,159	0,159	0,160
19	0,174	0,179	0,176	0,176
20	0,176	0,174	0,175	0,175
			Ømédio (mm)	0,165 ±0,0052

Fonte: Autor (2023).

O diâmetro médio (**Ømédio**) das fibras da palha de milho foram 0,165mm.

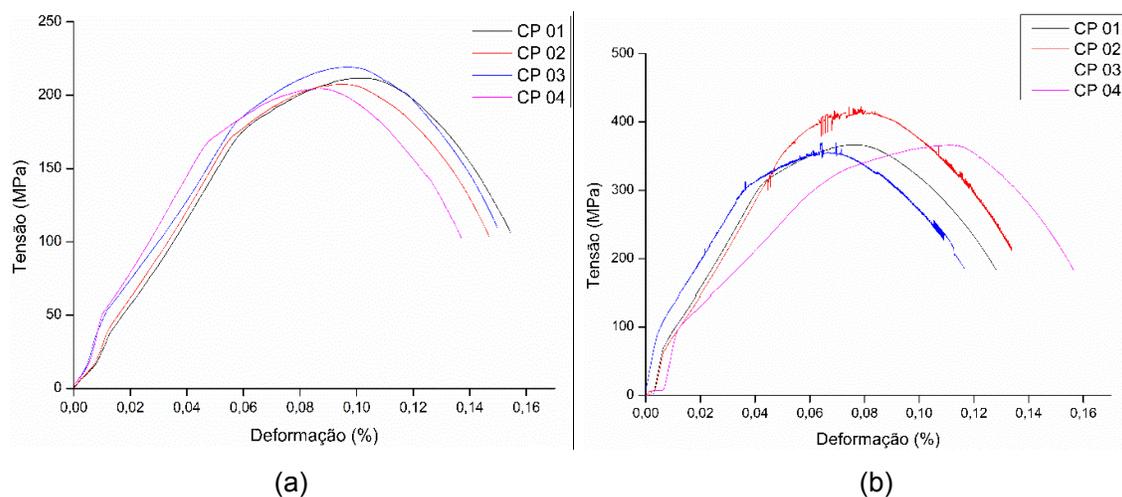
Em seu artigo, Koester (2019) obteve um diâmetro de 0,198mm para fibras da palha do milho, um valor superior a 20% do diâmetro encontrado nas fibras de palha de milho deste estudo, levando em consideração as diferentes regiões cultivadas.

Realizando um comparativo com outras fibras utilizadas na literatura, Gomes (2015) utilizou a fibra da folha do abacaxizeiro, obtendo um diâmetro médio de 0,160mm semelhante a fibra da palha de milho, Leão (2013) caracterizou a geometria das fibras de licuri apresentando um valor médio de 0,141mm, já as fibras de curauá de Maciel (2017) apresentou diâmetro médio de 0,098mm, valor inferior a 68% do diâmetro médio das fibras da palha do milho apresentados nessa pesquisa.

4.1.2 Ensaio de Tração das Fibras.

Os gráficos da figura 42 apresenta o comportamento tensão x deformação com as amostras de fibras aleatórias da palha do milho. A figura 42 (a) curva das fibras sem tratamento alcalino, e a (b) curva das fibras tratadas com carbonato de sódio (barrilha).

Figura 42: Curva tensão x deformação de tração das fibras. (a) Fibras sem tratamento. (b) Fibras tratadas.

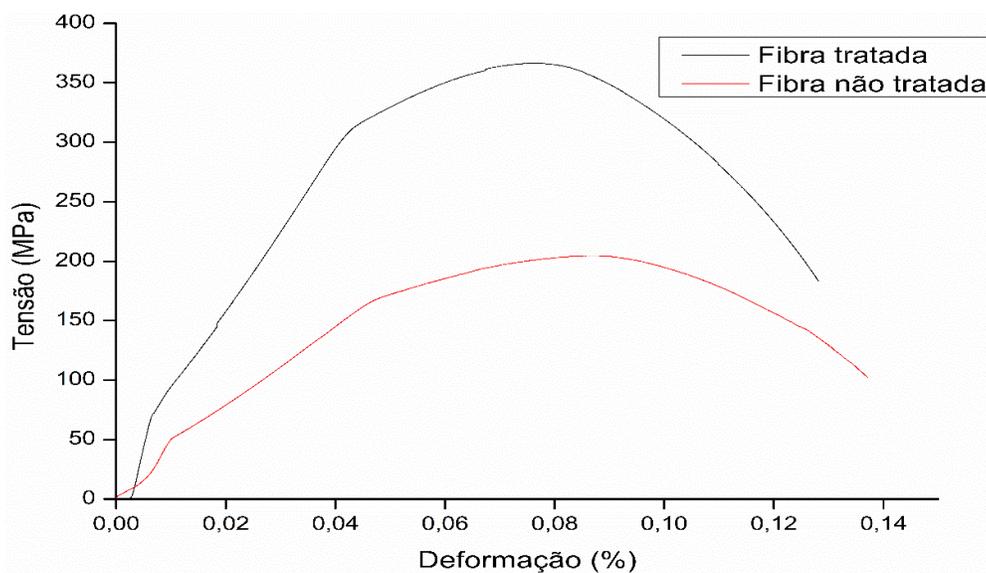


Fonte: Autor (2023).

O gráfico da figura 43 mostra o comportamento comparativo médio das curvas em sobreposição das fibras sem tratamento e tratadas. Comprovando a significância do tratamento alcalino das fibras, a fibra da palha do milho tratada com barrilha obteve

mais de 70% de resistência à tração em relação a fibra sem tratamento.

Figura 43: Comportamento comparativo médio da curva tensão x deformação das fibras.



Fonte: Autor (2023).

A Tabela 13 apresenta a média dos resultados para o ensaio de tração nas fibras.

Tabela 13: Média dos resultados para Tração das fibras.

Fibras	Módulo de Elasticidade GPa	Resistência à Tração MPa
Sem tratamento	16,03 ±1,49	207,91 ±12,25
Tratadas	25,74 ±1,81	361,03 ±25,94
Diferença %	60,57%	73,64%

Fonte: Autor (2023).

O teste inicial do comportamento à tração das fibras permitiu uma melhor discussão para o cálculo das frações volumétricas de cada formulação do compósito investigado na pesquisa. Os módulos de elasticidade e a resistência à tração das fibras, proporcionaram um aumento médio de 60,57 e 73,64 %, respectivamente.

O tratamento alcalino em fibra de carauá, segundo Libera *et al.* (2019), pode levar a alterações nas propriedades mecânicas, tais como o módulo de elasticidade e resistência à tração.

A eliminação de hemicelulose promove a formação de novas ligações de hidrogênio em certas cadeias de celulose. A hemicelulose é o componente da fibra que possui a função de unir e separar as cadeias celulósicas, Shimizu (2018).

Com a remoção de parte da hemicelulose e lignina da fibra após tratamento alcalino, a superfície desta torna-se mais rugosa Haoach (2019).

Segundo Callister (2016), quando possui uma forte interface de fibra e deformação da fibra, a carga total suportada por materiais compósitos será igual à soma da carga transportada pelo substrato e pela fase matriz e da fibra.

De acordo com Carvalho (2015), que realizou ensaio de tração nas fibras sem tratamento e com tratamento alcalino com barrilha, as fibras de bananeira apresentaram uma resistência a tração de 281 Mpa e 345 Mpa, valores de tensão semelhantes das fibras da palha do milho caracterizadas para esse estudo.

Com tudo isso, logo após limpeza e tratamento alcalino das fibras, deixando as fibras mais rugosas pós eliminação da hemicelulose, acredita-se que a resina epóxi penetra melhor na fibra, preenchendo vazios deixados pelo tratamento, absorvendo mais resina diferente do caso das fibras não tratadas.

4.1.3 Densidade das Fibras.

A densidade obtida neste estudo para a fibra da palha do milho utilizando um picnômetro foi de 1,32 g/cm³, conforme o cálculo da equação 14.

$$\rho = \frac{mb - ma}{(md - ma) - (mc - mb)} \quad (14)$$

$$\rho = \frac{96,957g - 95,003g}{(244,696g - 95,003g) - (245,178g - 96,957g)}$$

$$\rho = \frac{1,954g}{1,472g}$$

$$\rho = 1,32g/cm^3$$

De acordo com Lopes (2020), o valor de densidade relatado pela literatura para fibras vegetais é em torno de 0,7 – 1,4 g/cm³, e que os valores mencionados dependem muito da região cultivada, pelas diferenças de condições de clima e solo.

A tabela 14 apresenta valores comparativos de fibras da planta do milho já estudadas na literatura.

Tabela 14: Valores comparativos de densidade de fibras da planta do milho.

Autor	Fibras	Densidade (g/cm³)
Moreira; Seo (2016)	Folha do milho	1,36
Araújo (2009)	Espiga do milho	1,46
Mendes (2014)	Palha do milho	1,31
Paiva (2015)	Palha do milho	1,47
Romão (2015)	Palha do milho	1,57
Luz (2019)	Grão do milho	1,24
Silva (2020)	Sabugo do milho	1,39

Fonte: Autor (2023).

Os resultados apresentados estão em conformidade com trabalhos reportados na literatura (MENDES, 2014; PAIVA, 2015; MOREIRA; SEO, 2016; SILVA, 2020) comprovando a baixa densidade, vantagem em relação às fibras de origem sintética.

O valor encontrado para a densidade básica para a palha de milho é próximo ao valor da densidade de folha do milho determinado pelo mesmo método no trabalho de Moreira; Seo (2016), que foi de 1,36g/cm³.

O valor mais próximo de densidade encontrada para palha do milho, pode ser visto no trabalho de Mendes (2014), que fez uma projeção média de 1,18 a 1,32g/cm³.

Utilizando o método de caracterização da densidade pelo picnômetro, Paiva (2015) encontrou após 5 medidas o valor de 1,47g/cm³, densidade superior a 12% da encontrada neste trabalho.

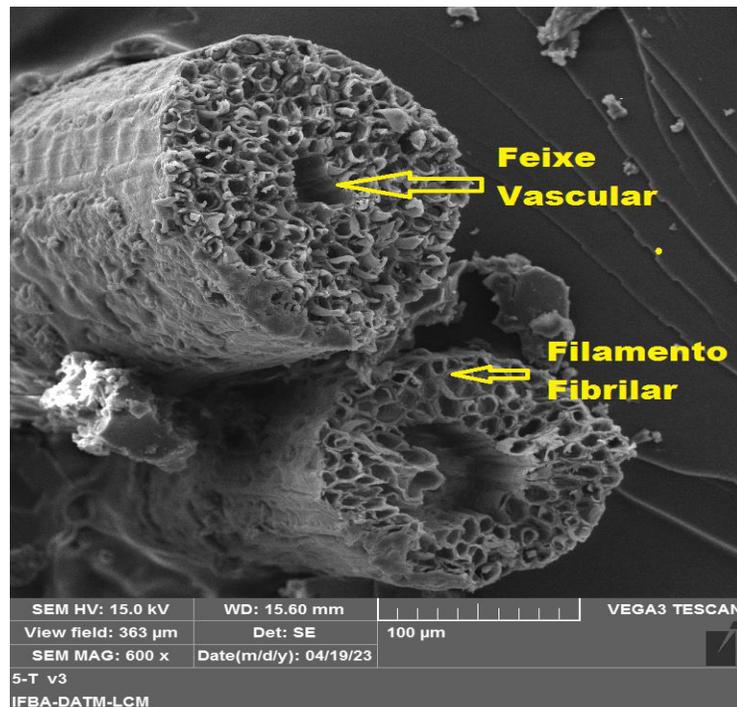
A densidade real do sabugo do milho foi apresentada na pesquisa de Silva (2020), que afirma que essa densidade encontra-se na faixa reportada na literatura para outras biomassas previamente utilizadas em processos de pirólise como também em reforços de materiais compósitos.

4.1.4 Morfologia da Fibra

A figura 44 mostra por imagens de MEV o aspecto da fibra de palha do milho, notando a forma heterogênea que é uma característica das fibras naturais. Com um aumento de 600 vezes no microscópio eletrônico de varredura é possível observar feixes de fibras ao redor do feixe central vascular, formando inúmeras fibrilas na longitude da fibra.

De acordo com Lopes (2020), alguns trabalhos revelaram que as propriedades microestruturais da planta estão relacionadas a sua microestrutura.

Figura 44: Análise morfológica da seção transversal da fibra de palha do milho.



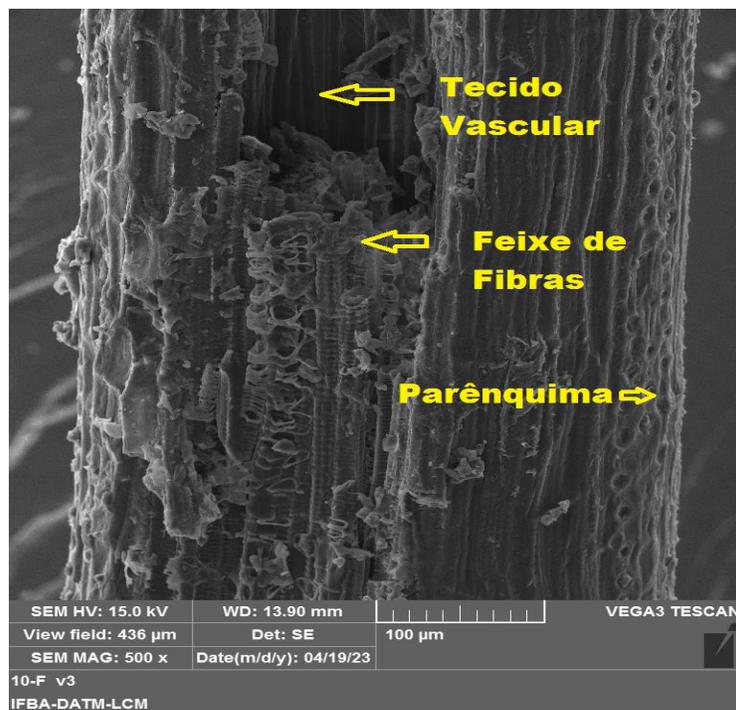
Fonte: Autor (2023).

Por meio da imagem do MEV com um aumento de 500 vezes, analisando a microestrutura da fibra, também é possível observar uma estrutura semi-esférica na parede celular da fibra, chamada de parênquimas, mostrado na figura 45.

A parênquima é um tecido composto por células vivas com capacidade de divisão celular, processo importante de cicatrização das fibras vegetais. Esse tecido tem a função de absorver água e nutrientes. Nota-se uma pequena quantidade de

parênquimas e uma maior quantidade de feixes de fibras, que é uma das vantagens do uso de fibras naturais na fabricação de materiais compósitos.

Figura 45: Análise microscópica da seção longitudinal da fibra da palha do milho.



Fonte: Autor (2023).

Alguns estudos como o de Beltrami *et al.* (2014) e Moreira; Seo (2016) relatam que quando essas fibras são utilizadas em compósitos, os resíduos presentes na superfície das fibras vegetais reduzem a adesão, portanto, tratamentos químicos são realizados para melhorar as propriedades superficiais das fibras. Comparando as fotomicrografias das fibras de sisal, curauá e abacaxi com as fibras da palha de milho, foram observadas características semelhantes comuns na maioria das fibras vegetais.

4.1.5 Teor de Cinzas

O teor de cinzas das fibras de palha de milho calcinados a 600°C no cadinho pelo forno Mufla foi de 1,91%, conforme o cálculo da equação 15.

$$\text{Cinzas \%} = \frac{mc}{mf} \times 100 \quad (15)$$

$$\text{Cinzas \%} = \frac{0,021g}{1,099g} \times 100$$

$$\text{Cinzas} = 1,91\%$$

A tabela 15 apresenta valores médios dos teores de cinzas de partes da planta do milho já estudadas na literatura por outros autores, comparado com o resultado de 1,91% investigado neste estudo para fibra da palha de milho.

Tabela 15: Valores comparativos de teor de cinzas de fibras da planta do milho.

Autor	Fibras	Teor de Cinzas (%)
Salazar (2005)	Palha do milho	1,52
Romão (2015)	Palha do milho	0,64
Mendes (2014)	Palha do milho	3,50
Ramos (2019)	Palha do milho	1,50
Casara (2017)	Caule do milho	2,63
Queiroz (2010)	Grão do milho	1,45
Silva (2020)	Sabugo do milho	1,60

Fonte: Autor (2023).

O teor médio de cinzas apresentado pela palha de milho neste estudo foi inferior ao encontrado para o mesmo material de Mendes (2014), que foi de 3,50%. Já no mesmo material de Romão (2015), o valor ficou bem superior aos seus 0,64%. Comparando com Salazar (2005) e Ramos (2019), onde os valores de teores de cinzas foram praticamente iguais, tiveram os resultados mais aproximados deste estudo para fibras de palha do milho.

Os teores de cinzas obtidos para as frações de caule e folha citados por Casara *et al.* (2017) são superiores aos da palha de milho, variando entre 2 e 3%. O autor afirma que a baixa concentração de inorgânicos, torna favorável o processo de utilização da biomassa, pois ao final da produção não serão gerados novos volumes de resíduos.

De acordo com Silva (2020), o baixo teor de cinzas presentes na biomassa do sabugo de milho, teor de cinzas 1,60%, podem favorecer a formação de compostos gasosos com baixo peso molecular. E que um elevado teor de cinzas pode provocar a formação de incrustações nos equipamentos, dificultando a transferência de calor.

Pela análise da tabela 15, verifica-se que a palha de milho investigada neste estudo apresentou teores de cinzas similares ao reportado da literatura.

4.2 ENSAIOS FÍSICOS

Os corpos de prova do material compósito estudado foram submetidos aos seguintes ensaios físicos: Densidade aparente, Absorção de água e Envelhecimento por degradação.

4.2.1 Densidade Aparente

A variação da densidade entre os materiais compósitos produzidos ficou entre 1,22 e 1,34 g/cm³, calculados pelas equações (16) e (17).

$$V = L1 \times L2 \times h \quad (16)$$

$$V = 25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 7\text{mm}$$

$$V = 4375\text{mm}^3 \quad \gg \quad \mathbf{V = 4,375\text{cm}^3}$$

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (17)$$

$$\rho_{cp0} = \frac{5,206}{4,375} \quad \gg \quad \mathbf{\rho_{cp0} = 1,19\text{g/cm}^3}$$

$$\rho_{cp5} = \frac{5,382}{4,375} \quad \gg \quad \mathbf{\rho_{cp5} = 1,22\text{g/cm}^3}$$

$$\rho_{cp10} = \frac{5,593}{4,375} \quad \gg \quad \rho_{cp10} = 1,27\text{g/cm}^3$$

$$\rho_{cp20} = \frac{5,901}{4,375} \quad \gg \quad \rho_{cp20} = 1,34\text{g/cm}^3$$

A tabela 16 apresenta os resultados das densidades aparente obtidas na resina epóxi e nas formulações estudadas do material compósito.

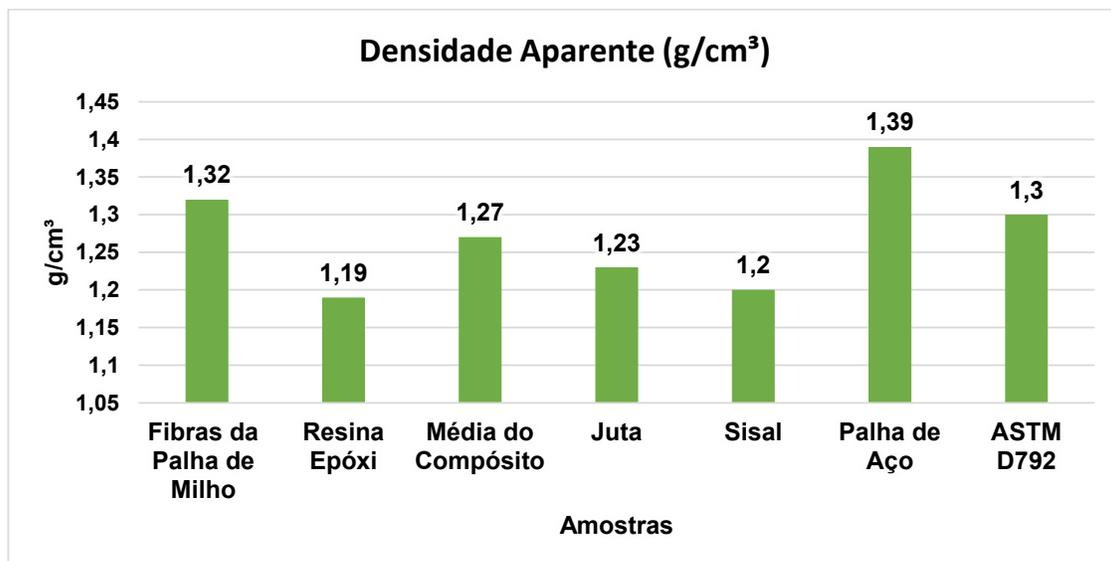
Tabela 16: Densidade aparente média da fibra e das formulações do compósito.

Formulação	Densidade (g/cm ³)
Fibra da Palha de Milho	1,32
CP0	1,19
CP5	1,22
CP10	1,27
CP20	1,34
Média do compósito	1,27

Fonte: Autor (2023).

O gráfico da figura 46 mostra o comportamento comparativo da densidade aparente da fibra, resina epóxi e das formulações do compósito com outros materiais.

Figura 46: Gráfico comparativo da densidade do compósito com outros já estudados.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com os dados obtidos, a densidade aparente do compósito foi superior à da matriz epóxi, para todas formulações investigadas. Isso é explicado pelo valor da densidade da fibra da palha de milho que é 11% superior em relação a matriz epóxi. O compósito com menor massa na formulação, foi superior em 3,2% a matriz e inferior em 8% a densidade da fibra natural.

Segundo o fabricante da resina epóxi GY-260, a densidade aparente é $1,20\text{g/cm}^3$, valor aproximadamente igual ao obtido nesse estudo que foi de $1,19\text{g/cm}^3$.

A densidade média de $1,27\text{g/cm}^3$ das formulações do compósito foi competitiva com a apresentada por outras fibras vegetais na literatura. Conforme Júnior (2017) relata em sua pesquisa, a densidade comparativa dos compósitos reforçados com outras fibras naturais variam de $1,04$ a $1,71\text{g/cm}^3$.

O compósito reforçado com fibras de juta de Varela (2017), apresentou densidade média de $1,23\text{g/cm}^3$, inferior a 4% do compósito estudado nessa pesquisa, mas o material compósito reforçado da palha de aço de Macêdo (2016) apresentou resultado de densidade média de $1,39\text{g/cm}^3$, superior à 10% do valor desse estudo.

De acordo a norma ASTM D792, a densidade média correlacionada às características técnicas capaz de suprir as necessidades de aplicação em estruturas de baixas cargas, variam entre $0,90$ a $1,30\text{ g/cm}^3$.

A média do compósito reforçado com a fibra da palha do milho foi superior em 9% ao da matriz epóxi, mesmo assim, a formulação para os três percentuais da carga de fibra de palha do milho apresenta uma boa vantagem em relação a leveza, apresentando um potencial para fabricação de estruturas leves e resistentes para algumas aplicabilidades na indústria, como por exemplo: calhas, telhas, tanques, móveis, na estética automotiva e muito mais.

4.2.2 Absorção de Água

A absorção de água é um ensaio realizado normalmente pelas indústrias, para controle de qualidade de seus produtos.

Para esse estudo as amostras foram analisadas com tempo de imersão de 60 dias em dois meios aquosos, água destilada e água do mar, cujos resultados estão apresentados na tabela 17.

Tabela 17: Resultados do ensaio de absorção para os dois meios aquosos.

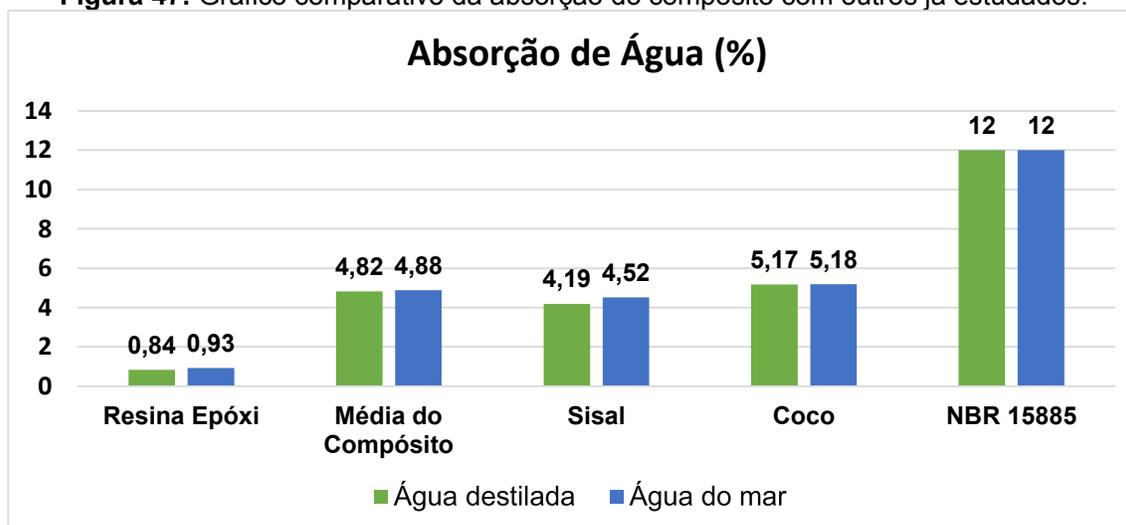
Formulação	Água Destilada (%)	Água do Mar (%)
CP0	0,84	0,93
CP5	2,57	2,63
CP10	4,83	4,91
CP20	7,06	7,11
Média do compósito	4,82	4,88

Fonte: Autor (2023).

Não há diferença significativa do ganho entre os níveis de absorção para os dois meios aquosos, ambas formulações teve absorção similares até a saturação. O percentual de absorção de água para os dois meio aquoso para todas formulações ensaiadas foi bem superior ao da matriz epóxi, demonstrando que o compósito da fibra da palha do milho tem maior poder de absorção que o da resina.

O ganho de absorção das formulações do compósito cresceu à medida que se aumentava o percentual de massa de fibras da palha do milho como reforço na resina matriz. A formulação do compósito com 5% de fibras para os dois meio aquoso foram a que apresentou melhores resultados de absorção, apresentando um nível de absorção 85% menor do que a própria média de absorção do compósito.

O gráfico da figura 47 apresenta o comportamento comparativo da absorção de água para os dois meios aquoso em relação à outras fibras e a norma NBR 15885.

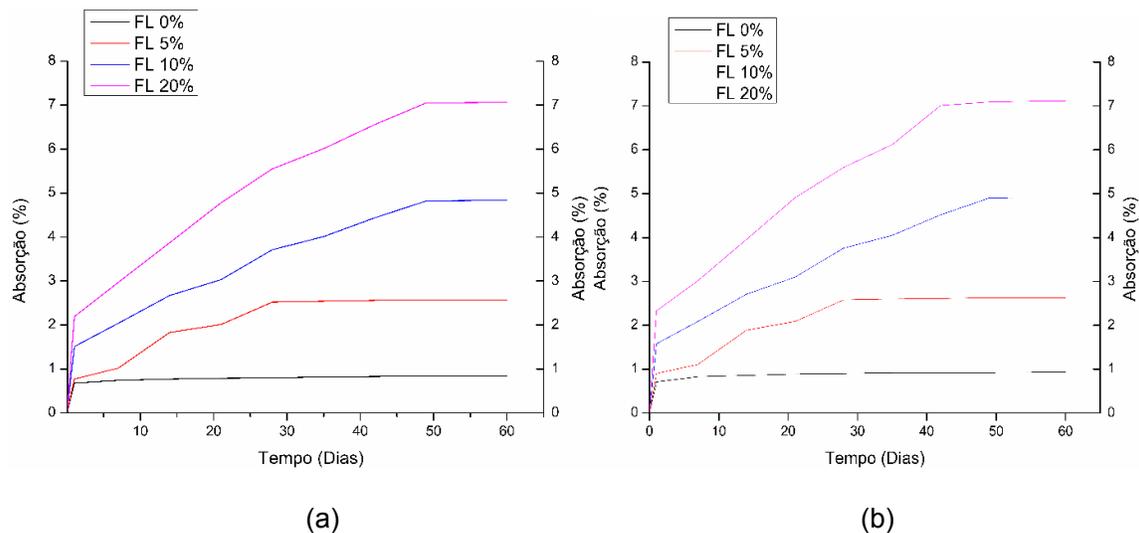
Figura 47: Gráfico comparativo da absorção do compósito com outros já estudados.

Fonte: Autor (2023).

A ASTM D570 pede que sejam feitos gráficos dos aumento de pesos em função do tempo de imersão, permitindo observar o limite máximo permitido de 12% de absorção de umidade no período de 7 à 120 dias de ensaio, valor máximo também permitido pela NBR 15885 (2010).

Os gráficos da figura 48 (a) apresenta o comportamento da absorção do compósito em 60 dias para água destilada e (b) para água do mar.

Figura 48: Comportamento gráfico da absorção. (a) Água destilada; (b) Água do mar.



Fonte: Autor (2023).

A média do compósito ensaiado com a água do mar obteve um nível de absorção de 1,3% maior do que na água destilada. O percentual de absorção de água do mar na matriz epóxi também foi maior em relação a água destilada, cerca de 10%. Essa maior capacidade de absorção em água salgada para os compósitos e para matriz epóxi, é causada pelo maior número de elementos químicos na água salgada, gerando mais força de ionização e mais interações na resina do que a água destilada.

Comprovou-se que o percentual de 20% como reforço de fibras da palha do milho na formulação do compósito obteve uma maior absorção em relação às outras formulações. O compósito de 20% para os 2 meio aquoso absorveu quase 3 vezes mais o nível de saturação da menor formulação que foi de 5%.

Importante ressaltar que os corpos de prova foram cortados com lâmina de serra, deixando a laterais sem proteção com camadas da resina, influenciando uma maior absorção pela superfície porosa.

Segundo Lopes (2020), o aumento no nível de absorção d'água é gerado com adição de fração volumétrica de fibras e, este comportamento é mais evidente para maiores tempos de imersão, quando as fibras já absorveram o seu máximo.

No artigo de Ibrahim (2019), ele observou que os biocompósitos preenchidos de fibra da casca de milho com baixo teor de carga apresentou maior resistência à absorção de água do que a matriz de amido termoplástico, enquanto aqueles preenchidos com alto teor de enchimento exibiu menor resistência.

A média de absorção dos compósitos imersos no trabalho de Júnior (2017), utilizando a fibra de sisal como reforço nas formulações de 5, 10 e 15% em matriz cristal, apresentou saturação semelhante a absorção com matriz epóxi realizado nesse estudo, numa faixa de 4 a 5% de absorção para os dois meios aquosos.

Realizado um ensaio de absorção de água destilada e água do mar com compósitos reforçado com a fibra da palha do milho com concentrações diferentes do volume de fibras, percebe-se uma rápida saturação indicando que o material pode ser utilizado em locais de alta umidade devido a boa resistência a água da matriz epóxi.

4.2.3 Envelhecimento (Degradação)

O ensaio de envelhecimento foi realizado no *campus* do IFBA localizado na cidade de Simões Filho com latitude 12° 47' 8" Sul e longitude 38° 24' 20" Oeste, com altitude de 30m e clima tropical.

A tabela 18 apresenta os resultados da variação da massa em gramas e porcentagem dos corpos de prova submetidos ao ensaio de envelhecimento, após 24h secando em estufa, em ambiente natural para todas as formulações do compósito e da matriz de epóxi.

Tabela 18: Resultados da variação de perda de massa do ensaio de envelhecimento.

Formulação	Massa em Mar/2022 (g)	Massa em Mar/2023 (g)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
CP0	13,636	13,573	0,063	0,46
CP5	14,521	14,275	0,246	1,69
CP10	15,834	15,553	0,281	1,77
CP20	17,869	17,509	0,360	2,01

Fonte: Autor (2023).

Os corpos de prova do compósito foram avaliados em 12 meses e expostos às condições intempéries. Nesse período a temperatura média da cidade variou em torno de 24 a 31°C, a umidade média relativa do ar ficou em torno de 80% e a precipitação pluvial anual ficou em torno de 1370 mm, de acordo o Climatempo (2023).

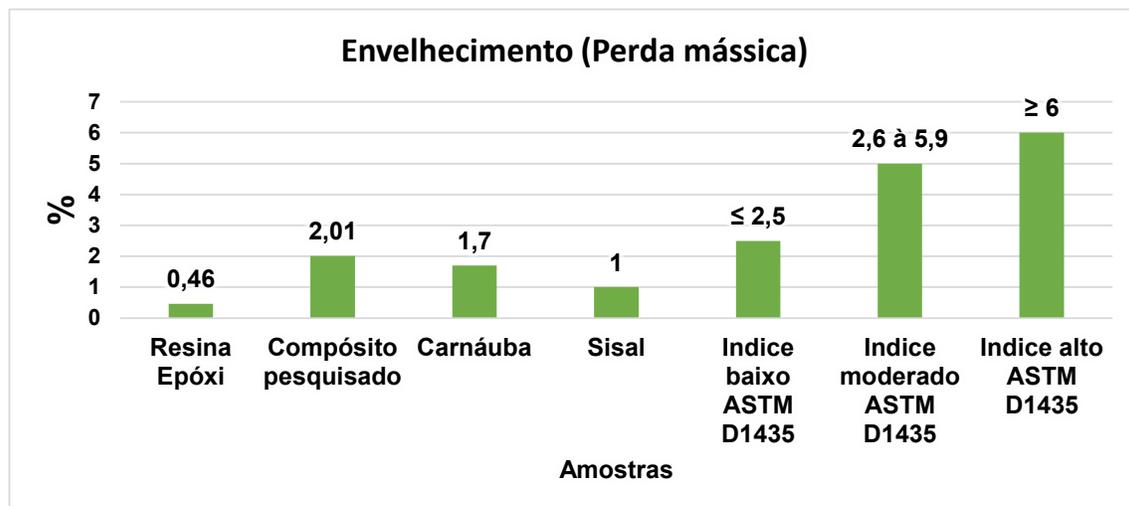
Os compósitos apresentaram uma crescente perda de massa com o aumento do reforço de fibras nas formulações. Os compósitos demonstraram significativa resistência às condições intempéries, tendo a formulação com maior carga com 2% de perdas de massa durante um ano.

Os principais agentes que atuaram durante um ano com a exposição das amostras dos compósitos foram variação de temperatura, chuvas, raios ultravioletas.

A matriz epóxi teve uma significativa resistência às condições severas do tempo, com uma perda mássica de 0,46% em um ano de exposição.

O gráfico da figura 49 apresenta o comportamento comparativo de perda de massa em porcentagens dos compósitos, da matriz epóxi, de outras fibras e os índices da ASTM D1435 após a realização do ensaio de envelhecimento natural em um ano.

Figura 49: Gráfico comparativo da perda de massa por envelhecimento das formulações do compósito e de outros estudos.



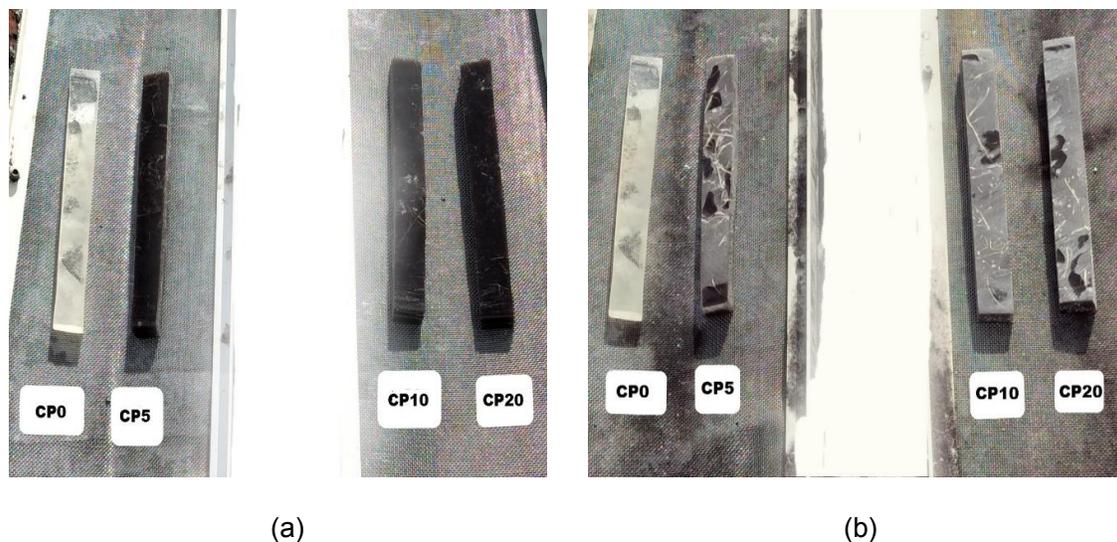
Fonte: Autor (2023).

A norma ASTM D1435 classifica índice baixo à perda mássica menor que 2,5%, índice moderado de 2,6 à 5,9% e índice alto à degradação superior à 6% de perda de massa no período de um ano exposto ao intemperismo.

A principal mudança no comportamento das amostras em exposição após

realização do ensaio, foram perda de brilho na superfície da matriz, microfissuras na superfície do compósito e desgastes superficial das fibras, mostrada na figura 50.

Figura 50: Envelhecimento. (a) Início do ensaio. (b) Após 12 meses de ensaio.



Fonte: Autor (2023).

Vale ressaltar também, que as laterais dos corpos de prova não foram protegidas com camadas de resina epóxi, essa exposição pode ter contribuído para uma maior degradação dos compósitos em relação a matriz epóxi.

O compósito reforçado com a fibra da palha do milho, mais viável as condições de exposição climáticas durante os 12 meses, foi o CP5 com 1,69% de perda de massa. Porém, o compósito mais viável em relação a custo econômico mesmo perdendo 2% de sua massa foi o CP20, por possuir menor quantidade de resina epóxi em sua formulação.

Callister (2016), resalta que o processo de degradação envolve fenômenos físicos e químicos, ocorrendo assim uma perda de integridade estrutural do material.

Os compósitos de Souza (2020), foram submetido ao mesmo método de envelhecimento, em condições mais quentes e com menos precipitações pluviais, apresentou valores médios de 1,70% em resina poliéster e pó de carnaúba, na faixa semelhante do compósito de matriz epóxi demonstrada nesta pesquisa.

Foi comprovada na literatura uma resistência maior às intempéries da resina poliéster em relação a epóxi, conforme atestado por Souza (2019), Spinelli (2023) e Oliveira (2023) com perda mássica inferior a 1% em uma ano de exposição às condições naturais.

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

De modo a assegurar que nenhum defeito de confecção dos compósitos atrapalhe os resultados, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios mecânicos de tração uniaxial, flexão de três pontos e impacto (Charpy), com objetivo de entender o comportamento e as propriedades mecânica do material compósito estudado.

4.3.1 Ensaio de Tração uniaxial

Os resultados dos parâmetros do ensaio de tração para as formulações dos compósitos e para resina epóxi, foram determinadas pelas equações 18, 19 e 20.

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{S_0} \text{ (MPa)} \quad (18)$$

Onde:

σ = Limite de resistência;

F_{\max} = Força máxima aplicada;

S_0 = Área inicial.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (GPa)} \quad (19)$$

Onde:

E = é o MOE ou módulo de Young em MPa ou N mm²;

σ = Tensão aplicada medida em pascal ou N m⁻²;

ε = Deformação elástica longitudinal do corpo de prova (adimensional).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (20)$$

Onde:

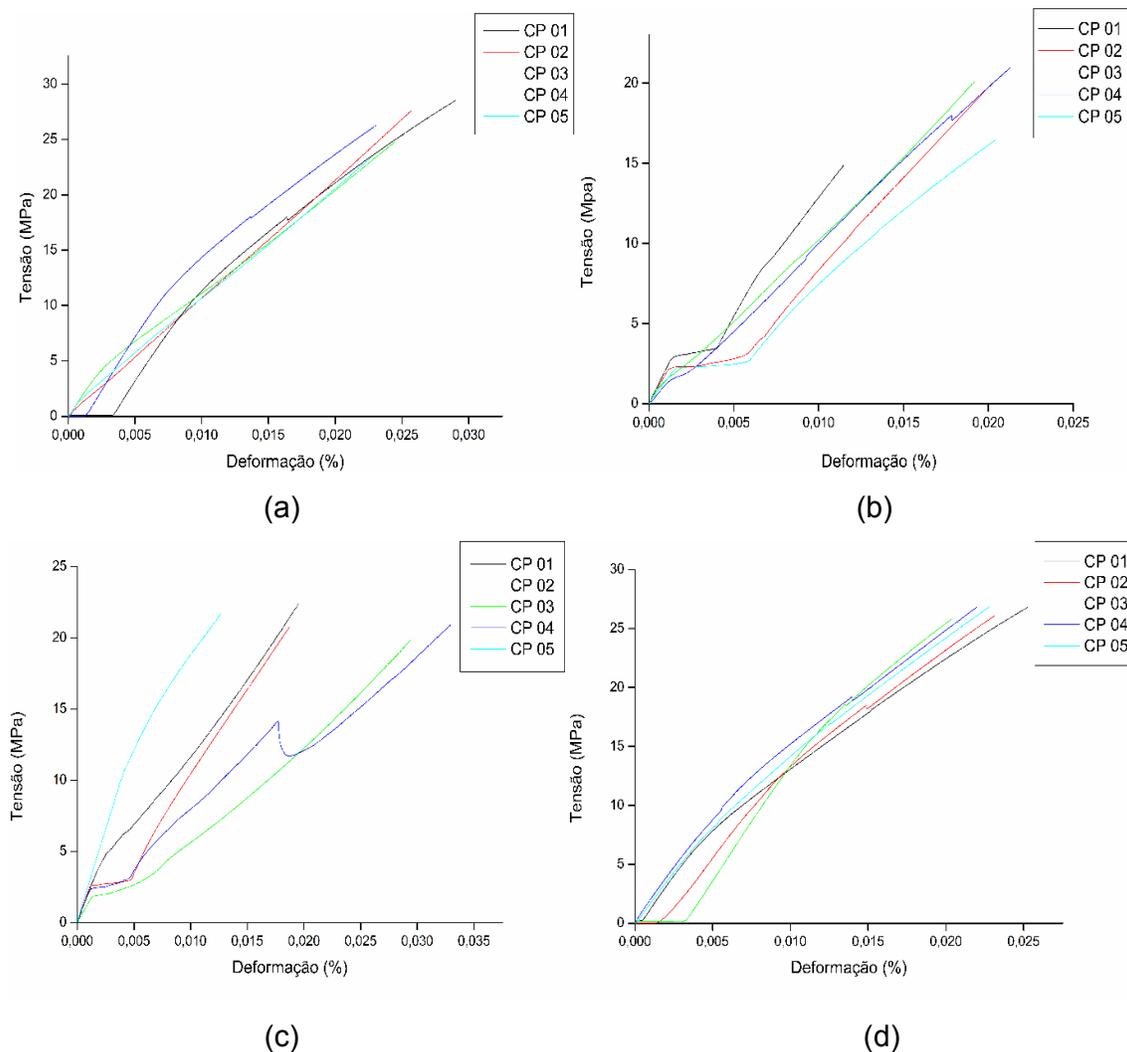
ε = deformação;

Δl = é variação do comprimento do CP;

l_0 = comprimento inicial do CP.

Os gráficos da figura 51 apresenta o resultado das curvas tensão x deformação do ensaio de tração dos compósitos e da matriz epóxi.

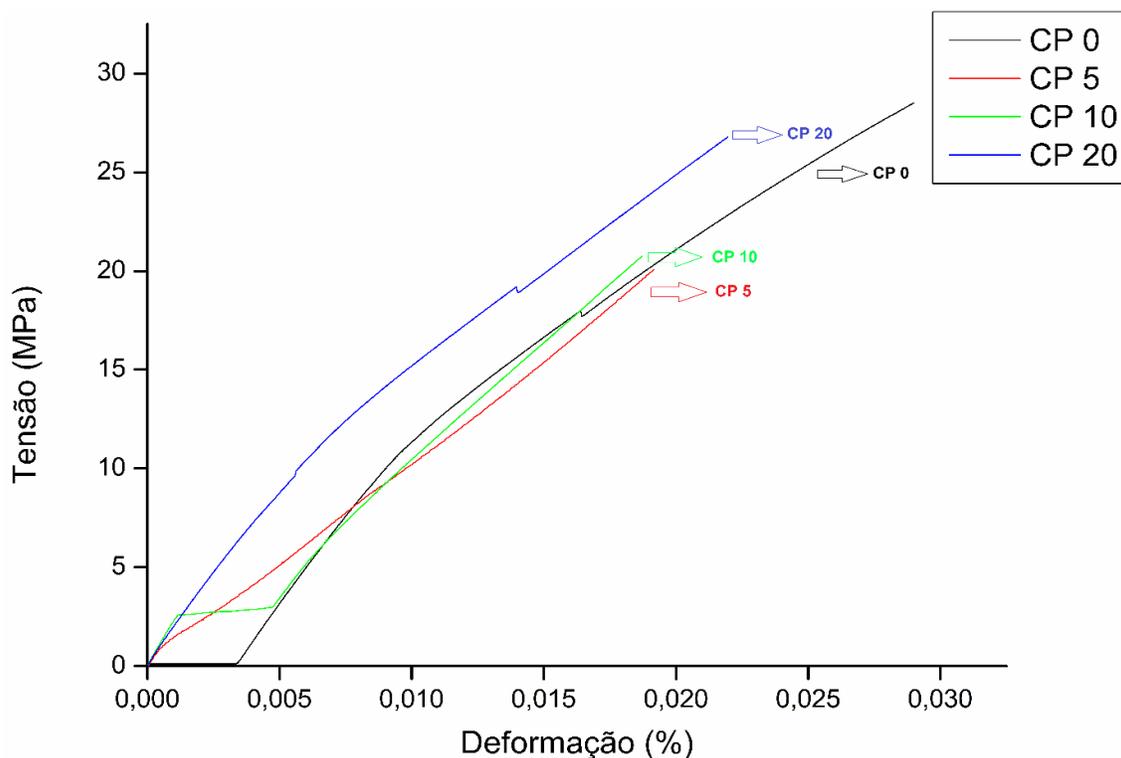
Figura 51: Resultados do ensaio de tração das formulações dos compósitos. (a) 0%; (b) 5%; (c) 10%; (d) 20%.



Fonte: Autor (2023).

O gráfico da figura 52 apresenta o comportamento médio comparativo da resistência à tração para as formulações dos compósitos e matriz epóxi.

Figura 52: Comportamento médio comparativo da curva tensão x deformação das formulações dos compósitos.



Fonte: Autor (2023).

A tabela 19 apresenta os resultados do comportamento médio comparativo da curva tensão x deformação das formulações dos compósitos e matriz epóxi.

Tabela 19: Resultado comparativo médio da curva tensão x deformação dos compósitos.

Amostras	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Deformação (%)
CP 0	28,51 ±1,296	1,09 ±0,042	0,026 ±0,0023
CP 5	19,57 ±2,180	1,03 ±0,014	0,019 ±0,0033
CP 10	20,84 ±1,117	1,04 ±0,018	0,020 ±0,0053
CP 20	26,76 ±1,065	1,16 ±0,032	0,023 ±0,0015

Fonte: Autor (2023).

De acordo ao método de ensaio de tração determinados pela norma ASTM D638, os resultados da tabela 19 acima, apresentam valores de tensão máxima antes da ruptura em conformidade padrão exigido pela norma ISO 527-1 (2019), com referência limítrofe de 15 à 62 Mpa, para fibras e laminados plásticos, não incluindo a indústria automotiva, por exemplo, que exige 30 Mpa tensão mínima de ruptura.

As amostras sem adição de fibras, formulação de 0% se configura na resina epóxi pura, apresentaram uma tensão de ruptura maior, sendo a máxima de 28,51 MPa. Os compósitos fabricados ficaram com resistência menor em relação ao da matriz, comprovando a pouca eficiência da laminação manual e que a formação de vazios nos compósitos de matriz polimérica está quase sempre associada às seguintes causas: impregnação incompleta da fibra pela matriz e aprisionamento de ar entre as camadas do compósito.

A resistência à tração aumentou na medida que se acrescentava um percentual de massa de fibras no compósito. Pode-se observar que a formulação de 5% foi a que apresentou menor resistência, o compósito de 10% obteve um aumento pouco significativo em relação ao menor, apresentando uma função de carga de enchimento, e a formulação de 20 % foi a que melhor apresentou em resultado de resistência à tração, um acréscimo de 36% em relação às formulações menores.

A deformação seguiu com aumento progressivo com adição do percentual de fibras, apresentando o compósito de 20% com a maior deformação, e obtendo uma redução de 15% em relação a matriz epóxi. Com relação ao módulo de elasticidade houve uma diminuição em relação a matriz epóxi dos compósitos de 5% e 10% . Com aumento de 7% em relação a resina, o compósito de 20% foi que obteve maior módulo de elasticidade, demonstrando a grande influência das fibras nesta propriedade.

Moreira; Seo (2016), em seu artigo utilizando uma resina poliéster e com adição de 3% fibras da folha do milho para maior configuração de seu compósito, em sua análise das curvas de tração, apresentou uma resistência de 3 MPa, uma diferença bem significativa em relação ao apresentado neste estudo com palha do milho.

Nos ensaios de tração de Sameer (2020), de um compósito de fibra da palha de milho reforçado em uma matriz de polipropileno, resistência máxima à tração obtida no estudo foi de 21,24 MPa, valor 25% menor do que a resistência máxima encontrada neste estudo. O autor afirmou que o comprimento da fibra foi o fator mais influenciado para afetar a resistência à tração.

4.3.2 Ensaio de Flexão em três pontos

Os resultados dos parâmetros do ensaio de flexão para as formulações dos compósitos e para resina epóxi, foram determinadas pelas equações 21, 22 e 23.

$$\sigma = \frac{M_{\text{máx}} \cdot c}{I} \quad (21)$$

Onde:

M = Momento interno resultante máximo;

c = Distância perpendicular entre a linha neutra e o ponto de $\sigma_{\text{máx}}$;

I = Momento de inércia da área da seção transversal.

$$\sigma = \frac{3pl}{2bh^2} \quad (22)$$

Onde:

σ = tensão de flexão (Mpa);

p = máxima carga aplicada (N);

l = distância entre os apoios;

b = largura do CP (mm);

h = espessura dos corpos de prova.

$$E = \frac{p \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot f} \quad (23)$$

Onde:

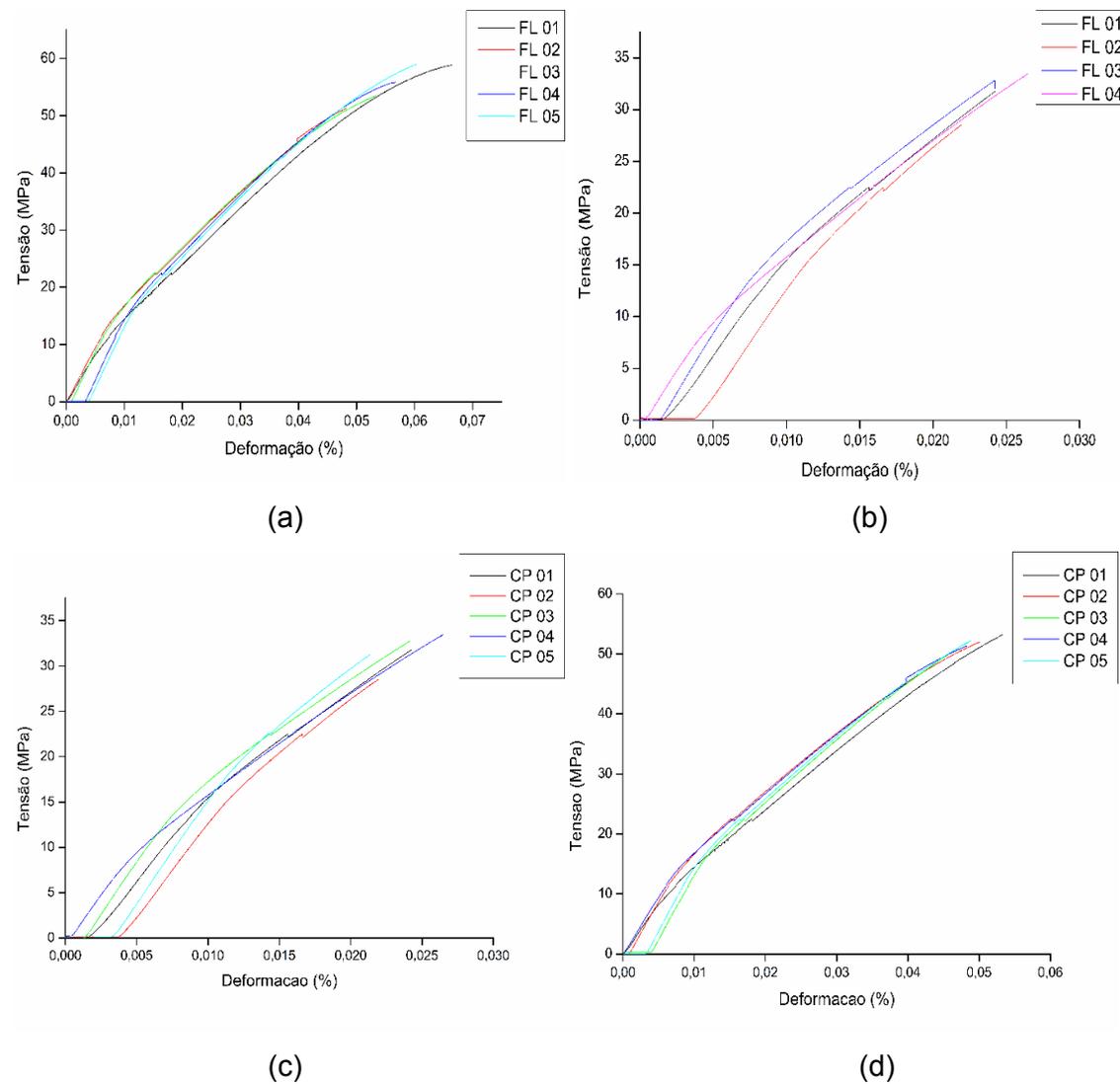
E = Módulo de elasticidade à flexão (GPa);

p = Carga aplicada (N);

l = comprimento útil (mm);
 b = largura do CP (mm);
 h = espessura do CP (mm);
 f = flecha (mm).

Os gráficos da figura 53 apresenta os resultados da curva tensão x deformação de flexão das formulações dos compósitos e da matriz epóxi.

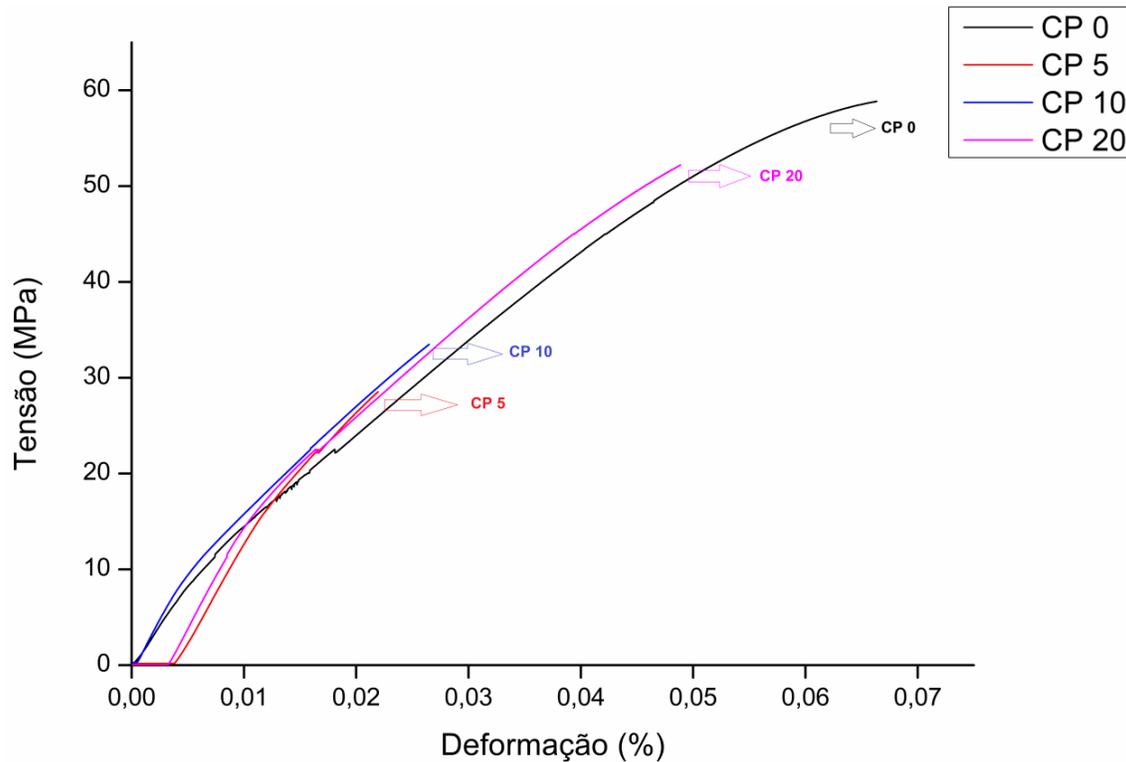
Figura 53: Resultados do ensaio de flexão das formulações dos compósitos. (a) 0%; (b) 5%; (c) 10%; (d) 20%.



Fonte: Autor (2023).

O gráfico da figura 54 apresenta o comportamento médio comparativo da resistência à flexão para as formulações dos compósitos e matriz epóxi.

Figura 54: Comportamento médio comparativo da curva tensão x deformação das formulações dos compósitos.



Fonte: Autor (2023).

A tabela 20 apresenta os resultados do comportamento médio comparativo da curva tensão x deformação das formulações dos compósitos e matriz epóxi.

Tabela 20: Resultado comparativo médio da curva tensão x deformação dos compósitos.

Amostras	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Deformação (%)
CP 0	59,11 ±1,172	1,02 ±0,008	0,058 ±0,0019
CP 5	29,98 ±1,303	1,16 ±0,011	0,026 ±0,0012
CP 10	34,44 ±0,967	1,25 ±0,013	0,027 ±0,0013
CP 20	52,66 ±0,995	1,08 ±0,009	0,049 ±0,0009

Fonte: Autor (2023).

De acordo ao método de ensaio de flexão em três pontos determinados pela norma ASTM D790, os resultados da tabela 20 acima, apresentam valores de tensão máxima antes da ruptura quando submetidos a flexão em três pontos, em conformidade padrão exigido pela norma ISO 178 (2019), com referência de valores padrão de 32 à 100 Mpa para fibras e laminados plásticos, e não conformidade com segmento industrial automotivo, que especifica o valor de 80 Mpa para resistência mínima à flexão para compósitos poliméricos.

Como apresentado nos resultados da resistência à tração, os compósitos fabricados ficaram com resistência à flexão menor em relação ao da matriz epóxi.

Nota-se no gráfico da figura 54 acima, que a resistência à flexão do compósito aumenta significativamente quando a quantidade de fibras da palha do milho incorporadas na matriz epóxi também aumenta. O compósito de maior massa de fibras teve um aumento na resistência à flexão superior a 75% em relação a menor formulação e obteve uma queda na resistência de mais de 12% em relação a matriz epóxi.

Os resultados obtidos dos ensaios de flexão realizados do compósito de fibras da palha do milho, apontou que a resistência mecânica à flexão e alongamento total de todas as formulações, foram bem superiores aos resultados de tração, mostrando uma maior viabilidade do compósito a resistir às cargas de flexão do que na tração.

Em relação ao módulo de elasticidade, o compósito de 20% apresentou rigidez com valores bem próximos a da resina epóxi, confirmando a influência da carga de fibras da palha do milho no aumento de resistência à flexão.

Com o comportamento da deformação ocorreu diferente da resistência à tração (RT), aumentou em relação a matriz epóxi e aumentou com incremento percentual de fibras nos compósitos formulados de 5% e 10%.

Silva (2015), avaliando resultados dos ensaios de flexão realizado com seu compósito reforçado com matriz epóxi e fibras do dendê, comparou com outros compósitos já estudados e apontados pela literatura, percebeu que os valores medidos para as matrizes utilizadas são compatíveis e às vezes até mais elevados.

Maciel (2017), que as amostras de compósitos de fibra de curauá com a mesma matriz epóxi, apresentam deformação plástica limitada. Comparando com a de outras fibras reportados da literatura, como por exemplo, os compósitos de matriz poliéster e cargas de fibras de sisal dos estudos de Martins (2016) e Júnior (2017), obtiveram média de tensão semelhantes a este estudo de 42,60 e 41,76 MPa, respectivamente.

4.3.3 Ensaio de Impacto Charpy

A tabela 21 apresenta os resultados da energia de absorção de impacto (Charpy) para as formulações do compósito e da matriz epóxi.

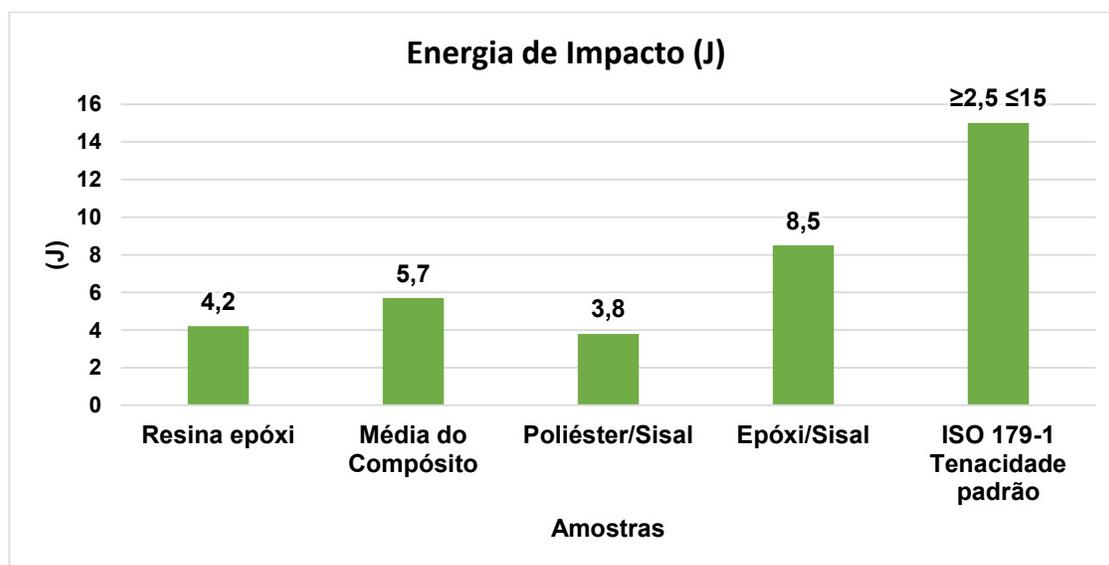
Tabela 21: Resultados da absorção de impacto dos compósitos e da matriz.

Formulação	Energia de Impacto (J)
CP 0	4,20 ($\pm 0,19$)
CP 5	4,40 ($\pm 0,22$)
CP 10	6,00 ($\pm 0,61$)
CP 20	8,20 ($\pm 0,75$)
Média do compósito	5,70 ($\pm 0,44$)

Fonte: Autor (2023).

O gráfico da figura 55 mostra o comportamento comparativo entre o compósito reforçado da fibra de palha do milho, com a matriz epóxi, com outras fibras e a referência da norma ISO 179-1 (2010).

Figura 55: Comportamento da energia de impacto do compósito e da matriz epóxi.



Fonte: Autor (2023).

Os resultados do gráfico da figura 55 acima, apresentam resultados em conformidade aos valores de referência da norma ISO 179-1, determinada pela energia necessária para romper um corpo de prova padrão por impacto em um teste

padronizado nos valores referenciados de 2,5 à 15J para materiais plásticos. De acordo a norma ISO 179-1, os valores mínimos exigidos pela indústria automobilística é de 25J, onde nenhum compósitos com fibras naturais atingem essa determinação.

Todas as formulações do compósito estudado apresentaram um significativo aumento na energia de absorção de impacto em relação a matriz de resina epóxi. O aumento acontecia à medida que se aumentava a quantidade de massa de fibras da palha de milho como reforço do material compósito.

A formulação com melhor resultado foi o CP20 que teve absorção de energia de impacto quase o dobro em relação a matriz epóxi. E o compósito de pior resultado foi CP5, que teve valor absorvido de energia de impacto quase igual a da resina epóxi, tendo um aumento pouco significativo de 5% em relação a matriz.

Analisando a média das formulações do compósito, apresenta um crescimento de energia de impacto de 36% em relação à da matriz epóxi, caracterizando maior viabilidade de aplicação do compósito, principalmente nas demandas de pequenas cargas mecânicas. No teste com a matriz epóxi, observa-se uma ruptura transversal devido sua fragilidade ao impacto, diferente dos compósitos que indica uma trinca nucleada no entalhe que se propaga na transversal, mas com o acréscimo de fibras proporcionou maior tenacidade, impedindo a separação do compósito em duas partes.

Conforme o estudo de Martins Neto (2016), utilizando também a fibra de sisal como reforço, apresentou energia de impacto semelhante à esse trabalho com absorção de energia na faixa de 3,8 a 5,7J. Já no ensaio de impacto de Sameer (2020), mostrando a influência do comprimento das fibras e da porcentagem de carga no compósito, apresentou resultados de resistência mínima de 8,51J e máxima de 14,05J, comprovando uma média superior ao material compósito deste estudo.

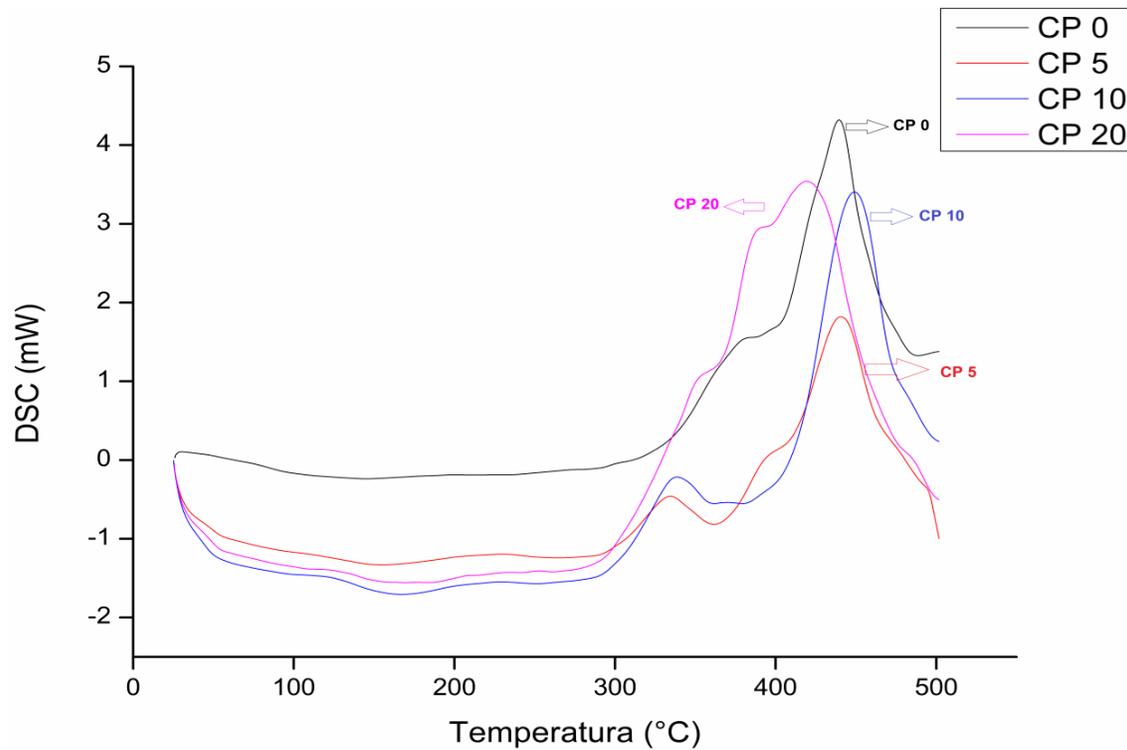
Sá (2019), realizou o ensaio de impacto das amostras de compósitos de polipropileno com reforço de fibras de palmeira-real, analisou que a adição da fibra à causou diminuição na resistência ao impacto. Isso ocorreu porque a fibra confere uma maior rigidez à matriz e quanto maior a quantidade de carga inserida nos compósitos, menores serão os valores de resistência ao impacto.

Segundo Maciel (2017), a partir de 20% de incorporação de fibras de curauá, alguns corpos de prova não se separam totalmente após o impacto, percebeu que o comportamento de fratura é diferente, ou seja, a falha ocorreu por um mecanismo de tensão normal transversalmente às fibras.

4.4 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

No gráfico da figura 56 são apresentados os resultados das curvas sobrepostas da análise do ensaio de DSC na resina epóxi e do compósito.

Figura 56: Curvas do ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para as amostras: 0%, 5%, 10% e 20%.



Fonte: Autor (2023).

A tabela 22 apresenta os resultados dos dados da curva DSC.

Tabela 22: Dados do DSC da matriz epóxi e das amostras de compósitos.

Amostras	T _{inicial} (°C)	T _{pico} (°C)	ΔH (J/g)
CP 0	374,5	441,4	111,91
CP 5	377,9	446,3	79,73
CP 10	389,4	452,7	128,70
CP 20	296,6	419,8	202,09

Fonte: Autor (2023).

Observa-se na tabela 22 acima, os valores da temperatura do pico exotérmico, da temperatura inicial do ensaio e da variação de entalpia (ΔH) para cada amostra percentual do compósito e resina epóxi. Nessa análise do DSC, ocorre as reações exotérmicas em diferentes temperaturas, onde a magnitude dos picos indicam a transformação da fase térmica do compósito.

No gráfico da figura 56 acima, nota-se um único evento exotérmico entre 420°C a 440°C para as formulações de 0% e 20%, destacando o maior pico para a matriz epóxi. Para os compósitos de 5% e 10%, ocorreram dois picos exotérmicos, o primeiro na faixa de temperatura de 310°C a 340°C, e o segundo pico na faixa de temperatura entre 445°C e 455°C.

As curvas obtidas apresentaram os picos exotérmicos referentes a cristalização das amostras, onde é observado um pequeno deslocamento dos picos de cristalização com a adição de fibras da palha de milho como reforço do material compósito.

A amostra de 20% foi a que apresentou uma maior variação de entalpia (ΔH) em relação às outras amostras, 202,09J/g, mesmo com a menor temperatura de pico do ensaio realizado. Além disso, os picos exotérmicos observados para os compósitos reforçado com a fibra da palha de milho, são demonstrados nos resultados pela combustão da hemicelulose e decomposição da lignina e impurezas que não foram removidas pelo tratamento alcalino das fibras.

No DSC de Moreira; Seo (2016), a fibra apresentou pico exotérmico em 300°C, onde ocorreu perda de massa devido à decomposição da celulose e da hemicelulose da fibra, demonstrando a oxidação do material.

Segundo o ensaio realizado por Jesus; Luz (2019), as curvas de DSC do PS reciclado e dos compósitos de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram um único evento endotérmico na temperatura de 420°C, característico da decomposição destes materiais.

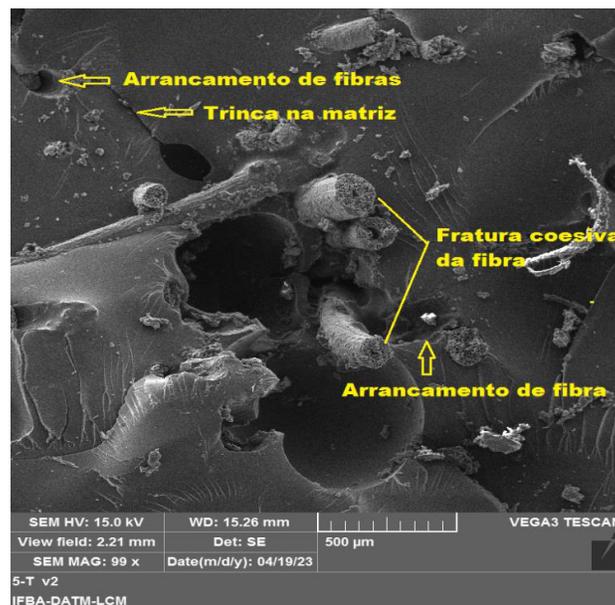
A calorimetria exploratória diferencial de Sá (2019) mostrou que a inserção da fibra da Palmeira-real ao Polipropileno reciclado, não alterou substancialmente a temperatura de fusão e a cristalização que apresentou um ΔH igual a 130,88J/g. A presença de dois picos nas curvas de DSC indicou a contaminação das amostras por polietileno devido à origem do polipropileno reciclado.

4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise microscópica do material compósito foi realizada para avaliar a os mecanismos de interação interfacial da matriz polimérica epóxi e da distribuição de fibras de palha do milho na região de rompimento dos corpos de prova dos ensaios de tração, flexão e de impacto.

As imagens das figuras 57 e figura 58 representadas abaixo mostram análise micrográfica para avaliação da formulação do compósito CP5 testadas no ensaio mecânico de tração uniaxial.

Figura 57: MEV (100x) da região de fratura do ensaio de tração para o compósito CP5.

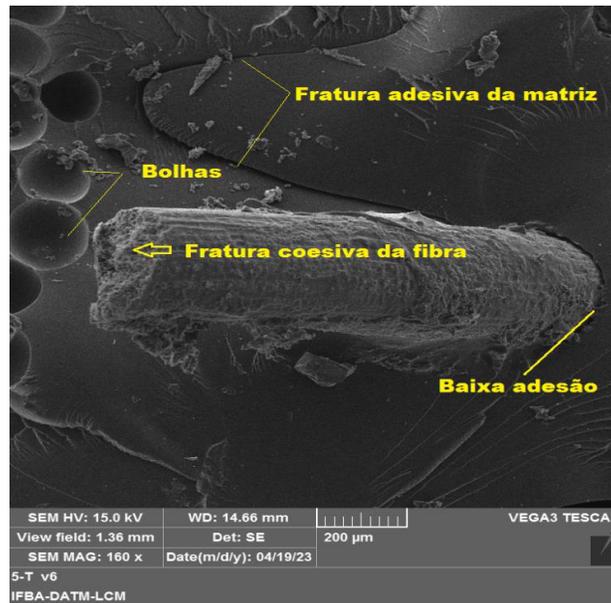


Fonte: Autor (2023).

Na imagem da figura 57 é possível perceber uma trinca na matriz epóxi formada numa região entre arrancamento de duas fibras. Verifica-se também fraturas coesivas das fibras e uma boa interação das fibras com a matriz. Observa-se uma presença de vazios e desprendimentos das fibras que são ocasionados durante o tracionamento dos corpos de prova.

Na imagem da figura 58 mostra a presença de bolhas na matriz epóxi, e verifica-se também uma baixa adesão da fibra com a matriz.

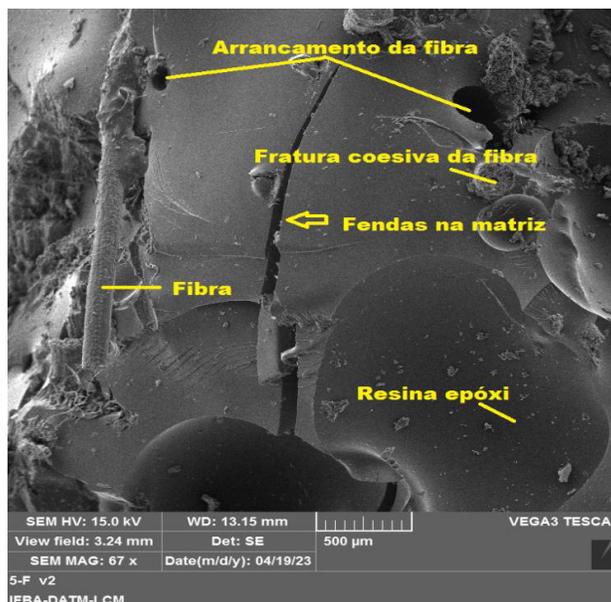
Figura 58: MEV (160x) da região de fratura do ensaio de tração para o compósito CP5.



Fonte: Autor (2023).

As imagens das figuras 59 e 60 mostram a microscopia da região da superfície fraturada pela tensão de flexão no CP5.

Figura 59: MEV (70x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP5.

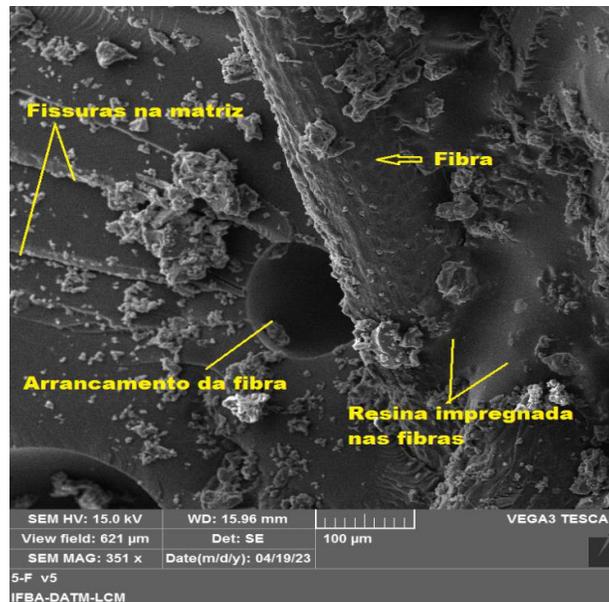


Fonte: Autor (2023)

Na figura 60 é possível notar a formação de pequenas fissuras na região transversal da matriz, e uma boa impregnação de resina no contorno das fibras,

comprovando uma boa interação interfacial da matriz epóxi e a fibra da palha do milho.

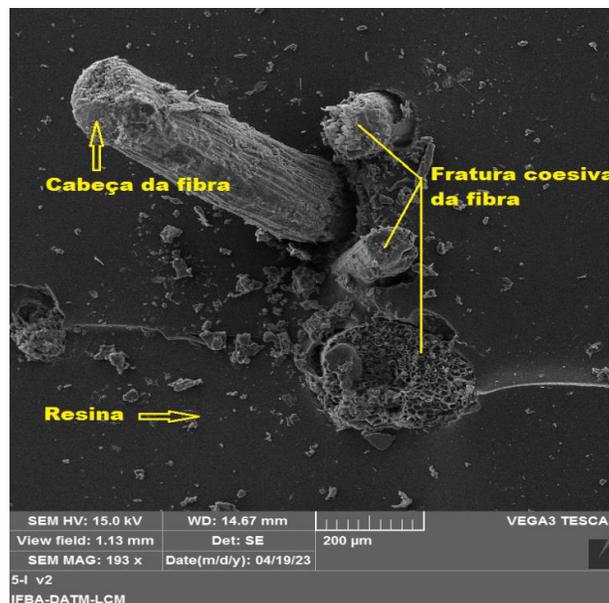
Figura 60: MEV (350x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP5.



Fonte: Autor (2023).

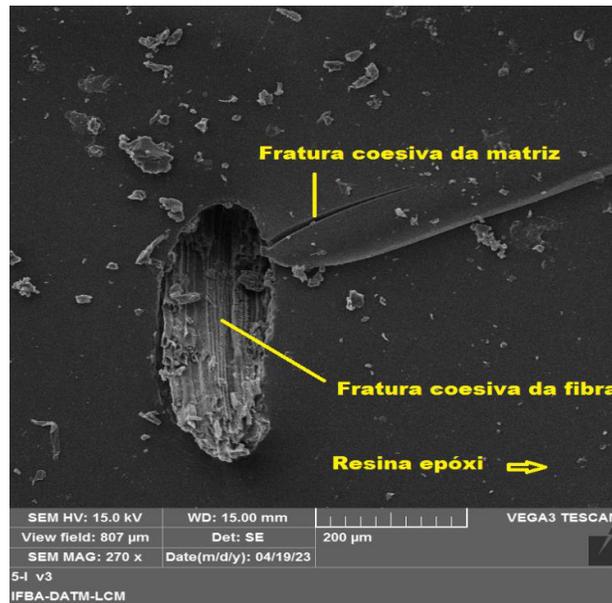
As imagens das figuras 61 e 62 mostram a microscopia da região de rompimento pela tensão de energia de impacto no CP5.

Figura 61: MEV (190x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP5.



Fonte: Autor (2023).

Figura 62: MEV (270x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP5.

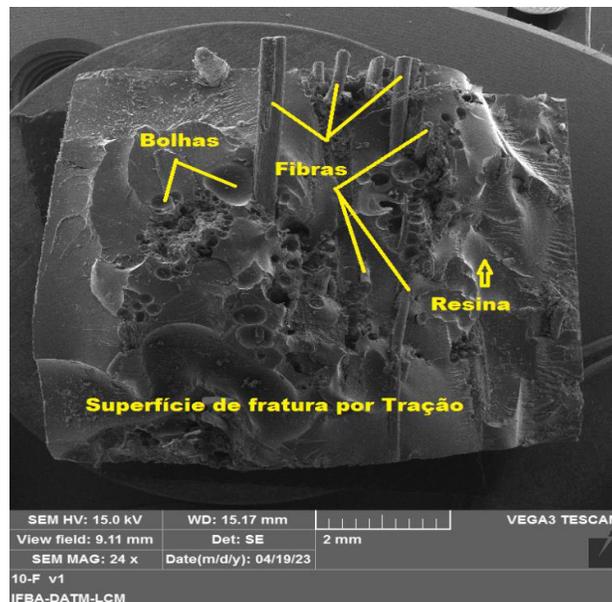


Fonte: Autor (2023).

Nas imagens da figura 61 e 62 é possível perceber o resultado a fratura coesiva da fibra e fratura frágil na matriz quando submetidos ao ensaio de impacto.

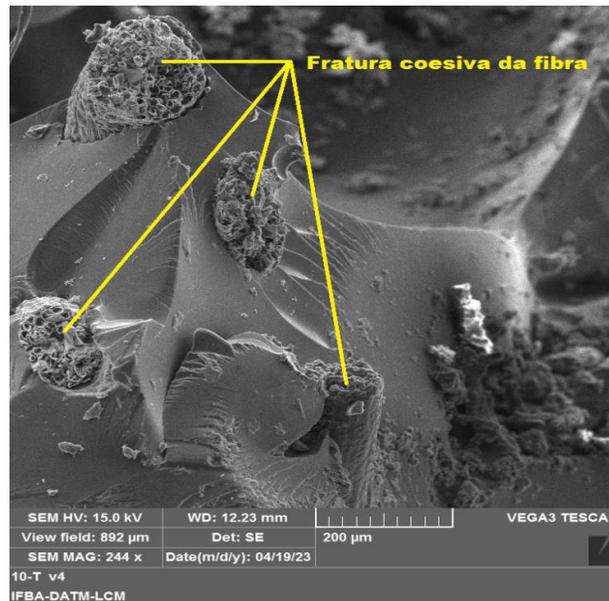
As imagens das figuras 63 e figura 64 representadas abaixo mostram análise micrográfica para avaliação do compósito CP10 testadas no ensaio de tração uniaxial.

Figura 63: MEV (24x) da região de fratura do ensaio de tração para o compósito CP10.



Fonte: Autor (2023).

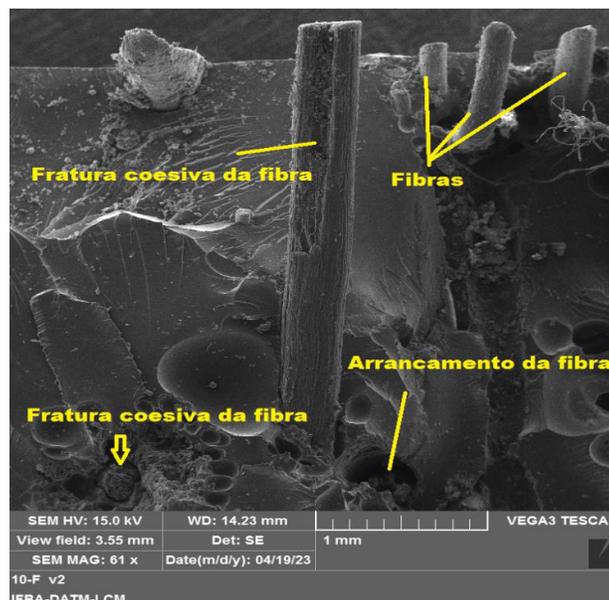
Figura 64: MEV (244x) da região de fratura do ensaio de tração para o compósito CP10.



Fonte: Autor (2023).

As imagens das figuras 65 e 66 mostram a microscopia da região da superfície fraturada pela tensão de flexão no CP10.

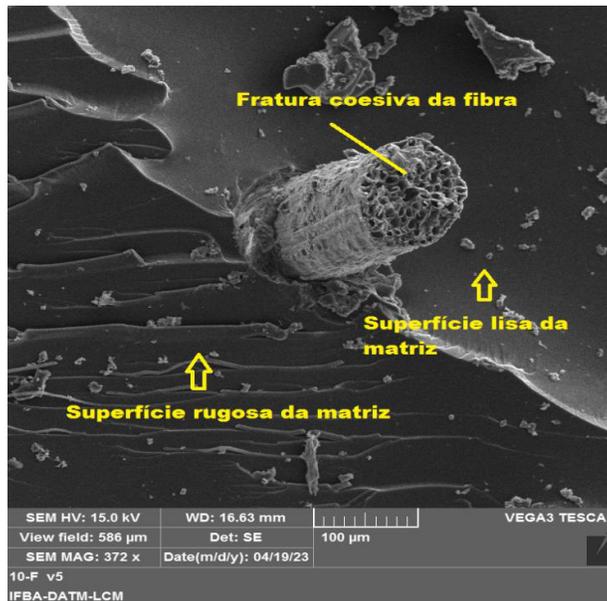
Figura 65: MEV (60x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP10.



Fonte: Autor (2023).

Com aumento da massa em 10%, observa-se uma fibra de palha do milho bem aderida à matriz epóxi, verificando fraturas coesivas somente nas fibras.

Figura 66: MEV (370x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP10.



Fonte: Autor (2023).

Nota-se na imagem da figura 66 uma região lisa da matriz epóxi, e mais abaixo uma região mais rugosa da resina, evidenciando uma tensão cisalhante, região essa mais proveniente de propagação de trincas adesivas da matriz.

Figura 67: MEV (130x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP10.



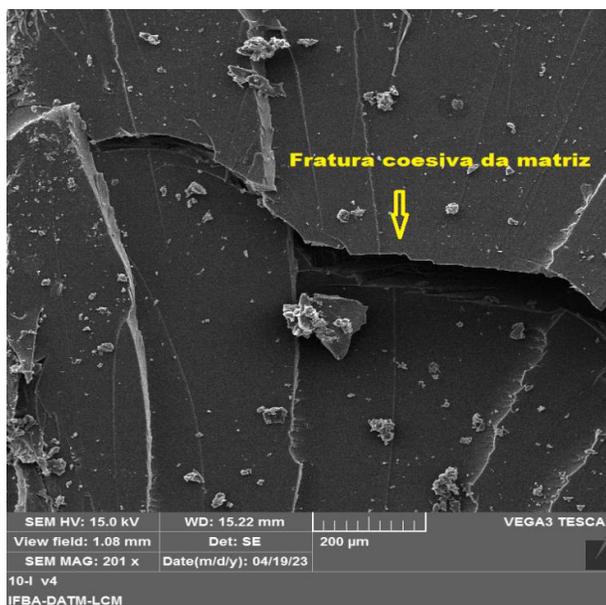
Fonte: Autor (2023).

A imagem da figura 67 mostra a região do entalhe do corpo de prova com carga

de 10% de fibras, submetido ao ensaio de energia de impacto, e mais acima a região lisa de superfície frágil rompida no impacto.

A imagem da figura 68 apresenta uma fratura coesiva ao longo da matriz, devido ao rompimento nucleado pelo entalhe.

Figura 68: MEV (200x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP10.



Fonte: Autor (2023).

As imagens das figuras 69 e 70 mostram uma análise micrográfica para avaliação da formulação do compósito CP20 testadas no ensaio mecânico de tração uniaxial.

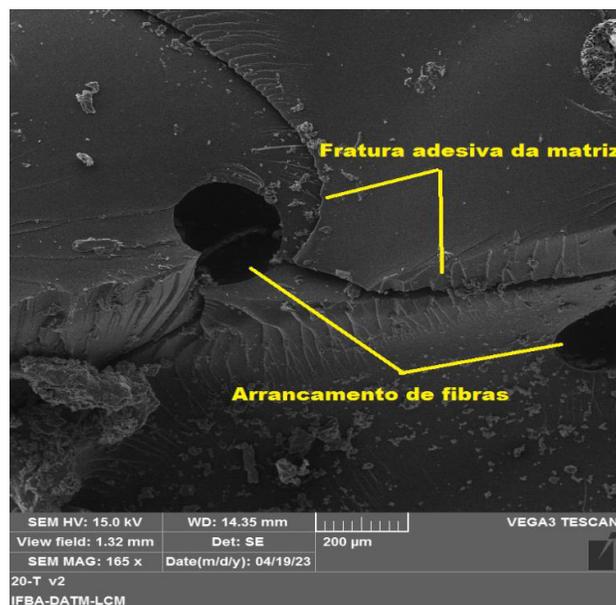
Verifica-se na imagem da figura 69 uma fratura adesiva da matriz com o aumento de carga de massa de fibras em 20%. A fratura que era coesiva, se transforma em uma fratura adesiva com a região rica em fibras, maior resistência à propagação de trincas. Apresenta também um arrancamento de fibras na região da fratura adesiva, quando submetidas ao tracionamento as fibras foram arrancadas da matriz devido a fragilidade da região afetada com o grau de forças aplicada.

A propagação da trinca é bloqueada pela fibra, abrindo um espaço entre a fibra e a matriz. Mesmo após a fratura da matriz epóxi, as fibras continuam resistindo ao esforço de tração, acarretando valores maiores de resistência ao compósito do que com a matriz pura.

Na imagem da figura 70 nota-se um deslocamento da fibra em relação a matriz,

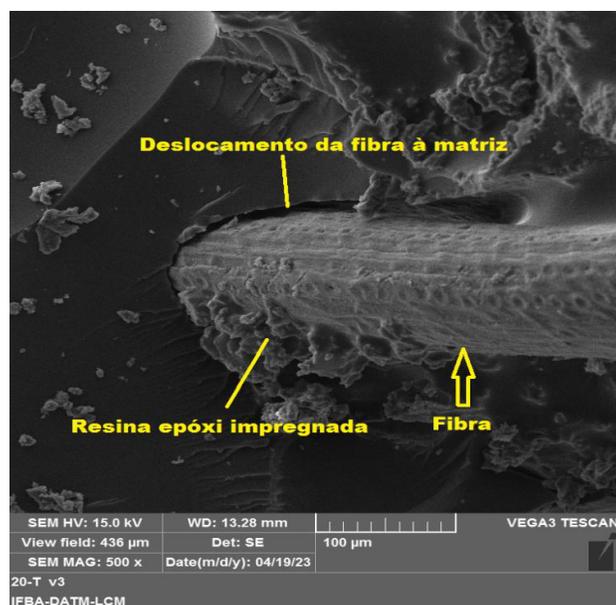
é possível visualizar uma interação deficiente entre a superfície da fibra com a matriz epóxi, problema que pode ser minimizado com uma melhor eficiência no tratamento da fibra para melhorar a sua adesão e ter uma maior compatibilidade com a matriz polimérica.

Figura 69: MEV (165x) região tracionada do CP20.



Fonte: Autor (2023).

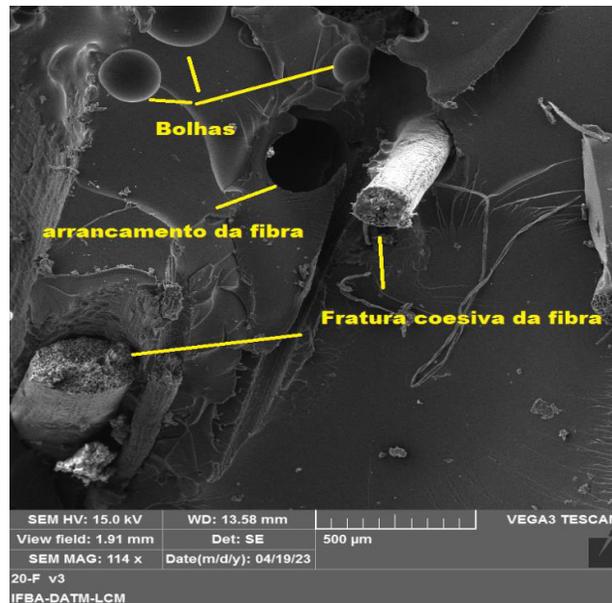
Figura 70: MEV (500x) região tracionada do CP20.



Fonte: Autor (2023).

As imagens das figuras 71 e 72 mostram a microscopia da região da superfície fraturada pela tensão de flexão no CP20.

Figura 71: MEV (114x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP20.



Fonte: Autor (2023).

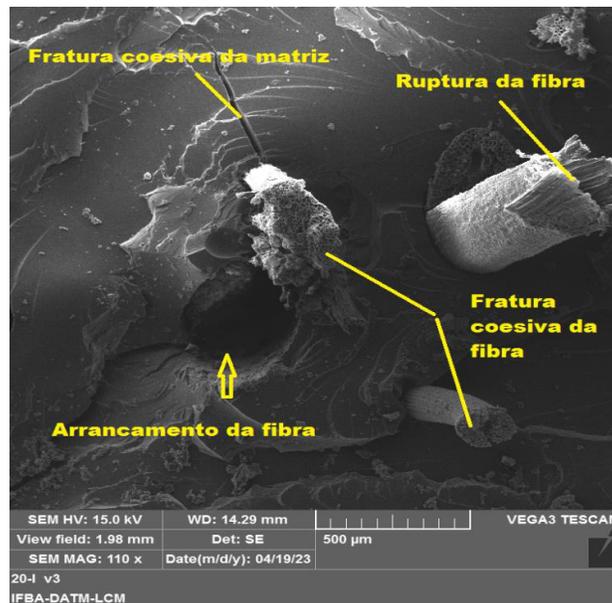
Figura 72: MEV (285x) da região de fratura do ensaio de flexão para o compósito CP20.



Fonte: Autor (2023).

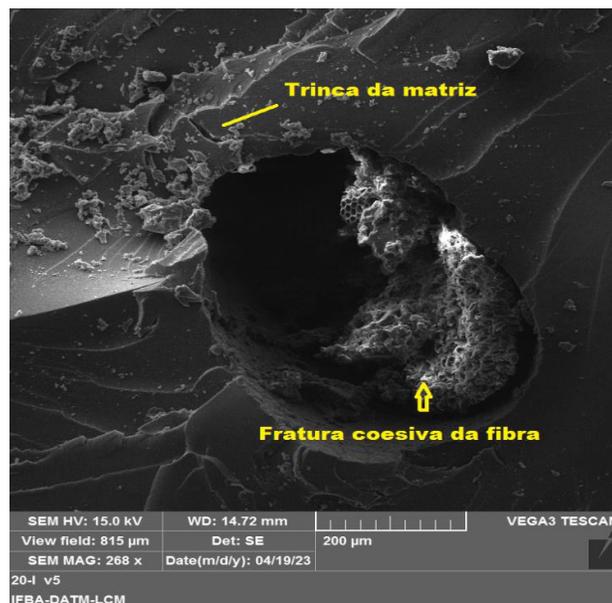
As imagens das figuras 73 e 74 mostram a microscopia da região de rompimento pela tensão de energia de impacto no CP20.

Figura 73: MEV (110x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP20.



Fonte: Autor (2023).

Figura 74: MEV (268x) da região de rompimento ao impacto para o compósito CP20.



Fonte: Autor (2023).

É possível observar pelo MEV da região de fratura, após os ensaios de tração, flexão e impacto, observa-se a presença de fibras desalinhadas e quebra da interface.

Nas imagens apresentadas, é possível perceber trincas na matriz, fraturas coesivas das fibras, fratura coesiva na matriz, fratura adesiva da matriz, arrancamento de fibras, a baixa adesão da fibra à matriz e em alguns caso uma adesão parcial, devido a pouca eficiência do tratamento alcalino na remoção de ceras com carbonato de sódio.

A presença de bolhas observadas em algumas imagens do compósito, indica que é preciso melhorar o processo de laminação manual na fabricação dos corpos de prova para eliminá-las e obter uma melhor resistência mecânica.

Em comparação com imagens reportadas da literatura, o material investigado neste estudo apresentou mecanismos de danos semelhantes ao de outros estudos com fibras naturais diversas.

A microscopia do material compósito de Moreira; Seo (2016), demonstrou que as fibras da folha do milho foram dispostas de forma descontínua e aleatória, ou seja, possuem características isotrópicas (mesma característica para diferentes direções), podendo-se, portanto, aplicar força em todos os sentidos que haverá reforço igual em toda extensão do material.

O MEV realizado por Oliveira (2015), mostrou uma deficiência de adesão entre a matriz e resíduo, fratura coesiva, impurezas e não penetração de resina no interior da estrutura do compósito, resignando uma fratura frágil.

As análises, microscópica de varredura realizada no compósito das fibras do mamoeiro por Santos (2019), foram feitas de modo a observar as superfícies da estrutura das fibras do mamoeiro sendo vistas devido à remoção do material não fibroso e ceras da superfície da fibra, tornando-se claro que o processo de extração físico remove muito bem as impurezas das superfícies das fibras do mamoeiro.

No estudo de Leite (2022), com material compósito reforçado com fibras de caraná e matriz epóxi, foram revelado pelo MEV o comportamento frágil da matriz epóxi, evidenciado pela presença de “marcas de rio e franjas de fratura”, tanto para a matriz quanto os compósitos. Também foi observado a presença de vazios e bolhas que podem estar relacionados ao método de fabricação manual, bem como uma má distribuição das fibras na matriz epóxi, sobretudo para os compósitos com 10 e 20% em volume.

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentados as conclusões dos resultados e discussões encontrados nesta pesquisa.

- A fibra da palha de milho possui uma geometria com diâmetro médio de 0,165mm e microestrutura semelhantes às demais fibras lignocelulósicas, apresentando um tecido vascular fibroso e com presença de parênquimas, levando em consideração as diferentes regiões cultivadas.
- A imersão das fibras no carbonato de sódio (barrilha) foi um método eficiente de tratamento alcalino, influenciando nos resultados das propriedades mecânicas, apresentando um resultado a tração 70% superior ao das fibras sem o tratamento.
- A densidade obtida neste estudo para a fibra da palha do milho foi de 1,32 g/cm³, semelhante ao de outras fibras vegetais que varia na faixa de 0,7 a 1,41 g/cm³, acontecendo o mesmo com o teor de cinzas apresentado nessa pesquisa que foi de 1,91%, em conformidade ao de outras partes da planta do milho reportados da literatura, cultivadas em diferentes regiões.
- Demonstrou-se a viabilidade técnica e obtenção do compósito utilizando as fibras da palha de milho e resina epóxi para todas as formulações percentuais escolhidas, na qual foram determinantes nos resultados dos ensaios.
- A densidade aparente média do compósito obtido nesse estudo foi de 1,27g/cm³, superior em 3,2% a matriz e inferior em 8% a densidade da fibra natural, produzindo um material leve, propriedade importante dos compósitos.
- Não há diferença significativa do ganho entre os níveis de absorção para os dois meios aquosos durante 60 dias, ambas formulações teve absorção similares até a saturação. A boa impregnação das fibras à matriz influenciou para uma saturação com baixo tempo de imersão, que foram aumentando com adição de fibras.
- No ensaio de envelhecimento do compósito mostrou a resistência do material às condições intempéries, com maior perda de massa para formulação de 20%, em média 2% de perda mássica, diferença pouco significativa em relação às outras formulações do compósito e a matriz epóxi.
- Houve aumento da resistência à tração e flexão dos compósitos à medida que se aumentava o percentual de fibras. A fibra da palha de milho esteve presente na

função de carga de enchimento para os testes de resistência a tração e flexão, pois todas formulações apresentaram resistência a baixo da matriz epóxi.

- A formulação do compósito de melhor comportamento mecânico foi de 20%. Apresentou resistência à tração e flexão semelhantes ao da matriz, com aumento significativo em relação às outras formulações propostas.
- Com relação a resistência a tenacidade do ensaio de impacto, as fibras estão presentes como carga reforço, onde todas formulações do compósito obtiveram resultados superiores ao da matriz epóxi, destacando a formulação de 20%, com aumento de 2 vezes a tenacidade da matriz epóxi.
- A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) mostra um maior pico exotérmico para todas as formulações do compósito com temperatura superior a 400°C, indicando compósito de 20% como o que apresentou maior variação de entalpia.
- As imagens obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciou a ocorrência de vazios, trincas, fraturas adesivas e coesivas na matriz e deficiência de adesão da fibra a resina, influenciando na resistência mecânica do material compósito, comprovando a necessidade de melhoria no processo de laminação manual (*Hand Lay Up*) e do tratamento alcalino para remoção de ceras, otimizando o processo de fabricação das placas de compósitos.
- Nesse contexto, foi demonstrada a viabilidade técnica do compósito produzido com matriz polimérica epóxi impregnados de fibras da palha de milho, surgindo como uma tecnologia inovadora, simples, eficaz e satisfatória para atender componentes e estruturas que solicitam poucas cargas mecânicas que necessitam de materiais leves, estética notável e de fácil produção com tendência competitiva com outros materiais na fabricação de reservatórios, calhas, telhas, prateleiras, painéis.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de novas formulações de compósitos utilizando a fibra da palha de milho com outros tipos de resinas poliméricas (poliéster, polipropileno);
- Realizar um estudo e caracterização de um compósito híbrido polimérico a base de matriz epóxi e carga de fibra da palha de milho junto com fibra do tecido de juta e vidro;
- Tratar superficialmente as fibras da palha de milho com outros métodos alcalinos a fim de melhorar a interface fibra/matriz;
- Estudar a influência do ensaio de envelhecimento em condições intempéries nas propriedades mecânicas do compósito;
- Ensaiair a absorção do compósito imersos em óleos;
- Analisar o comportamento acústico do compósito;
- Obter a composição química do compósito pela análise de difração de raio-x (DRX) e analisar como essa variação interferem nas propriedades mecânicas;
- Ampliar os estudos de fabricação de compósitos a base de matriz epóxi utilizando outras fibras vegetais como reforço.

REFERÊNCIAS

ABIB - **Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável. Atlas Brasileiro da Biomassa Florestal e Industrial de 2022.** Disponível em: <http://abibbrasil.wix.com/brasilbiomassa>. Acesso em: 22 de novembro de 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3878-20.** Standard Terminology for composite materials. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3418-21.** Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3822-14.** Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D792-20.** Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-14.** Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790-17.** Standard Test Methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6110-10.** Standard Test Methods for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D570-18.** Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1435-13.** Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15885:** Membrana de polímero acrílico com ou sem cimento, para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ANFIKO. **Soluções em polímeros.** Disponível em; <https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-microscopia-eletronica-mev/>. Acesso em 11 de mar 2023.

ARAÚJO, J. R. **Compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibra de curauá obtidos por extrusão e injeção.** Dissertação M.Sc., Universidade Estadual de Campinas Instituto de Química, Campinas, São Paulo, SP, Brasil, 2009.

ARAÚJO, S.N.R. **Compósitos de borracha regenerada e resíduos de eva para revestimento em instalações rurais**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – PPGEA/UFCG, 2022.

ARRUDA, A.M. **Polímeros. Materiais que transformaram o mundo**. Dissertação de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional da Universidade Federal de Viçosa, 2020.

AZEVEDO, J.B.; CARVALHO, L.H.; CANEDO, E.L.; BARBOSA, J.D.V.; SILVA, M.W.S. **Avaliação da Biodegradação em Compósitos com Fibras Naturais através de Perda de Massa e Produção de CO₂**. Revista Virtual de Química. v. 8. nº 4. p. 1115-1129, 2016.

BALASUBRAMANIAN, M. **Composite materials and processing**. [s.l.]: CRC Press. Bai, J. (2013) *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*. [s.l.]: Elsevier, 2013.

BARBOSA, J.T.L. **Caracterização de compósitos poliméricos feito com resíduos pós-consumo (poliestireno de alto impacto) e industriais (Lama vermelha e fibra de vidro/resina epóxi)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Estadual Paulista, UNESP. Bauru, 2019.

BELTRAMI L. V. R., SCIENZA L. C., ZATTERA A. J., “**Efeito do tratamento alcalino de fibras de Curauá sobre as propriedades de compósitos de matriz biodegradável**”, *Revista Polímeros*, v. 24, n. 3, pp.388-394, Jun. 2014.

BENIN, S.R. **A review on mechanical characterization of polymer matrix composites & its effects reinforced with various natural fibres**, *Material Today: Proceedings*, Volume 33, p.789-805, 2020.

BREBU, M. **Environmental degradation of plastic composites with natural fillers. a review**. *Polymers* 2020, 12, 166. <https://doi.org/10.3390/polym12010166>.

BRILHANTE, F.F. **Desenvolvimento de manta termoacústica à base de fibra da palha de milho e resina epóxi**. Dissertação para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil. Centro Universitário Christus, Unichristus, Fortaleza, 2020.

CALEGARI, E.P; OLIVEIRA, B.F. **Compósitos a partir de materiais de fontes renováveis como alternativa para o desenvolvimento de produtos**. *Sustentabilidade em debate*. v. 7. nº 1. p. 140-155, 2016.

CALLISTER JR, W. D, RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

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

CARVALHO, A.C. **Fabricação e caracterização de compósitos à base de resina epóxi e fibras de bananeira**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de São João Del-Rei, 2015.

CASARA, V. P.; BOHN, L. R.; DRESCH, A. P.; MIBIELLI, G. M.; BENDER, J. P.; **"Caracterização Físico-químico da biomassa de milho"**, p. 1295-1300 . In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica [=Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n.4]. ISSN: 2446-8711. São Paulo ,2017.

CASTRO, A. **Influência da temperatura e tempo de cura na transição vítrea da resina epóxi**. Scientia cum Industria, 7.15-2, 2019. 10.18226/23185279.v7iss3p14

CHANDGUDES; SALUNKHE,S. **Biofiber-reinforced polymeric hybrid composites: An overview on mechanical and tribological performance**. Review Article. Polymer Composites, 2020. <https://doi.org/10.1002/pc.25801>

CLIMATEMPO. **Climatologia em Simões Filho Bahia**. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/5245/simoesfilho-ba>. Acessado em 05 de Abril de 2023.

COELHO, P. **Resina epóxi: História, processo de produção, propriedades e usos**. Artigo publicado em 27 de agosto de 2018, na ENGQUIMICASANTOSSP, 2018.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Monitoramento agrícola – Safra 2021/22**. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília - DF. Relatório da Conjuntura Agropecuária, 2022.

CORREIA, E. A. S. **Compósitos de Matriz Geopolimérica Reforçados com Fibras Vegetais de Abacaxi e de Sisal**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba: João Pessoa, 2011.

COSTA, J. A. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus urograndis*, plantado no Distrito Federal, para produção de celulose Kraft**. 2011, 1-86 p. Dissertação (Mestrado no curso de Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília: Brasília, 2011.

DHALIWAL, J. S. **'Natural Fibers: Applications'**, in M. Abbas, H. Jeon (eds.), Generation, Development and Modifications of Natural Fibers, IntechOpen, London, 2019. 10.5772/intechopen.86884.

EICHOLZ, E. D. et al. **Produtividade de variedades de milho de polinização aberta no RS**. In: XXXI CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO. Anais... Bento Gonçalves, p. 1436 – 1439, 2016.

FAGUNDES, T. F. Da.S. **Influência do polipropileno modificado com anidrido maleico nas propriedades mecânicas e térmicas em compósitos de polipropileno dom resíduos de concha calcinados**. Título de Engenharia de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), 2018.

FAO. **Base de dados FAOSTAT**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 06 set. 2022.

FERREIRA, J.L.A.N.G. **Compósitos de polipropileno reforçados com nanopartículas de alumina e fibras curtas de carbono**. 2022. 172 f. Dissertação

(Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2022.

FIESP. **Informativo DEAGRO**. Safra mundial de milho 2018/19, 2019.

FOGUESATTO, C.R.; ARTUZO, F; SOUZA, Â. R; SILVA, L. X. **Gestão de custos na produção de milho e soja**. Artigo • Rev. bras. gest. neg. 20 (02) • Apr-Jun, 2018.

FROEHLICH, C; BITENCOURT, C.C. **Sustentabilidade empresarial: Um Estudo de Caso na Empresa Artecola**. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade GeAS, v. 5. nº 3. p. 55-71, 2016.

GHOLAMPOUR, Ali & OZBAKKALOGLU, Togay. **A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications**. Journal of Materials Science. 2020.

GIRALDELLI, M. A. **Propriedade da fibra de coco: Uma revisão sistemática**. Universidade de Cuiabá, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Ambientais. MT, 2020.

GOMES, M. A. **Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de folhas de abacaxizeiro (PALF)**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ. 2015.

HAOACH, J. F. **Obtenção e caracterização de nanocristais de celulose por hidrólise ácida a partir do bagaço de cana-de-açúcar**. Obtenção do título de Engenheiro Químico. Universidade Federal do Paraná; Câmpus Francisco Beltrão. 2019.

HENRIQUES, R. L. **Utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliação da ação de cloretos em compósitos de matriz cimentícia**. Especialização: Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.

HIRANOBE, C. T. **Avaliação da densidade de ligações cruzadas da borracha natural reticuladas em diferentes sistemas de vulcanização por meio de ensaios mecânicos**. 2020. 136f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais) UNESP, Coordenadoria de Curso de Engenharia de Energia, Rosana-SP, 2020.

IBRAHIM, S.M. **Potential of using multiscale corn husk fiber as reinforcing filler in cornstarch-based biocomposites**. Advanced Engineering Materials and Composites Research Centre, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Universiti Putra Malaysia, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Determination of tensile properties of plastics. ISO 527-1**, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Determination of flexural properties of plastics. ISO 178**, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Determination of Charpy impact properties of plastics. ISO 179-1**, 2010.

JESUS. L.C.C; LUZ, S. M. **Comportamento térmico de compósitos de poliestireno reciclado reforçado com celulose de bagaço de cana**. Revista Matéria, v.24, n.3, artigo e-12421, 2019.

JÚNIOR, E. **Compósitos poliméricos: Aplicações na indústria**. Materiais e Metalurgia. EMEJ: Porto Alegre, 2020.

JÚNIOR, Z.J.D. S. **Fabricação e caracterização de um compósito com matriz de resina poliéster ortoftálica e carga de fibras de agave angustifolia haw**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

KOESTER, D.L. **Obtenção e caracterização de celulose de resíduos agroindustriais**. IX Jornada de Iniciação Científica e tecnológica. Universidade Federal da fronteira do Sul. Cerro Largo, 2019.

KUHL, K. I. P. Investigation of the technical viability of the use of ozone for the polymerization of aniline. Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2021.

LEÃO M. A. **Compósitos poliméricos a base De fibras de licuri: Efeitos da hibridização e do envelhecimento ambiental acelerado**. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte, p. 190, 2013.

LEITE, O. L. **Determinação das propriedades mecânicas de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã**. FEMat, Universidade Federal do Pará; Ananindeua, 2022.

LIMA, J. A. **Estabilidade e adaptabilidade de híbridos de milho (*Zea mays* L.) em diferentes ambientes no Norte de Mato Grosso e Sudeste de Rondônia**. M.Sc; Universidade do Estado de Mato Grosso; fevereiro de 2020.

LOPES, M. D. M. **Uso de resíuos de bambu como reforço na fabricação de compósitos para utilização como OSB – Painéis de partículas orientadas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ. 2020.

LIBERA JUNIOR, V. D.; Teixeira, L. A.; Leão, R. M.; Luz, S. M. **“Evaluation of thermal behavior and cure kinetics of a curauá fiber prepreg by non-isothermal method”**. Materials Today: Proceedings, v. 8, n. 3, p. 839-846. 2019.

LUCHERELLI, M.A. **Biobased vitrimers: Towards sustainable and adaptable performing polymer materials**. Progress in Polymer Science, 2022, Volume 127, 101515. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2022.101515>.

LUZ, G. **Densidade do Milho (Grão, Graúdo ou Pequeno, Debulhado, Espiga. Materiais** por Gelson Luz, [s. l], 2019. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2019/04/densidade-do-milho.html>. Acesso em: 13 de abril de 2023.

MACIEL, N. de O. R. **Análise mecânica comparativa de tração, flexão e impacto entre compósitos reforçados com fibras de curauá**. 119f. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes/RJ. 2017.

MARTINS NETO, J.A. **Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MENDES, C. A. de C. **Caracterização e utilização do resíduo de palha de milho para obtenção de nanocelulose**. 2013. 105f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MENEZES, P.L. **Desenvolvimento e caracterização de um compósito polimérico reforçado com resíduos têxteis de tecido de Juta e malha de poliéster**. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

MISSIAGIA, A. **Desenvolvimento de tintas em pó base epóxi-poliéster para aplicação em móveis de aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), PPGEM– Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Farroupilha, 2018.

MOHAMMED, L. **A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications**. International Journal of Polymer Science, Londres, p.15, Ago 2015.

MORAES, C.E. **Adesivos Estruturais Baseados em Epóxi na Indústria Petroquímica: Uma revisão**. Dissertação de Graduação em Engenharia Materiais. Universidade Estadual Paulista: Guaratinguetá, 2021.

MOREIRA, T. M.; SEO, E. S. M. **Obtenção e caracterização de polímero reforçado com fibras da folha de milho**. Revista Matéria, v.21, n.4, pp. 1054 – 1068, 2016.

MOTA, R.C.S., **Análise de viabilidade técnica de utilização da fibra de bananeira com resina sintética em compósitos**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Do Rio Grande do Norte, UFRN. 2010.

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

OLIVEIRA, A.M. **Desenvolvimento de compósitos nanomodificados utilizando fibras de aramida envelhecidas uma alternativa para proteções balísticas**. Universidade Federal de Minas Gerais Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

OLIVEIRA, F.S. **Análise comparativa entre dois vasos de pressão cilíndricos: AÇO X PRFV.** 2022. 51 P. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2022.

OLIVEIRA, M.; LUZ, F. S.; SOUZA, A. T.; DEMOSTHENES, L. C. C. **Tucum fiber from Amazon astrocaryum vulgare palm tree: Novel reinforcement for polymer composites.** Polymers, 2020.

OLIVEIRA, M.L. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de resíduos vegetal proveniente do sabugo de milho.** 2015. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

OLIVEIRA, M. L. de. **Obtenção e caracterização de compósitos com matriz de resinapoliéster, resíduos do sabugo de milho e fibras de juta e de vidro tipo E.** 2023. 84 p. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2023.

OLIVEIRA, O.C. **Avaliação de fibras de bagaço de cana-de-açúcar in-natura e modificada para aplicação em compósitos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro: Campo dos Goytacazes, 2018.

OPELT, C.V; CÂNDIDO, G.M; REZENDE, M.C. **Compressive failure of fiber reinforced polymer composites–A fractographic study of the compression failure modes.** Materials Today Communications, 2018.

PAIVA, L. O. de. **Elaboração de compósitos de poliéster e amido com palha de milho: caracterização e avaliação da biodegradabilidade.** 2015. 141 f. Tese (Doutorado em Química ambiental; Polímeros) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

PEREIRA, C. dos. S. **Fatigue in tubular components of reinforced epoxy matrix with carbon fibers subjected to bending and torsional loads.** Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. University of Coimbra; Coimbra, 2013.

PEREIRA, P. H. F. **Vegetal fibers in polymeric composites:** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 25. nº 1. p. 9-22, 2015.

PINHEIRO, G.K.C. **Influência da orientação da fibra de vidro na resistência mecânica de laminados em compósitos de matriz epóxi.** Programa de Graduação em Engenharia Metalúrgica e de materiais da Universidade Federal do Ceará, 2022.

QUEIROZ, V.A.V. **Alterações na composição nutricional de milho durante o armazenamento em paióis.** XXVIII Congresso Nacional de Milho e Sorgo: Associação Brasileira de Milho e Sorgo. Goiânia, 2010.

RAMOS, M.D.F. **Produção de derivados de celulose de palha de milho.** Universidade Estadual de Maringá / Centro de Ciências Agrárias/Maringá, 2019.

RANA, S; FANGUEIRO, R. **Fibrous and textile e materials for composite applications**. [S.I.]: Springer, 2016.

ROMÃO, D.R. **Potencial de fibras de resíduo agrícola: palha de milho (Zea mays L.) para produção de celulose**. Graduação em Engenharia Florestal. Universidade de Brasília, 2015.

SÁ, Bruno. S. R. **Obtenção e caracterização do compósito de polipropileno reciclado com fibra de palmeira-real (Archontophoenix cunninghamiana)**. 55f. Dissertação de Mestrado: – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

SALAZAR, R.F.S. **Estudo da composição da palha de milho para posterior utilização como suporte na preparação de compósitos**. In: *VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, UNIFRA, Santa Maria, RS, Brasil, Jul. 2005.

SAMEER, A. Agrawal, Ashish M. Umbarkar, Nitin P. Sherie, Ashish M. Dharme, Dharmesh Dhabliya. **Statistical study of mechanical properties for corn fiber with reinforced of polypropylene fiber matrix composite**. University, Pune, India, 2020.

SANTOS, A.L.Dos. **Obtenção De Nb2O5 nanoestruturado para adsorção de poluentes em meio aquoso**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2022.

SANTOS, A.L.N. **Estudo da lignina residual da polpação soda na biorrefinaria do eucalipto para produção de etanol**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2021.

SANTOS, C. M. da S. **Extração e caracterização das fibras do mamoeiro**. 2019. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Têxtil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SHIMIZU, F. L. **Remoção de lignina e hemicelulose: influência na acessibilidade à celulose e sacarificação enzimática**. 73 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro. Rio Claro, 2018.

SILVA, A. C. R. **Pirólise rápida catalítica de sabugo de milho: Seletividade dos catalisadores HZSM-5 E Hb para a produção de hidrocarbonetos aromáticos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

SILVA, I.L.A. **Propriedade e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contiuna de juta**. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2014.

SILVEIRA, D. C. et al. **Caracterização agromorfológica de variedades de milho crioulo (Zea mays L.) na região noroeste do Rio Grande do Sul**. Rev. Ciência e Tecnologia, Rio Grande do Sul, v. 1, p. 01-11, n. 1, 2015.

SINTRAFSE. **Sindicato dos trabalhadores rurais e agricultores familiares de Santo Estevão-Ba.** Feira do Milho, acessado em 20 de abril de 2023.

SOUZA, A.T.; PEREIRA JUNIO, R.F.; **Caranan fiber from mauritiella armata palm tree as novel reinforcement for epoxy composites.** *Polymers* 2020, 12, 2037. <https://doi.org/10.3390/polym12092037>.

SOUZA, L.G.V. M. **Efeitos da adição de tecido de fibra de vidro tipo e a um compósito de resina poliéster e tecido de fibra de algodão.** 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SOUZA, R.F. **Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito de matriz de poliéster e carga de pó de carnaúba.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

SPINELLI, M.C.O. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz de resina poliéster e pó de resíduo de aço.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

TINÔ, S.R.L; FONTES, R.S; AQUINO, E.M.F. **Compósitos poliméricos à base de tecidos bidirecionais naturais e sintéticos.** *Latin American Journal of Development*, Curitiba, v.4, n.3, p.1270-1282, may/jun, 2022.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **United States Department of Agriculture: FY 2022 – Budget Summary. 2022a.** Disponível em: <<https://www.usda.gov/>>. Acesso em: 27 nov. 2022.

VARELA, P.H.A. **Obtenção, caracterização e aplicabilidade de um compósito com matriz de resina ortoftálica e reforços de tecidos de juta (corchorus capsularis) hibridizado com fibra de vidro.** Tese de Doutorado do PPGEM/UFRN, 2017.

YANG, G., PARK, M., PARK, S. J., “**Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: A review**”, *Composites Communications*, v. 14, p. 34–42, Ago. 2019.

ZHANG, Z.; CAI, S.; LI, Y.; WANG, Z.; LONG, Y.; YU, T.; SHEN, Y. **High performances of plant fiber reinforced composites - A new insight from hierarchical microstructures.** *Compos. Sci. Technol.* 2020. 108151. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020>.