



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS ANANINDEUA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS- FEMat

OLÍVIA LOPES LEITE

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE  
MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARAÑ**

Ananindeua, PA

2022

OLÍVIA LOPES LEITE

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE  
MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARANÃ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia de Materiais-FEMat,  
Universidade Federal do Pará-Campus  
Ananindeua para obtenção do grau de Bacharel  
em Engenharia de Materiais,

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Verônica Scarpini  
Cândido

Ananindeua, PA

2022

OLÍVIA LOPES LEITE

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE  
MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARANÃ**

Data da Avaliação:

Conceito: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Verônica Scarpini Candido - FEMat - UFPA - Ananindeua  
(Orientadora)

---

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva - FEMat – UFPA - Ananindeua  
(Membro Interno)

---

Prof. Dr. Maurício Maia Ribeiro – IFPA - Ananindeua  
(Membro Externo)

## **DEDICATÓRIA**

*Este trabalho é dedicado à Adriene Lopes e Marcos Antônio Leite, por terem a coragem e amor suficientes para mudarem as suas vidas em prol da esperança de um futuro melhor aos 3 filhos. Vocês conseguiram, Obrigada!*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser meu amparo e escudo nas horas sombrias e à Nossa Senhora, mãe de Deus, por me fornecer seu colo de mãe acalentador nas horas em que me senti mais sozinha.

Agradeço ao meu núcleo familiar. Meus pais por serem meu alicerce e maiores exemplos de amor, humildade e caráter. Meus irmãos, Tatá e Neném, por desde sempre serem meus melhores amigos e minha segurança. À minha sobrinha, Maria Helena, o sonho que mais desejei conhecer e o amor da minha vida!

Agradeço aos meus avós D. Maria Olívia, Sr. Borrego, Sr. Elias e D. Mãezinha por me darem a melhor herança que eu poderia ter, seus exemplos. À minha família na Paraíba e espalhada pelo Brasil, que mesmo longe comemora e vibra comigo cada uma das minhas conquistas, isso também é por vocês!

Ao meu tio/pai José Cícero pela oportunidade que forneceu à minha família e me cuidar como sua filha, com todo seu amor e zelo.

Ao Lucas Rezende por ser a minha paz todos os dias e não me deixar surtar (tanto) nos dias em que esse trabalho foi escrito.

À Luís Filho, Luanny, Talita, Nanã, Manu e Duda, por tornarem as minhas férias sempre mais divertidas e minha vida mais feliz desde que nasci. Ao Luiz Lokkoe e Wesley Rayol por terem sonhado esse sonho comigo e acreditarem que eu era capaz quando eu não acreditava.

Aos professores da FEMat por terem contribuído na minha formação acadêmica e profissional ao longo desses 5 anos. Em especial minha Orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Verônica Scarpini pelo conhecimento repassado/compartilhado, conselhos e exemplo.

Ao Prof. Dr. Alisson Rios e Prof. Dr. Maurício Maia por terem me dado auxílio no decorrer deste trabalho e aceitarem participar da etapa final do mesmo.

A Miriane e Luciano pelas resinas fornecidas para a realização deste trabalho. Ao GPMCOMP por ter me feito sorrir nas manhãs e tardes em que este trabalho foi confeccionado, Nély, Avener e Paulo.

Aos amigos Mathaus Lucas, Andreza Dias, Camila Gabrielle, Marcos Vinícius, Andrio Pinheiro e Renan Vasconcelos por tornarem essa caminhada mais leve e estarem comigo do começo ao fim deste projeto e toda a graduação.

Ao meu grupo de trabalho Damares Barbosa, Dimi Lira e Edson Miranda por não me permitirem preocupar com tempo a menos nas apresentações e a turma FEMat 2018 pela paciência em esperar o fim de nossas apresentações.

A todos, meu Muito Obrigada!

## RESUMO

O uso de fibras naturais como reforço em compósitos poliméricos tem sido amplamente estudado com o passar dos anos, a região amazônica se destaca por abrigar alta diversidade vegetal, no entanto ainda pouco exploradas cientificamente. Neste contexto, destaca-se a fibra de caranã, que apresenta propriedades promissoras para aplicações em engenharia. Este trabalho busca caracterizar a fibra de caranã, bem como avaliar a eficiência nas propriedades mecânicas da sua incorporação de 10, 20 e 30% em volume na matriz epóxi. A fibra apresentou densidade geométrica média de  $0.38 \text{ g/cm}^3$ , seção transversal porosa, circular, com orifício no centro da seção e superfície longitudinal heterogênea marcada pela presença de rugosidades. O FTIR indicou a presença de grupos funcionais característicos para a fibra e revelou que a adição de fibras gera um aumento gradativo da interação ativa entre a matriz epóxi e os grupos moleculares da fibra de caranã; para as propriedades de tração o percentual de 30% em volume de fibras apresenta-se como o mais eficaz, aumentando a resistência à tração em 4,5% e a rigidez em 8,8% do compósito em relação à matriz interação das caranã com a matriz epóxi. As propriedades de flexão não demonstraram melhoras a partir da incorporação de fibras de caranã na matriz epóxi, entre os mecanismos que levaram o material a falha encontram-se a presença de porosidades e dificuldade na distribuição de fibras no interior da matriz.

**Palavra(s)-chave:** Fibras Naturais; Amazônia; Fibra de Caranã; Compósitos.

## ABSTRACT

The use of natural fibers as reinforcement in polymeric composites has been widely studied over the years, the Amazon region stands out for harboring a high plant diversity, however still little explored scientifically. In this context, the caranã fiber stands out, as it has promising properties for engineering applications. This work seeks to characterize the caranã fiber, as well as to evaluate the efficiency in the mechanical properties of its incorporation of 10, 20 and 30% in volume in the epoxy matrix. The fiber had an average geometric density of 0.38 g/cm<sup>3</sup>, porous, circular cross-section, with a hole in the center of the section and heterogeneous longitudinal surface marked by the presence of roughness. The FTIR indicated the presence of characteristic functional groups for the fiber and revealed that the addition of fibers generates a gradual increase in the active interaction between the epoxy matrix and the molecular groups of the caranã fiber; for the tensile properties, the percentage of 30% by volume of fibers is the most effective, increasing the tensile strength by 4.5% and the stiffness by 8.8% of the composite in relation to the matrix interaction of the caranã with the epoxy matrix. The flexural properties did not show improvements from the incorporation of carana fibers in the epoxy matrix, among the mechanisms that led the material to failure are the presence of porosities and difficulty in the distribution of fibers inside the matrix.

**Keyword(s):** Natural Fibers; Amazon; Caranan fiber; Composites.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura química resina epóxi DGEBA .....	17
Figura 2 – Estrutura química da celulose .....	19
Figura 3 – Estrutura química da hemicelulose .....	20
Figura 4 – Ilustração parcial da provável estrutura da lignina .....	21
Figura 5 – Representação estrutural de fibra natural .....	22
Figura 6 – Aglomerado de <i>Mauritiella armata</i> .....	24
Figura 7 – Teto de palha de caranã .....	25
Figura 8 – Regiões de extração da tala e a fibra de caranã .....	25
Figura 9 – Classificação dos materiais compósitos .....	26
Figura 10 – Fibras de caranã (a) Tala de caranã e (b) Fibras de caranã .....	32
Figura 11 – Equipamento de microscopia ótica (Estereoscópio binocular Even) .....	33
Figura 12 – Balança analítica .....	33
Figura 13 – Produção dos compósitos para (a) Ensaio de tração e (b) Ensaio de flexão .....	35
Figura 14 – Dimensões (mm) de corpos de prova para ensaio de tração conforme ASTM D 638 (sem escala) .....	36
Figura 15 – Ensaio de tração. (a) Máquina de ensaio universal e (b) Realização do ensaio em compósito .....	36
Figura 16 – Corpos de prova epóxi-caranã de 0, 10, 20 e 30 %vol de fibras de caranã para ensaio de tração .....	37
Figura 17 – Dimensões (mm) de corpos de prova para ensaio de tração conforme ASTM D790 (sem escala) .....	37
Figura 18 – Ensaio de flexão. (a) Máquina de ensaio universal e (b) Realização do ensaio em compósito .....	38
Figura 19 – Corpos de prova epóxi-caranã de 0, 10, 20 e 30 %vol de fibras de caranã para ensaio de flexão .....	38
Figura 20 – (a) Metalizador de amostras e (b) MEV .....	39
Figura 21 – Distribuição diametral das fibras de caranã .....	41
Figura 22 – Densidade em função dos intervalos de diâmetro para a fibra de caranã .....	42
Figura 23 – Micrografia óptica da seção transversal do caule do caranã .....	43
Figura 24 – Espectro vibracional no infravermelho das fibras de caranã .....	44

Figura 25 – Microscopia eletrônica de varredura da seção transversal de fibras de caranã de diâmetros variados (a) 0,183-0,283 mm; (b) 0,383-0,483; (c) 0,583-0,683 mm e (d) 0,683-0,783 mm, com aumentos de 692 x, 395x, 395x e 395x, respectivamente .....	45
Figura 26 – Microscopia eletrônica de varredura da vista longitudinal de fibras de caranã de diferentes diâmetros (a) 0,183-0,283 mm e (b) 0,583-0,683 mm; com aumentos de 346x. ..	46
Figura 27 – FTIR resina epóxi e compósitos epóxi-caranã .....	47
Figura 28 – Aspecto macroscópico da fratura dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã ensaiados em tração.....	48
Figura 29 – Curvas de tração da resina epóxi e dos compósitos com 10, 20 e 30% em volume de fibras de caranã. ....	49
Figura 30 – Resistência à tração dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.....	50
Figura 31 – Módulo de elasticidade dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.....	51
Figura 32 – Deformação dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã. ....	51
Figura 33 – Aspecto macroscópico da fratura dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã ensaiados em flexão. ....	56
Figura 34 – Resistência à flexão dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.....	57
Figura 35 – Módulo de elasticidade em flexão e deformação dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã. ....	57
Figura 36 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura dos compósitos epóxi-caranã ensaiados em tração reforçados com (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30%; com aumentos de 69x. ....	61
Figura 37 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura dos compósitos epóxi-caranã ensaiados em flexão reforçados com (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30%; com aumentos de 69 x. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades de resinas termofixas .....	15
Tabela 2 – Principais características e limitações para uso de resinas termorrígidas.....	16
Tabela 3 – Classificação de fibras naturais .....	18
Tabela 4 – Composição química de fibras conhecidas.....	19
Tabela 5 – Propriedades mecânicas fibras naturais e fibras sintéticas .....	23
Tabela 6 – Resultados ensaio de tração de compósitos epóxi-caranã .....	31
Tabela 7 – Dados resina epóxi e agente de cura utilizada .....	32
Tabela 8 – Relação resina/fibra para os corpos de prova .....	35
Tabela 9 – Parâmetros ANOVA.....	40
Tabela 10 – Análise de variância da densidade geométrica das fibras de caranã .....	42
Tabela 11 – Teste de tukey para densidade geométrica das fibras de caranã.....	43
Tabela 12 – Valores para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação para a resina epóxi e para os compósitos com adição de 10, 20 e 30% em volume de fibra de caranã. ....	49
Tabela 13 – Comparativo desempenho de compósitos epóxi reforçados com fibras naturais. ....	53
Tabela 14 – Análise de variância da resistência à tração dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.....	53
Tabela 15 – Teste de tukey da resistência à tração dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã. ....	54
Tabela 16 – Análise de variância do módulo de elasticidade dos compósitos epóxi reforçados fibras de caranã.....	54
Tabela 17 – Análise de variância da deformação dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.....	55
Tabela 18 – Teste de tukey da deformação dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.....	55
Tabela 19 – Valores para à flexão, módulo de elasticidade e deformação para a resina epóxi e para os compósitos com adição de 10, 20 e 30% em volume de fibra de caranã.....	56
Tabela 20 – Análise de variância da resistência à flexão dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.....	58
Tabela 21 – Teste de tukey da resistência à flexão dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.....	58

Tabela 22 – Análise de variância do módulo de elasticidade em flexão dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã. ....	59
Tabela 23 – Teste de tukey do módulo de elasticidade dos compósitos epóxi-caranã.....	59
Tabela 24 – Análise de variância da deformação dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã. ....	60
Tabela 25 – Teste de Tukey da Deformação dos Compósitos Epóxi Reforçados com Fibras de Caranã.....	60

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
1.1 JUSTIFICATIVA .....	14
1.2 OBJETIVO GERAL.....	14
1.2.1 Objetivos específicos .....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 RESINAS POLIMÉRICAS .....	15
2.1.1 Resina Epóxi .....	16
2.2 FIBRAS NATURAIS .....	18
2.2.1 Fibras Lignocelulósicas .....	18
2.2.1.1 Fibras de Caraná.....	23
2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS .....	26
2.3.1 Materiais Compósitos Reforçados Com Fibras .....	27
2.4 MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS .....	28
2.4.1 Materiais Compósitos Reforçados Com Fibras de Caraná .....	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	32
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	32
3.2 BENEFICIAMENTO DAS FIBRAS DE CARANÃ.....	32
3.3.1 Caracterização Dimensional .....	32
3.3.2 Determinação da Densidade Geométrica das Fibras de Caraná. ....	33
3.3.3 Espectroscopia Vibracional no Infravermelho (FTIR) .....	34
3.4 COMPÓSITOS.....	34
3.4.1 Confeção dos Corpos de Prova .....	34
3.4.2.1 Ensaio de Tração .....	36
3.4.2.2 Ensaio de Flexão .....	37
3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	39
3.6 ANOVA.....	40
4 RESULTADOS.....	41
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE CARANÃ.....	41
4.1.1 Caracterização Dimensional das Fibras de Caraná.....	41
4.1.2 Espectroscopia Vibracional no Infravermelho das Fibras de Caraná .....	44
4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura das Fibras de Caraná (MEV) .....	45
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS EPÓXI-CARANÃ .....	47
4.2.1 Espectroscopia Vibracional No Infravermelho dos Compósitos Epóxi/Fibras de Caraná .....	47

	12
4.2.2	Ensaio Mecânico.....48
4.2.2.1	Ensaio de Tração .....48
4.2.2.2	Ensaio de Flexão .....55
4.2.3	Análise Fractográfica dos Compósitos ..... 60
4.2.3.1	Compósitos Ensaiaados em Tração.....60
4.2.3.2	Compósitos Ensaiaados em Flexão.....62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....65
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....66
7	REFERÊNCIAS:.....67

## 1. INTRODUÇÃO

Entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (ODS) para a Agenda 2030 está o de assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, isso mostra como nas últimas décadas a preocupação com a conservação ambiental tem sido cada vez mais difundida na sociedade e influencia fortemente o processamento e desenvolvimento de novos materiais que gerem mais economia durante sua produção/consumo e sejam ecologicamente corretos (REIS *et al.*, 2021).

Diante desse cenário o estudo da incorporação de fibras naturais em materiais compósitos em substituição a fibras sintéticas tem se destacado tanto na academia quanto na indústria. Os materiais compósitos são compostos por duas fases, uma conhecida como matriz e a fase reforço. Conforme Alcock *et al.* (2018) o desempenho mecânico de um compósito depende do desempenho mecânico, volume e orientação de seus constituintes. Os compósitos reforçados com fibra apresentam uma ampla gama de aplicações de engenharia, incluindo construção civil, indústria automotiva, aeroespacial e blindagem balística (OLIVEIRA *et al.*, 2020; ZHANG, *et al.*, 2020).

As fibras naturais são renováveis, recicláveis e neutras em emissão de CO<sub>2</sub>. São compostas principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, suas propriedades mecânicas diferem de acordo com sua espécie, clima, solo e pelas variações da composição química como teor de celulose, microestrutura e ângulo microfibrilar (ZHANG, *et al.*, 2020). Apesar de uma ampla dispersão de propriedades físicas, homogeneidade inerente à estrutura da fibra lignocelulósica e hidrofiliçidade, ao relacionar positivamente aspectos ambientais e econômicos, os compósitos reforçados com fibras naturais apresentam vantagens como biodegradabilidade da fibra, baixa densidade, baixo peso específico, energia de processo reduzida, produção econômica e impacto ambiental positivo (GUPTA *et al.*, 2021; KHALID *et al.*, 2021).

Algumas fibras como sisal, linho, rami, bambu, algodão, banana e cânhamo são amplamente estudadas e possuem aplicações industriais. A Amazônia é reconhecida mundialmente pela diversidade de plantas, alimentos, remédios e fibras que são há muito tempo produzidas e consumidas pelas comunidades nativas, no entanto ainda pouco exploradas cientificamente (PINHEIRO *et al.*, 2019). Apesar disso, alguns estudos relacionados a fibras de juta, malva, curauá, buriti, ubim e tucum revelam alto potencial de uso destas fibras como reforço em materiais compósitos de matriz polimérica.

Além das fibras naturais já citadas, a fibra de caranã (*Mauritiella armata*), encontrada nas florestas tropicais da América do Sul apresenta propriedades promissoras para aplicações em engenharia (SOUZA *et al*, 2020). No entanto não há, ainda uma vasta gama de trabalhos tratando acerca das propriedades desta fibra natural, fazendo-se de grande valia o estudo e a realização de testes desta fibra para caracterização de suas propriedades. Deste modo, este trabalho busca realizar caracterização da fibra de caranã e avaliar a influência de sua incorporação em materiais compósitos de matriz epóxi.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As fibras amazônicas apresentam alto potencial de uso na engenharia como reforço em materiais poliméricos, destacando-se na indústria civil, têxtil, automotiva e aeronáutica. Apesar de promissora, a fibra amazônica conhecida como caranã ainda tem sido pouco estudada pela comunidade científica, bem como seus compósitos tem sido pouco explorados. A sua utilização pode contribuir para a preservação da floresta amazônica, visto que a fibra é extraída da palmeira sul-americana (*Mauritiella armata*) e colhida sem o corte da mesma e também para o desenvolvimento econômico da região, visto que a mesma tem sido comercializada para fins artesanais por comunidades locais.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar propriedades da fibra de caranã e a influência de sua incorporação em materiais compósitos de matriz epóxi.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Estudar as propriedades físicas, diâmetro médio e densidade da fibra de Caranã;
- Estudar o comportamento mecânico em tração e flexão de compósitos poliméricos de matriz epóxi reforçados com 10, 20, 30% em volume de fibras contínuas e alinhadas;
- Estudar a influência da adição de fibras na interação entre a matriz epóxi e os grupos moleculares da fibra de caranã;
- Realizar análise estatística dos dados de tração e flexão dos compósitos ensaiados;
- Avaliar a morfologia da fibra, bem como estudar a região da fratura dos compósitos ensaiados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESINAS POLIMÉRICAS

As resinas são identificadas como um polímero que pode ser classificado como termoplásticos, termofixos e elastômeros, de acordo com suas propriedades térmicas e mecânicas. Devido a fatores como baixo ciclo de produção, custos de processamento mais baixos e alta reparabilidade termoplástica, os termoplásticos e termofixos são mais extensivamente investigados (MOMANYI *et al.*, 2019).

Os polímeros termoplásticos apresentam grande vantagem pela capacidade de serem remoldados a altas temperaturas (LUCHERELLI *et al.*, 2022). Têm suas propriedades influenciadas pelo grau de cristalinidade, morfologia e orientação da rede polimérica, as quais são diretamente relacionadas às condições de processamento. Os termoplásticos amorfos são conformados acima das suas temperaturas de transição vítrea, enquanto que os semicristalinos são processados acima de suas temperaturas de fusão (NETO, PARDINI, 2006; LOPES, 2017).

Os termofixos (termorrígidos) não podem ser remoldados a altas temperaturas devido às ligações cruzadas químicas intermoleculares covalentes que criam maior resistência e rigidez (LUCHERELLI *et al.*, 2022). Possuem aplicações na construção civil, tubulações, aeronáutica, indústria eletrônica e na confecção de compósitos, onde o processamento é capaz de empregar moldes de simples confecção e a disposição dos constituintes é possível ser realizada à mão ou automaticamente. A cura ou endurecimento da resina pode ocorrer com ou sem auxílio de pressão, temperatura ou vácuo (ASIM *et al.*, 2017; POST *et al.*, 2020). A Tabela 1 apresenta as propriedades de resinas termofixas comumente utilizadas.

Tabela 1– Propriedades de resinas termofixas

<b>Tipo de Resina</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência a Tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Tração (MPa)</b>
Fenólica	1.19-1.2	10	375
Poliéster Insaturado	1.025-1.5	40-90	2000-4500
Vinil Ester	1.2-1.4	69-83	3100-3800
Epóxi	1.1-1.4	35-100	3000-6000

Fonte: LEE *et al.*, 2021.

Os termorrígidos são mais utilizados para uso estrutural em materiais compósitos devido apresentarem algumas vantagens em relação aos termoplásticos, tais como alto módulo de elasticidade, rigidez, resistência, estabilidade dimensional, resistência térmica e química (LEE

*et al.*, 2021; JIN *et al.*, 2019). A Tabela 2 apresenta as principais características e limitações para o uso de resinas termorrígidas.

Tabela 2 – Principais características e limitações para uso de resinas termorrígidas

<b>Resina</b>	<b>Características</b>	<b>Limitações</b>
<b>Epóxi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excelente propriedade em compósitos</li> <li>- Boa Resistência química e propriedades elétricas</li> <li>- Boas propriedades térmicas</li> <li>- Baixa contração na cura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longos ciclos de cura</li> <li>- Melhores propriedades obtidas em altas temperaturas de cura</li> </ul>
<b>Fenólica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ótimas propriedades térmicas</li> <li>- Boa resistência ao fogo</li> <li>- Boas propriedades elétricas</li> </ul>	-Cor
<b>Vinil</b>	-Boa resistência à fadiga	-Emissão de estireno
<b>Poliéster</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amplamente utilizada</li> <li>- Fácil uso</li> <li>- Cura a temperatura ambiente</li> <li>- Ótimas propriedades em compósitos</li> <li>- Boa resistência química</li> <li>- Boas propriedades elétricas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissão de estireno</li> <li>- Contração durante a cura</li> <li>- Inflamável</li> </ul>
<b>Poliuretano</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boas propriedades em compósitos</li> <li>- Muito boa resistência química</li> <li>- Alta dureza (resistência ao impacto)</li> <li>- Boa resistência a abrasão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cor</li> <li>- Isocianetos como agentes de cura</li> </ul>
<b>Silicone</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ótimas propriedades térmicas</li> <li>- Excelente resistência química</li> <li>- Ótimas propriedade elétricas</li> <li>- Resistente a hidrólise e oxidação</li> <li>- Boa resistência ao fogo</li> <li>- Não tóxico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adesão</li> <li>- Longos ciclos de cura</li> <li>- Cura somente a altas temperaturas</li> </ul>
<b>Ester</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excelentes propriedades em compósitos</li> <li>- Boa resistência química</li> <li>- Boa dureza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contração durante a cura</li> <li>- Inflamável</li> </ul>

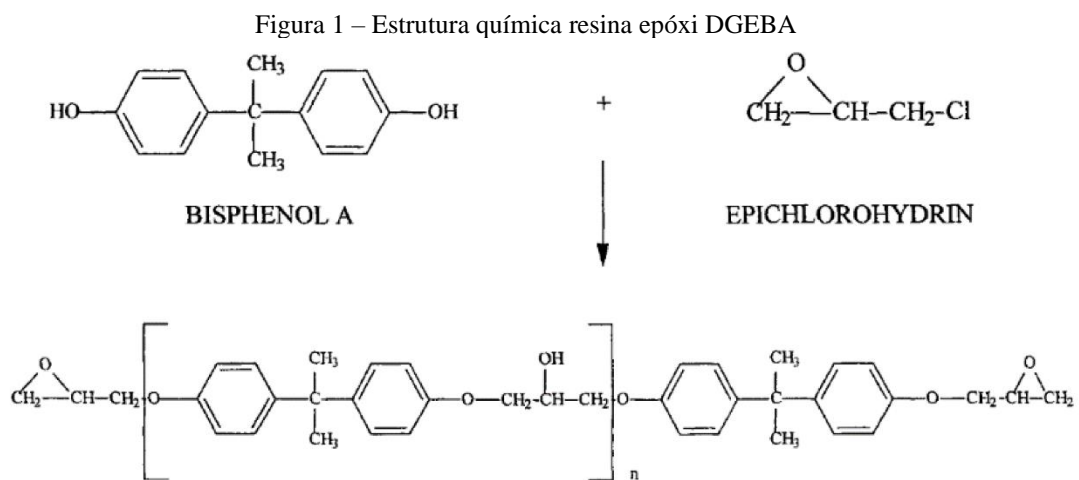
Fonte: Adaptado de PINHEIRO, 2020.

### 2.1.1 Resina Epóxi

Entre as resinas termofixas destaca-se a resina epóxi ou epoxídica que apresenta alto desempenho em razão de suas propriedades como resistência química, boas propriedades térmicas e alta força de adesão a vários substratos, além de bom isolamento elétrico, boa resistência química e baixa retração durante a cura, facilidade de processamento e boas propriedades mecânicas (WANG *et al.*, 2017). Essas propriedades lhe conferem aplicações em

diferentes áreas, como revestimentos, adesivos, tintas e destaque no desenvolvimento de materiais compósitos (KUMAR *et al.*, 2019). As reações de cura resultam na formação de redes tridimensionais com um amplo espectro de desempenho, dependendo da natureza do agente de cura e da extensão e densidade da reticulação (LEE *et al.*, 2021).

Existem três tipos principais de resinas epóxi: epóxis cicloalifáticos, epóxis de óleos epoxidados e epóxis glicidados, sendo as as mais utilizadas as resinas epóxis a base de diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA), sintetizada da reação entre a epicloidrina e o bisfenol-A (LEE *et al.*, 2021). A Figura 1 apresenta a estrutura química de uma resina epóxi DGEBA.



A estrutura é formada por grupos epóxis terminais e por uma unidade de repetição. As unidades de repetição que são incorporadas a molécula podem variar, e influenciam nas propriedades da resina (NETO, PARDINI, 2006). Apesar da sua facilidade de produção, é necessário atenção às reações de cura (grau de cura e taxa de reação) que ocorrem, visto que afetam fortemente o processamento e as propriedades físicas das resinas epóxi curadas. 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 *et al.*, 2019).

Em seus estudos CASTRO *et al.* (2019) verificou a influência da temperatura e o tempo de cura nas propriedades de Tg mínima e cura sem bolhas ou vazios internos em uma matriz epóxi. Assim, foi verificado que o método onde deixou-se a cura ocorrer em temperatura ambiente, por um tempo maior foi o de maior ganho do estudo, diminuindo o gasto com o tempo de estufa, eliminação de falhas internas da amostra e eliminação de porosidade durante a cura. Porém, foi necessário após o período de cura, submeter as amostras a um processo de pós-cura

em temperatura elevada na estufa, para obter o ciclo completo e alcançar uma transição vítrea mais elevada.

## 2.2 FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais são subdivididas de acordo com sua origem que pode ser animal ou vegetal. As fibras de origem animal são compostas por proteínas, enquanto as de origem vegetal são compostas por celulose (polissacarídeo). As fibras de origem vegetal também conhecidas como fibras lignocelulósicas (FLNs), são mais estudadas devido ao curto período de crescimento, maior disponibilidade e renovabilidade, estas podem ser encontradas nas sementes, frutos, folhas, madeira, caule dos vegetais, conforme demonstrado na Tabela 3 (LOFTI, *et al.*, 2021; TAVARES, *et al.*, 2020).

Tabela 3 – Classificação de fibras naturais

Vegetal	Seda	Linho, cânhamo, juta, rami
	Folha	Abacá, Banana, Abacaxi, Sisal
	Semente	Algodão, Sumaúma
	Fruta	Coco
	Madeira	Madeira dura, madeira macia (Ex. eucalipto)
	Talo	Trigo, milho, aveia, arroz
	Gramma/Junco	Bamboo, milho
Animal	Lã / Pêlo	Caxemira, Pêlo de Cabra, Pêlo De Cavalo, Lã De Cordeiro
	Seda	“Seda Mulberry”
Mineral	-	Amianto, fibras cerâmicas e fibras metálicas

Fonte: Adaptado de PEÇAS *et al.*, 2018

Em comparação às fibras sintéticas, os compostos FLNs apresentam características relacionadas a biodegradabilidade, renovabilidade e ampla disponibilidade associadas a baixa densidade, custo relativamente baixo e boas propriedades mecânicas. Com o passar dos anos, diversos estudos têm sido realizados para que fibras naturais sejam alternativas para substituição de fibras sintéticas como fibras de carbono e vidro, por exemplo (CHANDGUDE, SALUNKHE, 2020).

### 2.2.1 Fibras Lignocelulósicas

As fibras lignocelulósicas podem ser consideradas compósitos naturais constituídos basicamente por 33-55 %p de celulose, que é responsável pela forma estrutural e alongada dos vegetais; 20-40 %p de hemicelulose, responsável por manter as cadeias celulósicas conectadas; 10-40 %p de lignina, que possui estrutura interligada entre si formando uma rede molecular;

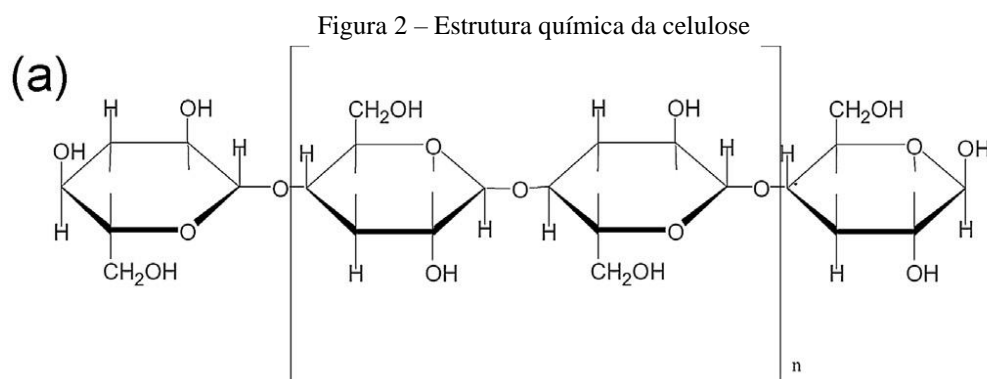
ainda possui extrativos como pectina, resina, ceras, dentre outros (YANG *et al.*, 2019). A Tabela 4 apresenta composições químicas de algumas fibras conhecidas.

Tabela 4 – Composição química de fibras conhecidas

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: Adaptado de YANG *et al.*, 2019

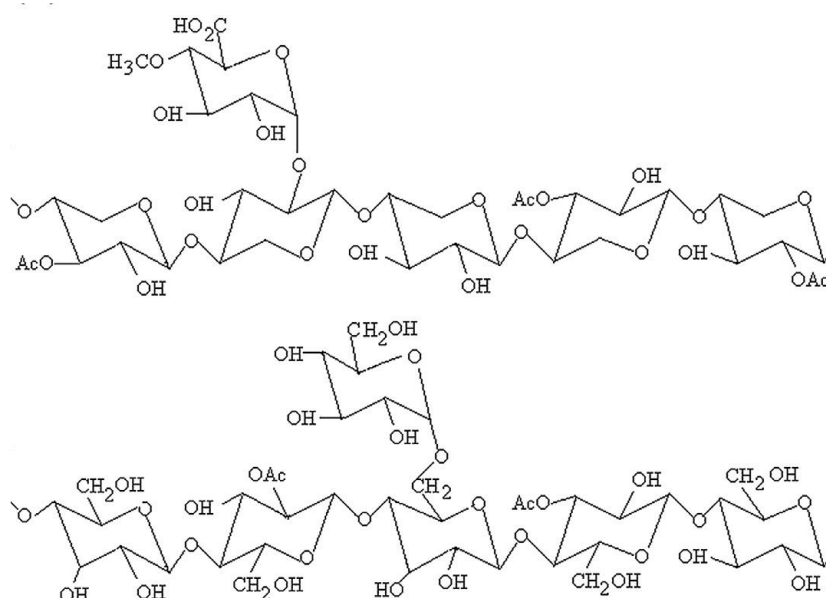
A celulose é o polissacarídeo mais abundante na Terra e um material renovável que está presente na maioria dos vegetais, composto por monômeros de glicose através de ligações 1,4- $\beta$ -D-glicosídicas. Sua fórmula básica é  $C_{6n}H_{10n}+2O_{5n+1}$  ou  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , onde “n” corresponde ao grau de polimerização da glicose. Por se tratar de um material polimérico, possui fases amorfas e cristalinas coexistentes. As microfibrilas de celulose apresentam alta resistência à tração que constitui sua propriedade fundamental e garante o papel estrutural que a celulose desempenha nas plantas (VÂRBAN *et al.*, 2021; BAHRAMI *et al.*, 2020; SYDUZZAMAN, 2020). A estrutura da celulose é representada pela Figura 2.



Fonte: THAKUR, THAKUR, 2014

A hemicelulose é o segundo polímero natural mais abundante da terra, depois da celulose. Sua composição química consiste em várias unidades de monômeros de açúcar diferentes dispostas em diferentes proporções que incluem açúcares de cinco carbonos e açúcares de seis carbonos conhecidos como pentose ( $C_5H_8O_4$ )<sub>n</sub> e a hexose ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>, respectivamente. Possui estrutura ramificada, seu peso molecular é inferior ao da celulose, assim como seu grau de polimerização bem inferior, o que torna a estrutura amorfa hidrolisável. Pode se ligar aos componentes de celulose e lignina na parede celular para aumentar a rigidez e a flexibilidade das fibras (BAHRAMI, *et. al.* 2020; NECHITA, *et. al.* 2021). A estrutura da hemicelulose é representada pela Figura 3.

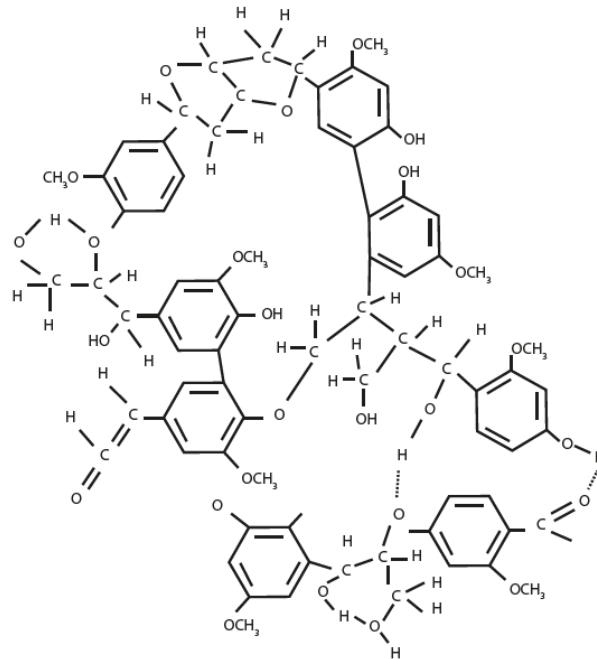
Figura 3 – Estrutura química da hemicelulose



Fonte: THAKUR, THAKUR, 2014

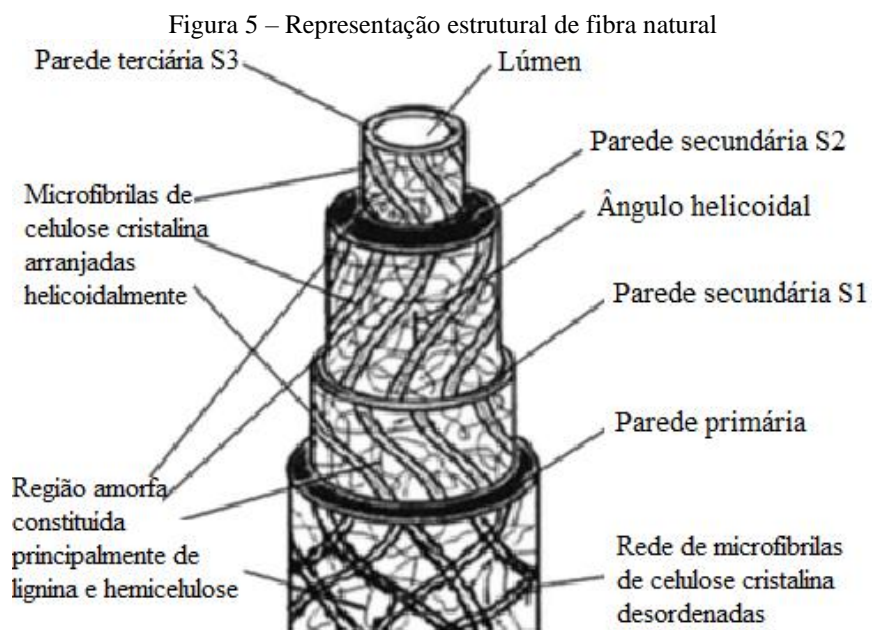
A lignina difere da celulose e hemicelulose por possuir anéis aromáticos em vez de longas cadeias moleculares. Trata-se de uma macromolécula polifenólica, amorfa e altamente ramificada que consiste em três unidades p-hidroxifenila, siringila e guaiacila, que dependendo da instalação e extração, pode apresentar diferentes composições químicas. Juntamente com a hemicelulose atua como matriz na incorporação das fibras de celulose, assim tem a função de unir a estrutura minimizando possíveis defeitos que possam surgir (YANG *et al.*, 2019). A provável estrutura da lignina é representada pela Figura 4.

Figura 4 – Ilustração parcial da provável estrutura da lignina



Fonte: FORNARI JÚNIOR, 2017

A organização estrutural das fibras lignocelulósicas é formada por três paredes distintas que possuem microfibrilas enroladas a elas em relação ao eixo da fibra formando o ângulo microfibrilar (ângulo de inclinação das microfibrilas, MFA). A parede primária é a primeira camada onde as fibrilas de celulose são depositadas durante o desenvolvimento celular, nela os MFAs apresentam diferentes graus de alinhamento. Já na camada secundária encontram-se três camadas, S1, S2 e S3. Nas camadas S1 e S3 o ângulo microfibrilar tem orientação helicoidal enquanto na camada S2 a orientação é axial. A parede terciária está relacionada ao lúmen (REIS *et al.*, 2020; GHOLAMPOUR, OZBAKKALOGLU, 2020). A Figura 5 apresenta um esquema representativo da estrutura das fibras lignocelulósicas.



Fonte: GHOLAMPOUR, OZBAKKALOGLU, 2020

O ângulo microfibrilar (MFA) formado influencia as propriedades de resistência à tração e ductilidade das fibras celulósicas, um baixo MFA implica em propriedades mecânicas superiores (MARCHI *et al.*, 2022).

Diversos estudos têm sido realizados para que fibras naturais sejam alternativas para substituição de fibras sintéticas como fibras de carbono e vidro, por exemplo, a partir da incorporação das mesmas em matriz polimérica. 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. A Tabela 5 apresenta um comparativo de propriedades mecânicas entre algumas fibras naturais e fibras sintéticas.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas fibras naturais e fibras sintéticas

<b>Fibra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Resistência a Tração (MPa)</b>
Aramida	1.4	3.3-3.7	63-67	3000-3150
Carbono	1.4	1.4-1.8	230-240	4000
E-glass	2.5	0.5	70	2000-3000
S-glass	2.5	2.8	86	4570
Poliéster	1.2-1.5	2.0-4.5	2	40-90
Polihidroxialcanoatos	1.1-1.4	1-6	3-6	35-100
Algodão	1.2-1.6	7.0-8.0	5.5-12.6	250-500
Coco	1.2	24-51	6 (40)	140-593
Linho	1.2-2.4	2.3-3.2	27.6-80.0	500-1500
Cânhamo	1.3	2-40	45 (70)	690 (530-1100)
Juta	1.2-1.8	1.5-2.5	10 – 55	325-800
Kenaf	1.2-1.6	1.6	41 (53)	745-930
Sisal	1.2-1.5	2.0-3.2 (8)	9.4-22.0	310-855
Abacá	1.5	3.4	41	410-810
Henequen	1.4	4.8	13.2	500
Abacaxi	1.5	0.8-3.2	82	1020-1600
Banana	1.3	2.0-3.7	27 – 32	720-910
Urtiga	1.5	1.7	38	650
Rami	1.4	1.2-3.7	23 – 44	500-915

Fonte: BREBU, 2020

Segundo DHALIWAL (2019), as propriedades físicas, mecânicas e químicas de fibras vegetais são fortemente dependentes da colheita, influenciadas pelo clima, localização, características do solo, condições do tempo, idade da planta, entre outros fatores. De fato, as propriedades também são afetadas pelo processamento das fibras e pela sua incorporação em compósitos, com relação ao manuseio, à impregnação e à consolidação.

#### 2.2.1.1 Fibras de Caranã

Popularmente conhecido como caranã, a *Mauritiella armata* é encontrada principalmente na região amazônica, e também em estados das regiões sudeste e nordeste brasileiras (SiBBr, 2020). Pode ser detectada em margens de lagos, pântanos e savanas inundadas sazonalmente

(SMITH, 2015). Apresentam tronco fino, revestido de fortes espinhos em toda a sua extensão e atingem entre 10 a 20 m de altura (SMITH, 2015; CAVALCANTE, 1974). A Figura 6 apresenta um aglomerado de caranã.

Figura 6 – Aglomerado de *Mauritiella armata*



Fonte: Acervo Royal Botanic Garden, 2021

As folhas do caranã são utilizadas como cobertura de casas, como mostrado na Figura 7. A tala do caranã, de onde é extraída a fibra, é utilizada na fabricação de artefatos indígenas como o tipiti e em amarrações feitas pelas populações locais. A comercialização da fibra de caranã contribui para a preservação da floresta amazônica, visto que a mesma é extraída da palmeira sul-americana e colhida sem o corte da mesma (SOUZA *et al.*, 2020). A região de onde é extraída a tala e a fibra de caranã, estão destacadas em vermelho na Figura 8.

Figura 7 – Teto de palha de caranã



Fonte: Mapio.net, 2022

Figura 8 – Regiões de extração da tala e a fibra de caranã

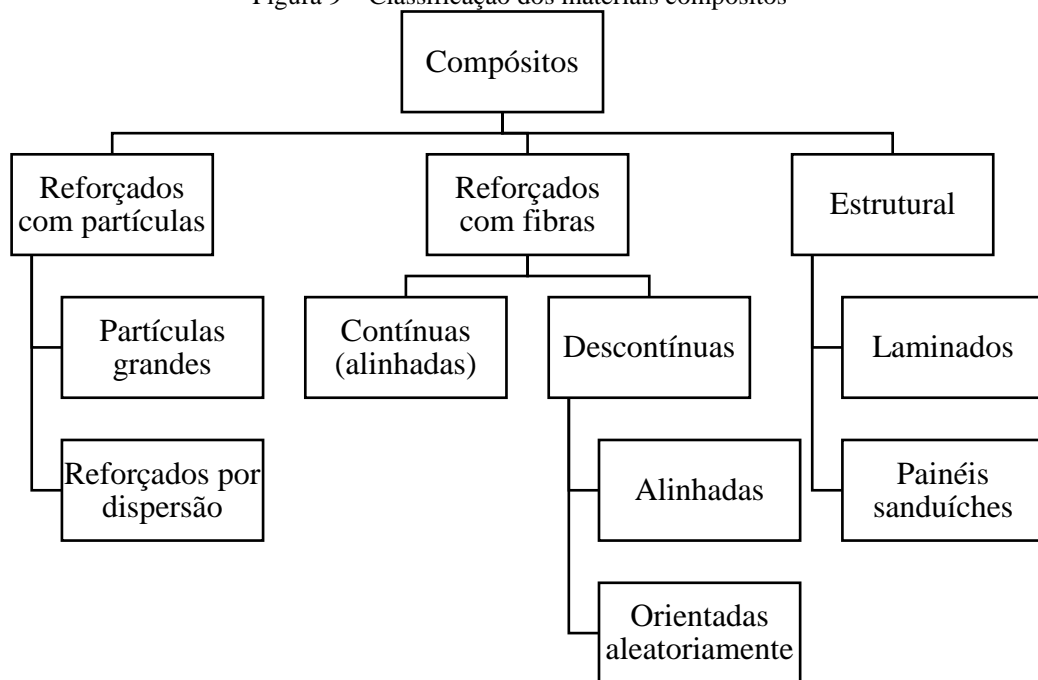


Fonte: Acervo Royal Botanic Garden, 2021

### 2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Conforme MUSSATO *et al.* (2016), os materiais compósitos são formados por duas fases, uma contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço). Para LOPES (2017) é importante que os componentes das fases estejam presentes em proporções razoáveis, ou seja, superior a 5% no material. As propriedades finais de um material compósito fabricado são dependentes das propriedades individuais dos constituintes, suas quantidades relativas, geometria e distribuição (EGBO, 2021). A Figura 9 apresenta um esquema representativo de classificação de materiais compósitos.

Figura 9 – Classificação dos materiais compósitos



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2016

Segundo NETO, PARDINI (2006), as matrizes podem ser classificadas de acordo com sua estrutura e natureza química como matrizes poliméricas (termorrígidas e termoplásticas), cerâmicas, carbono e metálicas. Sua função no material é distribuir ou transferir carregamentos ou tensões aplicadas ao compósito, a escolha do tipo de matriz depende à aplicação, destino e processo de obtenção.

Já a fase reforço tem a função de fornecer resistência ao material impedindo a propagação de defeitos na matriz, podem apresentar-se na forma de partículas, fibras ou compósitos estruturais. No caso do reforço com partículas, elas podem ser grandes ou por dispersão (partículas menores com diâmetro entre 10 nm e 100 nm). O reforço com fibras é considerado tecnologicamente o mais importante, classificado de acordo com o comprimento (longo ou

curto) e orientação das fibras (alinhadas e desalinhadas). Já os compósitos estruturais são constituídos tanto por materiais homogêneos como compósitos e as propriedades dependem do projeto e dos elementos estruturais (CALLISTER, 2016).

Para CHAWLA (2012), o comportamento de um material composto é resultado do comportamento combinado da matriz, do reforço e da interface entre estas duas fases. Segundo o autor, a interface entre um reforço e uma matriz pode ser definida como a superfície limite entre os dois, através da qual ocorre uma descontinuidade em algum parâmetro e matematicamente, trata-se de uma estrutura bidimensional de contato entre as diferentes regiões do material. Assim, deve-se determinar as características da interface e como esta pode ser afetada pela temperatura, difusão e tensões residuais.

### 2.3.1 Materiais Compósitos Reforçados Com Fibras

Durante a produção de um compósito polimérico reforçado com fibra, as fibras são incorporadas em uma matriz polimérica de menor rigidez. Enquanto a fibra é responsável por suportar a carga e oferecer resistência e rigidez necessária, a matriz polimérica é responsável pela mobilidade da carga para outras partes da fibra, fornecendo as forças de ligação necessárias. As matrizes também evitam que as fibras reforçadas absorvam umidade, propagando microfissuras devido a ataques microbianos e químicos (OGUNLEYE, RUSNAKOVA, 2022).

Conforme NETO, PARDINI (2006), os compósitos podem ser reforçados com fibras contínuas ou fibras curtas, em camadas isoladas ou em multicamadas, onde podem ser subdivididos em compósitos laminados (utiliza-se só um tipo de fibra, mas pode apresentar orientações definidas e distintas entre as lâminas); compósitos híbridos, onde dois ou mais tipos de fibras de reforço são utilizados. Os compósitos obtidos com fibras contínuas podem apresentar reforço unidirecional ou reforço bidirecional (tecidos). Para CALLISTER (2016), eles podem ser classificados baseado na orientação e comprimento das fibras na matriz, fatores que influenciam nas propriedades mecânicas do material. As fibras podem ser orientadas das seguintes formas:

- Fibras contínuas e alinhadas: as fibras ficam dispostas na direção longitudinal do compósito, possuem propriedades mecânicas altamente anisotrópicas, adquirem um caráter direcional, onde o reforço e a resistência são máximos na direção do alinhamento;
- Fibras descontínuas e alinhadas: fibras descontínuas e dispostas na direção longitudinal, nesses compósitos são possíveis resistências e rigidez significativas;

- Fibras descontínuas e com orientação aleatória: fibras curtas dispostas de forma aleatória na matriz, possui propriedades isotrópicas, e algumas limitações na eficiência do reforço.

Fatores como orientação, interação e aderência entre fibra e matriz, diâmetro e o comprimento fibrilar podem influenciar nas propriedades finais dos compósitos. Para CALLISTER (2016) é necessário um comprimento crítico da fibra para que haja aumento efetivo na resistência e na rigidez de um material compósito. Este comprimento crítico pode ser calculado a partir da Equação 2.1:

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

Onde:  $l_c$ : comprimento crítico

$\sigma_f^*$ : resistência máxima da fibra

$d$ : diâmetro da fibra

$\tau_c$ : resistência da ligação fibra-matriz (ou tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz, o que for menor)

Conforme o comprimento da fibra ( $l$ ) aumenta, o reforço da fibra torna-se mais efetivo. As fibras que apresentam  $l \gg l_c$  são consideradas fibras contínuas, já as fibras descontínuas apresentam comprimento menor que o comprimento crítico (CALLISTER, 2016).

#### 2.4 MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS

As cargas naturais têm menor estabilidade térmica, portanto em materiais compósitos seu uso é concentrado em associação com materiais plásticos com baixas temperaturas de fusão (BREBU, 2020). O interesse em compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra natural tem aumentado rapidamente, tanto em termos de suas aplicações, bem como em termos de investigação fundamental. Algumas das propriedades, como biodegradabilidade, fácil disponibilidade de matérias-primas, propriedades mecânicas, entre outros, tornam os compósitos de fibra natural preferíveis em comparação com os reforçados com fibras sintéticas (LI *et al.*, 2020; KHALID *et al.*, 2021).

Para CASTRO, *et al.* (2019) estes compósitos proporcionam baixa massa específica associada com altos valores de resistência mecânica e rigidez, tornando seu uso apropriado para diversos setores como automotivo, construção, energia, aeroespacial, papel e celulose, cuidados domésticos e pessoais, entre outros.

Esses compósitos se mostram como alternativas econômicas com potencial para a fixação de carbono na natureza, reduzindo a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera durante o seu ciclo de

produção, processamento e utilização (MARCHI *et al.*, 2022). Os processos de mistura e formulação são principalmente realizados em duas etapas. Na primeira etapa é feita a incorporação das fibras à matriz. Já na segunda etapa, o compósito é moldado na forma do produto final (LOPES, 2017).

Alguns fatores como interação física, ligação química e forças atrativas atuam diretamente na eficiência do acoplamento dos compósitos poliméricos, feitos com fibras vegetais. Deste modo, nos materiais compósitos é de extrema importância avaliar a adesão entre a fibra e a matriz, sobretudo no caso dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais onde a matriz é predominantemente hidrofóbica, enquanto que as fibras possuem caráter hidrofílico (WEARN, MONTAGNA, PASSADOR, 2020).

A interação física é um fator material e mecânico que depende da capacidade da matriz se moldar, executar e permitir um determinado grau de molhamento da matriz sobre a fibra, respeitando a morfologia superficial da fibra e preenchendo os vazios. Caso isto não ocorra, estes vazios podem atuar como defeitos pontuais de superfície. A depender do tipo da superfície, esta pode acomodar gases ou concentrar tensões, levando a uma ruptura prematura do material (FORNARI JUNIOR, 2017).

A ligação química entre os materiais pode proporcionar uma união mais estável. A intensidade destas ligações será a resultante da energia e densidade das ligações que forem formadas. Este mecanismo representa um dos melhores meios para se obter um compósito com boas propriedades. Já as forças atrativas atuam na direção de manter coesos os materiais, aproximando-os mais intimamente. Para materiais de mesma natureza ou polaridades semelhantes, isto contribui na interação e formação mais firme do material, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas finais do material (FORNARI JUNIOR, 2017). Por outro lado, as fibras vegetais podem ser modificadas com agentes químicos e tratamentos de superfície, de forma a realizar mais forte interação atrativa com a matriz do compósito (T G, *et al.* 2019).

Conforme LEE *et al.* (2020) em compósitos epóxi reforçados com fibras naturais as fibras naturais hidrofílicas exibem menor absorção de umidade como resultado do revestimento com resina epóxi, os compósitos apresentam boa interface entre a fibra e a matriz e boas propriedades em termos de características mecânicas e térmicas.

Em seus estudos NGUYEN, NGUYEN (2021) estudaram a influência da adição em percentual de massa de 10,15,20 e 25% de fibra de bananeira como reforço em matriz epóxi nas propriedades mecânicas, retardância a chama e propriedades térmicas. Sendo observado que as propriedades de resistências à tração, compressão e impacto de até 20% em peso

aumentaram em comparação ao epóxi puro devido à forte ligação interfacial entre fibra e matriz. As propriedades retardantes de chama e térmicas foram mantidas estáveis.

BETELIE *et al.* (2019) investigaram as propriedades de resistência à tração, flexão e impacto de compósitos de matriz epóxi reforçados com 15, 25, 30, 35 e 40% em peso de fibra de sisal. Os resultados dos testes demonstraram, entre as amostras, que 30% em peso dos compósitos reforçados com fibra de sisal têm a resistência máxima à tração e à flexão de 85,5 MPa e 85,79 MPa, respectivamente. Já a resistência ao impacto é máxima para 40% em peso de fibra de sisal, que é 24,5 kJ/m<sup>2</sup>.

PINHEIRO *et al.* (2019) investigaram quantidades de até 30 vol% de fibras de guarumã contínuas e alinhadas como reforço em compósitos de matriz epóxi. Os testes de tração revelaram que a adição da fibra de guarumã melhorou o módulo de elasticidade do compósito. No entanto, nenhuma mudança significativa nas propriedades de tração foi causada por incorporação de até 30% vol de fibras. Por outro lado, uma análise custo-efetiva revelou uma redução de ~29% no preço do compósito epóxi devido à incorporação das fibras.

OLIVEIRA *et al.* (2020) confirmaram pela primeira vez um efeito de reforço da fibra de tucum em compósitos poliméricos. Foram produzidos compósitos com 20 e 40% em volume de fibra de tucum em compósitos epóxi. Os resultados demonstraram que 40 vol% aumentaram a resistência à tração em 104% e a energia de impacto Izod absorvida em 157% em comparação com o epóxi puro, enquanto o desempenho balístico dos compósitos de fibra de tucum 20% vol aumentou 150%.

#### 2.4.1 Materiais Compósitos Reforçados Com Fibras de Caranã

Em seus estudos SOUZA *et al.* (2020), realizaram uma avaliação técnica e caracterização de compósitos reforçados com fibra de caranã. Compósitos de matriz epóxi reforçados com 10, 20 e 30 vol% de fibras de caranã contínuas e alinhadas foram investigadas por testes de tração e análise térmica (Tg e DSC). Para os compósitos reforçados com 20 e 30% em volume de fibra de caranã, verificou-se que a resistência mecânica aumenta com o percentual de fibras, confirmando a hipótese de que a fibra atua como um reforço eficaz. A Tabela 6 apresenta os valores encontrados para os compósitos reforçados com fibra de caranã.

Tabela 6 – Resultados ensaio de tração de compósitos epóxi-caranã

<b>Volume de Fibras (%)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Tenacidade (J/mm<sup>3</sup>)</b>
0	50,0 ± 6,4	4,9 ± 1,7	1,0 ± 1,0	6,6 ± 4,0
10	38,3 ± 3,6	5,7 ± 1,5	0,7 ± 0,6	1,7 ± 1,35
20	91,7 ± 5,9	6,9 ± 0,2	1,3 ± 1,3	11,3 ± 5,14
30	105,2 ± 6,0	7,4 ± 0,3	1,4 ± 1,4	15,4 ± 5,54

Fonte: SOUZA *et. al.*, 2020

Os resultados demonstraram que com 30% em volume de fibra de caranã houve melhora significativa (100%) a resistência à tração dos compósitos, caracterizando um efeito de reforço. Melhorando em 50% o módulo de elasticidade, 40% o alongamento total e em 130% tenacidade do compósito.

Apesar do aumento da quantidade de estudos voltados ao desenvolvimento de novos materiais a partir de fibras naturais, na literatura são retratadas poucas análises relacionadas à aplicação das fibras de caranã na engenharia, apesar desta apresentar alto potencial de reforço em materiais compósitos. Assim, a progressão de pesquisas relacionadas a esta fibra contribui com o desenvolvimento de econômico, tecnológico e a conservação da Amazônia, bem como auxilia no incentivo da preservação floresta nativa.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A fibra de Caranã utilizada neste estudo foi coletada na cidade de Moju-PA, a 70 Km da capital Belém-PA. A resina epóxi utilizada foi adquirida comercialmente no comércio de Belém-PA a base de Bisfenol A da marca Araldite GY 250 e o agente de cura a base de álcool benzílico da marca Aradur 3066 BR, sendo utilizado na proporção 2:1, duas partes de resina epóxi para uma parte de agente de cura. A Tabela 7 apresenta a densidade da resina e do agente de cura utilizado.

<b>Material</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Resina Epóxi	1,17~1,2 (25 °C)
Agente de Cura	0,92

Fonte: Ficha FISPQ do fornecedor, 2022

#### 3.2 BENEFICIAMENTO DAS FIBRAS DE CARANÃ

Seu beneficiamento ocorreu no laboratório de Práticas Tecnológicas da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua. Inicialmente, o Caranã foi dividido ao meio e cortado de modo que seu comprimento medisse 30 cm, conforme mostrado na Figura 10.a. Em seguida passou para estufa por 80 °C durante 2 horas seguindo para desfiamento manual com auxílio de pinça, a Figura 10.b apresenta as fibras de caranã desfiadas.

Figura 10 – Fibras de caranã (a) Tala de caranã e (b) Fibras de caranã



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

#### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE CARANÃ

##### 3.3.1 Caracterização Dimensional

Foram separadas 120 (cento e vinte) fibras de maneira aleatória para que fosse realizada análise do diâmetro fibrilar. Para esta análise foi empregado estereoscópio binocular modelo Even, apresentado na Figura 11, afiliado ao software Future WinJoe no Laboratório de

Caracterização dos Materiais, Campus Universitário de Ananindeua. Definiu-se três posições igualmente espaçadas ao longo do comprimento da fibra e devido a seção transversal irregular, as medições foram seguidas após rotação de  $90^\circ$  (noventa graus) da fibra, dessa forma o diâmetro fibrilar foi determinado como o valor médio das medições realizadas.

Figura 11 – Equipamento de microscopia ótica (Estereoscópio binocular Even)



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

### 3.3.2 Determinação da Densidade Geométrica das Fibras de Caranã.

A massa específica foi determinada a partir da relação entre massa e volume da fibra, a massa sendo verificada empregando balança analítica de precisão  $\pm 0,0001$  g da marca Chyo modelo JK, apresentada na Figura 12, e o comprimento medido com auxílio de régua. Para o volume, foi levado em consideração que a fibra possui geometria cilíndrica. O cálculo do volume médio da fibra foi realizado utilizando a Equação 3.1.

Figura 12 – Balança analítica



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

$$V = \frac{\pi \times d^2 \times c}{4} \quad (3.1)$$

Onde: V: Volume médio da fibra;

d: diâmetro médio;

c: comprimento da fibra.

A partir das massas e volumes encontrados foi possível calcular a densidade geométrica da fibra através da equação 3.2.

$$\rho_{geométrica} = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

Onde:  $\rho_{geométrica}$ : densidade geométrica da fibra;

m: massa;

V: volume da fibra.

### 3.3.3 Espectroscopia Vibracional no Infravermelho (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) foi realizada em um espectrômetro FT-IR da marca BRUKER, modelo VERTEX 70v, na faixa de 4000-400  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 8  $\text{cm}^{-1}$ , 100 scans, no Laboratório de Espectroscopia vibracional e altas pressões (PPGF/UFPA). Foram realizadas análises de FTIR na fibra e nos compósitos produzidos.

## 3.4 COMPÓSITOS

### 3.4.1 Confeção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram confeccionados utilizando-se resina epóxi e fibras de caranã por moldagem manual utilizando-se moldes de silicone, sem desmoldante e sem pressão. Para confecção dos corpos de prova a resina foi pesada para que se tivesse adição de catalisador posteriormente. Após a pesagem foram misturadas em recipiente próprio e vertidas sobre as fibras alinhadas longitudinalmente dispostas nos moldes de silicone. O tempo de cura foi de 24 horas à temperatura ambiente. A Figura 13 apresenta os compósitos em processo de cura dentro dos moldes utilizados para o ensaio de tração e flexão.

Figura 13 – Produção dos compósitos para (a) Ensaio de tração e (b) Ensaio de flexão



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Foram produzidos compósitos com fração volumétrica variando entre 0 e 30% de fibra. A Tabela 8 apresenta a relação resina/fibra utilizadas neste trabalho, bem como a quantidade de corpos de prova produzidos para cada relação.

Tabela 8 – Relação resina/fibra para os corpos de prova

Composições	Quantidade de Corpos de prova produzidos	Matéria(s) prima(s) por (% em Volume)	
		Resina	Fibra
CPEC0	9	100	-
CPEC10	9	90	10
CPEC20	9	80	20
CPEC30	9	70	30

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A determinação da quantidade de fibra/resina que deve ser utilizada na fabricação dos corpos de prova será realizada empregando-se a regra da mistura, demonstrada na Equação 3.5.

$$\%f = \frac{\frac{mf}{\rho f}}{\frac{mf}{\rho f} + \frac{mr}{\rho r}} \quad (3.5)$$

Onde: %f: porcentagem de fibra;

*Mf*: massa de fibra;

*ρf*: densidade da fibra;

*mr*: massa de resina;

*mf*: densidade da resina.

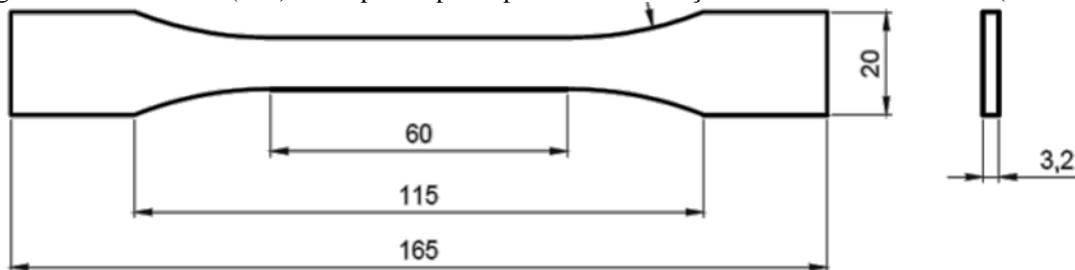
Após confeccionados, os corpos de prova foram lixados com lixas de granulometria variante entre 60 e 1200 e em seguida medidos com auxílio de paquímetro de modo que suas dimensões atendam às exigidas pela norma utilizada em cada ensaio.

### 3.4.2 Ensaio Mecânicos

#### 3.4.2.1 Ensaio de Tração

Os corpos de provas de matriz pura e dos compósitos reforçados com fibras foram conformados de acordo com a norma ASTM D638 (2014), seguindo as medidas apresentadas na Figura 14.

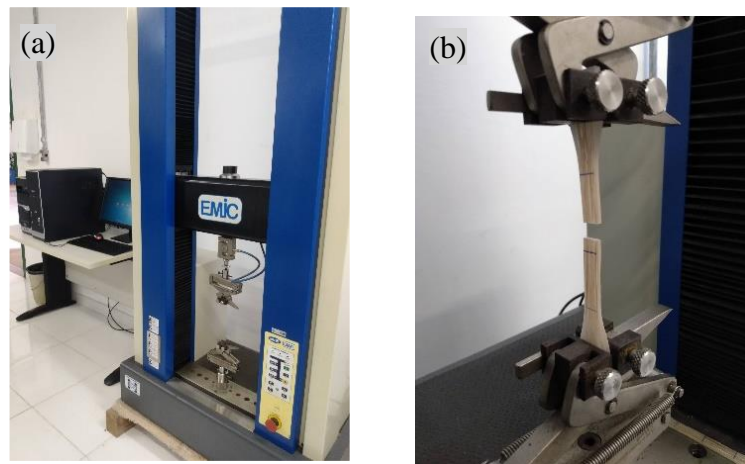
Figura 14 – Dimensões (mm) de corpos de prova para ensaio de tração conforme ASTM D 638 (sem escala)



Fonte: Adaptado de RIBEIRO, 2022.

Os testes em tração foram realizados em uma máquina de ensaio universal EMIC DL-10000, apresentada na Figura 15, com célula de carga de 5 kN, a uma velocidade de ensaio de 5 mm/min no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Instituto Federal do Pará, campus Abaetetuba. Foram utilizados 09 corpos de prova para cada composição testada. Os corpos de prova utilizados para o ensaio de tração estão apresentados na Figura 16.

Figura 15 – Ensaio de tração. (a) Máquina de ensaio universal e (b) Realização do ensaio em compósito



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Figura 16 – Corpos de prova epóxi-caraná de 0, 10, 20 e 30 % vol de fibras de caraná para ensaio de tração



Do Próprio Autor, 2022

A tensão máxima suportada pelo corpo de prova foi dada pela Equação 3.6:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.6)$$

Onde:  $\sigma$ : tensão máxima;

F: carga aplicada;

A: a área da seção transversal do corpo de prova.

O módulo de Elasticidade dos compósitos ensaiados foi dado conforme a Equação 3.7:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.7)$$

Onde: E: módulo de elasticidade;

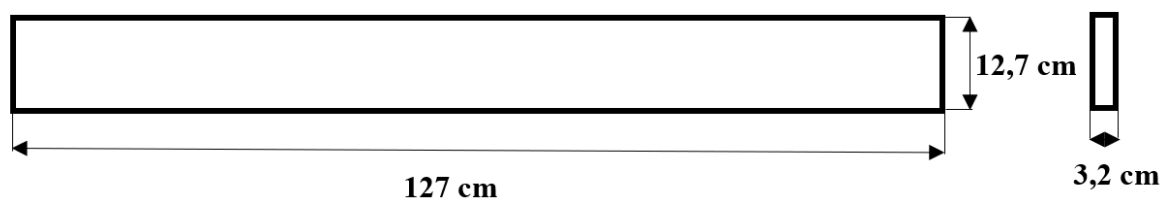
$\sigma$ : tensão máxima;

$\epsilon$ : deformação.

#### 3.4.2.2 Ensaio de Flexão

Os corpos de provas de matriz pura e dos compósitos reforçados com fibras foram conformados de acordo com a norma ASTM D790 (2017), seguindo as medidas apresentadas na Figura 17.

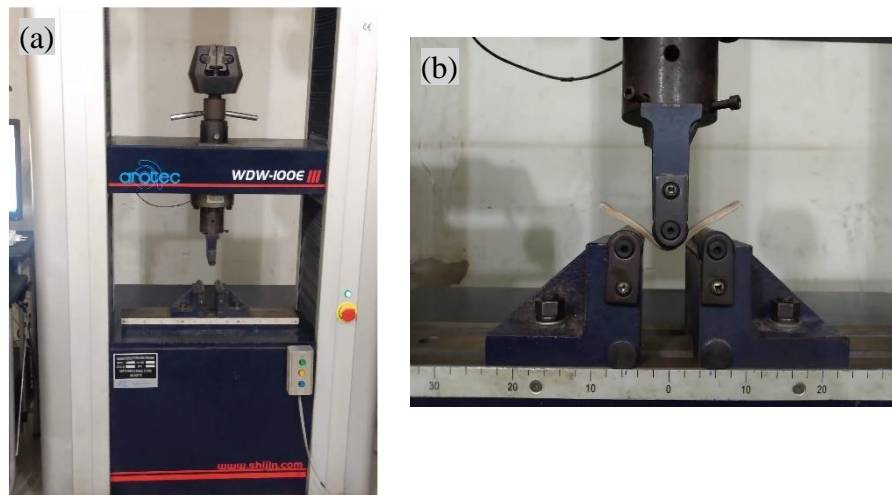
Figura 17 – Dimensões (mm) de corpos de prova para ensaio de tração conforme ASTM D790 (sem escala)



Fonte: Próprio Autor, 2022

Os testes em flexão foram realizados em uma máquina de ensaio universal Arotec, modelo WDW-100E, apresentada na Figura 18, com célula de carga de 5 kN, a uma velocidade de ensaio de 2 mm/min no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal do Pará, campus Belém. Foram utilizados 09 corpos de prova para cada composição testada. Os corpos de prova utilizados para o ensaio de tração estão apresentados na Figura 19.

Figura 18 – Ensaio de flexão. (a) Máquina de ensaio universal e (b) Realização do ensaio em compósito



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Figura 19 – Corpos de prova epóxi-caranã de 0, 10, 20 e 30 % vol de fibras de caranã para ensaio de flexão



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A tensão máxima ( $\sigma$ ) associada à resistência à flexão dos compósitos foi dada conforme a Equação 3.8:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.8)$$

Onde: P: carga máxima;

L: Distância entre suportes;

b: Largura;

d: Espessura.

A deformação na flexão ( $\varepsilon_f$ ) e o módulo de elasticidade em flexão ( $E_f$ ) foram dados empregando as equações 3.9 e 3.10, respectivamente.

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3.9)$$

$$E_f = (\sigma_{f2} - \sigma_{f1}) / (\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}) \quad (3.10)$$

Onde: D: Deflexão;

L: Distância entre os suportes;

d: Espessura;

$\sigma_{f1}$  e  $\sigma_{f2}$ : Tensões de flexão, medidas nos pontos predefinidos na curva de deflexão de carga;

$\varepsilon_{f1}$  e  $\varepsilon_{f2}$ : Deformações de flexão, medidas nos pontos predeterminados na curva de deflexão de carga.

### 3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Foi realizado em um microscópio eletrônico de varredura TESCAN, modelo MIRA3 na fibra, afim de investigar detalhes na superfície, seção transversal, lúmen e microfibrilas. Nos compósitos foi realizado MEV nas superfícies de fratura dos corpos de prova de tração e flexão após a realização do ensaio mecânico de tração e flexão, afim de investigar os mecanismos de falha dos corpos de prova produzidos. A Figura 20 apresenta o (a) metalizador de amostras e (b) o microscópio eletrônico de varredura utilizado para a análise.

Figura 20 – (a) Metalizador de amostras e (b) MEV



### 3.6 ANOVA

Foi realizada análise de variância (ANOVA) dos resultados obtidos de densidade geométrica da fibra de caranã e das propriedades mecânicas medidas nos compósitos e na matriz epóxi. A análise foi realizada através do teste F com nível de significância de 5 % para todos os testes, afim de verificar se para este nível de significância as médias populacionais dos tratamentos diferem entre si. A ANOVA utiliza os parâmetros apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros ANOVA					
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F crítico
Tratamentos	$SQTr$	$k-1$	$QMT$	$QMT/QMR$	Tabela F
Resíduos	$SQR$	$k(r-1)$	$QMR$		
Total	$SQT$	$n-1$			

Onde:  $SQ$  - Soma dos quadrados;  $GL$  - Número de graus de liberdade;  $MQ$  - Quadrado médio;  $F$  - Estatística F;  $SQTr$  - Soma dos quadrados dos tratamentos;  $k$  - Número de tratamentos;  $QMT$  - Quadrado médio dos tratamentos;  $QMR$  - Quadrado médio do resíduo;  $SQR$  - Soma dos quadrados do resíduo;  $SQT$  - Soma dos quadrados total;  $r$  - Número de repetições do tratamento;  $n$  - Número total de observações;  $n-1$  - Número total de graus de liberdade.

Para as análises onde o valor de F calculado foi superior ao F crítico, conclui-se que as médias dos resultados obtidos para cada tratamento apresentavam diferença significativa entre si, para estes casos foi necessário realizar o Teste de Tukey, afim de avaliar quantitativamente dois a dois cada um dos tratamentos, com base na diferença mínima significativa (d.m.s), calculada pela equação 3.11 (PINHEIRO, 2020).

$$d. m. s = q \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (3.11)$$

Onde:

$q$ : Amplitude total (tabelada), obtida em função do grau de liberdade (GL) do resíduo e do número de tratamentos;

$QMR$ : Quadrado médio do resíduo;

$r$ : Número de repetições para cada tratamento.

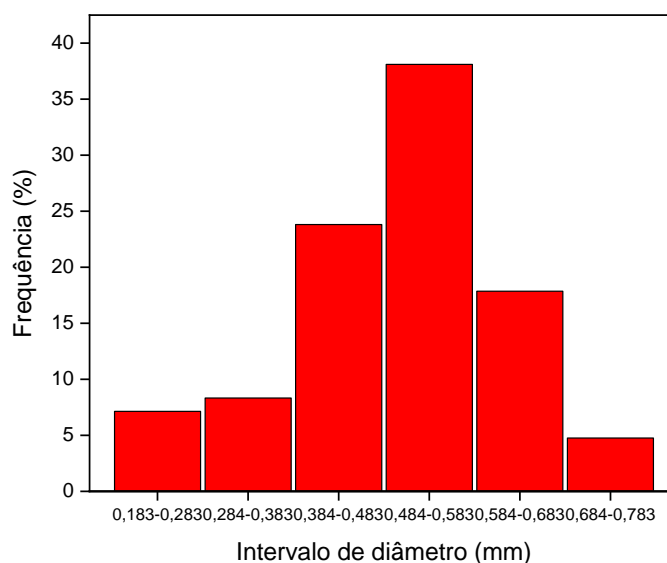
## 4 RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE CARANÃ

#### 4.1.1 Caracterização Dimensional das Fibras de Caranã

A Figura 21 apresenta o gráfico de quantidade de fibras nos intervalos diametrais obtidos.

Figura 21 – Distribuição diametral das fibras de caranã

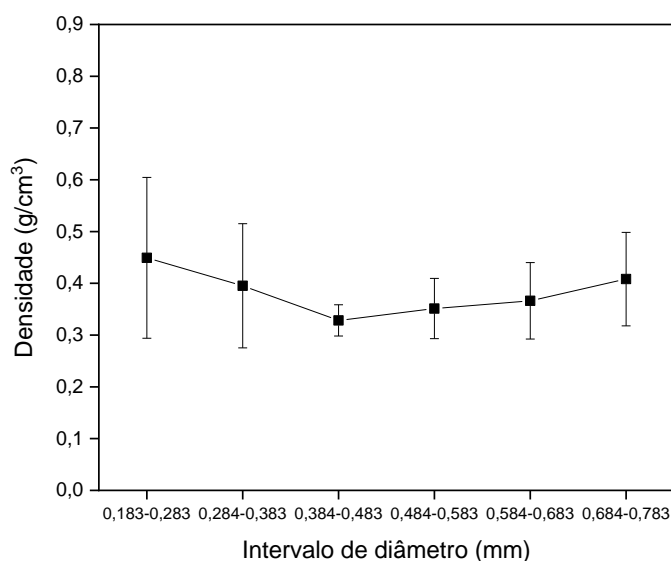


Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A média diametral encontrada foi de 0,50 mm. Sendo encontrada uma maior quantidade de fibras no intervalo de 0,483 - 0,583 mm, isso pode estar associado à natureza das fibras, indicando que as fibras médias tendem a ser menos quebradiças.

A Figura 22 apresenta a densidade geométrica das fibras de caranã em função da distribuição do intervalo diametral.

Figura 22 – Densidade em função dos intervalos de diâmetro para a fibra de caranã



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

O valor médio encontrado para a densidade geométrica das fibras de caranã foi de 0,38 g/cm<sup>3</sup>. As fibras mais finas apresentam o maior valor de densidade, como é esperado para as fibras naturais. No entanto, a relação entre densidade e diâmetro do caranã não é linearmente decrescente, como o esperado para as fibras naturais, onde as fibras com seções transversais mais elevadas (mais grossas) apresentam maior quantidade de defeitos e vazios e por isso, apresentam valor de densidade inferior (MADUEKE *et al.*, 2022).

Foi realizada análise de variância (ANOVA) afim de verificar se houve diferença significativa entre as médias de densidade geométrica para as fibras de caranã. A análise de variância (ANOVA) está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Análise de variância da densidade geométrica das fibras de caranã

<i>Fonte da</i>						
<i>variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Tratamentos	0,168	5,000	0,034	3,167	0,010	2,294
Resíduos	1,208	114,000	0,011			
Total	1,375	119,000				

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A análise de variância apresenta o valor de F calculado (3,167) superior ao valor de F crítico (2,294), com isso rejeitou-se a hipótese de médias iguais para um nível de significância

de 5 % e foi realizado o teste de tukey, demonstrado na Tabela 11, para comparação de médias utilizando-se um nível de confiança de 95 %.

Tabela 11 – Teste de tukey para densidade geométrica das fibras de caranã

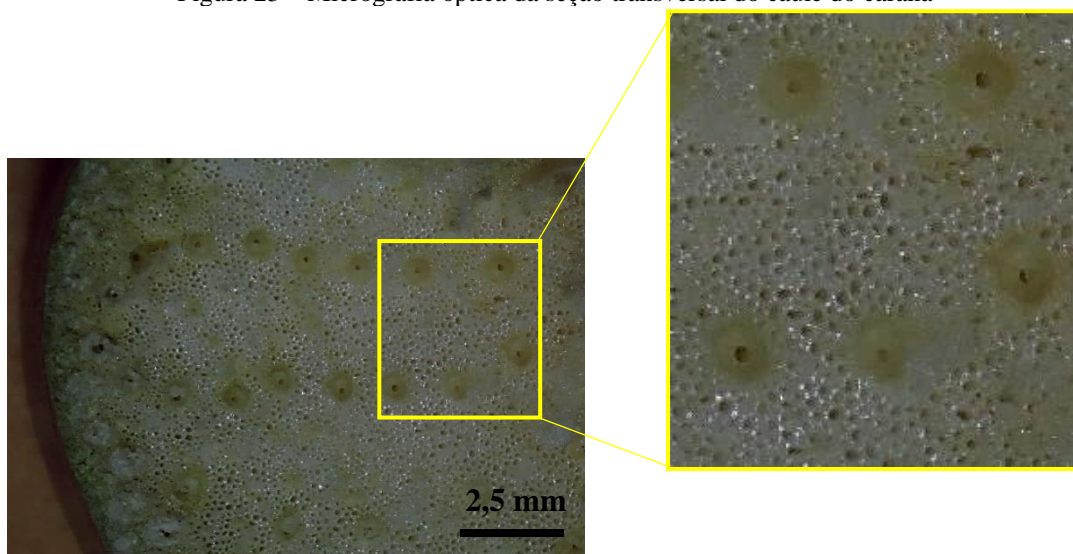
<b>Intervalos de diâmetro (mm)</b>	<b>0,183-0,283</b>	<b>0,284-0,383</b>	<b>0,384-0,483</b>	<b>0,484-0,583</b>	<b>0,584-0,683</b>	<b>0,684-0,783</b>
<b>0,183-0,283</b>	0	0,046	<b>0,112</b>	0,086	0,071	0,026
<b>0,284-0,383</b>	0,046	0	0,066	0,041	0,025	0,020
<b>0,384-0,483</b>	<b>0,112</b>	0,066	0	0,025	0,041	0,086
<b>0,484-0,583</b>	0,086	0,041	0,025	0	0,015	0,060
<b>0,584-0,683</b>	0,025	0,025	0,086	0,015	0	0,045
<b>0,684-0,783</b>	0,045	0,020	0,086	0,060	0,045	0

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Com base nesses resultados, considerando o nível de significância de 5 %, as fibras de caranã dos intervalos 0,183-0,283 (mm) e 0,384-0,483 (mm), são significativamente diferentes entre si, pois a diferença encontrada entre tais grupos é superior ao d.m.s calculado (0,0945). Sugerindo assim que nos intervalos significativamente iguais a organização das fibrilas não interfere na densidade das fibras e as fibras de diâmetro mediano apresentam compactação diferente das fibras de diâmetros extremos.

A Figura 23 apresenta a microscopia óptica da seção transversal do caule do caranã.

Figura 23 – Micrografia óptica da seção transversal do caule do caranã



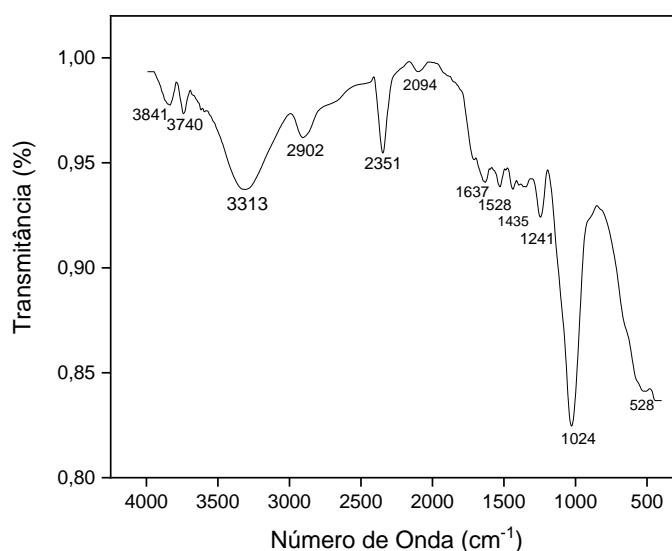
Fonte: Do Próprio Autor, 2022

No caule do caranã as fibras se encontram distribuídas tanto nas extremidades (casca) quanto na sua parte interna. Na região destacada pela figura, nota-se que as fibras internas se encontram organizadas em fileiras não igualmente alinhadas, mas consideravelmente espaçadas entre si. O caule do caranã apresenta acentuado grau de porosidade, o mesmo é esperado para as suas fibras uma vez que esses canais são importantes para levar os nutrientes ao longo da palmeira que é comumente encontrada em regiões inundadas sazonalmente.

#### 4.1.2 Espectroscopia Vibracional no Infravermelho das Fibras de Caranã

A Figura 24 apresenta o espectro de FTIR da fibra de caranã.

Figura 24 – Espectro vibracional no infravermelho das fibras de caranã



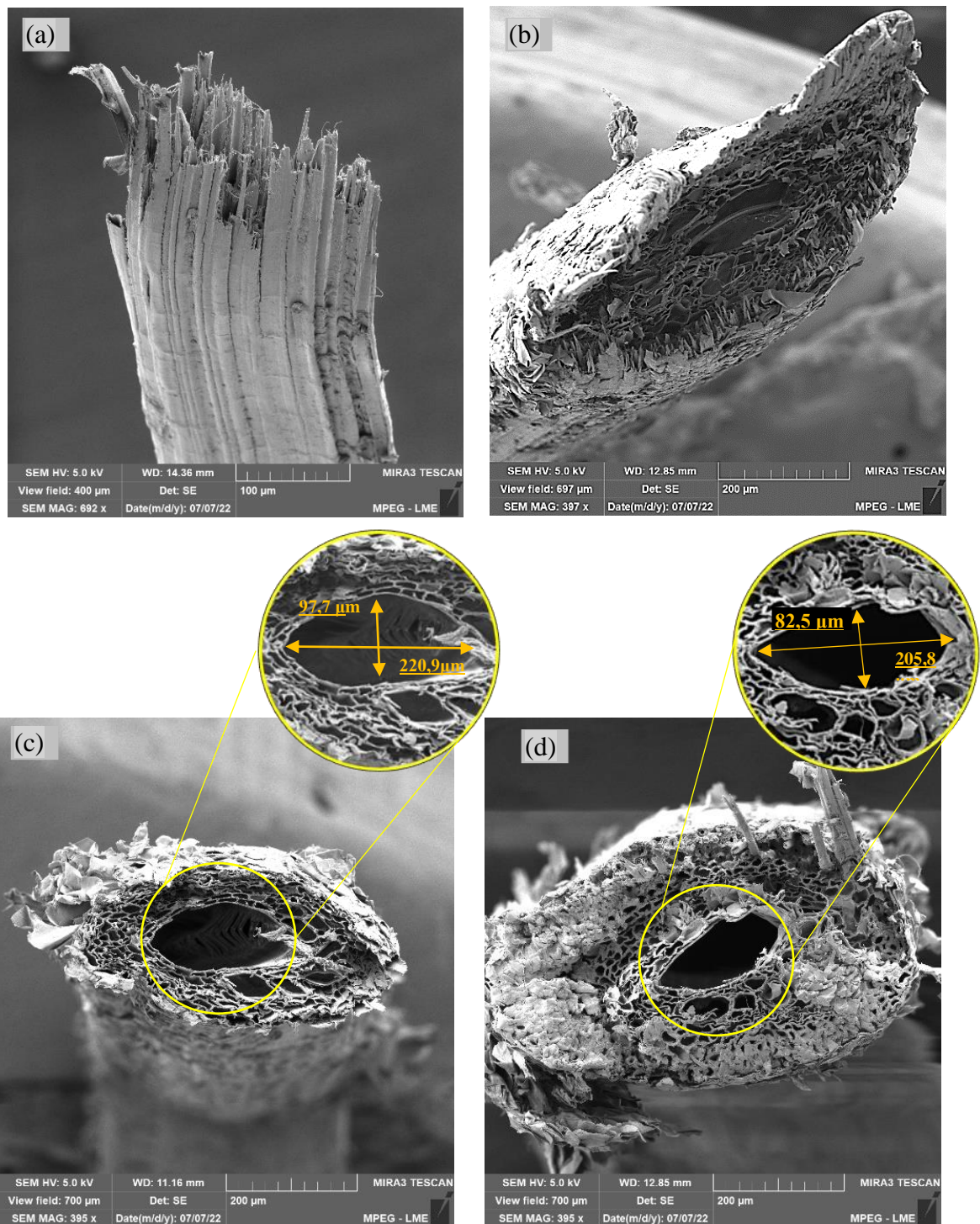
Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Pode-se identificar que o trecho de 3841 cm<sup>-1</sup> a 3313 cm<sup>-1</sup> representa tipicamente a extensão da ligação O-H, já pico 2902 cm<sup>-1</sup> corresponde ao alongamento C-H (alifático+aromático). O pico correspondente a 2351 cm<sup>-1</sup> é resultado do CO<sub>2</sub> que não foi totalmente deduzido do ar. Já os picos 1637 cm<sup>-1</sup> e 1528 cm<sup>-1</sup> referem-se à vibração de alongamento do carbonil (C = O) de ácidos carboxílicos alifáticos e cetonas, principalmente devido aos grupos hemicelulose, conforme. Às bandas entre 1435 cm<sup>-1</sup> e 1241 cm<sup>-1</sup> são atribuídos à flexão de C-H, bem como ao alongamento de grupos de lignina e carboidratos, tanto C-O quanto C-O-C. Já a banda correspondente ao pico 1024 cm<sup>-1</sup> representa a deformação das ligações C-H e C-O. Este comportamento também foi observado para outras fibras naturais por REIS *et al.* (2019), JUNIO *et al.* (2020), LI *et al.* (2018) e da DEMOSTHENES *et al.* (2019).

#### 4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura das Fibras de Caranã (MEV)

A Figura 25 apresenta a microscopia eletrônica de varredura da seção transversal de fibras de caranã de diâmetros variados.

Figura 25 – Microscopia eletrônica de varredura da seção transversal de fibras de caranã de diâmetros variados (a) 0,183-0,283 mm; (b) 0,383-0,483; (c) 0,583-0,683 mm e (d) 0,683-0,783 mm, com aumentos de 692 x, 395x, 395x e 395x, respectivamente

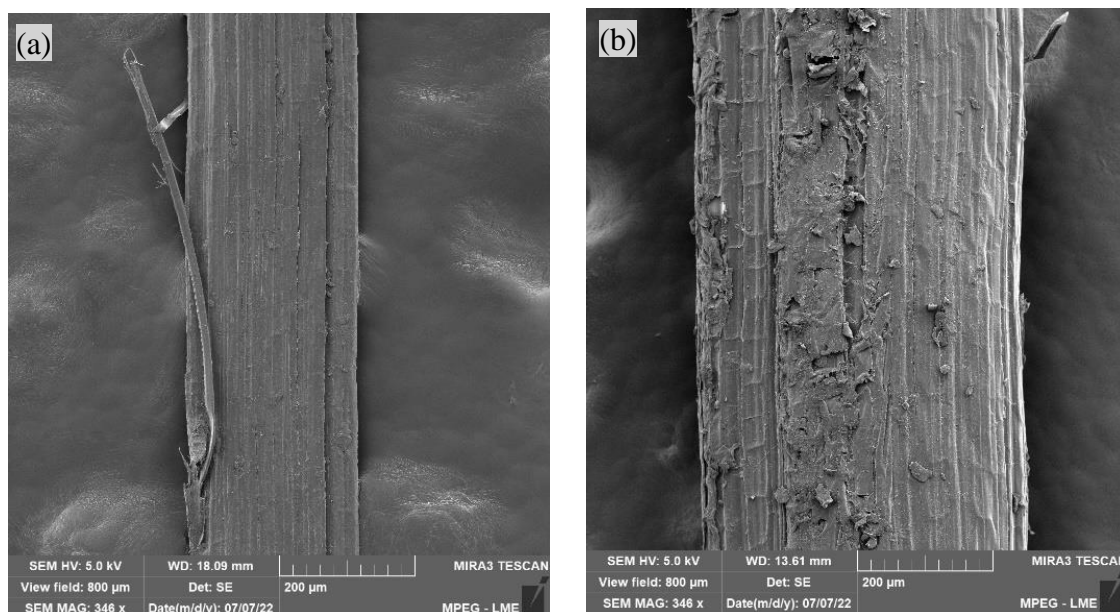


É possível observar que além do lúmen ao centro da seção, o caranã também apresenta canais cilíndricos pequenos que podem estar relacionados às microfibrilas, semelhante ao fenômeno observado por da DEMOSTHENES *et al.* (2019) ao analisar as fibras de buriti. A estrutura do caranã se assemelha à de outras fibras naturais como buriti, coco e sisal (Da DEMOSTHENES *et al.*, 2019; AWAIS *et al.*, 2021; SILVEIRA *et al.*, 2021). Para o caranã é possível observar que as fibras mais finas (Figura 25.a) apresentam pouca quantidade de poros.

À medida que se aumenta o diâmetro da fibra, não é observado um aumento linear da quantidade e tamanho dos poros existentes, sobretudo para as fibras mais grossas. Na figura 25.b representante do intervalo de diâmetro 0,383-0,483, onde a densidade ainda possui comportamento linear decrescente em relação ao diâmetro, Figura 22, observa-se um crescimento de lúmen regular. No entanto, a medida em que se aumenta o diâmetro, Figura 25.c (intervalo de diâmetro 0,583-0,683 mm) e Figura 25.d (intervalo de diâmetro 0,683-0,783), nota-se que o crescimento do lúmen não é diretamente proporcional ao aumento diametral da fibra, esclarecendo o comportamento do gráfico Densidade x diâmetro, Figura 22.

A Figura 26 apresenta a microscopia eletrônica de varredura da seção transversal de fibras de caranã de diferentes diâmetros.

Figura 26 – Microscopia eletrônica de varredura da vista longitudinal de fibras de caranã de diferentes diâmetros (a) 0,183-0,283 mm e (b) 0,583-0,683 mm; com aumentos de 346x.



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

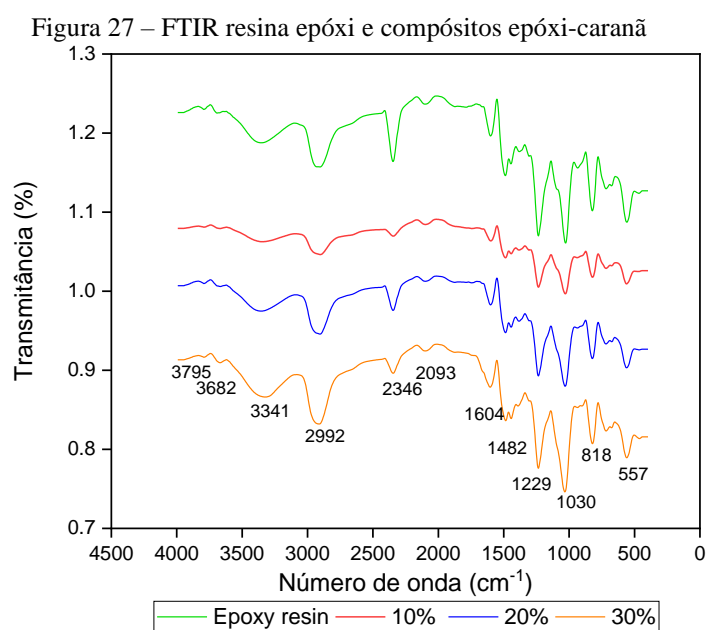
Nota-se uma superfície heterogênea com desprendimento das microfibrilas que pode estar relacionado ao método de extração das fibras. Além disso, nota-se que essa rugosidade é mais evidente em fibras de maior diâmetro, onde as microfibrilas se encontram unidas afim de formar

um feixe de fibras espesso. De acordo com OLIVEIRA *et al.*, 2020; MADUEKE *et al.*, 2022). A rugosidade superficial pode contribuir para o travamento mecânico e forças de atrito, aumentando a adesão entre a fibra e a matriz epóxi, melhorando as propriedades mecânicas dos compósitos.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS EPÓXI-CARANÃ

### 4.2.1 Espectroscopia Vibracional No Infravermelho dos Compósitos Epóxi/Fibras de Caranã

A Figura 27 apresenta os espectros obtidos por FTIR da resina epóxi e dos compósitos reforçados com 10, 20 e 30% em volume de fibra.



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Foi revelado de maneira geral que tanto a resina epóxi quanto os compósitos apresentam bandas de adsorção similares. As bandas entre 3341 e 3795 cm<sup>-1</sup> estão relacionadas à extensão simétrica da ligação O-H. A banda correspondente ao pico 2992 cm<sup>-1</sup> são atribuídas ao estiramento das ligações C-H do anel aromático. O pico correspondente a 2346 cm<sup>-1</sup> é resultado do CO<sub>2</sub> que não foi totalmente deduzido do ar. Na faixa de absorção entre 1300-1604 cm<sup>-1</sup> notam-se picos menos intensos, referentes ao estiramento da ligação C=C em anéis aromáticos. Em 1229 cm<sup>-1</sup>, nota-se o estiramento assimétrico das ligações C-O do anel aromático. Já em 1030 cm<sup>-1</sup> ocorre o estiramento simétrico da mesma cadeia alifática. Em 818 cm<sup>-1</sup> ocorre a deformação dos anéis aromáticos fora do plano (DELATORRE *et al.*, 2022; REDDY *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2018).

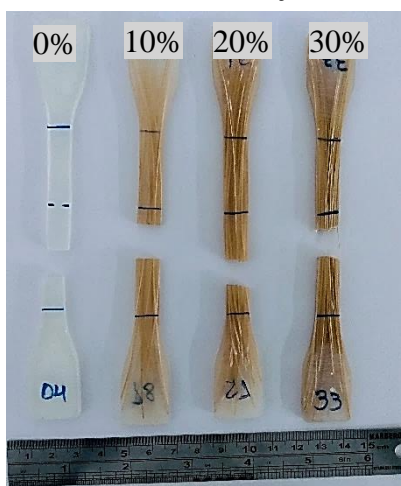
Apesar de as bandas apresentadas nos espectros obtidos da resina epóxi e dos compósitos serem predominantes características do epóxi, o aumento da fração volumétrica de fibras no compósito causa a variação na absorção relativa em alguns picos como em 3341, 2992, 1330 e 1229  $\text{cm}^{-1}$ , que têm suas intensidades aumentadas à medida que ocorre a incorporação de fibras de caranã nos compósitos epóxi/caranã, isso pode ser interpretado como uma indicação de interação ativa entre o epóxi e os grupos moleculares do caranã, assim como visto por outros autores (NEVES *et al.*, 2020; JUNIO *et al.*, 2020).

## 4.2.2 Ensaio Mecânicos

### 4.2.2.1 Ensaio de Tração

Na Figura 28 estão apresentados os compósitos ensaiados em tração de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.

Figura 28 – Aspecto macroscópico da fratura dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã ensaiados em tração.

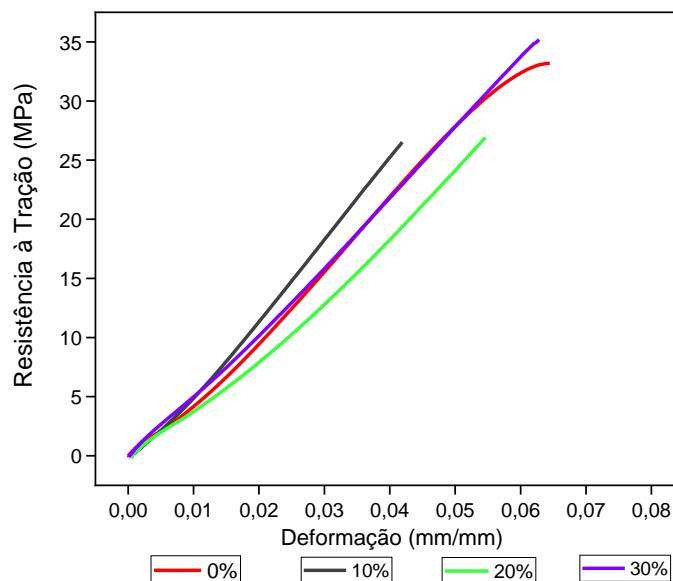


Fonte: Do Próprio Autor, 2022

No geral, os corpos de prova apresentaram fratura dentro do comprimento útil não havendo uma região preferencial. Isso é uma característica dos compósitos reforçados com fibras naturais e que pode levar a uma imprecisão elevada, ou seja, interferir diretamente na estatística dos resultados.

A Figura 29 apresenta as curvas típicas de ensaio de tração. Para plotar as curvas típicas foi escolhido em cada grupo o CP que apresentou resistência à tração mais próxima à média do percentual analisado.

Figura 29 – Curvas de tração da resina epóxi e dos compósitos com 10, 20 e 30% em volume de fibras de caranã.



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Nota-se que a resina epóxi pura apresenta um comportamento parabólico com suave inclinação, indicando que há certa plasticidade. Já os compósitos reforçados com 10, 20 e 30% apresentam tendência linear, sugerindo comportamento elástico a estes materiais e ruptura de forma quase frágil.

Os valores referentes à resistência à tração, módulo de elasticidade, deformação e tenacidade dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 12 – Valores para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação para a resina epóxi e para os compósitos com adição de 10, 20 e 30% em volume de fibra de caranã.

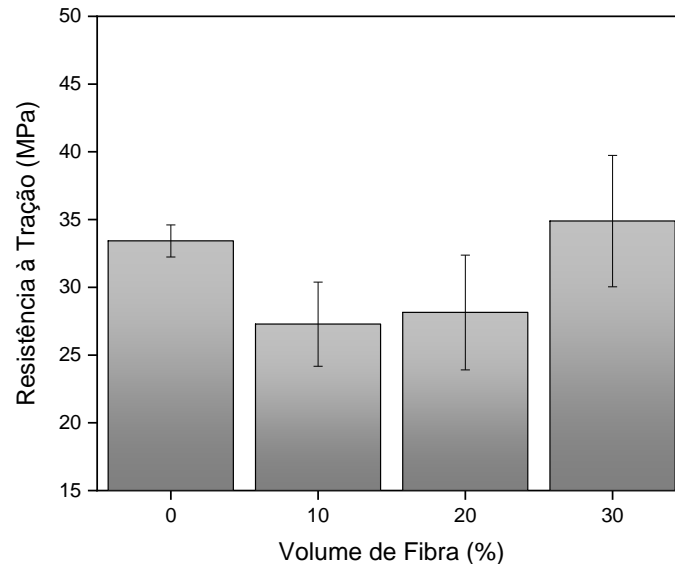
Composição	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
CPEC0	33,4 (± 1,2)	0,603 (± 0,064)	0,066 (± 0,008)
CPEC10	27,3 (± 3,1)	0,608 (± 0,068)	0,048 (± 0,010)
CPEC20	28,1 (± 4,2)	0,558 (± 0,074)	0,054 (± 0,005)
CPEC30	34,9 (± 4,8)	0,656 (± 0,071)	0,060 (± 0,013)

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A incorporação da fibra de caranã provocou um decréscimo de 18,26% para 10%vol e 15,87% para 20%vol, bem como aumento de 4,49% para 30 %vol na resistência à tração dos compósitos em relação a matriz epóxi. Já para o módulo de elasticidade foi observado um aumento de 0,83% para 10%vol, decréscimo de 7,46% para 20%vol e aumento de 8,79% para

30 %vol. Para deformação foi obtido decréscimo em todos os compósitos em relação a matriz, sendo de 27,27% para 10%vol, 18,18% para 20%vol e 9,09% para 30 %vol. A Figura 30 apresenta o gráfico da resistência obtido a partir do ensaio de tração dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.

Figura 30 – Resistência à tração dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.

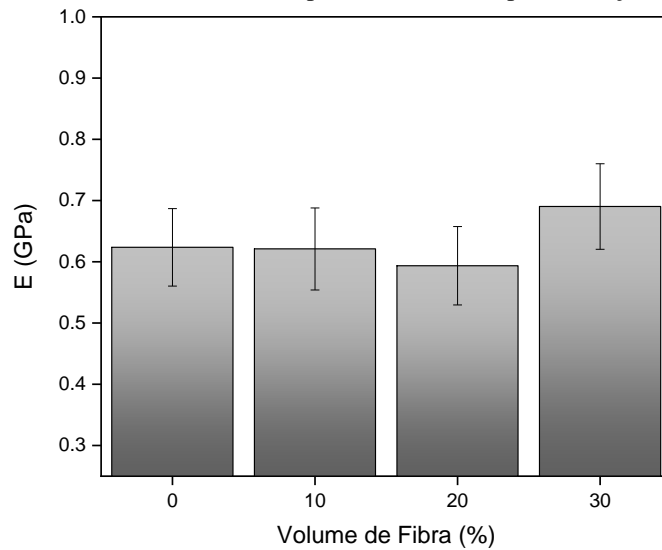


Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A adição de somente 10 e 20% em volume de caranã indica decaimento da resistência à tração dos compósitos em relação ao epóxi puro, sugerindo que para estas proporções a fibra atuou como carga de enchimento. No entanto, os compósitos reforçados com 30% em volume apresentaram aumento da resistência à tração em comparação à matriz epóxi, reafirmando a hipótese de que a fibra de caranã pode atuar como reforço, como já havia sido estudado por RIBEIRO *et al.* (2022).

A Figura 31 apresenta o gráfico do módulo de elasticidade obtido a partir do ensaio de tração dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.

Figura 31 – Módulo de elasticidade dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.

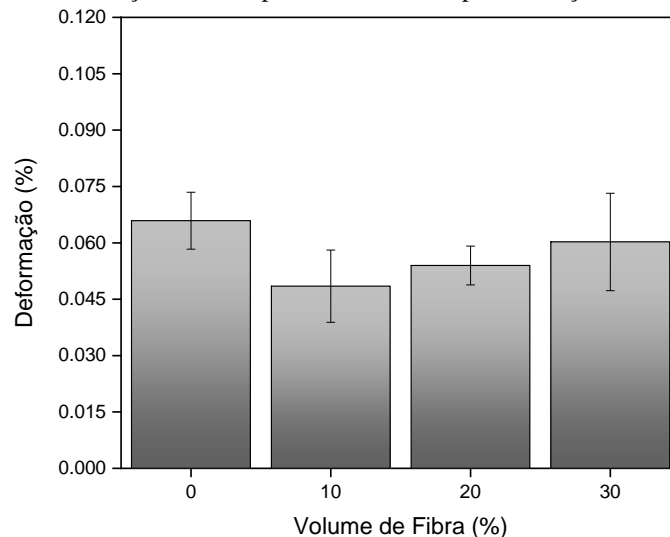


Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A adição de 10% em volume de fibra não apresentou grandes mudanças no módulo de elasticidade em relação a resina epóxi pura, diferente da adição de 20% em volume de fibra que provoca um leve decaimento do módulo de elasticidade. Já na adição de 30% em volume de fibra ocorre aumento do módulo de elasticidade para o compósito em relação à matriz epóxi pura, indicando que a incorporação desse percentual volumétrico de fibra contribui para o aumento da rigidez do compósito. Este aumento nos valores do módulo de elasticidade associado ao aumento de resistência à tração para os compósitos reforçados com 30% vol indica que as fibras de caranã atuaram como reforço efetivo na matriz epóxi.

A Figura 32 apresenta o gráfico de deformação obtido a partir do ensaio de tração dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.

Figura 32 – Deformação dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A adição de 10% em volume de fibra provoca um decaimento na deformação em relação a matriz, a medida em que se adiciona fibra, nas proporções de 20% e 30% vol ocorre um aumento linear da deformação em relação aos compósitos de 10% vol. No entanto em relação à deformação total observa-se que a matriz ainda apresenta os maiores valores quando comparados aos compósitos. Este resultado já era esperado visto que a incorporação da fibra de caranã provocou aumento na resistência à tração e tornou o material mais rígido, tornando o material mais resistente à deformação.

O comportamento mecânico dos compósitos reforçados com caranã foi semelhante ao encontrado para compósitos epóxi reforçados com fibras de guarumã (PINHEIRO *et al.*, 2019), onde os compósitos com 10 e 20 % em volume de fibra apresentaram resistência à tração menores que a matriz epóxi pura e o compósito de 30% em volume teve um leve aumento em relação a matriz, além do aumento da rigidez do material. Já BETELIE *et al.* (2019) estudou compósitos de matriz epóxi reforçados 15, 25, 30, 35 e 40% em peso de fibra de sisal e verificou que os que apresentaram maior resistência à tração e flexão foram os reforçados com 30% em peso.

Assim, evidencia-se o potencial de uso da fibra de caranã como reforço em matriz epóxi em que a incorporação de 30% em volume de fibra tende a aumentar a resistência à tração em 4,5% e a rigidez em 10,34%, o percentual de 30% em volume de fibras apresenta-se como o mais eficaz entre as proporções estudadas para estas propriedades visto neste trabalho e em (SOUZA *et al.*, 2020).

Os resultados do teste de tração também foram comparados aos encontrados para outras fibras naturais incorporadas com 30% volume na matriz epóxi por outros autores, conforme apresentado pela Tabela 13.

Tabela 13 – Comparativo desempenho de compósitos epóxi reforçados com fibras naturais.

<b>Fibra</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Referência</b>
Caranã	34,89 ( $\pm$ 4,84)	0,69 ( $\pm$ 0,07)	Este Trabalho
Coco	28,70 ( $\pm$ 11,00)	3,18 ( $\pm$ 0,30)	LUZ <i>et al.</i> , 2018
Guarumã	59,9 ( $\pm$ 7,1)	0,60 ( $\pm$ 0,02)	PINHEIRO <i>et al.</i> , 2019
Hemp	51,7 ( $\pm$ 9,9)	2,05 ( $\pm$ 0,19)	RIBEIRO <i>et al.</i> , 2021
Junco sete-ilhas	15,2 $\pm$ (3,6)	3,77 ( $\pm$ 0,05)	DE MENDONÇA NEUBA <i>et al.</i> , 2020
PALF	86,4 ( $\pm$ 16,9)	7,97 ( $\pm$ 1,40)	LUZ <i>et al.</i> , 2018

O desempenho em tração dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã se assemelha ao apresentado por outras fibras naturais já utilizadas e amplamente estudadas como as fibras de coco, hemp e guarumã por exemplo. Sendo sua resistência à tração superior às fibras de coco e palf e o módulo de elasticidade superior à também fibra amazônica, guarumã. O que indica que o potencial de uso destes compósitos em diversas aplicações de engenharia.

Foi realizada análise de variância (ANOVA) afim de verificar se houve diferença significativa entre as médias de resistência à tração para os compósitos reforçados com fibras de caranã. A análise de variância (ANOVA) está apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Análise de variância da resistência à tração dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>Gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Tratamentos	300,7240	3	100,2413	7,6396	0,0009	3,0088
Resíduos	314,9127	24	13,1214			
Total	615,6368	27				

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A análise de variância apresenta o valor de F calculada (7,6396) superior ao valor de F crítico (3,0088), com isso rejeitou-se a hipótese de médias iguais para um nível de significância de 5 % e foi realizado o teste de tukey, demonstrado na Tabela 15, para comparação de médias utilizando-se um nível de confiança de 95 %.

Tabela 15 – Teste de tukey da resistência à tração dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.

<b>Compósitos</b>	<b>CPEC0</b>	<b>CPEC10</b>	<b>CPEC20</b>	<b>CPEC30</b>
CPEC0	0	<b>6,139</b>	5,278	1,468
CPEC10	<b>6,139</b>	0	0,861	<b>7,608</b>
CPEC20	5,278	0,861	0	<b>6,746</b>
CPEC30	1,468	<b>7,608</b>	<b>6,746</b>	0

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Com base nesses resultados, considerando o nível de significância de 5 %, em relação à resistência à tração o compósito de 10 % vol de fibra é significativamente diferente da matriz epóxi enquanto o compósito de 30% vol de fibra é significativamente diferente dos compósitos de 10 e 20 % vol de fibra, pois a diferença encontrada entre tais grupos é superior ao d.m.s calculado (5,339). Sugerindo que a força das ligações dos compósitos 10% vol de fibra é significativamente inferior da matriz epóxi, assim como a atuação da fibra como reforço é significativamente superior nos compósitos de 30% em relação aos compósitos de 10 e 20% vol de fibra.

Foi realizada análise de variância (ANOVA) afim de verificar se houve diferença significativa entre as médias do módulo de elasticidade para os compósitos reforçados com fibras de caranã. A análise de variância (ANOVA) está apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Análise de variância do módulo de elasticidade dos compósitos epóxi reforçados fibras de caranã.

<i>Fonte da</i>						
<i>variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Tratamentos	0,034	3	0,011	2,330	0,100	3,009
Resíduos	0,116	24	0,005			
Total	0,150	27				

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A análise de variância apresenta o valor de F calculado (2,330) inferior ao valor de F crítico (3,009), com isso foi constatado que para um nível de significância de 5 %, não há diferença significativa para o módulo de elasticidade entre matriz e compósitos com 10,20 e 30% vol de fibras de caranã.

Foi realizada análise de variância (ANOVA) afim de verificar se houve diferença significativa entre as médias de deformação para os compósitos reforçados com fibras de caranã. A análise de variância (ANOVA) está apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 – Análise de variância da deformação dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Tratamentos	0,0012	3	0,0004	4,6509	0,0106	3,0088
Resíduos	0,0021	24	0,0001			
Total	0,00327	27				

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A análise de variância apresenta o valor de F calculado (4,6509) superior ao valor de F crítico (3,0088), com isso rejeitou-se a hipótese de médias iguais para um nível de significância de 5 % e foi realizado o teste de tukey, demonstrado na Tabela 18, para comparação de médias utilizando-se um nível de confiança de 95 %.

Tabela 18 – Teste de tukey da deformação dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.

Compósitos	CPEC0	CPEC10	CPEC20	CPEC30
CPEC0	0	<b>0,017</b>	0,012	0,006
CPEC10	<b>0,017</b>	0	0,005	0,012
CPEC20	0,012	0,005	0	0,006
CPEC30	0,006	0,012	0,006	0

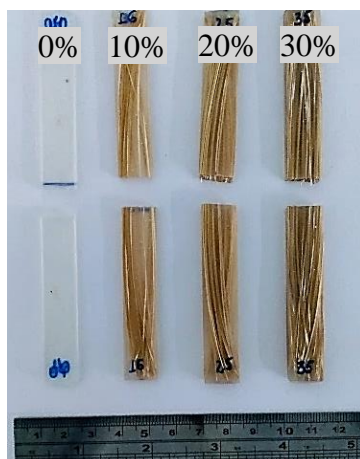
Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Com base nesses resultados, considerando o nível de significância de 5 %, foi possível observar através do teste de tukey que a diferença significativa no grupo se encontra entre o compósito de 10 %vol e a matriz epóxi, visto que a diferença encontrada entre os grupos é superior ao d.m.s calculado (0,014). Sugerindo que a força das ligações e a deformação sofrida pelos compósitos reforçados com 10% vol de fibra é significativamente inferior à deformação sofrida pela matriz.

#### 4.2.2.2 Ensaio de Flexão

Na Figura 33 estão apresentados os compósitos ensaiados em flexão de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã, o que demonstra que no geral os corpos de prova apresentaram fratura dentro do comprimento útil não havendo uma região preferencial.

Figura 33 – Aspecto macroscópico da fratura dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã ensaiados em flexão.



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Os valores referentes à resistência à flexão, módulo de elasticidade em flexão e deformação dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã estão apresentados na Tabela 19.

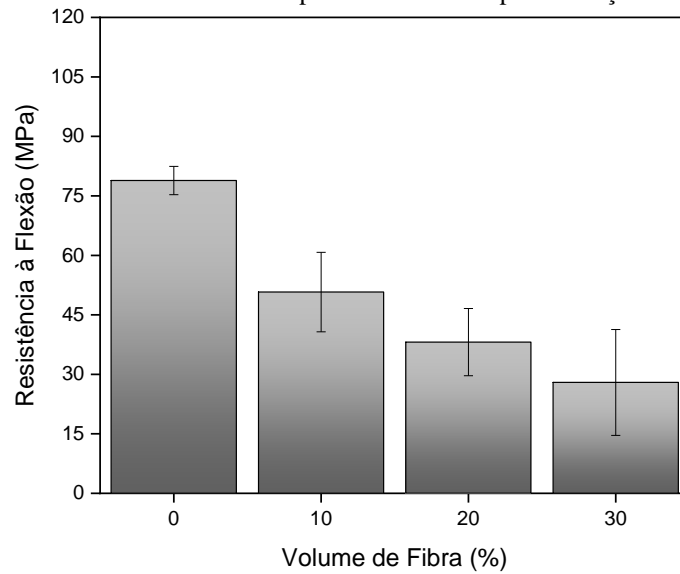
Tabela 19 – Valores para à flexão, módulo de elasticidade e deformação para a resina epóxi e para os compósitos com adição de 10, 20 e 30% em volume de fibra de caranã.

<b>Composição</b>	<b>Resistência à Flexão (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade em flexão (GPa)</b>	<b>Deformação (%)</b>
CPEC0	78,869 ( $\pm$ 3,57)	2,714 ( $\pm$ 0,115)	0,045 ( $\pm$ 0,016)
CPEC10	50,739 ( $\pm$ 10,01)	2,424 ( $\pm$ 0,232)	0,019 ( $\pm$ 0,007)
CPEC20	38,122 ( $\pm$ 8,48)	2,434 ( $\pm$ 0,275)	0,015 ( $\pm$ 0,003)
CPEC30	27,957 ( $\pm$ 13,35)	1,795 ( $\pm$ 0,984)	0,019 ( $\pm$ 0,008)

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A incorporação da fibra de caranã provocou um decréscimo de 35,66% para 10%vol, 51,66% para 20%vol e 64,55% para 30 %vol na resistência à tração dos compósitos em relação a matriz epóxi. Já para o módulo de elasticidade em flexão foram observados decréscimos de 10,68% para 10%vol, 10,32% para 20%vol e 33,86% para 30 %vol. Para deformação também foi obtido decréscimo em todos os compósitos em relação a matriz, sendo de 57,77% para 10%vol, 66,66% para 20%vol e 57,77% para 30 %vol. A Figura 34 apresenta o gráfico da resistência obtido a partir do ensaio de flexão dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.

Figura 34 – Resistência à flexão dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã.

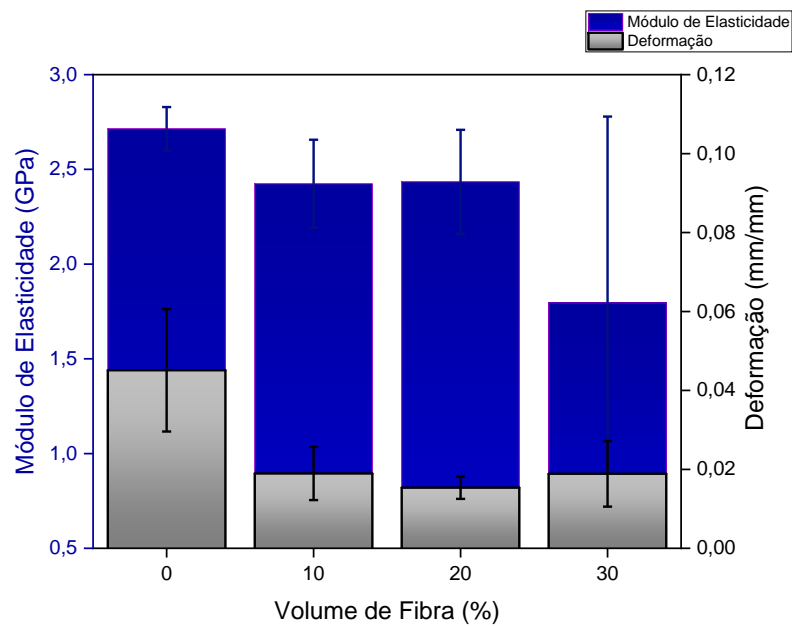


Fonte: Do Próprio Autor, 2022

É possível avaliar que a resistência à flexão apresenta comportamento decrescente dos compósitos em relação à matriz epóxi. Este comportamento pode estar associado à má distribuição de fibras na matriz, baixa adesão ou a presença de vazios no material.

A Figura 35 apresenta os valores de módulo de elasticidade em flexão e deformação encontrados no ensaio de flexão para os compósitos reforçados com fibras de caranã.

Figura 35 – Módulo de elasticidade em flexão e deformação dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Não foram observados aumento nos valores de módulo de elasticidade em flexão e deformação a partir da incorporação das fibras de caranã na matriz epóxi, Figura 36. Um comportamento próximo foi observado por (NEVES *et al.*, 2020) onde foi verificado que a incorporação de 0,10, 20 e 30% em volume de fibras de cânhamo em compósitos de poliéster também não apresenta melhoras nas propriedades mecânicas da matriz, o autor verificou através de MEV que uma razão para a dificuldade das fibras de cânhamo para reforçar a matriz de poliéster pode ser a interação fibra/matriz.

Foi realizada análise de variância (ANOVA) afim de verificar se houve diferença significativa entre as médias de resistência à flexão para os compósitos reforçados com fibras de caranã. A análise de variância (ANOVA) está apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – Análise de variância da resistência à flexão dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Tratamentos	10193,7654	3	3397,9218	37,4446	$3,26603 \times 10^{-9}$	3,0088
Resíduos	2177,8848	24	90,7452			
Total	12371,6502	27				

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A análise de variância apresenta o valor de F calculada (37,4446) superior ao valor de F crítico (3,0088), com isso rejeitou-se a hipótese de médias iguais para um nível de significância de 5 % e foi realizado o teste de tukey, demonstrado na Tabela 21, para comparação de médias utilizando-se um nível de confiança de 95 %.

Tabela 21 – Teste de tukey da resistência à flexão dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.

Compósitos	CPEC0	CPEC10	CPEC20	CPEC30
CPEC0	0	<b>28,129</b>	<b>40,746</b>	<b>50,911</b>
CPEC10	<b>28,129</b>	0	12,617	<b>22,782</b>
CPEC20	<b>40,746</b>	12,617	0	10,165
CPEC30	<b>50,911</b>	<b>22,782</b>	10,165	0

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Considerando o nível de significância de 5 %, em relação à resistência à flexão a resina epóxi é significativamente diferente de todos os compósitos reforçados com fibra de caranã nas proporções apresentadas neste trabalho. Além disso, os compósitos reforçados com 10 % vol de fibra de caranã também é significativamente diferente dos compósitos de 30% vol de fibra, visto que a diferença encontrada entre tais grupos é superior ao d.m.s calculado (14,042).

Sugerindo que a força das ligações dos compósitos é significativamente inferior às ligações da matriz. Bem como o compósito reforçado com 30%vol de fibra apresenta essas forças de ligação significativamente inferiores aos compósitos reforçados com 10%vol de fibra.

Também foi realizada análise de variância (ANOVA) afim de verificar se houve diferença significativa entre as médias de módulo de elasticidade em flexão para os compósitos reforçados com fibras de caranã. A análise de variância (ANOVA) está apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 – Análise de variância do módulo de elasticidade em flexão dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Tratamentos	3,1699	3	1,0566	3,8068	0,0231	3,0088
Resíduos	6,6616	24	0,2776			
Total	9,8315	27				

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A análise de variância apresenta o valor de F calculada (3,8068) superior ao valor de F crítico (3,0088), com isso rejeitou-se a hipótese de médias iguais para um nível de significância de 5 % e foi realizado o teste de tukey, demonstrado na Tabela 23, para comparação de médias utilizando-se um nível de confiança de 95 %.

Tabela 23 – Teste de tukey do módulo de elasticidade dos compósitos epóxi-caranã.

Compósitos	CPEC0	CPEC10	CPEC20	CPEC30
CPEC0	0	0,290	0,280	<b>0,919</b>
CPEC10	0,290	0	0,010	0,629
CPEC20	0,280	0,010	0	0,639
CPEC30	<b>0,919</b>	0,629	0,639	0

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Considerando o nível de significância de 5 %, em relação ao módulo de elasticidade em flexão, foi encontrado diferença significativa entre a matriz epóxi e os compósitos reforçados com 30 %vol de fibra de caranã, onde a diferença encontrada entre os grupos é superior ao d.m.s calculado (0,777). Sugerindo que os compósitos reforçados com 30% vol de fibra apresentam rigidez significativamente inferior à matriz epóxi para ensaio de flexão.

Também foi realizada análise de variância (ANOVA) afim de verificar se houve diferença significativa entre as médias de deformação para os compósitos reforçados com fibras de caranã. A análise de variância (ANOVA) está apresentada na Tabela 24.

Tabela 24 – Análise de variância da deformação dos compósitos epóxi reforçados com fibras de caranã.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Tratamentos	0,0040	3	0,0013	14,6627	$1,2385 \times 10^{-9}$	3,0088
Resíduos	0,0022	24	0,0001			
Total	0,0062	27				

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A análise de variância apresenta o valor de F calculada (14,6627) superior ao valor de F crítico (3,0088), com isso rejeitou-se a hipótese de médias iguais para um nível de significância de 5 % e foi realizado o teste de tukey, demonstrado na Tabela 25, para comparação de médias utilizando-se um nível de confiança de 95 %.

Tabela 25 – Teste de Tukey da Deformação dos Compósitos Epóxi Reforçados com Fibras de Caranã

Compósitos	CPEC0	CPEC10	CPEC20	CPEC30
CPEC0	0	<b>0,026</b>	<b>0,030</b>	<b>0,026</b>
CPEC10	<b>0,026</b>	0	0,004	$9,033 \times 10^{-5}$
CPEC20	<b>0,030</b>	0,004	0	0,004
CPEC30	<b>0,026</b>	$9,033 \times 10^{-5}$	0,004	0

Fonte: Do Próprio Autor, 2022

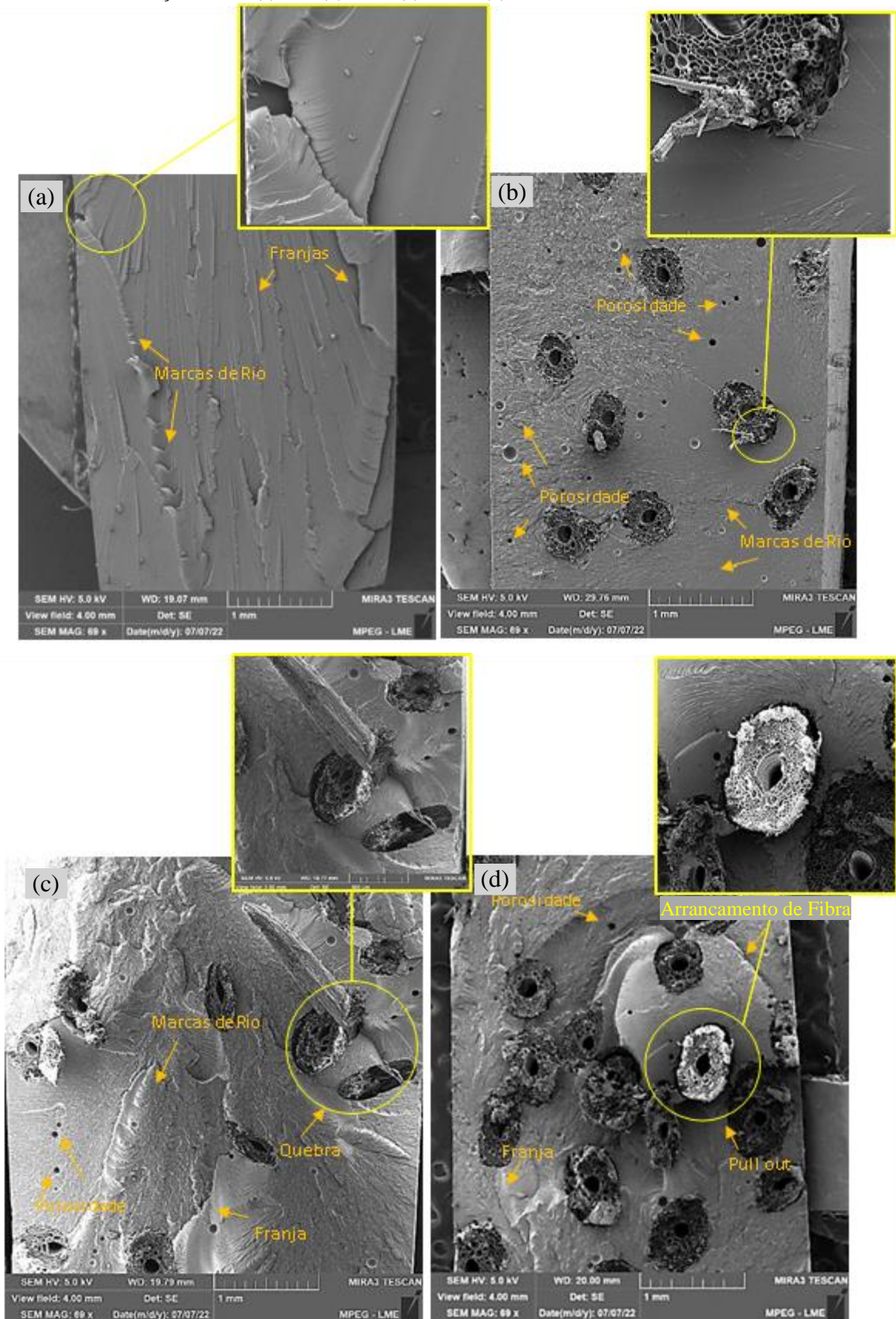
Considerando o nível de significância de 5 %, em relação à deformação, através do teste de tukey foi possível observar que existe diferença significativa entre a resina epóxi e os compósitos reforçados com 10, 20 e 30 % vol de fibra de caranã nas proporções apresentadas neste trabalho. Visto que a diferença encontrada entre a resina epóxi pura e os compósitos é superior ao d.m.s calculado (0,014). Sugerindo que a deformação sofrida pela matriz epóxi é significativamente diferente da deformação sofrida pelos compósitos reforçados com fibras.

#### 4.2.3 Análise Fractográfica dos Compósitos

##### 4.2.3.1 Compósitos Ensaçados em Tração

A Figura 36 apresenta a microscopia eletrônica de varredura obtida na análise da fratura dos compósitos ensaiados em tração.

Figura 36 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura dos compósitos epóxi-caranã ensaiados em tração reforçados com (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30%; com aumentos de 69x.



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

Foi revelado 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, verificadas nas Figuras 36.b e 36.c. Isto pode ter ocorrido em decorrência do método de confecção dos compósitos escolhido, devido ao processo de cura do epóxi lento as fibras pode ter ocorrido movimentação e concentração de fibras em regiões preferenciais no interior matriz para estes compósitos, o fenômeno pode ter sido reduzido no percentual de 30% pois o volume de fibras no interior da matriz é maior, dificultando tal movimentação durante o processo de cura.

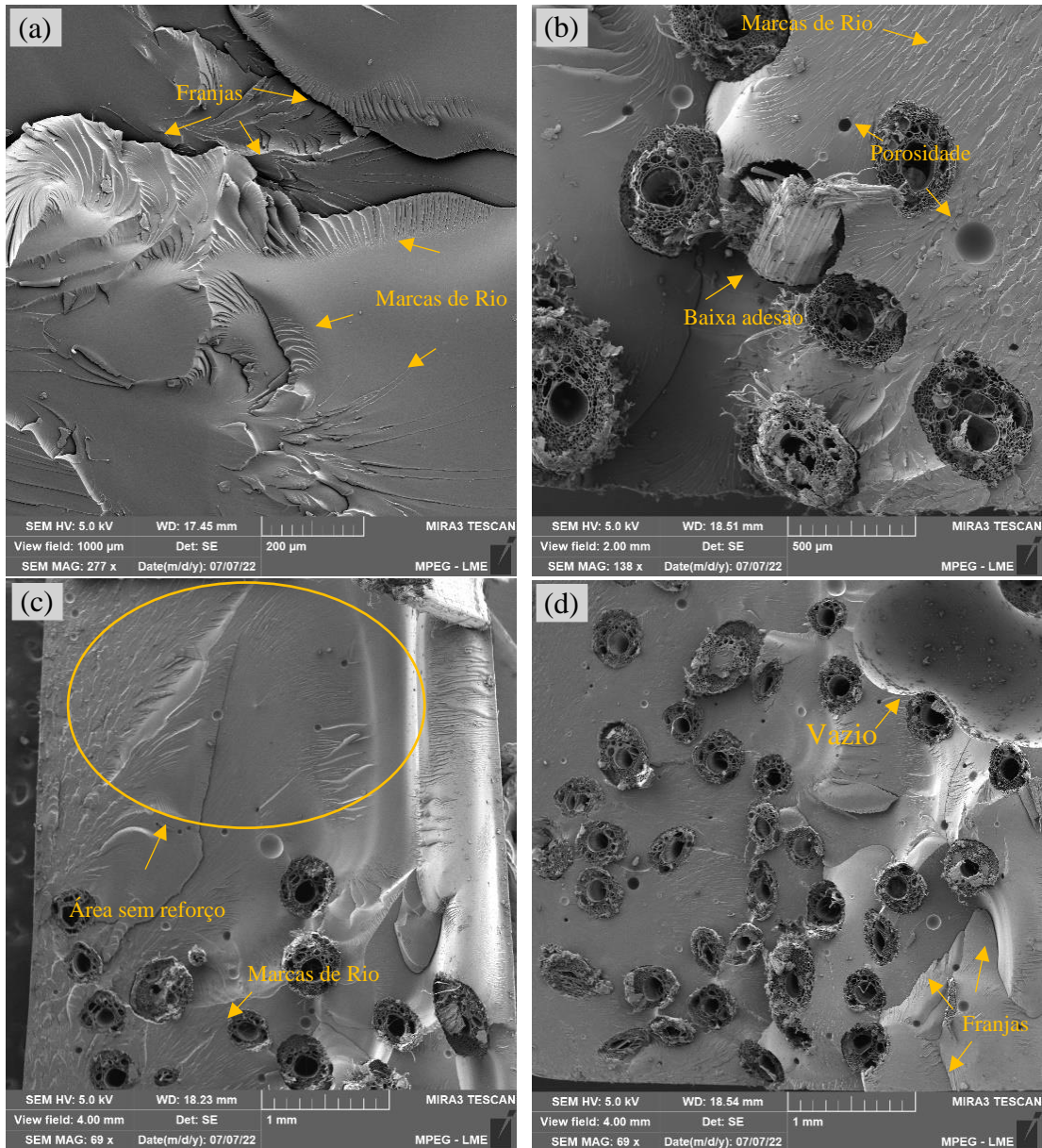
Para os compósitos reforçados com 20%, foi observado um maior número de fibras arrancadas sugerindo a ocorrência de efeito *pull out*, destacado na figura 36.c, devido a fraca interação da matriz com a fibra para essa concentração. No entanto por também se encontrar um maior volume de fibras nestes compósitos a interação foi melhor que entre os compósitos reforçados com 10% volume de fibra.

Para o compósito reforçado com 30% em volume de caranã, Figura 36.d, foi observado entre os fenômenos de arrancamento da fibra (*pull out*), porosidade e formação de franja evidente, fenômeno de delaminação, que pode estar associado à diferença na natureza da matriz hidrofóbica e da fibra natural hidrofílica, o que pode prejudicar a adesão interfacial do reforço na matriz, gerando trinca nesta interface (FILHO *et al.*, 2020)

#### 4.2.3.2 Compósitos Ensaçados em Flexão

A Figura 37 apresenta a microscopia eletrônica de varredura obtida na análise da fratura dos compósitos ensaiados em tração.

Figura 37 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura dos compósitos epóxi-caranã ensaiados em flexão reforçados com (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30%; com aumentos de 69 x.



Fonte: Do Próprio Autor, 2022

A análise da fratura em flexão dos compósitos revelou o comportamento frágil da matriz epóxi e os compósitos produzidos, evidenciado pela presença de marcas de rio e franjas de fratura. O baixo desempenho em flexão para os compósitos pode estar relacionado principalmente à má distribuição de fibras, Figura 37.c, e baixa interação fibra/matriz, Figura 37.b, observados para compósitos com 10 e 20 % vol de fibras e dificuldade na eliminação de bolhas para os compósitos com 30% vol de fibras, Figura 37.d.

A fibra de caraná caracteriza-se como uma fibra de baixa densidade e alta porosidade. A fibra é capaz de fornecer interação ativa entre seus grupos moleculares com a matriz epóxi. Os

resultados encontrados no ensaio de tração revelam que apesar do baixo desempenho mecânico, a adição das fibras de caranã tende a fornecer um leve reforço na matriz epóxi. De maneira geral, o caráter hidrofílico, os defeitos na superfície da fibra e o processo de fabricação dos compósitos adotado podem ter dificultado a obtenção de valores mais expressivos nas propriedades mecânicas dos compósitos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos neste trabalho de pesquisa, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- A fibra de caranã possui densidade geométrica média de  $0.38 \text{ g/cm}^3$ , sendo que as fibras mais finas apresentam os maiores valores de densidade;
- A fibra de caranã possui seção transversal porosa, circular, com orifício no centro da seção. A superfície longitudinal apresenta-se como heterogênea marcada pela presença de rugosidades;
- A análise de FTIR da fibra indicou a presença de grupos funcionais característicos dos principais constituintes das fibras naturais (celulose, hemicelulose e lignina). Já para os compósitos revelou a existência de uma interação ativa entre a matriz epóxi e os grupos moleculares da fibra de caranã, que foi melhorada a partir do aumento do percentual de fibras na matriz;
- Para as propriedades de tração o percentual de 30% em volume de fibras apresenta-se como o mais eficaz, aumentando a resistência à tração em 4,5% e a rigidez em 8,8% do compósito em relação à matriz epóxi;
- As propriedades de flexão não demonstraram melhoras a partir da incorporação de fibras de caranã na matriz epóxi;
- A análise de fratura revelou comportamento frágil tanto para a matriz quanto para os compósitos, que foram marcados pela presença de porosidades, dificuldade na distribuição de fibras no interior da matriz, principalmente para os compósitos de 10 e 20%vol.
- Para os compósitos de 30% vol testados em tração foi observado maior interação das fibras de caranã com a matriz epóxi, evidenciando o potencial de uso da fibra de caranã como reforço em matriz epóxi, sobretudo em maiores concentrações de volume.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a este trabalho, algumas sugestões podem ser feitas, como:

- Realizar análise química da fibra de caranã afim de avaliar os teores de celulose, hemicelulose e lignina presentes na fibra;
- Estudar a resistência mecânica do filamento de caranã em relação ao seu diâmetro;
- Produzir compósitos utilizando fibras finas, médias e grossas de caranã;
- Produzir compósitos utilizando diferentes matrizes poliméricas e de outras classificações;
- Produzir compósitos utilizando maiores volumes de fibras para analisar as propriedades mecânicas dos mesmos;
- Realizar testes de impacto Charpy e Izod em compósitos de matriz epóxi reforçados com fibra de caranã;
- Estudar o efeito de tratamentos químicos aplicados na fibra de caranã para o desempenho mecânico de seus compósitos;
- Caracterizar e avaliar as propriedades das fibras que se encontram na casca do caranã e os compósitos que podem ser produzidos a partir da mesma.

## 7 REFERÊNCIAS:

ALCOCK, M.; AHMED, S.; DUCHARME, S.; ULVEN, C.A. **Influence of Stem Diameter on Fiber Diameter and the Mechanical Properties of Technical Flax Fibers from Linseed Flax**. *Fibers* 2018, 6, 10. <https://doi.org/10.3390/fib6010010>.

ASIM, M.; JAWAID, M.; SABA, N.; NASIR, M.; SULTAN, M.T.H. **Processing of hybrid polymer composites—A review**. In *Hybrid Polymer Composite Materials*; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2017; pp. 1-22.

ASTM D 638 - 2014 “**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**”, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

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

ATIQUE, Md Saifuddin Ahmed; PROBHA, Nafisa; NAFI, Asif. **Polymer composites: a blessing to modern aerospace engineering**. International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering, Bangladesh, 2014.

AWAIS, H.; NAWAB, Y.; AMJAD, A.; ANJANG, A.; MD AKIL, H.; ZAINOL ABIDIN, M. S. **Environmental benign natural fibre re-inforced thermoplastic composites: A review**. *Composites Part C* 2021, 4, 100082–. doi:10.1016/j.jcomc.2020.100082.

BAHRAMI, M.; ABENOJAR, J.; MARTÍNEZ, M.Á. **Recent Progress in Hybrid Biocomposites: Mechanical Properties, Water Absorption, and Flame Retardancy**. *Materials* 2020, 13, 5145. <https://doi.org/10.3390/ma13225145>.

BETELIE, A.; SINCLAIR, T.; KORTSCHOT, M.; LI, Y.; REDDA, D. **Mechanical properties of sisal-epoxy composites as functions of fiber-to-epoxy ratio**. *AIMS Materials Science*, 2019, 6, 985-996. [10.3934/matasci.2019.6.985](https://doi.org/10.3934/matasci.2019.6.985).

BREBU, M. **Environmental Degradation of Plastic Composites with Natural Fillers—A Review**. *Polymers* 2020, 12, 166. <https://doi.org/10.3390/polym12010166>.

CALLISTER, W. D.; RETHWISH, D. G. **Materials Science and Engineering - An Introduction**. 8th edition, John Wiley & Sons, New York, NY, 2016.

CANDIDO, V. S. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. 2014. 188f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

CASTRO, Alexandre; FRANCISQUETTI, Edson; GASPARIN, Alexandre. **Influência da temperatura e tempo de cura na transição vítrea da resina epóxi**. *Scientia cum Industria*, 7, 15-2, 2019. 10.18226/23185279.v7iss3p14.

CAVALCANTE, Paulo B. **Frutas comestíveis da Amazônia II**. *Publicações Avulsas* n.27, 1974

CHANDGUDE, S.; SALUNKHE, S. **Biofiber-reinforced polymeric hybrid composites: An overview on mechanical and tribological performance**. *Polymer composites*, 2020, Vol.41 (10), 3908-3939. <https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1002/pc.25801>.

CHAWLA, Krishan K. **Composite Materials** || 2012. 10.1007/978-0-387-74365-3(), -. doi:10.1007/978-0-387-74365-3

Da COSTA, Célia. **Product development using vegetable fibers**. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2014 Volume 9. 237-244. 10.2495/DNE-V9-N3-237-244.

Da DEMOSTHENES, L.C.C.; NASCIMENTO, L.F.C.; MONTEIRO, S.N.; COSTA, U.O.; da GARCIA FILHO, F.C.; da LUZ, F.S.; OLIVEIRA, M.S.; RAMOS, F.J.H.T.V.; PEREIRA, A.C.; BRAGA, F.O. **Thermal and structural characterization of buriti fibers and their relevance in fabric reinforced composites**. *J. Mater. Res. Technol.* 2019, 9, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.036>.

de MENDONÇA NEUBA, L.; PEREIRA JUNIO, R.F.; RIBEIRO, M.P.; SOUZA, A.T.; de SOUSA LIMA, E.; GARCIA FILHO, F.D.C.; FIGUEIREDO, A.B.-H.d.S.; Braga, F.d.O.; Azevedo, A.R.G.d.; Monteiro, S.N. **Promising Mechanical, Thermal, and Ballistic Properties of Novel Epoxy Composites Reinforced with Cyperus malaccensis Sedge Fiber**. *Polymers*, 2020, 12, 1776. <https://doi.org/10.3390/polym12081776>

DELATORRE, F.M.; PEREIRA, A.K.S.; DA SILVA, Á.M.; DE SOUZA, E.C.; OLIVEIRA, M.P.; PROFETI, D.; PROFETI, L.P.R.; DIAS JÚNIOR, A.F. **The Addition of Charcoal Fines Can Increase the Photodegradation Resistance of Polymeric Biocomposites**. *Environ. Sci. Proc.* 2022, 13, 8. <https://doi.org/10.3390/IECF2021-10812>

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.

EGBO, Munonyedi. **A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering**. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2020;33. 10.1016/j.jksues.2020.07.007.

FILHO, F.C.G.; OLIVEIRA, M.S.; PEREIRA, A.C.; NASCIMENTO, L.F.C.; MATHEUS, J.R.G.; MONTEIRO, S.N. **Ballistic behavior of epoxy matrix composites reinforced with piassava fiber against high energy ammunition**. *J. Mater. Res. and Tech.* 2020, 9, 1734-1741. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.004>.

FORNARI JUNIOR, Celso Carlino Maria. **Fibras vegetais para compósitos poliméricos**/ Celso Carlino Maria Fornari Junior. - Ilhéus, BA: Editus, 2017. 198 p.; il. ISBN: 978-85-7455-436-5

GHOLAMPOUR, Ali & OZBAKKALOGLU, Togay. **A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications**. *Journal of Materials Science*. 2020, 55 (3), 1-64. 10.1007/s10853-019-03990-y.

GUPTA, M. K.; RAMESH, M., THOMAS, S. **Effect of hybridization on properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites (2001-2020): A review**. *Polymer Composites*, 2021, V. 42 (10), p. 4981-5010. <https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1002/pc.26244>.

JIN, Y.; LEI, Z.; TAYNTON, P.; HUANG, S.; ZHANG, W. **Malleable and Recyclable Thermosets: The Next Generation of Plastics**. *Matter*, 2019, 1, 1456-1493. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.09.004>.

JOHN, M.J.; THOMAS, S. **Biofibers and Biocomposites**. *Carbohydrate Polymers*, Vol. 71, pp. 343-364, 2008.

JUNIO, R.F.P.; NASCIMENTO, L.F.C.; NEUBA, L.D.M.; SOUZA, A.T.; MOURA, J.V.B.; GARCIA FILHO, F.D.C.; MONTEIRO, S.N. **Copernicia Prunifera Leaf Fiber: A Promising New Reinforcement for Epoxy Composites**. *Polymers* 2020, 12, 2090. <https://doi.org/10.3390/polym12092090>

KHALID, M. Y., AL RASHID, A., ARIF, Z. U., AHMED, W., ARSHAD, H., & ZAIDI, A. A. **Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications.** Results in Engineering, 2021, 11, 100263. doi:10.1016/j.rineng.2021.100263

KUMAR, S., SAMAL, S.K., MOHANTY, S. *et al.* **Curing kinetics of bio-based epoxy resin-toughened DGEBA epoxy resin blend.** J Therm Anal Calorim 2019, 137, 1567-1578. <https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10973-019-08080-4>.

LEAL, Artur; SILVA, Suédina; de ARAÚJO, Carlos. **Thermomechanical Behavior of Active Composites Prepared with Epoxy/Organoclay Nanocomposites and Ni-Ti Shape Memory Alloy Wires.** Polímeros. 2011. 22. 134-141. 10.1590/S0104-14282012005000020.

LEE, C.H.; KHALINA, A.; NURAZZI, N.M.; NORLI, A.; HARUSSANI, M.M.; RAFIQAH, S.A.; AISYAH, H.A.; RAMLI, N. **The Challenges and Future Perspective of Woven Kenaf Reinforcement in Thermoset Polymer Composites in Malaysia: A Review.** Polymers 2021, 13, 1390. <https://doi.org/10.3390/polym13091390>.

LI, M.; PU, Y.; THOMAS, V. M.; YOO, C. G.; OZCAN, S.; DENG, Y.; NELSON, K.; RAGAUSKAS, A. J. **Recent advancements of plant-based natural fiber-reinforced composites and their applications.** Composites. Part B, Engineering, 2020-11-01, Vol.200 (1), p.108254. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108254.

LI, X., WEI, Y., XU, J. *et al.* **Quantitative visualization of lignocellulose components in transverse sections of moso bamboo based on FTIR macro- and micro-spectroscopy coupled with chemometrics.** Biotechnol Biofuels, 2018, 11, 263. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1251-4>.

LOPES, Bruno Leonardy Sousa. **Polímeros Reforçados por Fibras Vegetais: Um resumo sobre esses compósitos.** Editora Blucher, 2017. ISBN: 9788580392920

LOTFI A, LI H, DAO DV, PRUSTY G. **Natural fiber-reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability.** Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2021;34(2):238-284. doi:10.1177/0892705719844546

LUCHERELLI, M.A., DUVAL, A., AVÉROUS, L. **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, F.S.D.; RAMOS, F.J.H.T.V.; NASCIMENTO, L.F.C.; FIGUEIREDO, A.B.S.; MONTEIRO, S.N. **Critical length and interfacial strength of PALF and coir fiber incorporated in epoxy resin matrix.** J. Mater. Res. and Tech. 2018, 7, 528-534. doi:10.1016/j.jmrt.2018.04.025

MADUEKE, C.I.; MBAH, O.M.; UMUNAKWE, R. **A review on the limitations of natural fibres and natural fibre composites with emphasis on tensile strength using coir as a case study.** Polym. Bull. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04241-y>.

MALLICK, P.K. **Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design;** CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2007.

MAPIO.NET. **Teto de palha de palmeira caranã.** s.d. Disponível em <<https://mapio.net/pic/p-60151575/>>. Acesso em: 17 de outubro de 2022.

MARCHI, B.Z.; OLIVEIRA, M.S.; BEZERRA, W.B.A.; DE SOUSA, T.G.; CANDIDO, V.S.; DA SILVA, A.C.R.; MONTEIRO, S.N. **Ubim Fiber (Geonoma baculífera): A Less Known Brazilian Amazon Natural Fiber for Engineering Applications.** Sustainability 2022, 14, 421. <https://doi.org/10.3390/su14010421>.

MOMANYI, J.; HERZOG, M.; MUCHIRI, P. **Analysis of Thermomechanical Properties of Selected Class of Recycled Thermoplastic Materials Based on Their Applications.** Recycling 2019, 4, 33. <https://doi.org/10.3390/recycling4030033>.

MUSSATO, Andre; AHAD, Inam UI; MOUSAVIAN, Reza Taherzadeh; DELAURE, Yan; BRABAZON, Dermot. **Advanced production routes for metal matrix composites.** Engineering Reports, 2020. Volume 3. <https://doi.org/10.1002/eng2.12330>.

NECHITA, P.; MIRELA, R.; CIOLACU, F. **Xylan Hemicellulose: A Renewable Material with Potential Properties for Food Packaging Applications.** Sustainability 2021, 13, 13504. <https://doi.org/10.3390/su132413504>

NETO, F. Levy; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** Editora Blucher, 2006.

NEVES, A. C. C.; ROHEN, L. A.; MANTOVANI, D. P.; CARVALHO, J. P. R. G.; VIEIRA, M. F.; LOPES, F.P.D.; SIMIONASSI, N. T.; LUZ, F. S.; MONTEIRO, S. N. **Comparative mechanical proper-ties between biocomposites of Epoxy and polyester matrices**

**reinforced by hemp fiber.** J. Mater. Res. and Tech. 2020, 9, 1296-1304. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.056>.

NGUYEN, A.; NGUYEN, T. **Banana Fiber-Reinforced Epoxy Composites: Mechanical Properties and Fire Retardancy.** International Journal of Chemical Engineering, 2021, 1-9. 10.1155/2021/1973644

OGUNLEYE, R.O.; RUSNAKOVA, S. **A Review of Prestressed Fibre-Reinforced Polymer Matrix Composites.** Polymers 2022, 14, 60. <https://doi.org/10.3390/polym14010060>

OLIVEIRA, M.; LUZ, F. S.; SOUZA, A. T.; DEMOSTHENES, L. C. C.; PEREIRA, A. C.; GARCIA FILHO, F. C.; BRAGA, F. O.; FIGUEIREDO, A. S.; MONTEIRO, S. N. **Tucum Fiber from Amazon *Astrocaryum vulgare* Palm Tree: Novel Reinforcement for Polymer Composites.** Polymers, 2020, 12, 2259. 10.3390/polym12102259.

PEÇAS, Paulo; CARVALHO, V. Hugo; SALMAN, Hafiz; LEITE, Marco. **Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review.** Journal of Composites Science, 2018. 2. 66. 10.3390/jcs2040066.

PINHEIRO, M. A.; GOMES, L. G.; SILVA, A. C. R.; CANDIDO, V. S.; REIS, R. H. M.; MONTEIRO, S. N. **Guaruman: a Natural Amazonian Fiber with Potential for Polymer Composite Reinforcement.** Materials Research, 2019; 22(suppl. 1): e20190092. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0092>.

PINHEIRO, Miriane Alexandrino. **OBTENÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI REFROÇADOS COM FIBRA DE GUARUMÃ (*Ischnosiphon aromum*) / MIRIANE ALEXANDRINO PINHEIRO.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Belém, 2020.

POST, W., SUSA, A., BLAAUW, R., MOLENVELD, K. & KNOOP, R. J. I. **A Review on the Potential and Limitations of Recyclable Thermosets for Structural Applications.** Polymer Reviews, 2020, 60:2, 359-388, DOI: 10.1080/15583724.2019.1673406

REDDY, B. M.; REDDY, P. V.; REDDY, Y.V.; *et al.* **Mechanical, thermal and morphological properties of raw cordia dichotoma fiber reinforced epoxy composites.** Cur. Res. in Green and Sust. Chem. 2022, 2, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100264>

REIS, R.H.M., CÂNDIDO, V.S., NUNES, L.F., MONTEIRO, S.N. **Chemical and Morphological Characterization of Guaruman Fiber. In: Ikhmayies, S., Li, J., Vieira, C., Margem (Deceased), J., de Oliveira Braga, F. (eds) Green Materials Engineering.** The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-10383-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10383-5_12)

REIS, R.H.M.; NUNES, L.F.; OLIVEIRA, M.S.; DE VEIGA, V.F.; GARCIA FILHO, F.D.C.; PINHEIRO, M.A.; MONTEIRO, S.N. **Guaruman fiber: Another possible reinforcement in composites.** J. Mater. Res. Technol. 2020, 9, 622-628.

REIS, Raphael H. M.; GARCIA FILHO, Fabio C.; NUNES, Larissa F.; CANDIDO, Veronica S.; SILVA, Alisson C. R.; MONTEIRO, Sergio N. **Impact Resistance of Epoxy Composites Reinforced with Amazon Guaruman Fiber: A Brief Report.** Polymers, v. 13, p. 2264, 2021.

RIBEIRO, M.M.; PINHEIRO, M.A.; RODRIGUES, J.D.S.; RAMOS, R.P.B.; CORRÊA, A.D.C.; MONTEIRO, S.N.; DA SILVA, A.C.R.; CANDIDO, V.S. **Comparison of Young's Modulus of Continuous and Aligned Lignocellulosic Jute and Mallow Fibers Reinforced Polyester Composites Determined Both Experimentally and from Theoretical Prediction Models.** Polymers 2022, 14, 401. <https://doi.org/10.3390/polym14030401>.

RIBEIRO, M.P.; de MENDONÇA NEUBA, L.; SILVEIRA, P.H.P.M.; LUZ, F.S.; FIGUEIREDO, A.B.S.; MONTEIRO, S.N.; MOREIRA, M.O. **Mechanical, thermal and ballistic performance of epoxy composites reinforced with Cannabis sativa hemp fabric.** J. Mater. Res. and Tech. 2021, 12, 221-233. doi:10.1016/j.jmrt.2021.02.064

RIBEIRO, Maurício Maia. **Estudo da incorporação de resíduos industriais, lama vermelha e caulim, nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de juta e malva.** Orientadora: Verônica Scarpini Candido. 2022. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/14612>. Acesso em: 17 de outubro de 2022.

SiBBr. **Mauritiella armata in Ficha de Espécies do Sistema de Informação sobre a Biodiversidade Brasileira (SiBBr).** Disponível em: <[https://ferramentas.sibbr.gov.br/ficha/bin/view/especie/mauritiella\\_armata](https://ferramentas.sibbr.gov.br/ficha/bin/view/especie/mauritiella_armata)>. Acesso em 22-10-2020

SILVEIRA, M.V.; CASAGRANDE, M.D.T. **Effects of Degradation of Vegetal Fibers on the Mechanical Behavior of Reinforced Sand.** Geotech Geol Eng 2021, 39, 3875–3887. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01733-y>.

SMITH, N. **Mauritiella Armata. Palms and People in the Amazon;** Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2015; pp. 383-389.

SOUZA, A.T.; PEREIRA JUNIO, R.F.; NEUBA, L.D.M.; CANDIDO, V.S.; DA SILVA, A.C.R.; DE AZEVEDO, A.R.G.; MONTEIRO, S.N.; NASCIMENTO, L.F.C. **Caranan Fiber from Mauritiella armata Palm Tree as Novel Reinforcement for Epoxy Composites.** Polymers 2020, 12, 2037. <https://doi.org/10.3390/polym12092037>.

SYDUZZAMAN, M.; AL FARUQUE, M.A.; BILISIK, K.; NAEBE, M. **Plant-Based Natural Fibre Reinforced Composites: A Review on Fabrication, Properties and Applications.** Coatings 2020, 10, 973. <https://doi.org/10.3390/coatings10100973>.

T G, Yashas & M R, Sanjay; PARAMESWARANPILLAI, Jyotishkumar; SIENGCHIN, Suchart. **Natural Fibers as Sustainable and Renewable Resource for Development of Eco-Friendly Composites: A Comprehensive Review.** Frontiers in Materials. 2019 6. 10.3389/fmats.2019.00226.

TAVARES, T.D.; ANTUNES, J.C.; FERREIRA, F.; FELGUEIRAS, H.P. **Biofunctionalization of Natural Fiber-Reinforced Biocomposites for Biomedical Applications.** Biomolecules 2020, 10, 148. <https://doi.org/10.3390/biom10010148>

THAKUR, Vijay Kumar & THAKUR, M. **Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites.** Carbohydrate Polymers. 2014. 109. 102-117. 10.1016/j.carbpol.2014.03.039.

The Royal Botanic Gardens (Kew). **Mauritiella armata (Mart.) Burret. Plants of the world Online.** Disponível em: <http://www.plantsoftheworldonline.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:154897-2>. Acessado em 20 de novembro de 2021.

VÂRBAN, R.; CRIȘAN, I.; VÂRBAN, D.; ONA, A.; OLAR, L.; STOIE, A.; ȘTEFAN, R. **Comparative FT-IR Prospecting for Cellulose in Stems of Some Fiber Plants: Flax, Velvet Leaf, Hemp and Jute.** Appl. Sci. 2021, 11, 8570. <https://doi.org/10.3390/app11188570>.

WANG, H., YUAN, J., ZHU, Z. *et al.* **High performance epoxy resin composites modified with multifunctional thiophene/phosphaphenanthrene-based flame retardant: Excellent flame retardance, strong mechanical property and high transparency.** *Composites Part B: Engineering*, 2021, Volume 227, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109392>.

WEARN, Yves Nicolau, MONTAGNA, Larissa Stieven e PASSADOR, Fábio Roberto. **Compósitos de fibra de coco/LDPE: efeito do tratamento superficial das fibras de coco em compósitos verdes.** *Matéria (Rio de Janeiro)* [online]. 2020, v. 25, n. 1 [Acessado 5 Junho 2021], e-12548. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0873>>. Epub 06 Abr 2020. ISSN 1517-7076. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0873>.

YANG, Jianlei & YERN CHEE, Ching & CHUAH, Cheng Hock. **Applications of Lignocellulosic Fibers and Lignin in Bioplastics: A Review.** *Polymers*. 2019. 11. 751. [10.3390/polym11050751](https://doi.org/10.3390/polym11050751).

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.2020.108151>.