



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

MICHELE DA COSTA BAÍA

**UTILIZAÇÃO DE TECIDOS DE FIBRAS DE BANANEIRA COMO AGENTE DE REFORÇO EM
COMPÓSITOS DE MATRIZ DE RESINA POLIÉSTER TERMORRÍGIDA**

Tucuruí - PA

2023

MICHELE DA COSTA BAÍA

**UTILIZAÇÃO DE TECIDOS DE FIBRAS DE BANANEIRA COMO AGENTE DE
REFORÇO EM COMPÓSITOS DE MATRIZ DE RESINA POLIÉSTER
TERMORRÍGIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.

Área de concentração: Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. Wassim Raja El Banna

Tucuruí - PA
2023

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

-
- B152u Baía, Michele da Costa.
Utilização de tecidos de fibras de bananeira como agente de reforço em compósitos de matriz de resina poliéster termorrígida / Michele da Costa Baía. — 2023.
XIV, 62 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Wassim Raja El Banna Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2023.
1. Reaproveitamento. 2. Polímeros. 3. Resíduos vegetais. 4. Materiais alternativos. 5. Compósitos . I. Título.

CDD 620.118

MICHELE DA COSTA BAÍA

**UTILIZAÇÃO DE TECIDOS DE FIBRAS DE BANANEIRA COMO AGENTE DE
REFORÇO EM COMPÓSITOS DE MATRIZ DE RESINA POLIÉSTER
TERMORRÍGIDA**


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energ do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.

Área de concentração: Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. Wassim Raja El Banna

Aprovada em 11 de agosto de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **WASSIM RAJA EL BANNA**
Data: 23/01/2024 14:47:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wassim Raja El Banna/UFPA – Orientador



**WALBER ALEXANDRE DO
NASCIMENTO:0115540946
9
2024.01.19 18:26:12 -03'00'**

Prof. Dr. Walber Alexandre do Nascimento /UFPA – CAMTUC



Prof. Dr. Johnny Gilberto Moraes Coelho/IFSC – Campus São Carlos

Dedicatória

Ao meu filho Miguel que está comigo desde o início desta aventura... É você que me impulsiona a ser melhor.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela inspiração, conhecimento, sabedoria e esperança.

Ao meu ilustre orientador, Prof. Dr. Wassim Raja El Banna, que me orienta desde a graduação com toda sabedoria, comprometimento, paciência e compreensão, muitíssimo obrigada.

A minha família são meus exemplos e impulsionam a buscar o melhor, vocês são o alicerce para a realização dos meus sonhos e obrigada por estarem sempre ao meu lado. Em especial, aos meus esposo e filho, Alan Nascimento e Alan Miguel, respectivamente, por todo companheirismo e paciência durante esta etapa.

Ao Laboratório de Engenharia Mecânica do CAMTUC por me cederem seu espaço e café. Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos, em especial ao discente Railson Oliveira de Mendonça por conduzir os ensaios. Eu não poderia deixar de agradecer aos vigilantes, em especial Carlos e Jair, pela companhia e boas conversas.

À Universidade Federal do Pará – Campus Belém, em especial ao Prof. Dr. Deibson Silva da Costa pelos ensaios realizados em meus materiais, sou eternamente grata.

Aos meus colegas de trabalho da UMEI Irmã Ivone, em especial a Janilce, Socorro, Marlene, Arly, Naize, Núbia e Kátia, por me incentivarem a buscar o melhor e por entenderem as vezes em que precisei me isolar para estudar.

Aos amigos Caroline, Danilto, Jaí, Cléia, Lana, Segina e Vagno Costa (*in memoriam*) por sua amizade, orações, pensamentos positivos e incentivos.

Epígrafe

“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente”.

Roger Von Oech

UTILIZAÇÃO DE TECIDOS DE FIBRAS DE BANANEIRA COMO AGENTE DE REFORÇO EM COMPÓSITOS DE MATRIZ TERMORRÍGIDA DE RESINA POLIÉSTER

Nas últimas décadas, diversas pesquisas, nos âmbitos nacional e internacional, que utilizam materiais alternativos aos convencionalmente utilizados pela indústria, com destaque para os resíduos da biomassa provenientes das atividades agrícolas, como as fibras vegetais, na busca por minimizar os problemas causados ao meio ambiente e substituir produtos nocivos ao ser humano. Além de oferecer vantagens como atoxidade, biodegradabilidade, baixa densidade e custo reduzido, como as fibras oriundas do pseudocaule da bananeira. Esta pesquisa tem como objetivo principal utilizar as fibras do pseudocaule da bananeira como agente de reforço na forma de tecidos em materiais compósitos com matriz de resina termorrígida de poliéster, destinados a produção de materiais para engenharia. Inicialmente, realizou-se o processo de extração e limpeza das fibras para em seguida realizar o tecimento dos tecidos do tipo plano no tear de pregos, a serem utilizados como agente de reforço. Por seguinte, moldou-se compósitos poliméricos por meio de processo manual (*hand lay up*) e posterior aplicação de pressão à temperatura ambiente. Assim, obteve-se os compósitos: matriz plena, reforçados por mantas de fibras de vidro e os que possuem como agente de reforço os tecidos de fibras da bananeira. Foram realizados ensaios mecânicos – flexão e tração –, flamabilidade e microscopia. Os compósitos poliméricos foram fabricados nas seguintes composições: (V1) – Matriz plena; (V2) – com agente de reforço com duas camadas de mantas de fibra de vidro; (V3) – com agente de reforço com uma camada do tecido da fibra de bananeira e (V4) – com agente de reforço com duas camadas do tecido da fibra de bananeira. Os materiais de composição V3 e V4 apresentaram valores de resistência às de tração 29,25 MPa 51,27 MPa e flexão 142,45 MPa e 91,99 MPa, respectivamente. Quanto a resistência a flamabilidade, todos os materiais compósitos fabricados demonstraram valores abaixo ao estipulado pela normativa e dentro do padrão brasileiro. A análise dos mecanismos de falha presentes em suas superfícies foi feita através de microscopia eletrônica de varredura – (MEV), o que evidenciara a disposição entre matriz e agente de reforço, bem como a presença de trincas na matriz, fratura e rompimento das fibras no agente de reforço, vazios e *pull out*.

Palavras-chave: Reaproveitamento. Polímeros. Resíduos vegetais. Confeção.

USE OF BANANA FIBER FABRICS AS A REINFORCING AGENT IN POLYESTER RESIN HEAT RIGID MATRIX COMPOSITES

In recent decades, several studies have been observed, both nationally and internationally, which seek alternative materials to those conventionally used by industry, with emphasis on biomass residues from agricultural activities, such as vegetable fibers, in the quest to minimize the problems caused to the environment and replace products harmful to human beings. In addition to offering advantages such as atoxicity, biodegradability, low density and reduced cost, such as fibers derived from the pseudostem of the banana tree. With regard to banana trees, Brazil is one of the largest producers of its fruit at an international level, and as a result this is one of the activities that most generate waste in the country. Therefore, this research has as main objective to make composite materials with the fibers of the pseudostem of the banana tree in the form of fabrics and thermoset polyester resin, destined to the production of materials for engineering. Initially, the process of extracting and cleaning the fibers was carried out, followed by the weaving of flat-type fabrics on the nail loom, to be used as a reinforcing agent. Next, polymeric composites were molded using a manual process (hand lay up) and application of pressure at room temperature. Thus, composites were obtained: full matrix and those reinforced with glass fibers and banana tree fibers. Mechanical tests were carried out – flexion and traction –, flammability and microscopy. The polymeric composites were manufactured in the following compositions: V1 – Full matrix; V2 – with reinforcing agent with two layers of fiberglass mats; V3 – with reinforcing agent with one layer of banana fiber fabric and V4 – with reinforcing agent with two layers of banana fiber fabric. The materials of composition V3 and V4 presented tensile strength values of 29.25 MPa 51.27 MPa and bending strength of 142.45 MPa and 91.99 MPa, respectively. As for resistance to flammability, all composite materials manufactured showed values below those stipulated by the regulations and within the Brazilian standard. The analysis of the failure mechanisms present on their surfaces was performed using MEV, which can show the arrangement between matrix and reinforcing agent, as well as the presence of cracks in the matrix, fracture and rupture of fibers in the reinforcing agent, voids and pullout.

Keywords: Reuse. Polymers. Vegetable Waste. Confection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Classificação dos materiais compósitos conforme a orientação do agente de reforço.	21
Figura 2. Esquema de classificação dos materiais compósitos conforme sua matriz.	21
Figura 3. Estrutura química da resina poliéster isoftálica.	25
Figura 4. Disposição do agente de reforço em compósitos. a) partículas aleatórias; b) fibras descontínuas unidirecionais; c) fibras descontínuas aleatórias; d) fibras contínuas unidirecionais.	26
Figura 5. Constituição estrutural de uma fibra vegetal.	31
Figura 6. Ilustração da associação dos componentes da parede celular. a) Vista transversal; b) Vista tangencial; L-P: ligações lignina polioses.	32
Figura 7. Estrutura da bananeira.	34
Figura 8. Fibras para a confecção de tecido.	35
Figura 9. Painéis acústicos Green Blade.	35
Figura 10. Bainha folear de plantas do tipo <i>Musa Sapientum Musaceae</i>	37
Figura 11. Acessórios interiores veicular que utilizam fibras vegetais.	39
Quadro 1. Características e propriedades da fibra de bananeira.	37
Figura 12. Ilustração do tecido plano.	42
Figura 13. Arranjo hexagonal do reforço fibroso.	45
Figura 14. Fratura em materiais compósitos reforçados por fibras.	45
Figura 15. Manta de fibra de vidro.	48
Figura 16. Plantação das bananeiras coletadas para este estudo.	49
Figura 17. Pseudocaulés após separação do rizoma e folhas.	49
Quadro 2. Propriedades físico-químicas da resina.	47
Figura 18. Processo de extração da fibra: a) separação das bainhas; b) retirada da estrutura vegetal; c) lavagem; d) secagem ao ar livre.	50

Figura 19. Amostra das fibras utilizadas.	50
Figura 20. Tear manual.	51
Figura 21. Processo de tecimento das fibras.	51
Figura 22. Esquema do procedimento experimental desta pesquisa.	52
Figura 23. Síntese do processo de confecção dos corpos de prova.	54
Figura 24. Molde utilizado para confecção das placas.	55
Quadro 3. Variações dos compósitos estudados.	53
Figura 25. Preparo do material compósito: A) pesagem da resina; B) homogeneização resina/iniciador; C) vazamento da mistura no molde; d) adição do agente de reforço; E) estado final da mistura.	56
Figura 26. Material polimérico durante o processo de prensagem.	56
Figura 27. Dimensões dos corpos de prova ASTM D3039 – 17.	57
Figura 28. Equipamento para ensaio de tração.	58
Figura 29. Dimensões dos corpos de prova ASTM D790 – 10.	58
Figura 30. Equipamento para ensaio de flexão.	59
Figura 31. Dimensões dos corpos de prova ASTM D635 – 18.	59
Figura 32. Ensaio de flamabilidade de material compósito.	60
Figura 33. Equipamento utilizado para a caracterização microestrutural.	61
Figura 34. Tecido de fibras da bananeira.	62
Figura 35. A) matriz plena; B) compósito polimérico com reforço de fibras de vidro; C) compósito polimérico reforçado com 1 camada de tecido de fibras da bananeira; D) compósito polimérico reforçado com 2 camadas de tecidos de fibras da bananeira.	63
Figura 36 . Gráfico dos compostos confeccionados quanto as suas propriedades mecânicas.	65
Quadro 4. Resultados do ensaio de tração.	64
Figura 37. Gráfico da resistência à flexão dos materiais desenvolvidos.	67
Quadro 5. Resultados do ensaio de resistência a flexão.	66

Figura 38. Microscopia eletrônica de varredura da fratura após ensaio mecânico de tração: (a) composição V1; (b) composição V2; (c) composição V3; (d) composição V4.....	69
Figura 39. Microscopia eletrônica de varredura da fratura após ensaio de flexão: (a) composição V1; (b) composição V2; (c) composição V3; (d) composição V4.....	72
Quadro 6. Resultado do ensaio de flamabilidade.....	74

NOMENCLATURAS

A – Área

ASTM – *American Society Testing and Materials*

cm – Centímetro

g – Grama

g/cm³ - grama por centímetro cúbico

g/m² - grama por metro quadrado

GPa – Giga Pascal

h – Hora

HB – *Horizontal burning*

kN – Quilo Newton

m – Massa

m – Metro

m² - metro quadrado

MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura

mm – Milímetro

mm/min – Milímetro por minuto

MPa – Mega Pascal

UV – Radiação ultravioleta

μm – Micrometro

V1 – Matriz polimérica plena

V2 – Compósito com agente de reforço de duas camadas de mantas de fibra de vidro

V3 – Compósito com agente de reforço de uma camada do tecido de fibras da bananeira

V4 – Compósito com agente de reforço de duas camadas do tecido de fibras da bananeira

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. JUSTIFICATIVA	16
1.2. OBJETIVOS	18
1.2.1. Objetivo geral	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. IMPORTÂNCIA E EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS	19
2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS.....	20
2.3. OS POLÍMEROS COMO MATRIZES EM COMPÓSITOS	22
2.3.1. Resina Termofixa do tipo Poliéster Insaturado	23
2.4. AS FIBRAS COMO AGENTE DE REFORÇO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	25
2.4.1. Fibras Sintéticas	27
2.4.1.1. <i>Fibras de vidro</i>	28
2.4.2. Fibras de origem vegetal	30
2.4.2.1. <i>A fibra do pseudocaule da bananeira - Musa sapientum, Musaceae</i>	33
2.5. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE FIBRAS VEGETAIS	38
2.5.1. Compósitos com reforço de fibras de bananeira	39
2.6. TECIDOS	41
2.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS COMPÓSITOS FABRICADOS COM FIBRAS.....	42
2.8. FRATURA EM MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS ...	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1. MATERIAIS	47
3.1.1. Matriz Polimérica	47

3.1.2.	Mantas de fibra de vidro	47
3.1.3.	Fibra de bananeira	48
3.1.4.	Confecção dos tecidos	51
3.1.4.1.	<i>Determinação da gramatura do tecido de fibra da bananeira</i>	52
3.2.	SISTEMATIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	52
3.3.	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	53
3.4.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS CORPOS DE PROVA	57
3.4.1.	Ensaio de tração	57
3.4.2.	Ensaio de flexão	58
3.5.	ENSAIO DE FLAMABILIDADE DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	59
3.6.	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA	60
4.	RESULTADOS E DISCUSÕES	62
4.1.	MÉTODO DE CONFECÇÃO DOS TECIDOS	62
4.1.1.	Determinação da gramatura do tecido	62
4.2.	FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS	63
4.3.	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	64
4.4.	ENSAIO DE FLEXÃO.....	65
4.5.	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	67
4.5.1.	Ensaio de tração	67
4.5.2.	Ensaio de flexão	70
4.6.	ENSAIO DE FLAMBILIDADE	74
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	77

1. INTRODUÇÃO

O uso e transformação dos materiais estão correlacionados com o desenvolvimento da sociedade humana. Desenvolvimento este que acontece de maneira dinâmica e em um ritmo cada vez maior. Portanto, cria-se uma necessidade cada vez mais crescente por novos produtos. Para atender esta demanda, é exigido o aperfeiçoamento contínuo dos materiais, o que permite a obtenção de maiores eficiências e de menores custos (NAVARRO, 2006; SOUZA, 2019)

O aperfeiçoamento técnico dos materiais é resultado do processo de difusão das inovações na pesquisa científica e tecnológica, as quais são frutos de estudos nas áreas da ciência e da tecnologia dos materiais (MEDINA E NAVEIRO, 1998; SOUZA, 2019).

Nas últimas décadas, a utilização maciça de materiais obtidos a partir de fontes não renováveis estão em variados processos de fabricação por conformação mecânica, por exemplo. As fibras sintéticas apresentam destaque quanto ao seu uso para o reforço de materiais, como plásticos e borrachas, além de seu emprego constante na indústria automobilística e aeronáutica (VENKATESHARAN et al., 2011).

Contudo, o desenvolvimento e a comercialização de novos materiais sustentáveis, podem contribuir diretamente para a redução do uso de materiais oriundos de fontes não renováveis. A substituição de fibras sintéticas pela de origem vegetal é uma possibilidade promissora, uma vez que se trata de utilizar um material de origem renovável e que, por diversas vezes, pode ser um resíduo com potencialidades e propriedades específicas para novas aplicações (RAZERA, 2006; CARASHI et. al., 2009).

Souza (2019) destaca que na atualidade, os fatores relacionados à degradação ambiental e à utilização de fontes de energia não renováveis, impulsiona o desenvolvimento de novos materiais, ao citar como exemplo, o aproveitamento das fontes de energia renováveis. Ainda de acordo com Souza (2019), a competitividade dos sistemas de geração alternativos (tais como aerogeradores e painéis fotovoltaicos) frente aos sistemas de geração convencionais está associada ao desenvolvimento sustentável. Este, por sua vez, depende, dentre outros fatores, da utilização de materiais sustentáveis que atendam a propriedades específicas, tais como: baixo peso, custo competitivo e resistência mecânica compatível.

Para Oliveira (2017), os materiais compósitos com matriz polimérica são os mais pesquisados e utilizados devido ao grande número de aplicações e baixo custo de processamento que aos demais tipos. As resinas poliéster termofixas obtêm destaque na utilização como matrizes para compor tais materiais, seja por apresentarem vantagens técnicas e econômicas, tais como: estabilidade dimensional, cura a frio e possibilidade de utilização de moldes simples e econômicos (GOMES, 2015).

Tendo isso em vista, essa pesquisa consistiu em confeccionar um compósito de resina poliéster e tecido de fibra de bananeira, bem como caracterizar e avaliar de maneira experimental o comportamento mecânico deste material, e realizar uma comparação com material polimérico com reforço de fibra sintética, neste caso a fibra de vidro. Deve-se destacar que a inovação deste trabalho é o estudo das propriedades mecânicas e de inflamabilidade dos compósitos que possuem como agente de reforço o tecido de fibras da bananeira, tendo em vista que na literatura especializada foram encontradas poucas pesquisas com tal abordagem.

1.1. JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos tem-se falado muito sobre temas como o desenvolvimento sustentável e as questões ambientais, afinal, o futuro da humanidade depende do que se está fazendo hoje, de maneira a não prejudicar as gerações futuras. Tendo como base a definição de desenvolvimento sustentável e a saber que, na literatura científica, ele se aplica sob diversos aspectos como: ambiental, econômico, social, dentre outros (CIEGIS et. al., 2009). A sustentabilidade é uma filosofia que deve ser aplicada a todos os ramos industriais, dada a relação direta que toda atividade econômica tem com o meio ambiente (CORREA, 2017).

A saber que o território brasileiro possui uma flora com grande variedade de espécies de fibras vegetais com diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas, e em função dessa diversidade, houve um despertar de interesse para a utilização destas fibras em novos materiais. Materiais poliméricos com fibras naturais são considerados alternativas potenciais e economicamente rentáveis para a fixação de carbono na natureza, ao reduzir a emissão de CO₂ na atmosfera durante o seu ciclo de produção, processamento e utilização (MARINELLI et al., 2008).

Os processos agrícolas e florestais geram resíduos e biomassa, estimados mundialmente na ordem de 140 bilhões de toneladas ao ano. A maior parte destes resíduos são eliminados por meio do processo de queima, o que influencia diretamente no efeito estufa, ou utilizada como fertilizante. Esses resíduos podem ser utilizados, como combustíveis, como fase dispersa em polímeros e em materiais de construção (ZHU et. al., 2016, TRIPATHI et. al., 2019)

Resíduos obtidos a partir do cultivo de plantas como arroz, milho, algodão, cana-de-açúcar e banana geram fibras celulósicas que podem ser utilizadas como alternativas as fibras sintéticas na confecção e desenvolvimento de novos materiais. E de acordo com sua natureza estas fibras têm variabilidade de propriedades como forma, comprimento e composição química (DUNGANI et. al., 2016). Carvalho (2015) afirma que o apelo ambiental e o baixo custo são alguns dos aspectos mais relevantes quando se considera o reaproveitamento de possíveis resíduos à natureza, como as fibras naturais para a aplicação e desenvolvimento de novos materiais compósitos.

No Brasil, a fruticultura da banana, ocupa o quarto lugar de produção, o que coloca o país como um dos grandes produtores da planta, sendo o cultivo realizado em todo território nacional, com predominância para as regiões litorâneas. No ano de 2020 foram produzidos no Brasil mais de 6,6 milhões de toneladas da fruta em uma área de 455 mil hectares (IBGE, 2022).

A fibra de bananeira é um material que vem ganhando destaque e seu campo para estudos cresceu nos últimos anos. Isso explica-se por alguns fatores, como as vantagens associadas ao se aproveitar o caule da bananeira após seu descarte, que são a biodegradabilidade, atoxidade, reciclabilidade, produção de baixo custo e processamento, baixa densidade, bom conjunto de propriedades mecânicas, dentre outros fatores, bem como, a sua composição química demonstra variações consideráveis a depender da espécie vegetal e localização geográfica (UNEP, 2009; ZHU et. al., 2016; TRIPATHI et. al., 2019).

O presente trabalho propõe produzir um material compósito reforçado com fibras naturais onde o seu agente de reforço, será um tecido confeccionado a partir de fibras da bananeira, que propiciam benefícios em aspectos como o reaproveitamento de um resíduo de fonte renovável, reciclável e biodegradável, com relevância no que diz respeito ao meio ambiente.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Analisar mecânica e micro estruturalmente compósitos poliméricos de matriz poliéster termofixa reforçados com tecidos de fibras de bananeira para serem aplicados na engenharia.

1.2.2. Objetivos específicos

- Confeccionar tecido do tipo plano a partir das fibras de bananeira para ser utilizado como fase dispersa na confecção de compósitos poliméricos;
- Confeccionar um compósito com fase dispersa de mantas de fibras de vidro para comparação de propriedades com o compósito com agente de reforço de fibras de bananeira;
- Determinar as propriedades mecânicas dos compósitos fabricados a partir de ensaios de tração e flexão;
- Analisar o comportamento dos compósitos submetidos aos ensaios de flamabilidade;
- Analisar a morfologia e as características dos mecanismos de fraturas nos compósitos ensaiados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. IMPORTÂNCIA E EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS

A relação entre o desenvolvimento e uso dos materiais nas mais variadas áreas deve ser considerada como uma das principais contribuições da transformação dos materiais de forma isolada em outros, que podem ocorrer a partir de variados fatores como, por exemplo, as questões sociais, econômicas e/ou ambientais, e evoluções tecnológicas. (AGOPYAN e JOHN, 2014)

O ser humano faz uso de materiais desde a pré-história, ao desenvolver e utilizar ferramentas e armas necessários à sobrevivência, ao moldá-los e adaptá-los às suas necessidades cotidianas. Nos primórdios da construção civil, os primeiros materiais de construção eram coletados no meio ambiente e utilizados em seu estado natural, como a mistura de capim seco à argila para produção de edificações mais eficientes, bem como, a utilização de pedras, galhos, fibras vegetais, pele de animais etc. (NEGRÃO, 2018; RÉGO et al, 2022)

Para Gusmão (2020), o desenvolvimento de materiais ao longo da história é decisivo no progresso das civilizações uma vez que marcam variados períodos pré-históricos como a idade da pedra e a idade dos metais. Isso evidencia que mesmo em tempos remotos, o homem realizava combinação das matérias-primas disponíveis de modo a obter novos materiais que supriam melhor às necessidades da época.

Ainda de acordo com Gusmão (2020) e Ventura (2009), o avanço tecnológico provoca mudanças nos requisitos exigidos dos materiais, sendo necessário o surgimento de novos compostos capazes de atendê-los. Assim, dentre estes materiais, os compósitos, são a classe em que tem crescente potencial já que estabelece a possibilidade de associar materiais de outros tipos.

Conforme Lima (2009), a evolução da humanidade sempre esteve associada ao uso de materiais para atingir níveis de desenvolvimento maiores e complexos, desde o aperfeiçoamento de técnicas de lascas e polimentos que resultaram em melhores condições no cotidiano, bem como a utilização da combinação entre madeira e palha para a construção, além do uso da mistura do barro e da palha para confeccionar blocos, talvez o primeiro material compósito (o adobe), com a finalidade de reforçar muros e paredes de suas construções.

Os materiais compósitos possuem grande relevância quando se fala em materiais de importância para a engenharia, uma vez que podem ser selecionados

por projetistas para que atendam os parâmetros desejados para uma determinada finalidade (LIMA, 2009).

2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS

Negrão (2018) define os materiais compósitos como heterogêneos e multifásicos, que resultam da combinação de dois ou mais componentes insolúveis entre si, que diferem em suas propriedades físicas e mecânicas, em que cada um dos componentes possui a função principal de resistência ao esforço – agente de reforço, e o outro atua como meio de transferência das cargas de esforço – matriz.

Para Askeland e Phulé (2012) esta classe de materiais possui a função de obter uma combinação de propriedades específicas superiores como, por exemplo, térmicas, acústicas e mecânicas, a de seus componentes quando utilizados isoladamente, para formar um novo material.

Os materiais compósitos são obtidos a partir de uma mistura macroscópica de seus constituintes, com identidade química e fases distintas, e que se mantem distintas após o processamento e são separadas por uma interface mais ou menos definida, com a finalidade de obter propriedades específicas e características desejadas. (MENEZES, 2018)

A norma ASTM D3878 (2007) descreve materiais compósitos como aqueles formados pela combinação de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, em que a combinação desses materiais origina um material útil para a engenharia, o qual possui propriedades diferentes das encontradas nos constituintes separadamente. A denominação destes materiais é diversificada, podendo ser tratados na literatura como compósitos, compostos ou conjugados (NEGRÃO et al., 2020).

As propriedades mecânicas dos materiais compósitos dependem principalmente da interface entre o agente de reforço e a matriz, com ressaltos para as proporções entre os materiais, a geometria do agente de reforço que podem ser: partículas, fibras e lâminas, bem como sua orientação (CALLISTER JR, 2007).

De acordo com Venkateshwaran e Elayaperumal e (2013), em geral, os agentes de reforço são os principais elementos quando se trata do transporte de cargas, enquanto a matriz os mantém na localização e direção desejada, os protegendo de danos ambientais. A boa adesão entre o agente de reforço e a matriz

em um compósito é um requisito fundamental para o aumento da resistência do material.

Em materiais compósitos há um esquema da classificação do agente de reforço baseado em sua geometria e orientação, conforme a Figura 1.

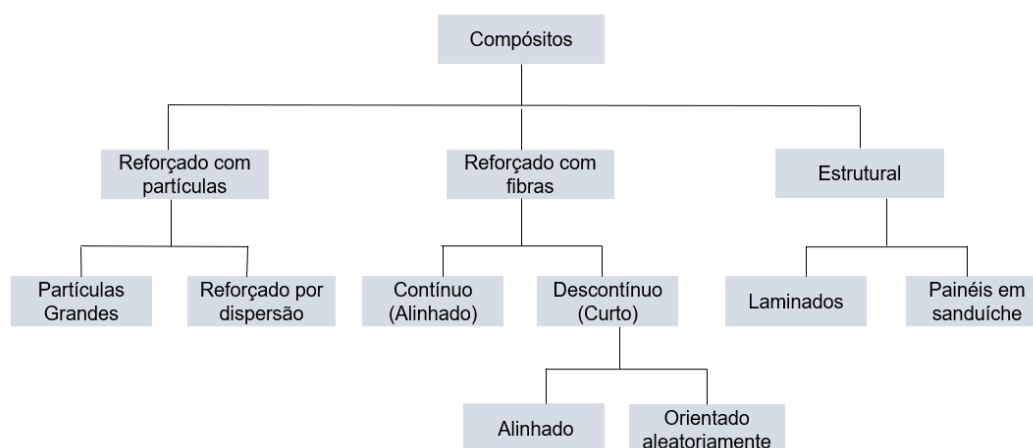


Figura 1. Classificação dos materiais compósitos conforme a orientação do agente de reforço.

Fonte: Callister Jr. (2007), adaptado.

Para Fernandes (2008), um dos parâmetros a ser utilizado para a classificação dos materiais compósitos é o seu tipo de matriz, sejam de origem metálica, cerâmica ou polimérica, conforme demonstrado na Figura 2. É possível encontrar alguns exemplos de pesquisas em áreas como a engenharia ou mesmo a arquitetura de compósitos metálicos, cerâmicos e poliméricos, sendo estas descritas como ligas metálicas, concreto e algumas chapas derivadas da madeira.

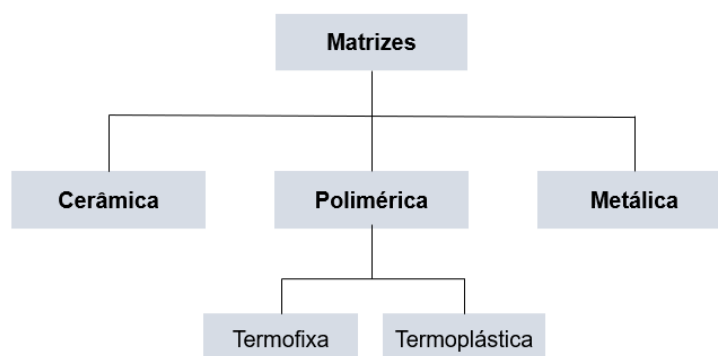


Figura 2. Esquema de classificação dos materiais compósitos conforme sua matriz.

Fonte: Negrão (2018)

Para Negrão (2018), com relação à matriz dos materiais compósitos, tem-se destaque para os materiais poliméricos, uma vez que, são os compostos mais utilizados, devido a características como leveza e facilidade de moldagem. Com relação ao peso, estes materiais apresentam propriedades mecânicas específicas que podem exceder a dos metais, em alguns casos, de acordo com os estudos de Bhagawan et. al (2011). Portanto, na atualidade, as matrizes poliméricas apresentam grande relevância para variadas aplicações na indústria, com destaque para o uso de resinas termofixas no desenvolvimento destes materiais.

2.3. OS POLÍMEROS COMO MATRIZES EM COMPÓSITOS

Os polímeros são substâncias viscosas ou sólidas que podem ser classificadas como sintéticas ou naturais. Os polímeros naturais são extraídos de plantas como, por exemplo, o látex. Já os polímeros de origens sintéticas são produzidas em laboratório, derivadas de matérias-primas como o petróleo e espécies vegetais (NEGRÃO, 2018).

Os polímeros são classificados em termoplástico e termofixo, tendo como principal diferença entre estas a temperatura. Os polímeros termoplásticos possuem uma estrutura em que tende a fundir repetidamente quando submetida a variações de aumento de temperatura e torna-se rígida quando resfriada (SHACKERLFORD, 2014).

Em relação aos polímeros termofixos, os autores, Negrão et al. (2020) apud Mano (1991), descrevem que são materiais que curam em um estágio irreversível, ou seja, permanecem na mesma condição quando submetidas a variações de aumento de temperatura, em razão de que uma vez processadas não é possível fundir ou moldar, caso haja ações relativas à temperatura.

Estes materiais são substâncias orgânicas de baixo peso molecular que, sendo submetidos a condições propícias e complementadas com aditivos específicos, passam por reações que dão origem a polímeros caracterizados por sua estrutura com alta densidade de ligações cruzadas. O conjunto dessas reações perfaz o processo de cura. As ligações cruzadas são responsáveis pela alta rigidez e estabilidade desses materiais à ação de solventes e à elevada temperatura, tornando-os insolúveis e infusíveis, comportamento que lhes confere a denominação termofixo. Assim, sem que passem por um estado plástico, o aquecimento acima de um

determinado nível de temperatura leva ao início do processo de degradação (BITENCOURT et al., 2013).

Conforme Silva (2009), os polímeros termofixos, também descritos na literatura como resinas termofixas utilizadas para a confecção e desenvolvimento de compósitos têm-se exemplos como: poliéster insaturadas, éter-vinilica, époxis, uréicas, fenólicas e poliuretanos. Muitos estudos pontuam o desenvolvimento de painéis derivados de madeira produzidos com resinas uréicas e fenólica, definidas de acordo com a aplicação e a resistência do produto final, sendo estas as primeiras resinas inseridas em escala industrial, durante a década de 1930.

O desenvolvimento de novas resinas, como o composto resorcinol-formaldeído, com finalidade ao desempenho estrutural, ocorreram na segunda guerra mundial. Por seguinte, os adesivos, como os poliuretanos, surgiram devido ao crescimento da química das macromoléculas. Assim a partir dos anos 2000, houve a ampliação do campo de aplicações e uso dos poliuretanos, geralmente, utilizado sob a forma de espumas flexíveis ou rígidas, uso em páineis, assentos e para-choque de automóveis, utensílios esportivos, dentre outros (SILVA, 2003).

2.3.1. Resina Termofixa do tipo Poliéster Insaturado

A matriz de um compósito é considerada a parte que confere estrutura ao material e envolve a fase dispersa, de forma a preencher os vazios existentes entre os reforços e mantê-los na posição relativa. Além disso, são as matrizes que têm como função transferir as solicitações mecânicas às fibras e as protegerem do ambiente externo. O processamento e os defeitos dos compósitos estão fortemente dependentes das características da matriz (SOUZA, 2010; MASUELLI, 2013). As propriedades da matriz polimérica dependem da estrutura da resina e conseqüentemente do tipo de polímero que as constitui.

Dentre as matrizes poliméricas utilizadas, para a produção de compósitos, a matriz de poliéster tem destaque devido às suas propriedades mecânicas desejáveis. Poliésteres insaturados são extremamente versáteis em suas propriedades e aplicações e têm sido um popular termofixo usado como matriz polimérica em compósitos. Os poliésteres são amplamente produzidos industrialmente e possuem muitas vantagens comparadas às outras resinas termofixas, incluindo a capacidade

de cura a temperatura ambiente, boas propriedades mecânicas e, em alguns casos, transparência (AZIZ et al., 2005; COSTA et al., 2015).

As resinas de poliéster podem ser formuladas em propriedades que variam de rígido a quebradiço e de macio a flexível. As suas vantagens são a baixa viscosidade, cura rápida e baixo custo. Entretanto, a principal desvantagem da resina poliéster é a sua alta contração volumétrica. Embora isso permita a liberação mais fácil das peças do molde, a diferença de encolhimento entre a resina e as fibras resulta em depressões na superfície moldada. Estas marcas são indesejáveis para superfícies que exigem alto brilho e boa aparência (MENEZES, 2018). De acordo com o tempo de cura, tempo de gel e propriedades esperadas, as resinas poliésteres podem ser aditivadas com aceleradores que auxiliam no processo de cura, reagindo com o iniciador de peróxido e formando radicais livres (NASSEH, 2007; MOREIRA, 2008).

As resinas do tipo poliésteres insaturados são éteres complexos formados pela reação de um diácol e um anidrido ou ácido dibásico com liberação de uma molécula de água. O poliéster insaturado é produzido quando os reagentes contêm insaturações, e fornecida, geralmente, pelo ácido anidrido maleíco, assim como pelo seus isômeros e ácido fumárico. Esta denominação é proveniente da presença das duas ligações presentes na sua cadeia molecular. Podem ser formados em duas etapas, condensação do ácido e do álcool, para formar uma resina solúvel, e após a adição de um agente de interligação, para formar uma resina termoestável (SILAEX, 2022).

O poliéster insaturado em sua fase solúvel com o monômero de estireno, que possui insaturações, e que são resinas líquidas catalisáveis a temperatura ambiente ou com sutis elevações de temperatura pra torná-los termoestáveis sem a necessidade de sistemas complexos de catalisação. As duplas ligações serão quebradas pela ação de um catalisador para reagirem novamente entre si, dando origem a um polímero de características termoestáveis, (SILAEX, 2022).

Conforme Moreira (2008) e SERCEL (2018), as resinas poliésteres mais usadas são divididas em Ortoftálica – resina mais comum de menor custo para usos básicos não nobres; Isoftálicas – boas características mecânicas, químicas e térmicas, baixo custo; Tereftálicas – possui resistências físicas pouco superiores a ortoftálicas porém baixa resistência a UV; Bisfenólica – melhores características químicas e térmicas que as anteriores.

As resinas isoftálicas podem ser obtidas de poliésteres de alto peso molecular com cadeias mais longas. E devido ao ácido isoftálico não formar anidrido cíclico faz com que as resinas isoftálicas não sofram desvantagem de regeneração como é o caso das resinas ortoftálicas. Portanto, estas cadeias conferem à resina de poliéster isoftálico, maior resistência mecânica visto que absorve melhor os impactos e são mais resistentes à água. Assim, conseqüentemente, tonam-se polímeros de boa resistência química e térmica. A Figura 3, apresenta a estrutura química da resina poliéster isoftálica (SILAEX, 2022).

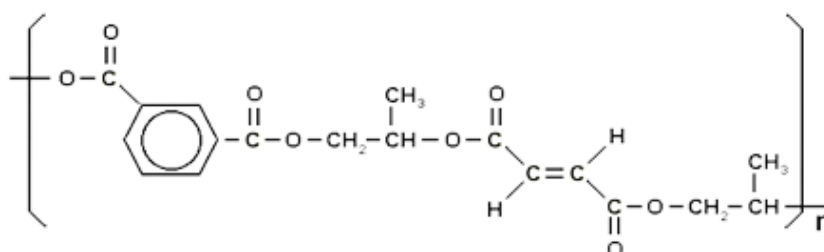


Figura 3. Estrutura química da resina poliéster isoftálica.

Fonte: SILAEX (2022)

2.4. AS FIBRAS COMO AGENTE DE REFORÇO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Mallick (2007) descreve que os materiais compósitos reforçados com fibras apresentam alta resistência e módulo ligado a uma matriz com interfaces distintas entre eles. Desta forma, tanto o reforço quanto a matriz manterão as suas identidades físicas e químicas, porém, continuarão produzindo uma combinação de propriedades que não podem ser alcançadas com um ou outro dos componentes em separado.

Em geral, as fibras são os principais elementos de transporte de carga, enquanto que a matriz circundante as mantém na posição e orientação desejada, atuando como um meio de transferência de carga entre elas, protegendo-as de danos ambientais devido a temperaturas e umidade elevadas (MALLICK, 2007).

Benitez et al. (2013) abordam o uso de fibras como agente de reforço, em especial nos compósitos poliméricos, como material de interesse em estudos e pesquisas, uma vez que possuem características de interesse para a indústria, como o aumento da resistência mecânica e a redução na densidade do produto final, sendo estes alguns dos fatores mais relevantes.

Diversos estudos como os de Santos (2013); Neto e Pardini (2006) evidenciam sobre a forma, disposição geométrica e arranjo das fibras tem influência sobre a resistência mecânica e demais propriedades do material. A literatura pontua que as disposições nos compósitos podem ser: alinhadas ou contínuas, aleatórias ou descontínuas, tecido tramado; e quanto ao comprimento: curtas e longas, conforme demonstrado na Figura 4.

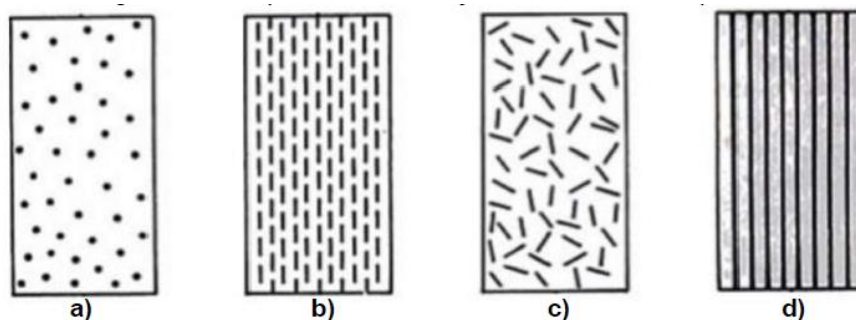


Figura 4. Disposição do agente de reforço em compósitos. a) partículas aleatórias; b) fibras descontínuas unidirecionais; c) fibras descontínuas aleatórias; d) fibras contínuas unidirecionais.

Fonte: Fengel e Wegener (1989).

Para Marinelli et al., (2008), as fibras podem ser classificadas como natural de origem animal, mineral ou vegetal, ou sintética. Em relação às sintéticas, as mais utilizadas são carbono, boro e vidro, porém, devido ao alto custo de fabricação, possuem o uso limitado à produção de compósitos de elevada exigência estrutural (CALLISTER JR., 2007). Outro fator que deve ser apontado é que o uso excessivo destes materiais tem originado sérios problemas ambientais, pois apresentam uma baixa biodegradabilidade, resultante da sua origem fóssil (FENGEL e WEGENER, 1989).

Os estudos de Agopyan e Savastano Jr. (2007) mencionam que o uso de materiais confeccionados a partir do uso de fibras obtêm destaque na construção civil, devido ao seu comportamento mecânico. Uma vez que seu emprego na engenharia e demais áreas, ocorreu de forma generalizada no início do século XX, quando o composto cimento e amianto foi produzido em escala industrial. Entretanto, na década de 1960, os problemas de saúde originados pelo uso das fibras de amianto impulsionaram pesquisas e estudos de materiais e matérias-primas, tais como, fibras de aço, vidro, plástico, boro, carbono e vegetais.

Para os autores, os compósitos poliméricos reforçados por fibras, possuem resistência mecânica superior às suas matrizes. Portanto, para se obter estes materiais com desempenho mecânico elevado, busca-se utilizar o máximo de fibras necessário. E para o caso das fibras vegetais, o custo das fibras é inferior ao da matriz, com isto, o máximo de fibras tende a reduzir o custo do material fabricado (NEGRÃO, 2018).

Falk et. al. (2003) ressalta a densidade associada à sua natureza não abrasiva das fibras vegetais, permite a incorporação de uma maior fração de reforço no material, que o conduz para obter propriedades mecânicas superiores e produtos mais leves.

Uma outra característica relevante às fibras de origem vegetal está em poder resistir a temperaturas de até 200°C, sem que haja perdas significativas de suas propriedades mecânicas. Outro fato a ser pontuado está correlacionado aos vazios existentes em sua estrutura física, que favorecem a absorção de ruídos o que propicia isolamento acústico (ALEXANDRE, 2005). Para Elayaperumal e Venkateshwaran (2012) as fibras vegetais se comparadas às fibras de vidro, por exemplo, são muito eficientes, quando utilizadas como isolantes térmicos e acústicos, isto justifica também sua utilização como agente de reforço em materiais compósitos.

2.4.1. Fibras Sintéticas

Para Kuasne (2008), as fibras sintéticas são aquelas que são produzidas por processos industriais e se classificam em fibras de origem artificial e fibras de origem sintética. As fibras de origem artificial são obtidas utilizando-se como matéria-prima polímeros naturais, como a celulose. O processo de produção dessas fibras consiste basicamente na regeneração desses polímeros em uma solução de celulose com agentes químicos (SILVA, 2012).

Segundo Souza (2010), dentre as fibras artificiais estão as derivadas da celulose como o Lyocel e o Modal, o acetato, o triacetato, o raiom e a viscose. Uma pequena parte das fibras sintéticas é produzida a partir de materiais inorgânicos como o vidro e os metais. A maior parte das fibras é produzida a partir de polímeros sintéticos. Polímeros estes que são sintetizados a partir de monômeros multifuncionais por meio de reações de polimerização (SILVA, 2012).

Conforme a pesquisa de Kuasne (2008), após o advento sobre a estrutura dos polímeros, várias pesquisas foram realizadas no intuito de recriar a estrutura das fibras naturais utilizando polímeros quimicamente tratados, visando o aprimoramento de se obter melhores propriedades, custos mais baixos e tornar a produção independente da sazonalidade das colheitas.

Nas décadas de 1940 e 1950, grandes indústrias cresceram por pesquisar e produzir fibras sintéticas, como exemplo, a DuPont que a partir de 1940 investiu em pesquisa e desenvolvimento de polímeros para engenharia, como o Mylar e o Tedlar, e de fibras sintéticas, como o Nylon e o Kevlar (DUPONT, 2019).

De acordo com Kuasne (2008), as fibras de origem sintética podem ser classificadas de acordo com os materiais que as constituem, sejam de origem orgânicas ou inorgânicas. Os polímeros sintéticos que compõem grande parte das fibras sintéticas são substâncias orgânicas, o que dão origem, portanto, as fibras orgânicas. As demais fibras sintéticas, as quais são obtidas a partir de compostos inorgânicos como os metais, são as fibras inorgânicas (SOUZA, 2019).

A pesquisa de Kuasne (2008), aborda algumas vantagens das fibras sintéticas em relação às fibras naturais, sendo uma destas, com relação a produção, não depender das oscilações dos referentes aos períodos de colheita. O que faz com que o volume da produção possa ser aumentado à vontade e que o valor das fibras possa ser mantido em um patamar constante. Além disso, as fibras sintéticas possuem propriedades que em determinados campos as fazem superar as fibras naturais, como por exemplo, a alta resistência à ruptura, o reduzido poder de absorção de umidade, a estabilidade dimensional durante o tratamento a úmido e a boa processabilidade.

Entretanto, algumas das desvantagens a serem mencionadas sobre estes materiais sintéticos está em sua flamabilidade, uma vez que queimam mais facilmente, não são biodegradáveis e, além disso, durante a produção dessas fibras, mais carga eletrostática são geradas por atrito e há emissões de carbono para a atmosfera (KUASNE, 2008; POLYMER DATABASE, 2019; SOUZA, 2019).

2.4.1.1. Fibras de vidro

O vidro é um material constituído de um dos materiais mais abundantes do planeta, o silício que corresponde a 27,7 % da crosta terrestre e é encontrado na forma

de sílica (SiO_2) que combinado com calcário, carvão, ácido bórico e argila completam as substâncias utilizadas para sua fabricação (MARINUCCI, 2011).

As fibras de vidro são produzidas em um forno refratário onde as matérias primas são fundidas a $1450\text{ }^\circ\text{C}$ e, em seguida, a massa de vidro fundida passa por uma placa de platina (denominada fieira), originando assim filamentos que posteriormente serão resfriados. O processo é finalizado por meio da ensimagem (sizing), que consiste em tratar superficialmente as fibras com emulsões aquosas contendo agentes de acoplamento, lubrificantes, formadores de filme e agentes antiestáticos. Essa etapa proporciona às fibras flexibilidade, compatibilidade com a matriz polimérica (compósito) e proteção para o contato com os equipamentos de fabricação e manuseio (MARINUCCI, 2011).

Os tipos de fibra de vidro são classificados de acordo com sua composição e apresentam diferentes comportamentos, os mais comuns encontrados são dos tipos A, E, C e S. As fibras do tipo A (vidro de sódio ou de garrafa), apresentam boa resistência química, entretanto possuem baixa resistência ao ataque por água e baixa resistividade elétrica. As do tipo C (vidros de sódio-borosilicato) são mais resistentes ao ataque de álcalis e ácidos e possuem ótima inércia química, porém, assim como o vidro A não apresentam boa resistividade elétrica. Fazendo um balanceamento das propriedades, as fibras do tipo E (vidros de cálcio-alumínio-borosilicato) são as mais indicadas para a utilização em compósitos, pois alia boa resistência mecânica (resistência à tração e módulo de elasticidade) a elevada resistividade elétrica. Já as fibras do tipo S (vidro de magnésio-alumínio-borosilicato) são compostas por maior teor de sílica que as torna mais resistentes a elevadas temperaturas e com propriedades mecânicas superiores ao vidro E, sendo indicadas para utilização na indústria aeroespacial e aeronáutica (ADAMIAN, 2008; HARADA e WIEBECK, 2005).

As características principais atribuídas às fibras de vidro são: leveza, resistência à degradação, baixa condutividade térmica, não propaga chamas, possui estabilidade dimensional, compatível com matrizes orgânicas e boa resistência mecânica. Essas propriedades quando aplicadas como reforço somam aos compósitos poliméricos algumas particularidades como: resistência ao calor, à corrosão e à umidade, facilidade de fabricação, transporte e instalação, boas propriedades mecânicas e resistência química às intempéries e baixo custo quando comparado com outros materiais constituídos por aço inoxidável, ligas especiais ou

até mesmo compósitos reforçados com fibras de alto desempenho como carbono ou aramida (BARCELLOS et al., 2009; SOUZA, 2019).

No processo de ensimagem, a fibra pode entrar em contato com polímeros reativos que são polimerizados em maior parte no próprio processo, o que ocorre também com o silano orgânico que está na lista de materiais perigosos, mas é utilizado em concentrações baixíssimas, menos que 0,05% para o vidro E, e é completamente polimerizado neste caso. Entretanto a fibra de vidro é um material não biodegradável e possui propriedades abrasivas que podem danificar equipamentos tanto no processo de fabricação como no de transporte. O contato direto com fragmentos de vidro pode causar irritações nos olhos, nariz, pele e garganta além de agravar doenças respiratórias (KEMERICH et al., 2013).

2.4.2. Fibras de origem vegetal

As fibras de origem vegetal ou lignocelulósicas podem ser extraídas de diferentes regiões da planta, tais como: caule (juta, malva, linho, bambu etc.); folha (abacaxi, sisal, caraurá etc.); fruto ou semente (algodão, mamona, coco, açaí etc.) e do fuste (madeira). Desse modo, diferem consideravelmente umas das outras quanto às suas propriedades químicas, físicas, anatômicas e mecânicas. Muitas destas fibras já são utilizadas em materiais compósitos e apresentam propriedades elevadas quando utilizadas como reforço em resinas poliméricas (RWAWIIRE et. al. 2017).

Estudos como os de Bhagawan et. al. (2011) e Nóbrega (2007) destacam que uma grande parcela de fibras de origem vegetal pode ser aplicada como agente de reforço em compósitos que possuam matriz polimérica. Contudo, pontuam que as fibras pertencentes a região das folhas são as mais utilizadas, uma vez que, geralmente, são mais resistentes do que as fibras de outras regiões. As fibras das folhas são conhecidas como fibras duras enquanto as fibras do caule, por exemplo, são apresentadas como macias.

As fibras vegetais são compostas basicamente por três componentes: celulose, lignina e poliose, este último conhecido também como hemicelulose. Em termos de estrutura, as fibras são constituídas por um conjunto de filamentos individuais, microfibrilas, formadas por fibrilas e unidas por espécies químicas orgânicas não cristalinas: as ligninas e as hemiceluloses. As fibrilas se orientam em ângulos distintos,

unindo-se e formando as diversas camadas que compõem a macrofibra (RONG et. al., 2001; PINTO, 2008; NEGRÃO, 2018).

Em relação a sua microestrutura, a parede celular de fibras individuais é composta basicamente por quatro camadas de microfibrilas: (i) camada primária, mais externa de estrutura reticulada, constituída principalmente de celulose, hemiceluloses e compostos pécticos; (ii) camada secundária (S1), onde as microfibrilas estão orientadas em espiral, segundo um ângulo de aproximadamente 45° com relação ao eixo longitudinal da célula; (iii) camada secundária média (S2), também com as microfibrilas em forma de espiral; e (iv) parede secundária interna (S3), reticulada, conforme Figura 5, (PEREIRA, 2016; NEGRÃO 2018).

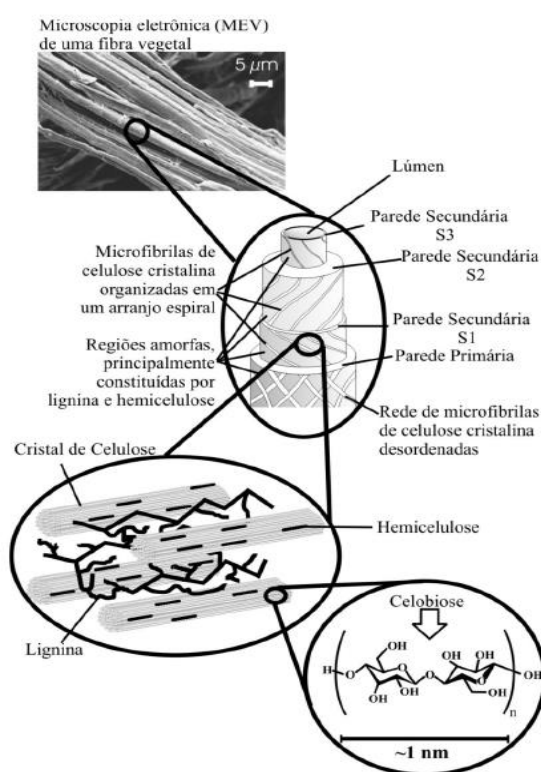


Figura 5. Constituição estrutural de uma fibra vegetal.

Fonte: Silva (2011)

Portanto, afirma-se que a fibra é um compósito no qual as rígidas microfibrilas de celulose estão envolvidas por uma matriz de lignina e hemicelulose (poliose). Sendo assim, a lignina atua como o material de cimentação, ao unir as microfibrilas e a hemicelulose como interface entre ambas (Figura 6). É descrito por Nascimento (2009) que as fibras lignocelulósicas não possuem propriedades uniformes, ou seja, apresentam grandes variações nos valores de suas propriedades correlacionadas a seus constituintes celulose, hemicelulose e lignina.

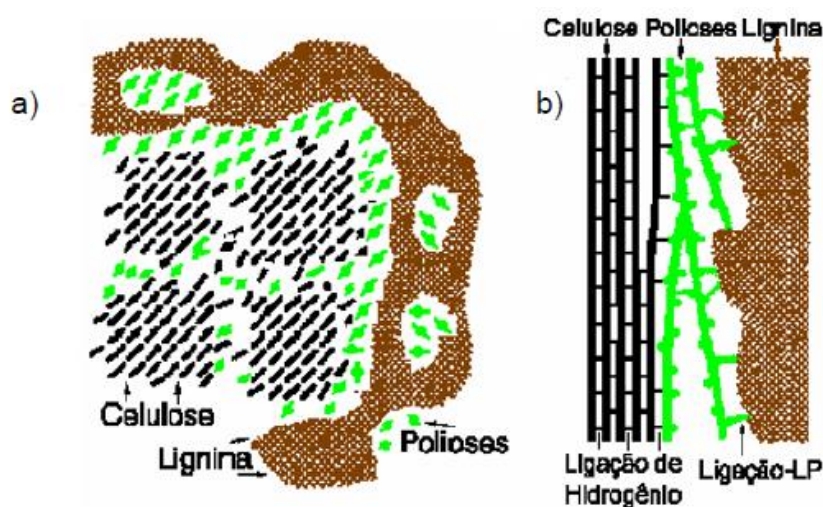


Figura 6. Ilustração da associação dos componentes da parede celular. a) Vista transversal; b) Vista tangencial; L-P: ligações lignina polioses.

Fonte: Negrão (2018) apud Fengel e Wegener (1989).

Para Santos et al. (2012) a composição química das fibras lignocelulósicas consiste principalmente de microfibrilas (células com alto teor de celulose) envolvidas por uma matriz amorfa de hemicelulose e lignina. A função da matriz é proteger a celulose do ataque de microrganismos e enzimas, fazendo com que a estrutura do material seja rígida e pouco reativa.

A celulose é o principal componente estrutural das fibras lignocelulósicas, uma vez que fornece resistência e estabilidade para as paredes celulares e à fibra como um todo. É considerado o componente mais abundante das fibras vegetais, tratando-se de um polímero linear composto por moléculas de glicose eterificadas por ligações β -1,4-glicosídicas. A celobiose, ou unidade repetitiva, contém seis grupos hidroxila presentes em sua estrutura estabelecem ligações de hidrogênio intermolecular e intramolecular. Devido a esse fator, a celulose tende a formar cristais, adquirindo, assim, insolubilidade a alguns solventes orgânicos e a água (ARAÚJO et al., 2008; CARVALHO, 2015).

As hemiceluloses ou polioses são polissacarídeos compostos por pentoses, hexoses e ácidos urônicos polimerizados. A sua estrutura consiste em um considerável grau de ramificação, baixa massa molar, elevada hidrofiliabilidade e ausência de cristalinidade. Essas características acentuam a capacidade de degradação, fazendo com que a sua taxa de decomposição seja superior à da celulose. As estruturas de ramificação da hemicelulose reagem facilmente com a

celulose, proporcionando-a maior estabilidade e maleabilidade. Atuam também como agente de acoplamento entre a lignina e a celulose (SANCHEZ et al., 2010; BARBOSA, 2011; MENEZES, 2018).

A lignina é considerada o segundo componente mais abundante presente nas plantas. É um material amorfo, com alta massa molar e possui comportamento hidrofóbico com estrutura tridimensional, altamente ramificada, podendo ser classificada como um polifenol o qual é constituído por um arranjo irregular de várias unidades de fenilpropano que pode conter grupos hidroxila e metoxila como substituintes no grupo fenil, que atua como um agente enrijecedor no interior da parede celular. A lignina é também responsável pela proteção da célula de microrganismos e pela resistência à compressão suportada pela planta, o que permite o seu crescimento e desenvolvimento (CARVALHO, 2009; SANTOS et al., 2012; MENEZES, 2018; NEGRÃO, 2018).

2.4.2.1. A fibra do pseudocaule da bananeira - *Musa sapientum*, *Musaceae*

A bananeira é uma planta herbácea com origem do continente asiático e pertence à família botânica *Musaceae*, com uma variedade de tipos, como a prata, maçã, nanica entre outras. A planta necessita, em média, de um pouco mais de 270 dias ou nove meses para frutificar e é propagada vegetativamente por meio de mudas produzidas pela própria planta. Normalmente, estas plantas, cultivadas em regiões tropicais, são muito resistentes, possuem altura que pode variar entre dois e seis metros, são constituídas por fortes e longas folhas sobrepostas umas às outras, que formam o pseudocaule (IDAM, 2020; EMBRAPA, 2021).

A pesquisa de El Banna (2017) descreve a bananeira como uma planta herbácea que apresenta raiz, caule, folhas, flores, frutos e sementes, conforme Figura 7. O caule é representado pelo rizoma e o conjunto de bainhas de folhas de pseudocaule. O pseudocaule termina com uma copa de folhas longas e largas com nervura central bem definida. O pseudocaule apresenta uma coloração externa verde, no entanto esta coloração pode variar a depender do genótipo e de sua origem.

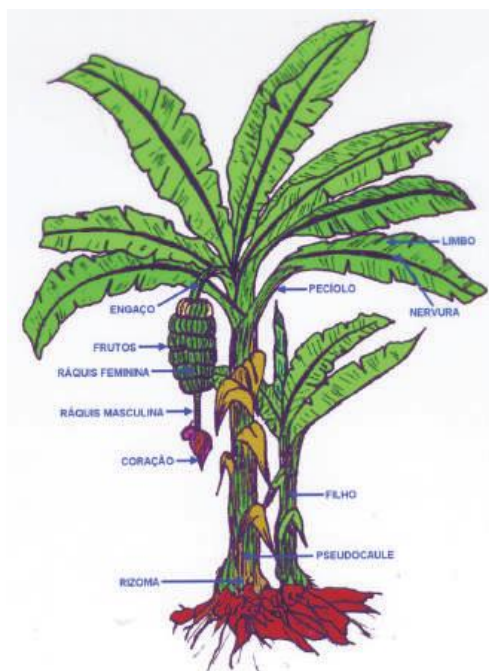


Figura 7. Estrutura da bananeira.

Fonte: Embrapa (2021).

A bananeira pode ser plantada em sistemas de fileiras simples. Seu fruto é utilizado para consumo *in natura* e na indústria para a produção de doces em caldas e dentre outros componentes alimentícios. Em países, como Filipinas, é realizada a extração das fibras do pseudocaule de bananeiras, da espécie abacá, para a fabricação de tecidos biodegradáveis, macios, flexíveis e resistentes à água, Figura 8, (SEBRAE, 2021; QWSTION, 2008).



Figura 8. Fibras para a confecção de tecido.

Fonte: QWSTION, 2008.

Na França, as fibras de bananeira são matérias-primas utilizadas para o desenvolvimento de revestimentos arquitetônicos, como os pisos laminados, painéis acústicos etc. (Figura 9). A escolha deste material justifica-se pela alta renovabilidade e promoção do equilíbrio ambiental (SEBRAE, 2021; FiBandCO, 2022).



Figura 9. Painéis acústicos Green Blade.

Fonte: FiBandCo (2022)

De acordo com Razera (2006), as fibras de bananeira são extraídas, normalmente, do pseudocaule da planta, ou seja, das bainhas foleares que formam o tronco da planta, após secagem, são de coloração bege claro e maleável, devido principalmente ao seu alto teor de polissacarídeos. Alguns autores consideram que estas fibras têm propriedades mecânicas comparáveis às fibras de sisal e de vidro quando utilizadas como reforços em compósitos, com relação as propriedades mecânicas de resistência a flexão e impacto.

Para Razera (2006), em países de clima predominante tropical, como o Brasil, plantas fibrosas são matérias-primas abundantes, algumas por serem subprodutos de descarte após o ciclo de coleta da fruticultura. No Brasil, há algumas iniciativas do uso desta fibra, como na polpação para papel, motivado pelo alto teor de celulose, bem como, o uso da matéria-prima para artesanato como, por exemplo, bolsas, cestos, enfeites e tapetes.

Balzer et. al. (2007) pontua que após a oferta do fruto, o pseudocaule da bananeira pode proliferar fungos de complicado controle de tratamento, devido à alta umidade incidente presente nas plantações. Portanto, a extração do pseudocaule das bananeiras torna-se uma alternativa de renda conveniente à mão-de-obra rural, além de poder ser uma opção viável para confecção de artesanatos e reforço para materiais a partir de resinas termoplásticas.

Cordioli (2008), em sua pesquisa, descreve que para diminuir os efeitos da sazonalidade da produção, a extração da fibra do pseudocaule surgiu como uma alternativa de emprego e renda complementar para os agricultores. A fibra de bananeira tem texturas diferentes (capa, seda, renda, fio) e possui diversas aplicações, além do uso em artesanatos.

A fibra de bananeira pode ser extraída manualmente ou mecanicamente. O processo manual consiste em corte da área de interesse, separação das bainhas foleares e retirada dos compostos vegetais com auxílio de espátulas, facas ou cerâmica. O processo mecânico é realizado por meio de equipamentos extratores mecanizados, chamados de desfibradores (EL BANNA, 2017).

Plantas do tipo *Musa Sapientum*, *Musaceae* apresentam em média cerca de quinze bainhas foleares e, conforme a pesquisa de El Banna (2017), são nomeadas de acordo a sua disposição com relação ao centro (Figura 10).

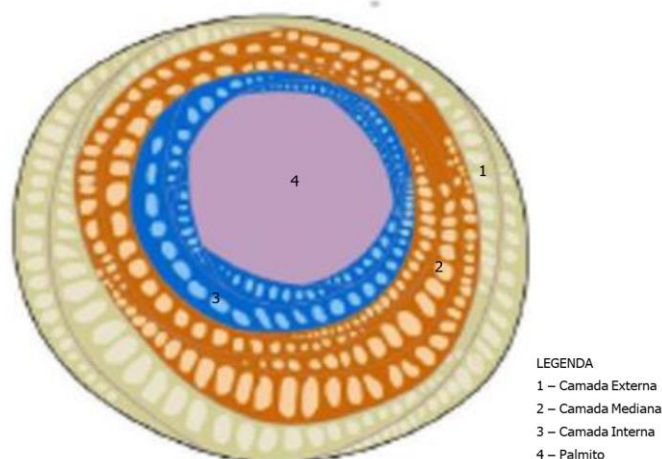


Figura 10. Bainha foliar de plantas do tipo *Musa Sapientum Musaceae*.

Fonte: El Banna (2017).

Quanto a planta, a fibra do pseudocaule da bananeira demonstraram resultados com ótimas propriedades mecânicas. De acordo com Correia (2011), as propriedades da fibra variam conforme o aspecto dimensional, comprimento e espessura e/ou diâmetro, idade e tipo das folhas. Para se obter fibras de qualidade, a origem e cultivo são fatores que devem ser observados quando se objetiva pseudocaules extraídos de terrenos secos e plantas saudáveis. Outro fator de influência para uma fibra de qualidade é a colheita, que deve ser feita, preferencialmente, em clima seco e período mais quente do dia para que a evaporação da umidade ocorra com maior facilidade (MERLINI, 2011). Algumas características físicas e propriedades mecânicas da fibra de bananeira *in natura* são mostradas na Quadro 1.

Quadro 1. Características e propriedades da fibra de bananeira.

Fibras do pseudocaule	Camada externa	Camada Mediana	Camada interna
Diâmetro (μm)	117 \pm 0,1	100 \pm 0,5	75 \pm 0,9
Massa Específica (g/cm^3)	1,58 \pm 0,21	1,58 \pm 0,16	1,57 \pm 0,06
Resistência a Tração (MPa)	516,36 \pm 39,83	789,87 \pm 116,56	1381,82 \pm 99,59
Deformação (%)	7,77 \pm 2,55	8,68 \pm 1,39	9,82 \pm 2,29
Teor de umidade (%)	14,0 \pm 0,5	14,0 \pm 0,3	14,0 \pm 0,2

Fonte: Adaptado de El Banna (2017)

2.5. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE FIBRAS VEGETAIS

O uso e desenvolvimento de materiais de matriz polimérica e reforçado com fibras vegetais não é recente, o interesse em materiais mais ecológicos e sustentáveis nos processos industriais fez ressurgir pesquisas voltadas para as fontes renováveis, tais como as fibras vegetais. Ressalta-se, o crescimento acentuado da utilização de fibras naturais, grande parcela de origem vegetal, inclusive em aplicações estruturais de pequeno e médio desempenho, principalmente na indústria automotiva (MENEZES, 2018).

Para Negrão (2018), os materiais desenvolvidos nas últimas décadas dão destaque para aqueles em que se utilizam as fibras vegetais como agente de reforço. Assim, as pesquisas sobre compósitos poliméricos reforçados por fibras naturais investigam suas propriedades mecânicas em função da fração volumétrica da matéria-prima, bem como sua disposição e comprimento.

Pesquisas, como as de Sanchez et. al. (2010) e Gehlen (2014), têm sido desenvolvidas com o uso de resina do poliéster insaturada como matriz em compósitos reforçados com fibras vegetais. Gehlen (2014) investigou a absorção de água em compósitos e constatou que a resina pura apresentava o valor de $0,23 \pm 0,02\%$, mais baixo do que o encontrado por Sanchez et al. (2010) no valor de $0,46 \pm 0,01\%$, o qual relata que a absorção de água pela resina é praticamente nula devido ao seu caráter hidrofóbico.

Com relação as principais características verificadas para o desenvolvimento de compósitos com fibras vegetais, como a determinação das propriedades e dos ensaios físicos e mecânicos, temos: resistência à tração, módulo de elasticidade específico, estabilidade térmica, alta rigidez, baixa ou alta transferência de calor, condutividade (ou não) elétrica, resistência à corrosão, facilidade de forma na fabricação, reduzida manutenção, além de serem biodegradáveis (AQUINO, 2016).

A indústria automotiva foi responsável pelo desenvolvimento de acessórios utilizando fibras naturais (Figura 11). Além de aspectos ecológicos, como a sustentabilidade, há os aspectos tecnológicos e econômicos presentes no uso destes materiais, assim como a questão social, que é um forte argumento para o incentivo da produção destes compósitos, uma vez que estes são geralmente oriundos de regiões economicamente pobres (PANTHAPULAKKAL et al., 2005).

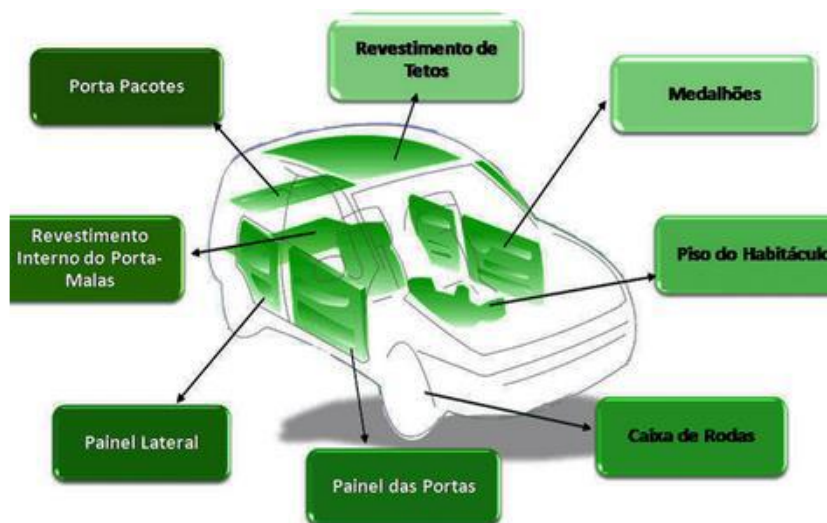


Figura 11. Acessórios interiores veicular que utilizam fibras vegetais.

Fonte: Kunst (2012)

2.5.1. Compósitos com reforço de fibras de bananeira

Na literatura são encontrados trabalhos sobre a utilização da fibra de bananeira para fabricação de compósitos utilizando variados tipos de matrizes. Estes trabalhos buscaram verificar propriedades como: estabilidade térmica, modificação superficial, durabilidade, orientação das fibras, comportamento de desgaste de componentes automotivos, propriedades mecânicas, propriedades elásticas, relação entre absorção de água e comportamento dielétrico, entalhes e critérios de resistência a fratura, caracterização de danos ao impacto, comportamento térmico entre outros, do compósito obtido, ao utilizar a fibra *in natura* ou com tratamentos químicos (FARUK e et. al., 2012; BARROS, 2014).

O desenvolvimento de um compósito biodegradável a partir das fibras de bananeira e um látex natural obtido de plantas do gênero *Euphorbia*, utilizaram as fibras da bananeira com tratamento alcalino e *in natura*, e tendo sido testadas diferentes composições de proporção de fibras e matriz. Foi observado um aumento da absorção de água com o aumento na proporção de fibras. As propriedades físico-mecânicas como também a interface fibra-matriz foram melhores nos compósitos com as fibras que sofreram tratamento alcalino. Também foi comprovada a biodegradação do material (SILVA, 2003).

Existem variadas pesquisas onde verifica-se o desenvolvimento de materiais que utilizam matrizes de fontes não renováveis ou sintéticas. Alguns trabalhos como o de Paul et al. (2008) investigaram a condutividade térmica, difusão térmica e calor

específico em compósitos com polipropileno. Foram usadas diferentes proporções de fibras com diferentes tratamentos químicos. Os tratamentos melhoraram as propriedades termofísicas dos compósitos avaliados e a incorporação das fibras diminuiu a condutividade térmica do polipropileno.

Sapuan et al. (2008) desenvolveram um material compósito com matriz de resina epóxi e utilizaram fibras do pseudocaule de bananeira como agente de reforço no projeto e fabricação de uma mesa multiuso. Os autores mencionam que as propriedades mecânicas, resistência e valor estético do produto comprovam a utilização das fibras de bananeira como material alternativo aos convencionais.

Venkateshwaran et al. (2011) analisaram as propriedades mecânicas e absorção de água em compósitos com resina epóxi e diferentes comprimentos e proporções em peso das fibras nos compósitos. Os resultados mostraram que fibras com comprimento de 15 mm e proporção de 16% mostraram melhores resultados. Em termos de absorção de água, para todos os parâmetros utilizados foram obtidos resultados de 5% em média. O aumento da proporção acima de 16% comprometeu a interface fibra-matriz.

Merlini et al. (2011) avaliaram as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos utilizando poliuretano derivado do óleo de mamona como matriz. Foram usadas diferentes frações de mistura das fibras e de matriz, com diferentes comprimentos de fibras com e sem tratamento químico. Os resultados mostraram que as fibras tratadas apresentaram melhores propriedades mecânicas e que o volume e tamanho das fibras também influenciam nas propriedades.

Venkateshwaran et al. (2013) avaliaram as propriedades mecânicas de um compósito com fibras tratadas e resina epóxi. Os resultados mostraram uma melhoria de aproximadamente 50% das propriedades em relação a fibras não tratadas, porém maiores concentrações da solução do tratamento alcalino causaram danos à superfície das fibras.

Paul et al. (2015) desenvolveram e caracterizaram um biocompósito utilizando na matriz seiva da bananeira. Foi utilizado para comparação um compósito com outra matriz similar, sem a seiva. Os testes mecânicos mostraram 12% de aumento no módulo de tração, 15% de aumento na resistência a tração e 25% de aumento no módulo de flexão, comparado ao compósito sem a seiva de bananeira. Nos testes também foi observado a tendência a biodegradação.

Souza et al. (2017) propuseram a substituição de fibras de vidro por fibras de bananeira em um compósito com resina poliéster. A proposta para este material foi de utilização em elementos estruturais não submetidos a grandes esforços mecânicos como tanques, calhas e tubulações de esgoto. Foram analisadas as propriedades térmicas e a densidade do material obtido. Os autores afirmaram que o material é uma opção viável para o uso proposto, necessitando de um aperfeiçoamento no processo de obtenção das fibras e fabricação do material.

2.6. TECIDOS

O termo têxtil engloba uma vasta gama de materiais susceptíveis de serem transformados em fios e posteriormente convertidos em tecidos. As fibras têxteis, sejam de origem natural ou química, formam os elementos básicos para o desenvolvimento dos tecidos. Os tecidos são materiais flexíveis confeccionados pela indústria têxtil ou por meios artesanais que consistem em redes de fios, os quais são produzidos através da fiação das fibras têxteis. Os tecidos têxteis são utilizados em variadas áreas como a construção civil, arquitetura, saúde, agricultura, aeronáutica e aeroespacial, entre outros (ARAÚJO, 2008; KUASNE, 2008; MENEZES, 2018; SOUZA, 2019).

Levy Neto e Pardini (2006) descrevem que os primeiros processos para a confecção de tecidos têxteis, provavelmente, foram realizados através do entrelaçamento de juncos e bambu. Por terem relativa rigidez foi necessário o desenvolvimento de um método para evitar os torcimentos e emaranhados. Isso só foi possível com a invenção dos teares.

Os tecidos têxteis são compostos pelos fios de urdume e fios de trama. Os fios de urdume são os fios que são esticados longitudinalmente em um tear durante a tecelagem, enquanto os fios da trama estão dispostos transversalmente a estes. Assim, o urdume dá o comprimento, enquanto a trama dá a forma e as características do tecido (SILVA et. al., 2009; SOUZA, 2019). Levy Neto e Pardini (2006) citam que há basicamente três tipos de padrões de configurações que dão origem aos tipos de tecidos, sendo: tecido tipo plano, tipo cetim e tipo diagonal.

2.6.1. Tecido plano

De acordo com Pereira (2008), o tecido plano é formado basicamente por fios de ourela (fios que formam bordas do tecido) e fios de fundo, que formam o tecido e que se situam entre as ourelas. De acordo com Marques (2016), os fios de fundo são formados pelo entrelaçamento dos fios de urdume e de trama, que se cruzam em ângulo reto. A Figura 12 representa a estrutura de um tecido plano.

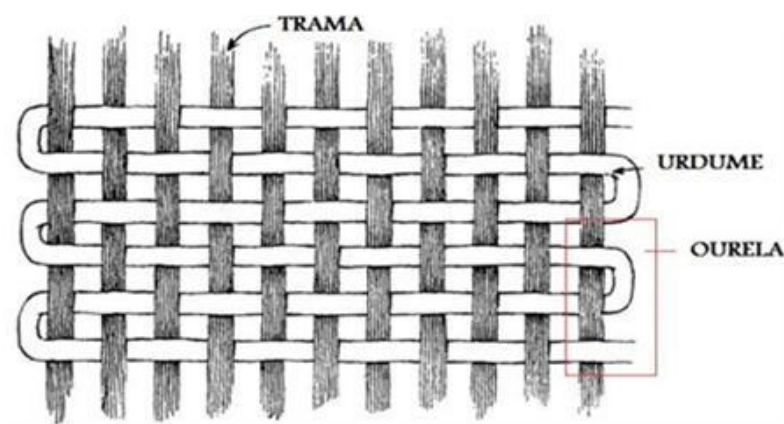


Figura 12. Ilustração do tecido plano.

Fonte: Pereira (2008).

O entrelaçamento é formado quando os fios de trama se entrelaçam um acima e um abaixo dos fios do urdume e assim sucessivamente, sendo que na próxima coluna o que estava em cima passa a ser abaixo e o que estava abaixo passa por cima e assim sucessivamente até o final do tecido (SILVA et al., 2009).

2.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS COMPÓSITOS FABRICADOS COM FIBRAS

Os compósitos para utilização em estruturas de média e alta resistência geralmente são fabricados com fibras sintéticas ou naturais como agente de reforço. Suas fibras podem ser contínuas ou descontínuas, possuir configuração alinhada ou aleatória. Podem ser moldados com grande variedade de formas como mantas, tecidos ou pré-formas têxteis (MENEZES, 2018).

Desse modo, as propriedades mecânicas do compósito podem ser apontadas entre as propriedades da matriz, da fibra e das interfaces fibra/matriz e estão diretamente ligadas à sua avaliação de desempenho segundo os seguintes parâmetros (CALLISTER JR., 2007):

- Característica dos materiais componentes fibra e matriz;
- Geometria das fibras, seção transversal e comprimento;
- Arranjo das fibras;
- Proporção entre materiais ou fração volumétricas dos componentes.
- Características das interfaces dos materiais.

O desempenho dos materiais é sempre apresentado em termos das suas características mecânicas, tais como propriedades de: tração, flexão, rigidez, impacto e comportamento de desgaste. Essas características são importantes para determinar o comportamento do material em condições extremas e críticas, que estão diretamente relacionados com o desempenho de engenharia (MENEZES, 2018).

Para Kalia et. al. (2009), a maioria dos estudos sobre compósitos de fibras naturais implicará no estudo de propriedades mecânicas como uma função do teor de fibras e uso de agentes de acoplamento externo para sistemas de duas fases e comparação com dados experimentais. Ainda conforme Kalia et. al. (2009), as propriedades da matriz e das fibras são importantes na melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos.

A relação de aspecto é muito importante para a determinação das propriedades de fratura. Em materiais compósitos cuja fase dispersa são fibras curtas evidencia-se a existência do comprimento crítico da fibra que delimita as condições necessárias para sua impregnação completa na matriz polimérica. Conforme Callister Jr (2007), fibras de comprimentos mais curtos do que este comprimento crítico leva a fraturas devido à descolagem na interface com carga inferior. Por outro lado, para as fibras com comprimentos maior que o comprimento crítico, resulta numa maior resistência do compósito.

Para Menezes (2018), dentre as propriedades mecânicas de maior interesse no estudo de materiais compósitos a serem analisados estão a resistência a tração e a resistência a flexão. A análise micromecânica tradicional é baseada na combinação das propriedades individuais da fibra e da matriz que tem mecânica particular bem entendida com seus respectivos teores volumétricos para estimar a propriedade do compósito (MENDONÇA, 2003).

A resistência mecânica da fibra é um fator importante para sua seleção, uma vez que o estudo de suas características determinará a sua aplicabilidade. O ensaio

de tração tem como finalidade quantificar estas propriedades em compósitos reforçados por fibras naturais. As tensões neste ensaio são uniformes ao longo da seção da amostra. A resistência à tração é mais sensível as propriedades da matriz, uma vez que o módulo é dependente das propriedades do reforço (fibras). Para melhorar a resistência as solicitações de tração, é necessário que o material possua características como, por exemplo, uma interface forte, orientação e concentração das fibras, molhabilidade na fase de fibra matriz, e relação de aspecto de fibra determina o alto módulo de elasticidade (MENDONÇA, 2003; CALLISTER JR., 2007; MENEZES, 2018).

As propriedades mecânicas de flexão de um material é uma função baseada em duas propriedades essenciais: o módulo de elasticidade do material que o compõe; e seu momento de inércia, em função da geometria da seção transversal. A literatura descreve a rigidez de flexão como um critério para medir a deformabilidade de um material submetido a suas tensões. Assim, um ensaio de flexão é fortemente influenciado pelas propriedades do espécime mais próximos da parte superior e inferior a superfícies. (SABEEL AHMED et. al., 2007; MENEZES, 2018).

Estudos de Rezende et. al. (2011) e Menezes (2018), descrevem a importância dos elementos de reforço e a matriz, ao ressaltar a interação fibra/matriz de um material compósito. É imprescindível uma boa adesão reforço-matriz para que ocorra a transferência de esforço no material. A boa transferência de tensões tem influência na rigidez, tenacidade e comportamento de falha do compósito, principalmente em determinadas condições ambientais, como temperatura e umidade.

2.8. FRATURA EM MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Holanda (2013) destaca que as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras estão diretamente relacionadas com o tipo, quantidade e direção do reforço, sendo que, o comportamento da fibra exerce uma função bastante relevante com relação as propriedades do material, no qual, a maior parcela de carga será suportada pela fibra, aumentando assim a resistência mecânica do material, principalmente se as fibras estiverem na direção de aplicação do esforço.

A utilização de filamentos de comportamento contínuo é a maneira mais eficaz de se promover adequadamente o empacotamento das fibras empregadas como reforço em compósitos. Supondo que as fibras de seção cruzada circular, ou seja,

fibras que se tocam uma as outras estejam empacotadas formando um hexágono regular fechado ideal à fração volumétrica de fibras, Figura 13, (HOLANDA, 2013).

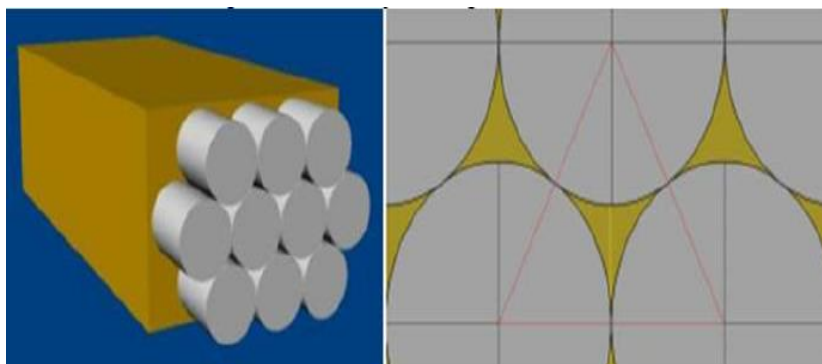


Figura 13. Arranjo hexagonal do reforço fibroso.

Fonte: Holanda (2013)

A análise dos mecanismos de falhas consiste em um dos métodos para a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais compósitos. Usualmente, a fratura não ocorre de forma catastrófica, tende a ser de maneira progressiva, com falhas subcríticas dispersas ao longo do material, constituindo-se assim em uma vantagem (PEREIRA, 2016).

Holanda (2013) afirma que a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais compósitos não é simples e correlaciona os mecanismos de falha local que podem ocorrer durante a fratura de um material compósito com fibras. A Figura 14 demonstra vários mecanismos de falhas que podem ocorrer em compósitos.

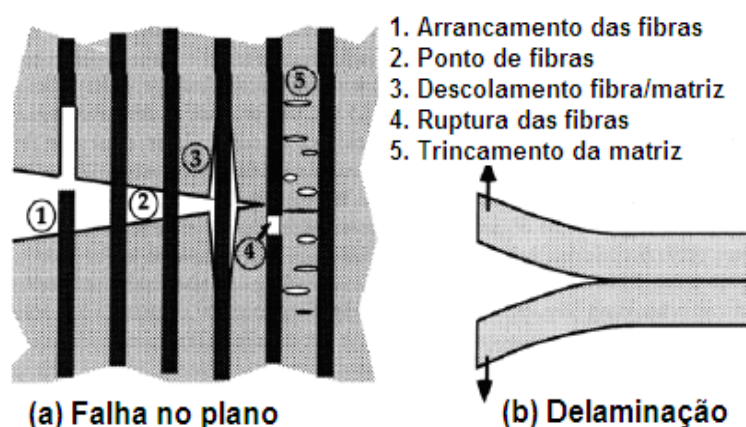


Figura 14. Fratura em materiais compósitos reforçados por fibras.

Fonte: Pereira (2016)

Pereira (2016) descreve que a ruptura em materiais compósitos pode ser dividida em ruptura intralaminar, que pode ocorrer em função do desprendimento da

fibra (*pullout*) (1), ponte de fibras em que as superfícies de uma trinca são interligadas por fibras; (2), deslocamento interfacial fibra/matriz (3), ruptura das fibras (4) e ruptura da matriz (5); e ruptura interlaminar ou delaminação, que consiste em um deslocamento entre duas camadas contínuas, normalmente ocorre entre camadas com diferentes orientações, sendo muito comum nos materiais de fibras contínuas. Segundo Harmia (1996), quando as fibras estão orientadas paralelamente à direção de propagação da trinca, observam-se o descolamento das fibras, e quando elas estão orientadas perpendicularmente, deslizamento e fratura das fibras são observados.

Verifica-se que a condição interfacial é o fator importante e governa o comportamento tensão-deformação dos compósitos. A interface fibra/matriz é a principal responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço e suas propriedades são específicas para cada sistema fibra/matriz. Existem métodos experimentais para determinar a resistência interfacial, como os ensaios de *pullout* (HARMIA, 1996).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Matriz Polimérica

Para a produção da matriz, utilizada nesta pesquisa, foi utilizado o adesivo para laminação descrito pela fabricante Maxi Rubber Indústrias Químicas Ltda. como resina poliéster insaturada do tipo isoftálica de média reatividade, baixa viscosidade, cor âmbar e pré-acelerada. Catalisador Peróxido de Metil Etil Cetona de MEK da empresa Maxi Rubber. O Quadro 2 apresenta as especificações da resina.

Quadro 2. Propriedades físico-químicas da resina.

Aspecto (estado físico, forma cor)	Líquido âmbar	–
Odor	Característico de monômero de estireno	–
Viscosidade Brookfield	600	cP
Densidade	1,10	g/cm ³
Tempo de gel 21 a 30°C	5-15	Min.
Ponto de fulgor (vaso fechado – monômero de estireno)	31	°C
Ponto de ebulição	Não disponível	–
Temperatura de decomposição	Não disponível	–
Tempo de secagem ao ar a 25°C	20 a 30	min.
Tempo de cura total	72	horas

Fonte: Adaptado de FISPQ Maxi Rubber (2018)

3.1.2. Mantas de fibra de vidro

As mantas de vidro utilizadas como fase dispersa foram adquiridas no comércio local do município de Tucuruí – PA. Conforme especificação do fabricante, são do tipo E, e são compostas por fibras curtas, dispostas de forma aleatória em várias camadas ao longo do tecido, Figura 15.



Figura 15. Manta de fibra de vidro.

Fonte: Arquivo pessoal.

Para a preparação das mantas de fibra de vidro, foram feitas, primeiramente, as delimitações para o tamanho padrão a ser utilizado e em seguida foram feitos os cortes e a pesagem individual de cada manta com o auxílio de uma balança de precisão da fabricante Marte/M 6K. Após isto, reservou-se as mantas para a posterior confecção dos materiais compósitos.

3.1.3. Fibra de bananeira

Os pseudocaules de bananeira foram coletados em uma empresa localizada em Tucuruí – PA. A Figura 16 apresenta uma área do local onde foram coletados os pseudocaules. As plantas selecionadas, são de um período pós-colheita, com comprimento médio de 1,5 m, sendo o fruto do tipo banana prata.



Figura 16. Plantação das bananeiras coletadas para este estudo.

Fonte: Autoria própria

Os pseudocaulos foram cortados estrategicamente, não muito próximo às folhas, rizomas e raízes adventícias. O pseudocaulo é formado pela sobreposição em camadas das bainhas foleares, composto por aproximadamente 15 bainhas em condições de utilização para a produção de fibras (EL BANNA, 2017). A Figura 17 apresenta os pseudocaulos utilizados para fins desta pesquisa.



Figura 17. Pseudocaulos após separação do rizoma e folhas.

Fonte: Autoria própria

Em seguida a este procedimento, as bainhas foleares foram cortadas em tiras longitudinais para a retirada dos resíduos vegetais e extração das fibras, que é retirada pelo modo de extração com fio longo.

A extração das fibras ocorreu no Laboratório de Engenharia Mecânica, UFPA – CAMTUC, e obedeceu aos seguintes procedimentos: separação das bainhas

foliares, desfibramento manual do pseudocaule com faca e espátula (raspagem), retirada do resíduo vegetal (polpa), lavagem e secagem da fibra ao ar livre por um período compreendido entre 24h a 48h, conforme Figura 18.



Figura 18. Processo de extração da fibra: a) separação das bainhas; b) retirada da estrutura vegetal; c) lavagem; d) secagem ao ar livre.

Fonte: Autoria própria.

Em seguida aos processos de extração das fibras e secagem, realizou-se a cardagem manual para separar as fibras umas das outras, para retirar as mucilagens que ainda poderiam estar aderidas aos elementos, com a finalidade de se ter uma fibra mais homogênea. A Figura 19 ilustra as fibras de bananeira utilizadas neste estudo.



Figura 19. Amostra das fibras utilizadas.

Fonte: Autoria própria.

3.1.4. Confeção dos tecidos

Para a confecção dos tecidos de fibras vegetais foi utilizado um tear manual, que reúne características de um tear de pregos com as dimensões de 40 cm x 44cm, mas com dimensões de 30 cm x 40 cm de área para tecelagem, conforme Figura 20.



Figura 20. Tear manual.

Fonte: Autoria própria.

Para o início do processo de tecimento, as fibras de bananeira foram dispostas nos sentidos de trama no tamanho de 65 cm e urdume com 45 cm (Figura 21), após o processo de confecção, as fibras excedentes foram cortadas para atender ao tamanho do reforço. Assim, a partir do processo de tecimento das fibras de bananeira, foram obtidos doze tecidos.



Figura 21. Processo de tecimento das fibras.

Fonte: Autoria própria.

3.1.4.1. Determinação da gramatura do tecido de fibra de bananeira

Para a determinação da gramatura da superfície têxtil do tecido das fibras de bananeira, utilizou-se a Equação (1), que objetiva definir uma das principais características de um material caracterizado como tecido. A gramatura é a medida da massa em 1 m² de tecido, conforme os parâmetros presentes na NBR 10591 – 2008.

$$G = \frac{m}{A} \quad (1)$$

Onde:

G – Gramatura;

m – Massa (g); e

A – Área (m²).

3.2. SISTEMATIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o início do estudo do comportamento mecânico do material, faz-se necessário a sistematização do seu procedimento experimental, composto pelas seguintes etapas, confecção dos corpos de prova e ensaios, conforme Figura 22.

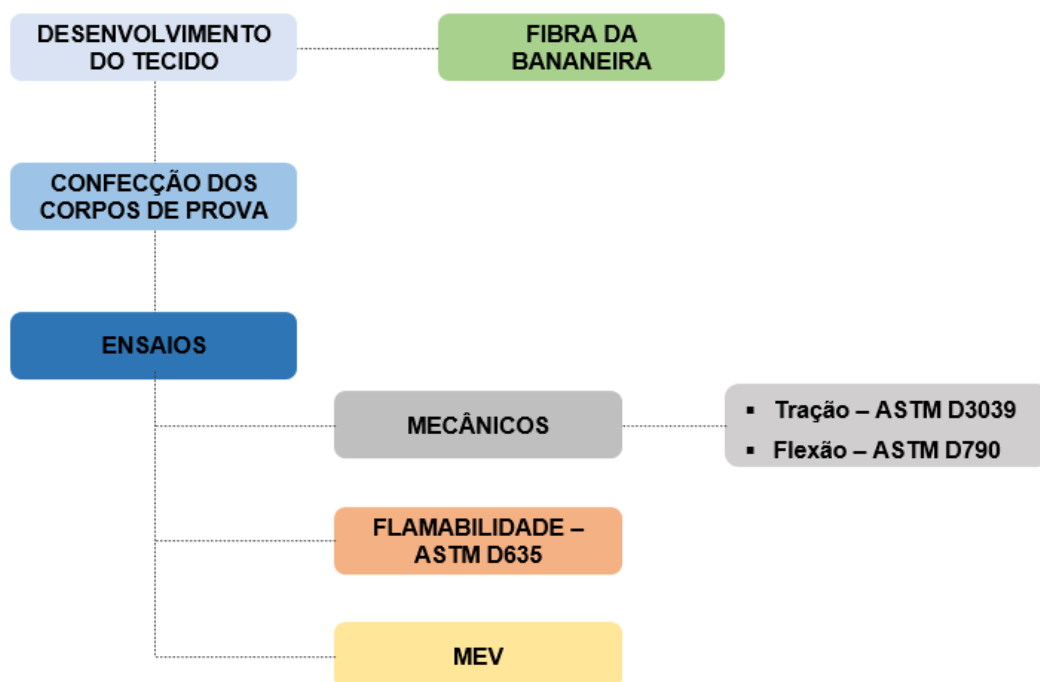


Figura 22. Esquema do procedimento experimental desta pesquisa.

Fonte: Autoria própria.

A sistematização do procedimento experimental e a definição dos teores da matriz e do agente de reforço foram embasadas em estudos já realizados sobre compósitos com resinas termofixas e fibras vegetais.

A definição das variações dos compósitos estudados, além de basear-se nas pesquisas científicas, considerou a disponibilidade de matérias-primas, em específico o agente de reforço, sendo definidas em: matriz pura – V1; matriz/duas camadas de mantas da fibra de vidro – V2, matriz/uma camada do tecido da fibra de bananeira – V3 e matriz/duas camadas do tecido da fibra de bananeira – V4. O Quadro 3 apresenta as variações a serem estudadas.

Quadro 3. Variações dos compósitos estudados.

Chapa aglomerada	Matriz	Agente de reforço	Fração	Massa do reforço (g)
V1	Resina poliéster	–	–	-
V2	Resina poliéster	Fibra de vidro	02 camadas	51,6
V3	Resina poliéster	Fibra de bananeira	01 camada	3,32
V4	Resina poliéster	Fibra de bananeira	02 camadas	6,64

Fonte: Autoria própria.

3.3. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem dos compósitos foi realizada no Laboratório de Engenharia Mecânica, do CAMTUC. Os procedimentos adotados nesta etapa da pesquisa, foram embasados pelas pesquisas científicas apresentadas por El Banna (2017) e por normas técnicas vigentes, relacionadas aos ensaios que foram selecionados para esta pesquisa, flexão, tração e flamabilidade.

O processo geral de confecção dos corpos de prova inicia-se pelo preparo do compósito e finaliza-se com o corte das placas, formando assim, as amostras para os ensaios para caracterização mecânica. Sendo apresentada no fluxograma da Figura 23.

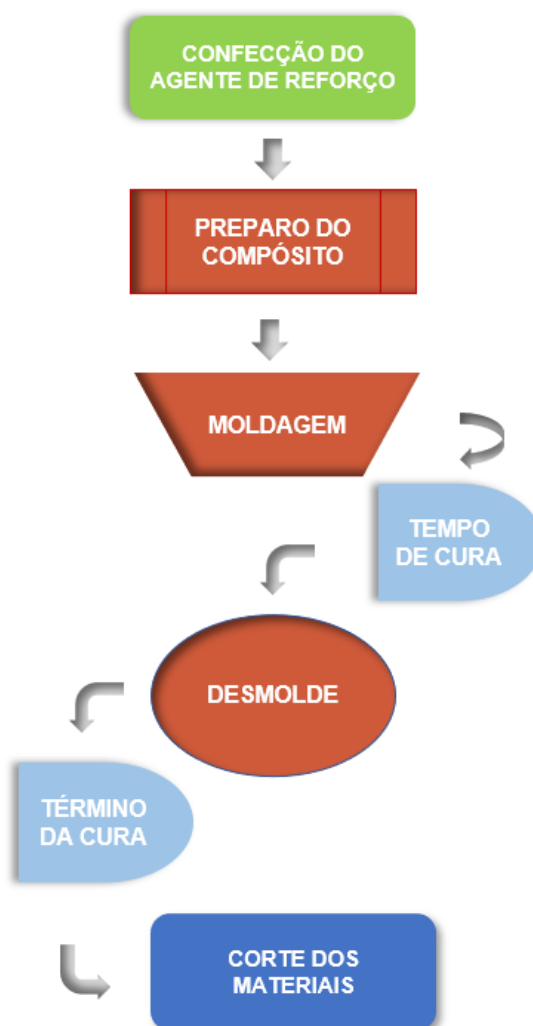


Figura 23. Síntese do processo de confecção dos corpos de prova.

Fonte: El Banna (2017).

Os materiais compósitos de poliéster foram confeccionados na forma de placas retangulares pelo método manual *hand lay-up* e pelo processo de moldagem por compressão em uma prensa hidráulica. Antes da moldagem, realizou-se a secagem dos tecidos de fibra vegetal a temperatura ambiente, por aproximadamente quatro horas, para redução de umidade. Para a constituição do agente de reforço, o tecido foi composto por fibras da bananeira *in natura*, e as moldagens ocorreram manualmente e em condições ambiente. Os comprimentos utilizados foram obtidos a partir de corte manual, com tesoura, de acordo com as dimensões do molde. Para este processo fez-se uso de molde de aço de duas partes tipo macho-fêmea, Figura 24.



Figura 24. Molde utilizado para confecção das placas.

Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, confeccionou-se as placas somente com a resina de poliéster, em seguida foram confeccionadas as placas de compósitos com agente de reforço de duas camadas de fibra de vidro, posteriormente foram confeccionadas as placas de compósitos poliméricos reforçados com uma camada do tecido da fibra de bananeira e, na etapa final, foram fabricados os materiais poliméricos com duas camadas do tecido da fibra de bananeiras.

Durante o processo de fabricação dos compósitos poliméricos, obedeceu-se aos procedimentos para quantificação específica dos materiais a serem utilizados para as placas. De início, após pesagem da massa da resina na balança de precisão, acrescentou-se o catalisador e iniciou-se o processo de homogeneização por um período de trinta segundos.

Posteriormente, com o molde já preparado com desmoldante, inicia-se o vazamento da mistura à temperatura ambiente, de modo a não ultrapassar o tempo de cinco minutos. O tempo de gel do material obedeceu ao intervalo de 5 a 15 minutos, conforme indicado pelo fabricante, Figura 25.

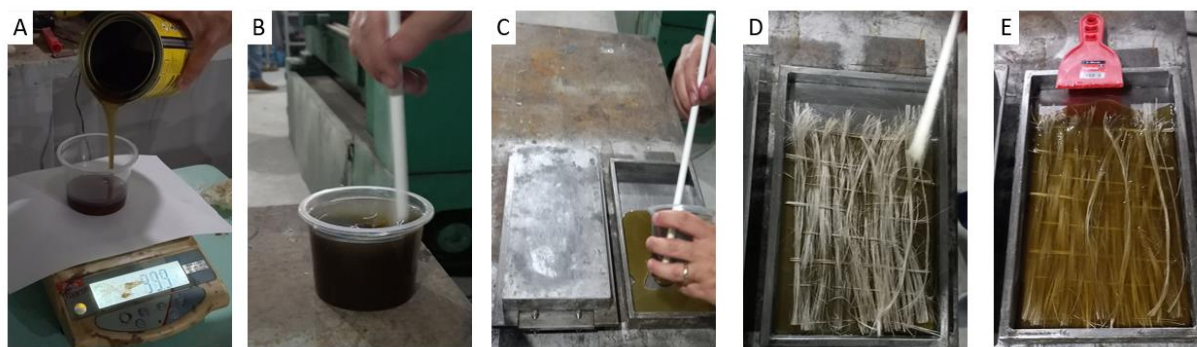


Figura 25. Preparo do material compósito: A) pesagem da resina; B) homogeneização resina/iniciador; C) vazamento da mistura no molde; d) adição do agente de reforço; E) estado final da mistura.

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, o molde foi fechado e prensado em uma prensa hidráulica da marca Bovenau, modelo P10 ST, sob a carga de 2,0 kN, por 25 minutos, Figura 26. Posteriormente, as placas foram retiradas do molde metálico e acondicionadas para a continuação do seu processo de cura em temperatura ambiente por um período de 72h.



Figura 26. Material polimérico durante o processo de prensagem.

Fonte: Autoria própria.

As placas foram confeccionadas em triplicada para cada constituinte, resultando em um total de 12 (doze) placas fabricadas. Cada placa foi marcada e cortada para a confecção dos corpos de prova para submissão aos ensaios mecânicos, resistência à chama e análise microestrutural.

3.4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS CORPOS DE PROVA

3.4.1. Ensaio de tração

Os compósitos foram preparados conforme a Norma ASTM D3039 (2017) para propriedades de tração para compósitos que possuem matriz polimérica. As propriedades mecânicas destes materiais podem ser determinadas por meio deste ensaio são: resistência uniaxial, módulo de elasticidade e deformação. A resistência e a deformação do material são medidas a partir do momento de ruptura do corpo de prova. Sendo a resistência à tração medida pelo quociente entre a carga aplicada e a área transversal do corpo de prova, enquanto a deformação representa o aumento percentual do comprimento da peça sob os esforços axiais. O módulo de elasticidade do compósito é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do regime elástico.

A norma ASTM D3039 delimita as dimensões dos corpos de prova sendo 250 mm de comprimento, largura de 25 mm e espessura de 2,5 mm, conforme Figura 27.

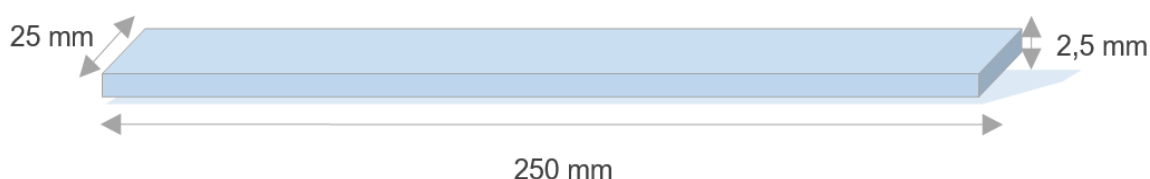


Figura 27. Dimensões dos corpos de prova ASTM D3039 – 17.

Fonte: Autoria própria.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal do Pará – Campus de Tucuruí, em um equipamento de ensaio universal WDW-100 E serial nº 146 EMIC, com célula de carga de 30 kN, com velocidade de deslocamento de 2 mm/min, distância entre garras de 180 mm e temperatura de 26°C, Figura 28.



Figura 28. Equipamento para ensaio de tração.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.4.2. Ensaio de flexão

Para a determinação da resistência e módulo de elasticidade sob esforços de flexão, o ensaio de flexão foi padronizado conforme a Norma ASTM D790 –10.

Devem ser submetidos ao ensaio de flexão materiais plásticos com agente de reforço ou não, e utilizar as dimensões em seus corpos de prova de 127 mm de comprimento com largura de 12,7 mm e espessura de 3,2 mm, conforme exemplificado pela Figura 29.



Figura 29. Dimensões dos corpos de prova ASTM D790 – 10.

Fonte: Autoria própria.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal do Pará – Campus de Tucuruí, em um equipamento de ensaio universal WDW-100 E serial nº 146 EMIC, equipada com dispositivo para ensaio de flexão em três pontos, Figura 30.



Figura 30. Equipamento para ensaio de flexão.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.5. ENSAIO DE FLAMABILIDADE DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

O ensaio de flamabilidade tem como objetivo avaliar materiais poliméricos e determinar seu comportamento com relação ao tempo de combustão, tempo para a extinção da combustão sem intervenção, se há combustão continuada e testes para determinação do potencial de flamabilidade e resistência a 'exposição a chama.

De acordo com a norma ASTM D635 – 18, para a queima, os corpos de prova devem possuir as dimensões de 130 mm de comprimento, largura de $13 \pm 0,5$ mm e espessura mínima de 3 mm, conforme demonstrado pela Figura 31.

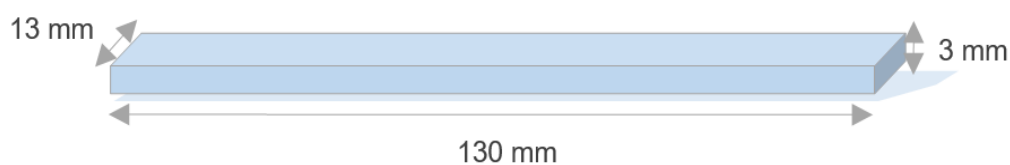


Figura 31. Dimensões dos corpos de prova ASTM D635 – 18.

Fonte: Autoria própria.

Assim, selecionou-se 5 (cinco) corpos de prova de cada material confeccionado a ser ensaiado, cada amostra foi marcada com duas linhas perpendiculares ao eixo longitudinal do provete, de 25 ± 1 mm e 100 ± 1 mm, em seguida apoiado

horizontalmente em uma das extremidades. A extremidade livre foi exposta à chama do queimador por, especificamente, por 30s, Figura 32.



Figura 32. Ensaio de flamabilidade de material compósito.

Fonte: Arquivo pessoal.

Com a finalização do ensaio e determinado o tempo de queima, pode-se calcular a velocidade de propagação da chama no provete, conforme a Equação 2.

$$V = \frac{L}{t} \times 60 \quad (2)$$

Onde: V é a velocidade de propagação da chama (mm/min);

L – Comprimento danificado pela queima (mm); e

t – Tempo de queima dos corpos de prova (s).

3.6. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

A análise de imagens que utiliza a técnica de microscopia eletrônica de varredura – MEV tem como finalidade obter informações relativas à morfologia e distribuição entre matriz e agente de reforço, bem como estudar a superfície de fratura dos corpos de prova, após ensaios mecânicos, ao analisar os mecanismos de falhas de cada composição fabricada. A Figura 33 apresenta o equipamento utilizado para a análise microestrutural, fabricado pela empresa Hitachi, modelo TM 3000 pertencente ao laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará – Campus Belém.



Figura 33. Equipamento utilizado para a caracterização microestrutural.

Fonte: Arquivo pessoal.

4. RESULTADOS E DISCUSÕES

4.1. MÉTODO DE CONFECÇÃO DOS TECIDOS

As fibras da bananeira foram preparadas na forma de tecidos do tipo plano confeccionados em tear de pregos manual, o tecimento utilizou, tanto no urdume quanto na trama, as fibras *in natura*. Para a confecção do tecido, optou-se por seleccionar, para cada trama e urdume, o conjunto de 20 unidades de fibras longas e aspecto visual homogêneo para assim realizar o entrelaçamento/transpasse. Entretanto, os tecidos apresentaram espaçamentos que variaram em média de 7 mm entre trama e urdume, o que não afetou a uniformidade dos tecidos (Figura 34).



Figura 34. Tecido de fibras da bananeira

Fonte: Arquivo pessoal.

4.1.1. Determinação da gramatura do tecido

A gramatura representa uma classificação da matéria-prima para a padronização do peso de tecidos no sistema produtivo (SILVA, 2020). Como os agentes de reforço (tecidos) foram feitos de modo manual e as fibras utilizadas são de origem natural, existem diferentes espessuras e pode haver diferenças ao longo do comprimento das fibras, devido a sua anisotropia.

Para esta pesquisa, foi preparada uma amostra do tecido confeccionado nas dimensões de 280 mm x 150 mm, com massa média de $3,32 \pm 0,39$ g. Com área de

amostra de 0,042 m², a gramatura média (G) encontrada para o tecido de fibras de bananeira foi de 79,05 ± 9,17 g/m².

4.2. FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os processos de fabricação por meio do método manual *hand lay-up* e pelo uso de moldagem por compressão em prensa hidráulica mostraram-se adequadas para esta pesquisa, pois possibilitaram a obtenção dos corpos de prova para a caracterização mecânica e flamabilidade de acordo com as dimensões normalizadas pela ASTM, Figura 35.

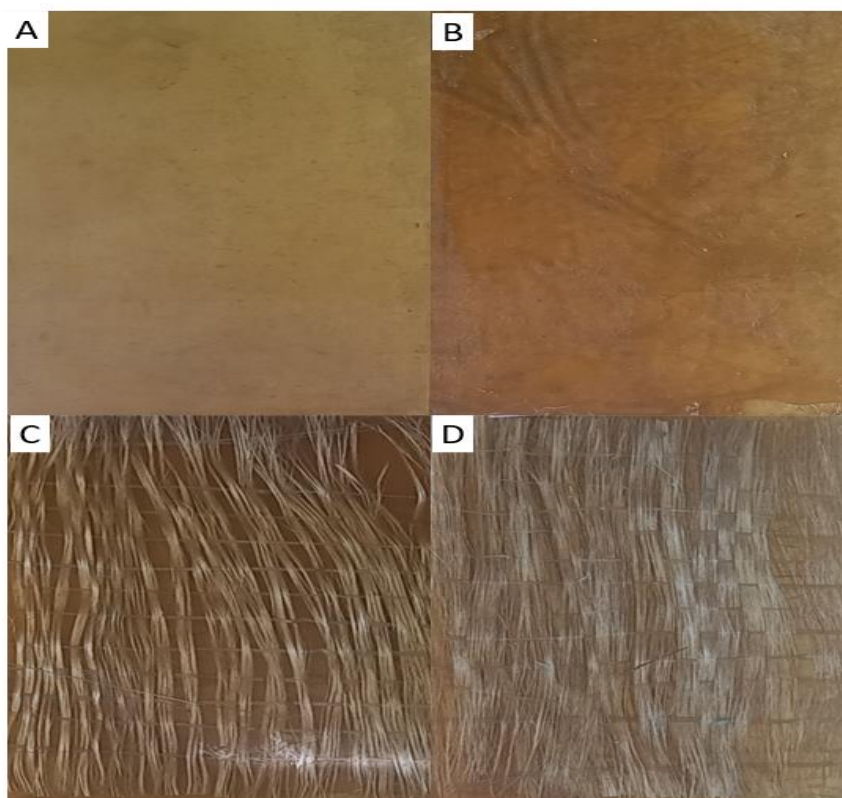


Figura 35. A) matriz plena; B) compósito polimérico com reforço de fibras de vidro; C) compósito polimérico reforçado com 1 camada de tecido de fibras da bananeira; D) compósito polimérico reforçado com 2 camadas de tecidos de fibras da bananeira.

Fonte: Autoria própria.

4.3. ENSAIO DE TRAÇÃO

A avaliação quanto à resistência mecânica obtidas por meio de ensaio de tração dos compósitos poliméricos termofixos constituídos com agente de reforço com mantas de fibras de vidro, tecido do tipo plano de fibras da bananeira *in natura* com 01 (uma) e 02 (duas) camadas são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Resultados do ensaio de tração

Composição do Compósito	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
V1	20,05±0,4	1,30±0,75	1,16±0,96
V2	75,38±8,06	3,13±0,68	5,58± 0,76
V3	29,25±4,38	1,85±0,96	1,59±0,43
V4	51,27±2,3	2,47±0,69	2,79±0,50

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os valores apresentados no Quadro 4, ao correlacionar a variação V1 – Matriz plena aos demais compósitos com agente de reforço sintético ou proveniente das fibras de origem vegetal, estes materiais apresentam um aumento significativo em relação às suas propriedades mecânicas, sendo a composição V2 a que apresenta o melhor desempenho dentre os compósitos confeccionados.

Os compósitos poliméricos termofixos em que seu agente de reforço foram os tecidos de fibras da bananeira, V3 e V4, apresentaram valores acima da composição V1, entretanto abaixo da composição V2. Portanto, considera-se que os materiais V3 e V4 obtiveram resultados satisfatórios devido cumprirem a finalidade ao qual foram propostos, ou seja, atuar como agente de reforço, aumentando sua resistência à solicitações de tração com valores para V3 e V4, de 29,25 MPa e 51,27 MPa, respectivamente, durante às etapas de ensaio, conforme apresentado no Quadro 4. O módulo de elasticidade destes materiais apresentou aumento significativo em relação à matriz plena e porém, em relação à composição V2, seus valores ficaram abaixo de 5 GPa.

A Figura 36 representa um gráfico comparativo para os materiais desenvolvidos em suas respectivas composições.

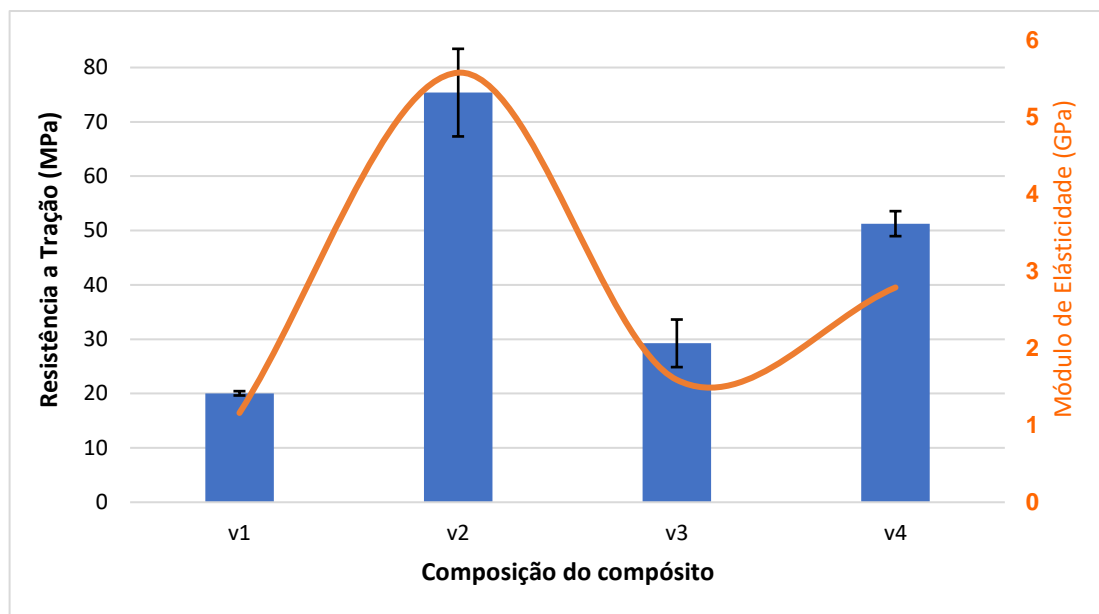


Figura 36 . Gráfico dos compostos confeccionados quanto as suas propriedades mecânicas.

Fonte: Autoria própria.

Assim, pode observar que houve um incremento positivo às propriedades de resistência à tração e módulo de elasticidade da composição V1 ao se utilizar os tecidos de fibras da bananeira como agente de reforço em suas duas variações, com isto, pode-se afirmar que estas atuam de maneira efetiva para uso com matrizes poliméricas termofixas.

A boa aderência entre matriz e material de reforço garante um desempenho eficiente das propriedades mecânicas de um material compósito reforçado por fibras em forma de mantas ou tecidos. Estudos como o de Costa (2016) descrevem que é necessário que ocorra uma forte adesão entre estas fases para que ao solicitar a matriz, esta transfira as tensões para o material de reforço para que as fibras possam dificultar ou resistir à fratura do material.

4.4. ENSAIO DE FLEXÃO

O Quadro 5 apresenta os resultados da caracterização mecânica em relação à resistência a flexão dos compósitos poliméricos termofixos desenvolvidos em suas respectivas composições.

Os resultados obtidos demonstram que a inserção dos agentes de reforço, tanto o de fibras de vidro quanto os tecidos de fibras da bananeira à matriz conferiram aos compósitos aumento de sua resistência aos esforços de flexão em relação à variação

V1. Com isto, pode afirmar que houve um reforço efetivo de todos estes agentes à matriz, resultando assim em aumento de sua resistência.

Quadro 5. Resultados do ensaio de resistência a flexão

Composição do Compósito	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de flexão (GPa)
V1	40,37±53,01	5,32±1,83	5,37±1,33
V2	165,42±17,49	9,51±1,09	3,97±0,55
V3	142,45±15,77	7,13±0,91	6,86±1,53
V4	91,99±6,83	4,07±0,22	7,25±0,48

Fonte: Autoria própria.

Os resultados do Quadro 5 demonstram que a composição V2 obtiveram uma melhor performance, superior em relação à tensão de flexão, comparado as demais composições de materiais fabricados. Entretanto, o seu valor em módulo de flexão, obteve resultado inferior em relação às demais composições, inclusive a V1 (Matriz plena), este resultado pode ser justificado pelas características do agente reforçante ser um material sintético que possui características como ser rígido e frágil.

A composição V3 obteve tensão de resistência a flexão acima de 142 MPa e módulo 6,86 GPa resultados satisfatórios ao correlacioná-los com V1. Já o compósito V4 obteve sua tensão de flexão valor aproximado de 91 MPa e módulo de 7,25 GPa, resultados estes satisfatórios em relação à matriz pura (V1). Entretanto, ao analisar as duas composições em que o agente de reforço é o tecido da fibra de bananeira, nota-se que a composição V3 apresentou resultados mais significativos em relação aos esforços de flexão, sendo o material com melhor performance dentre os confeccionados.

Portanto, estes resultados demonstram que a adição dos agentes de reforço conferiu resistência ao material, o que os correlaciona a uma boa adesão entre reforço e matriz. Isto deve-se, conforme Costa (2016), de às fibras de origem vegetal melhorarem a resistência dos compósitos que as utilizam como agente de reforço. Sendo o aumento da resistência à flexão dos materiais compósitos correlacionado com a interação na interface fibra/matriz e, também, com a disposição das fibras no interior da matriz. Assim, conclui-se que o módulo de flexão é uma propriedade aditiva, portanto quanto o maior percentual de fibras, o valor do módulo será aumentado.

A Figura 37 ilustra o gráfico comparativo entre os materiais desenvolvidos em suas respectivas composições: matriz plena (V1), compósito com reforço de mantas de fibra de vidro (V2) e compósitos com reforço de tecidos de fibras de bananeira uma camada (V3) e duas camadas (V4).

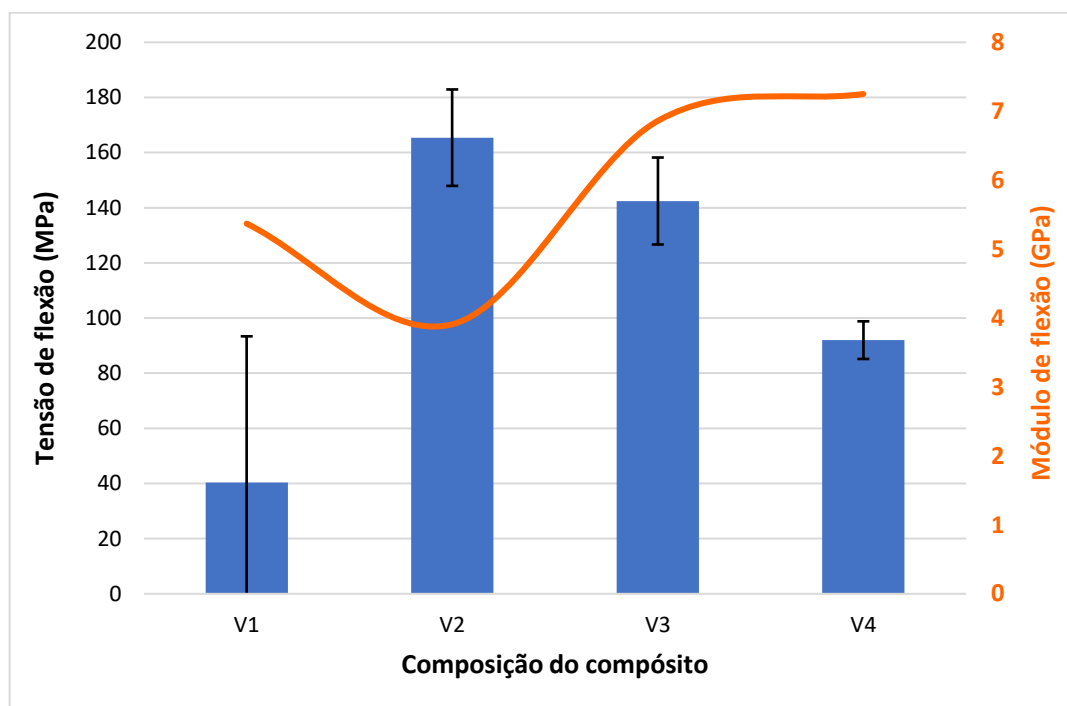


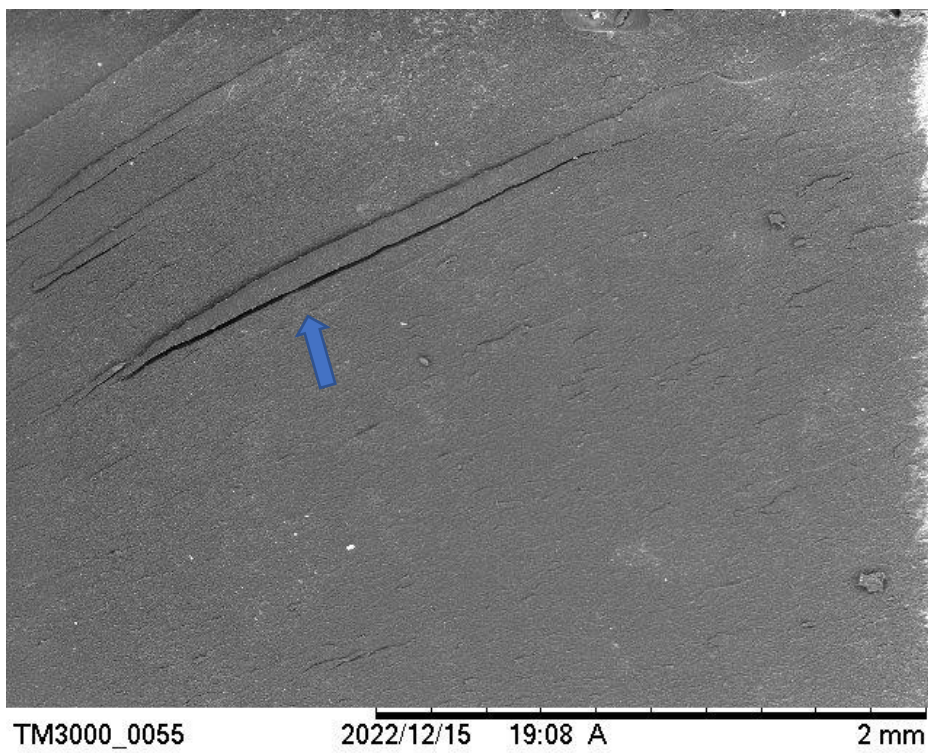
Figura 37. Gráfico da resistência à flexão dos materiais desenvolvidos

Fonte: Autoria própria.

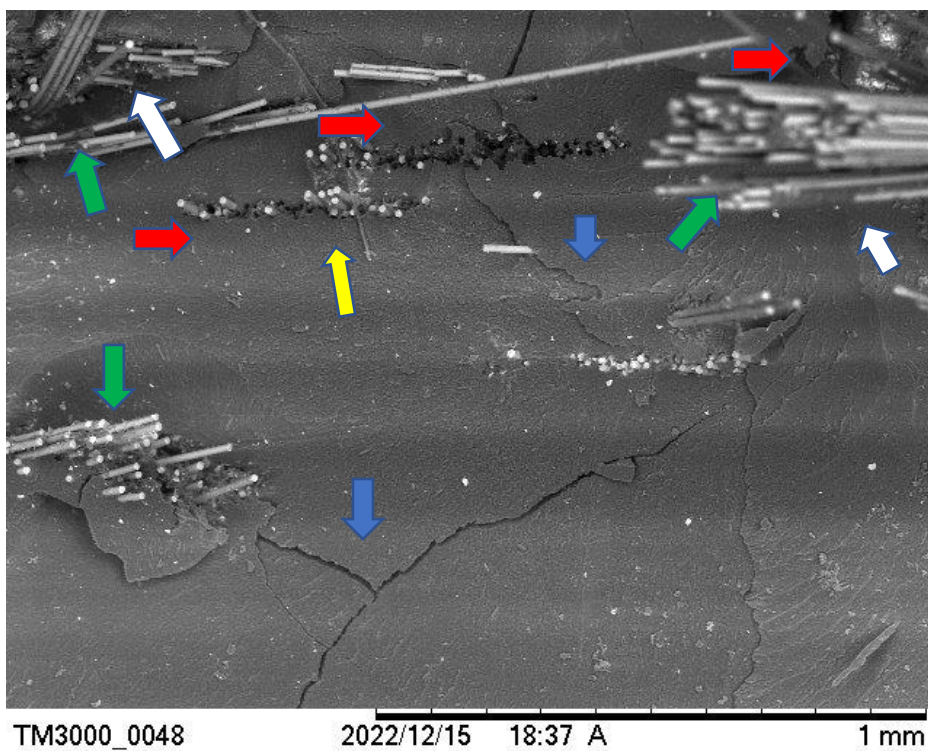
4.5. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

4.5.1. Ensaio de tração

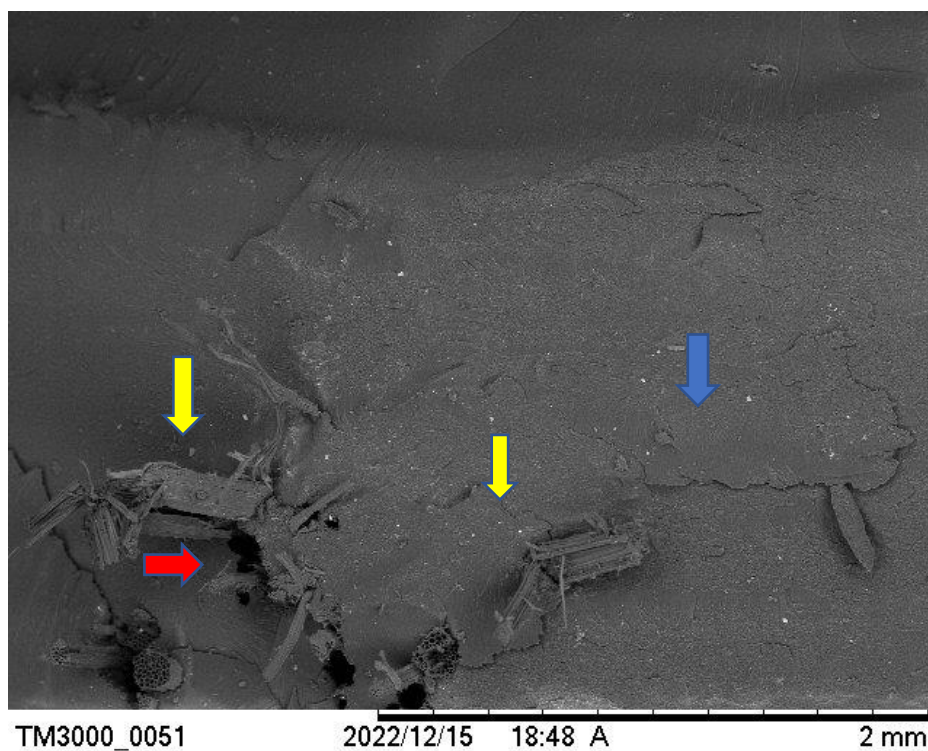
A Figura 38 apresentam as superfícies de fratura após ruptura transversal proveniente do ensaio de tração das composições V1 (matriz plena) e os compósitos com agente de reforço V2 (fibra de vidro), V3 (tecido da fibra de bananeira uma camada) e V4 (tecido da fibra de bananeira duas camadas).



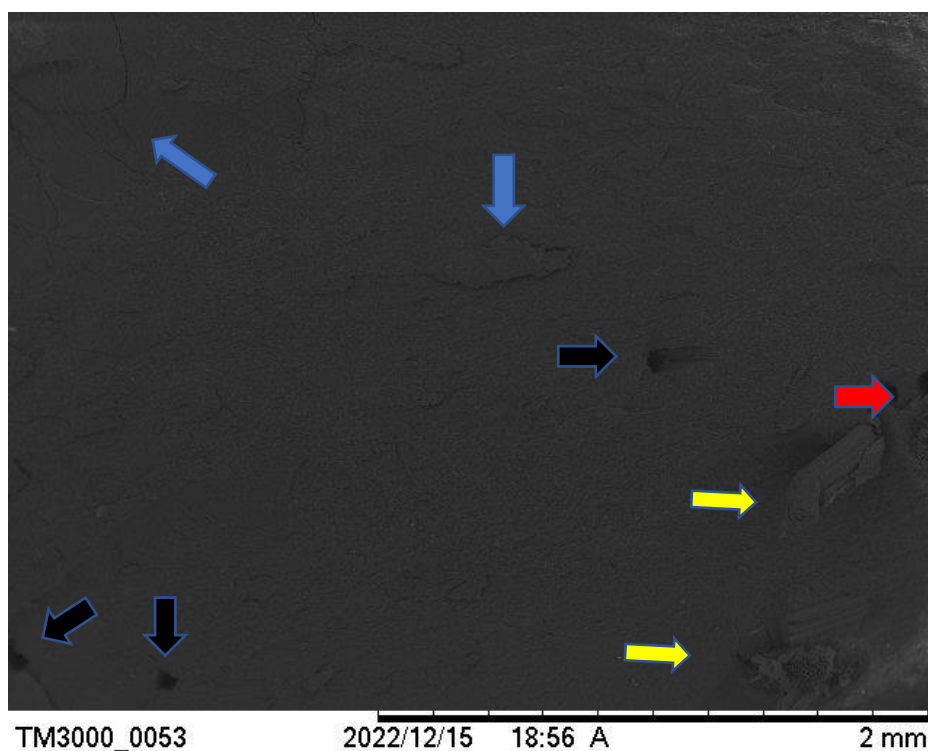
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 38. Microscopia eletrônica de varredura da fratura após ensaio mecânico de tração: (a) composição V1; (b) composição V2; (c) composição V3; (d) composição V4.

A Figura 38 (a) corresponde a superfície da composição V1 nela é possível observar, inicialmente, sua uniformidade quanto a composição e evidencia-se após

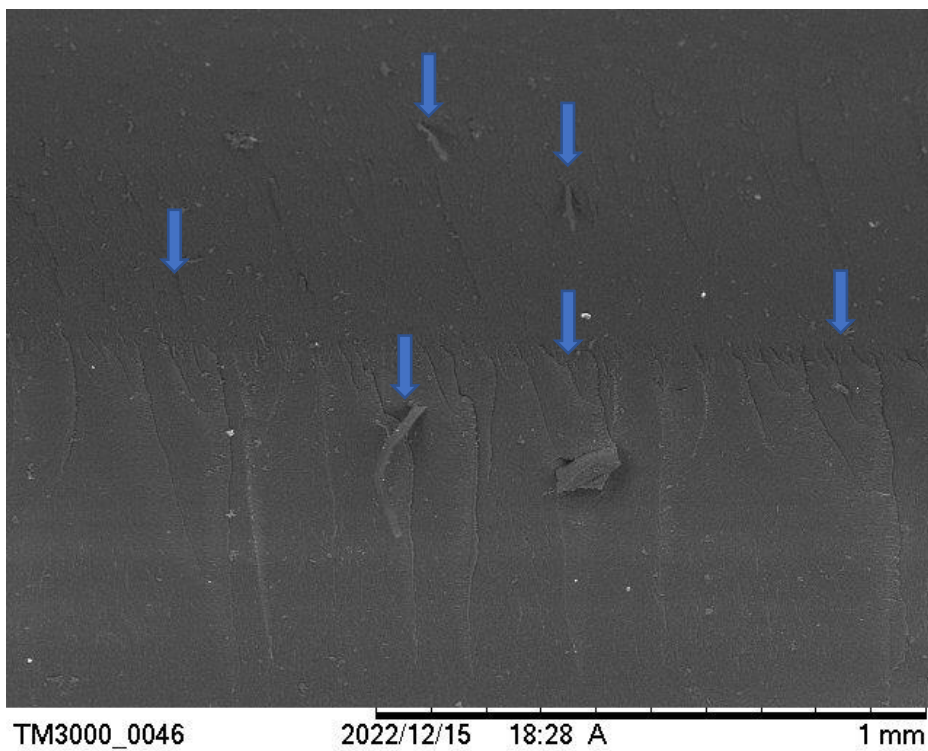
ensaio a presença de trincas (seta azul) proveniente das solicitações externas durante o ensaio. A Figura 38 (b) apresenta a fratura do compósito V2, evidencia-se a distribuição bem definida entre matriz e reforço, bem como a distribuição de maneira randômica de suas fibras (seta verde). Em sua superfície fraturada nota-se a presença de trincas (seta azul), além de se observar a presença do mecanismo de falha *pull-out* (seta vermelha), fibras fraturadas (seta amarela) bem como a presença do descolamento do reforço e matriz (seta branca), as fibras estão sacadas e dispostas na direção do esforço solicitado, o que aumenta a resistência do compósito.

No material de composição V3, Figura 38 (c), evidencia-se, inicialmente, a estrutura do material confeccionado, observa-se a presença de trincas (seta azul) em sua superfície fraturada, além da presença de mecanismo de falha *pull-out* e fratura da fibra (seta amarela).

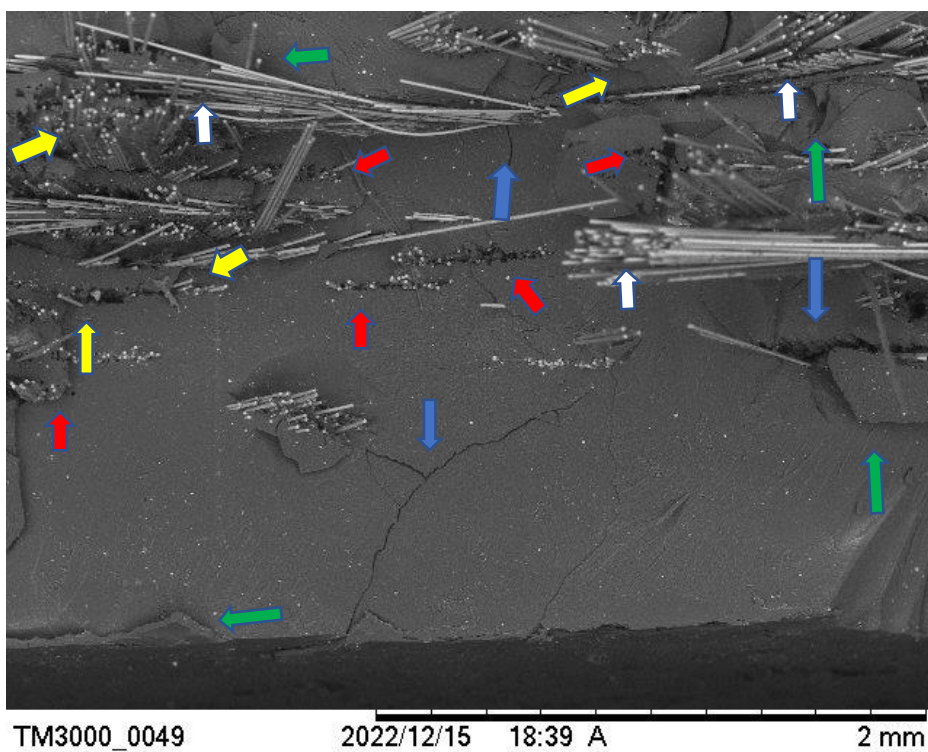
A Figura 38 (d), demonstra a superfície do compósito V4, nela percebe-se alguns mecanismos de falha, como *pull-out*, trincas, fibras fraturadas, vazios (setas vermelha, azul, amarela e preta respectivamente) bem como a ruptura da matriz, bem como, nota-se o deslocamento do reforço em direção aos esforços solicitados, o que indica a sua efetividade.

4.5.2. Ensaio de flexão

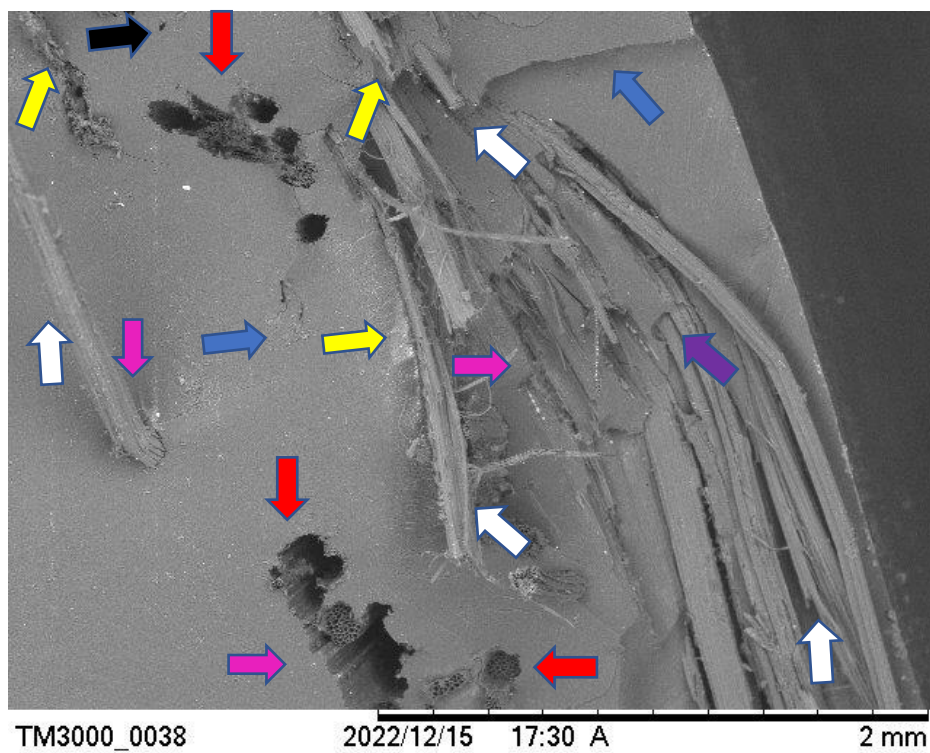
A Figura 39 evidencia as superfícies transversais de fratura dos compósitos matriz plena e com agente de reforço em fibra de vidro, uma camada de tecido da fibra de bananeira e duas camadas do tecido da fibra de bananeira respectivamente após ensaios de flexão.



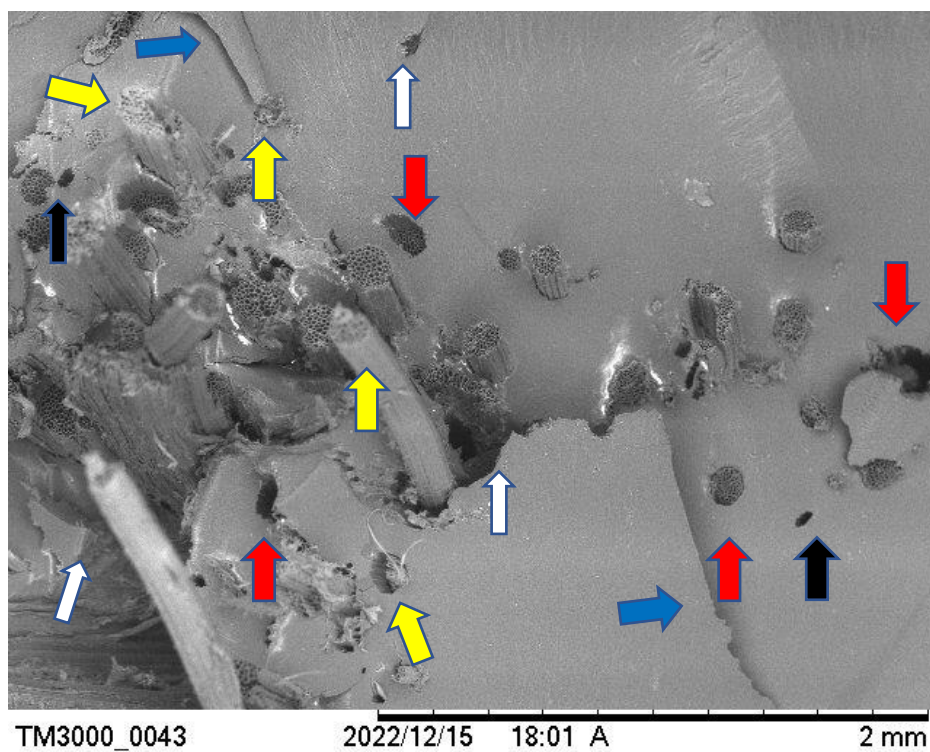
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 39. Microscopia eletrônica de varredura da fratura após ensaio de flexão: (a) composição V1; (b) composição V2; (c) composição V3; (d) composição V4.

A superfície da Figura 39 (a) evidencia a ruptura da composição V1, este material apresenta sua composição bem definida estando, sua área superficial, livre de defeitos oriundos do processo de fabricação, contudo há a presença de trincas (setas azuis) ao longo de sua secção.

A Figura 39 (b) demonstra a ruptura do compósito V2, inicialmente evidencia-se a distribuição bem definida entre matriz e agente de reforço, observa-se em sua face fraturada a presença de alguns mecanismos de falha, como *pul-out* (setas vermelhas), ruptura do agente de reforço, ruptura da matriz e propagação de trincas (setas amarelas, verdes, azuis respectivamente) além da presença de algumas fibras sacadas da matriz (setas brancas). Neste material observa-se uma boa distribuição entre a matriz polimérica termofixa e o agente de reforço, o que corrobora para a performance apresentada durante os ensaios.

A Figura 39 (c) apresenta a fratura do compósito polimérico termofixo de composição V3, cujo agente reforçante é uma camada do tecido de fibras da bananeira. Este material obteve resultado satisfatório dentre as amostras ensaiadas. Em sua face fraturada, tem-se a camadas definidas entre matriz e reforço, é possível visualizar a disposição da trama e urdume do reforço (seta rosa), bem como sua adesão satisfatória (seta lilás). Nota-se a predominância dos mecanismos de falha, como *pull-out* (setas vermelhas), ruptura das fibras (setas amarelas), presença de poucos vazios (seta preta), trincas (setas azuis) e fibras sacadas (setas brancas).

A microscopia para a amostra do compósito polimérico V4, Figura 39 (d), demonstra a distribuição entre matriz e reforço, é possível observar a adesão entre os dois materiais, além de evidenciar alguns mecanismos de falhas em sua superfície, como a ruptura da matriz, a predominância de trincas e a ruptura de fibras do reforço (setas brancas, azuis e amarelas, respectivamente), bem como a presença de *pull-out* (setas vermelhas) e vazios (setas pretas) oriundos do processo de fabricação. Assim, é possível afirmar que este material cumpriu com o que foi proposto, a presença de propagação das trincas e a presença de descolamento e ruptura do reforço, evidenciam o quão a dissipação de energias durante as solicitações do ensaio propagou-se na matriz ocasionando seu trincamento conforme visto nas bibliografias de referência, estes mecanismos são característicos a este tipo de material.

4.6. ENSAIO DE FLAMBILIDADE

O Quadro 6, apresenta os resultados do ensaio de flamabilidade horizontal dos materiais desenvolvidos, analisando a sua velocidade de queima (mm/min) após o tempo de 30s, bem como se houve queima total dos corpos de prova.

Quadro 6. Resultado do ensaio de flamabilidade.

Compósito	Taxa de Queima (mm/min)	Queima total	Classificação
V1	18,7 ± 1,39	Sim	HB
V2	14,01 ± 0,81	Sim	HB
V3	17,22 ± 1,29	Sim	HB
V4	15,88 ± 1,43	Sim	HB

Fonte: Autoria própria.

Nos ensaios de flamabilidade cinco amostras de cada composição do material foram expostas à queima de acordo com os parâmetros da norma ASTM D635 e pode-se observar que todos os provetes apresentaram comportamento semelhante de não extinguir a chama. Assim, queimaram-se completamente até o limite estipulado pelo ensaio.

A Resolução nº 498 de 29 de junho de 2014 do Conselho Nacional de Trânsito Brasileiro, determina que os materiais a serem empregados em revestimentos internos dos habitáculos automobilísticos nacionais e importados, fabricados ou adaptados, deverão apresentar velocidade de propagação de chama de, no máximo, 100 mm/min.

Assim, ao analisar os dados presentes no Quadro 6, observou-se que todos os materiais poliméricos que possuem agente de reforço apresentaram taxa de queima inferior a composição V1 (matriz plena) com variações de aproximadamente 25% para V2; 7,9% para a composição V3 e 15,08% para o material V4. Logo, verifica-se que todos os materiais apresentaram valores inferiores ao solicitado pela resolução brasileira. Portanto, com base nos parâmetros e critérios estabelecidos pela norma ASTM D635, considera-se que os compósitos V1, V2, V3 e V4 possuem classificação HB.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A confecção dos tecidos utilizados como agente de reforço para este trabalho foi realizada de maneira satisfatória, o uso do tear de pregos proporcionou um tecido classificado como plano com um bom acabamento superficial, com fibras unidas e boa distribuição, porém com alguns espaços que variaram em média 7 mm. Ao considerar o procedimento experimental, aponta-se que a metodologia (*hand lay up* com posterior compressão) dirigida à fabricação dos materiais compósitos em questão se mostrou apropriada.

A produção dos materiais poliméricos de resina termofixa poliéster com fase dispersa composta por mantas da fibra de vidro para comparação de propriedades mecânicas, seguiu a metodologia *hand lay up* com compressão e apresentou resultados satisfatórios.

O material de composição V2, como esperado, demonstrou os melhores valores com relação às solicitações durante os ensaios com resistência à tração ultrapassando o valor de 75 MPa e 165 MPa para flexão. Já os compósitos com agente de reforço do tecido de fibras do pseudocaulo da bananeira, composições V3 e V4, demonstraram resultados eficazes durante os ensaios de tração com valores de 29,25 MPa – 51,27 MPa e flexão 142 MPa – 91,99 MPa, respectivamente. Estes resultados demonstram que houve um incremento às propriedades mecânicas da matriz polimérica comprovando a efetividade do agente de reforço.

Quanto a resistência à flama, os compósitos poliméricos confeccionados, estudados e submetidos à queima de acordo com os padrões da norma ASTM D635, obtiveram valores que os classifica em HB, estando assim, também, abaixo dos valores mínimos de velocidade de queima determinadas pela resolução brasileira.

A análise morfológica das superfícies fraturadas de cada material compósito desenvolvidos evidenciou a predominância de mecanismos de falhas como trincas e fraturas das fibras. Além de identificar-se a estrutura destes materiais, quanto a distribuição e adesão entre matriz e reforço, assim como a presença de alguns vazios e *pull out*.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, deve-se ressaltar as questões ambientais e a crescente busca por materiais sustentáveis, os aspectos sociais, inovação e desempenho tendem a estar de acordo com as necessidades atuais para o desenvolvimento e fabricação de materiais a serem utilizados pela indústria, conforme as referências desta pesquisa. Assim, como forma de otimizar e induzir variedades dos compósitos desenvolvidos, é pertinente sugerir algumas recomendações para trabalhos futuros, como:

- Realizar a trama dos fios do agente de reforço em outras configurações como 45° e 90°;
- Utilizar tear de pente linço para a fabricação do agente de reforço para diminuir o espaçamento entre trama e urdume;
- Realizar a trama dos fios do agente de reforço de maneira industrializada;
- Realizar a torção dos fios entre trama e urdume para utilizá-los no formato de malha;
- Para evitar fraturas ao longo da fibra realizar processo de molho e lavagem com água destilada;
- Realizar tratamento químico com NaOH para melhora da adesão entre agente de reforço e matriz;
- Confeccionar compósitos híbridos com fibras vegetais e resíduos com propriedades antichamas.
- Verificar a potencialidade de outros usos na engenharia e arquitetura do material desenvolvido;
- Analisar as condutibilidades térmica e acústica;
- Utilizar resina de origem vegetal na fabricação do compósito;
- Realizar ensaio de impacto e análise das amostras em pêndulo charpy e verificação de *pull out* na estrutura.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

A MATERIAL (R)EVOLUTION. **Qwstion**, 2008. Disponível em: <https://www.qwstion.com/en/bananatex>. Acesso em: jul. de 2023

ADAMIAN, R. **Novos materiais** – Tecnologia e Aspectos Econômicos. COPPE/UFRJ: Rio de Janeiro, 2008.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR., H. **Fibras Vegetais como Material de Construção**. São Paulo: IBRACON, 2007.

AGOPYAN, V. JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Blucher, 2014.

ALEXANDRE, M. **Compósito de matriz poliéster reforçados com fibra da folha do abacaxizeiro: propriedades mecânicas e absorção de água**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D 3878-2007 **Standard terminology of high – modulus reinforcing fibers and their composites**.

_____. ASTM D3039 – 2017. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

_____. ASTM D790 – 2010. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials

_____. ASTM. D635 – 2018. **Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position**. West Conshohocken: ASTM - American Standard Test Method.

AQUINO, E. M. F. **Compósitos poliméricos: fabricação, propriedades e mecanismo de dano**. Apostila – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

ARAUJO, M. **Têxteis técnicos**. **Apostila** – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

ARAÚJO, J. R.; WALDMAN, W. R. DE PAOLI, M. A. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibers: coupling agent effect. **Polym. Degrad. Stab.**, v. 93, p. 1770-1775, 2008.

ASKELAND, D. R., PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. Cengage Learning: São Paulo. 2012, 594p., 28 cm, possui índice. ISBN: 978-85-221-0598-4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10591: Materiais têxteis – Determinação da gramatura de superfícies têxteis**. 2ª ed. Rio de Janeiro, p. 4, 2008. ISBN: 978-85-07-00819-4.

AZIZ, S. H.; ANSEL, M. P.; CLARKE, S. J.; PANTENYA, S. R. Modified polyester resins for natural fibre composites. **Composites Science and Technology**, v. 65, n. 3–4, p. 525-535, 2005.

BALZER, P. S., VINCENTE, L. L., BRIESEMEINTER, R. BECKER, D. Estudo das propriedades mecânicas de um composto de PVC modificado com fibras de bananeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 1, p. 1-4, 2007.

BARBOSA, A. de P. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti**. 2011. 141f. Tese (Doutorado em engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campus dos Goytacazes.

BARCELLOS, I. O.; SOUZA, A. C.; SELKE, A. E. **Incorporação de lodo industrial em compósitos de resina poliéster**. Artigo Técnico Científico – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/po/v19n2/v19n2a14.pdf> . Acesso em: jan. 2023

BARROS, R. T. P. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos de elastômero termoplástico reforçado com fibra de bananeira**. 2014, 98 p Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Sustentabilidade) – Instituto de Ciências ambientais, UNIFESP/SP, Diadema.

BENÍTEZ, A. N.; MONZÓN, M. D.; ANGULO, I.; ORTEGA, Z; HERNANDEZ, P. M.; MARRERO, M. D. Treatment of banana fiber for use in the reinforcement of polymeric matrices. **Measurement**, p. 1065-1073, 2013.

BHAGAWAN, S. S.; DEVI, L. U.; THOMAS, S. Dynamic mechanical properties of pineapple leaf fiber polyester composites, **Polymer composites**, v. 32, p. 1741-1750, 2011.

BITENCOURT, C. S.; PANDOLFELLI, V.C. Resinas termofixa e a produção de refratários contendo carbono: base teórica e insights para futuros desenvolvimentos. **Cerâmica**, v 59, 2013, p. 1-26.

BRASIL. Resolução nº 498, de 29 de julho de 2014. Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN. Disponível em: <https://www.gov.br/transito>

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC: Rio de Janeiro. 7ª ed. 2007.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L.; CHAMMA, P. V. C. Painéis produzidos a partir de resíduos sólidos para aplicação na arquitetura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n.1, 2009, p. 47-53.

CARVALHO, A. C. **Fabricação e caracterização de compósitos à base de resina epóxi e fibras de bananeira**. 2015. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei.

CARVALHO, E. A. S. **Caracterização estrutural e propriedades do (Acrilamidometil) acetato prepinato de celulose modificado via radicalar**. 2009. 64 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

CIEGIS, R., RAMANAUSKIENE, J., MARTINKUS, B. The concept of sustainable development and its use for sustainability scenarios. **Inzinerine Ekonomika – Engineering Economics Online**, n. 2, vol. 62, 2009. Disponível em: <<http://www.inzeko.ktu.lt/index.php/EE>>. Acesso em: fev. 2023.

CORDIOLI, S. **Oficina de avaliação e planejamento do Projeto Fibra da Bananeira**. 2008. Santa Catarina.

CORREIA, B. A. A. **Desenvolvimento Sustentável em Engenharia Mecânica**, 2017, 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – FEUP.

CORREIA, E. A. S. **Compósitos de matriz geopolimérica reforçados com fibras vegetais de abacaxi e de sisal**. 2011. 113f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

COSTA, D. S. da. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais**. 2016. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém.

COSTA, D. S.; EL BANNA, W. R.; COSTA, D. S.; SOUZA, J. A. S. Laminados de matriz polimérica e fibras de bambu contínuas e alinhadas. **Congresso Brasileiro De Engenharia Química**, São Paulo: Blucher, p. 14234-14241, 2015.

CULTIVO DA BANANA. **Instituto de Desenvolvimento Agropecuário e Florestal Sustentável do Estado do Amazonas, IDAM**, 2020. Disponível em: <http://idam.am.gov.br>. Acesso em: jul. de 2023.

CULTIVO DA BANANA. **Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – SEBRAE**, 2021. Disponível em: <https://sebrae.com.br>>Portalsebrae. Acesso em: jul. 2023.

DUNGANI, R.; KARINA, M.; SUBYAKTO, A. S.; HERMAWAN, D.; HADIYANE, A. Agricultural waste fibers towards sustainability and advanced utilization: **A review**. **Asian Journal of Plant Sciences**, v.15 (1-2), p.42-55, 2016.

EL BANNA, W. R. **Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (*Musa Sapientum*, *Musacae*)**. 2017. 150 f. Tese (Doutorado em

Engenharia de Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém.

ELAYAPERUMAL, A.; VENKATESHWARAN, N. Mechanical and dynamic analysis of woven banana/epoxy composite. **Polym Environ**, p. 565-572, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA. **A cultura da banana: aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustriais**. 2022.

FARUK, O., BLEDZKI, A. K., FINK, H. P., SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000 – 2010. **Progress in Polymer Science**. Toronto. n. 37, p.1552–1596, abr. 2012.

FALK, R.; FELTON, C.; HERMANSON, J. C.; TAJVIDI, M. Influence of natural fibers on the phase transitions in highdensity polyethylene composites using dynamic mechanical analysis. In: **The 7th international conference on woodfiber-plastic composites**, 2003.

FENGEL, D, WEGENER, G. **Wood**: chemistry, ultrastruture and reactions. Berlin: Walter de Gruyter, 1989.

FERNANDES, T. **Preparação e caracterização de novos materiais compósitos baseados em fibras de celulose**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro.

FICHA DE INFORMAÇÃO DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUIMICO – FISPQ, **Adesivo para mármore e laminação**. 2018. 23p. Maxi Rubber Indústrias Químicas: Diadema/SP.

GEHLEN, L. R. **Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açai e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado**.2014. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GOMES, M. A. **Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de folhas de abacaxizeiro (PALF)**. 2015. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.

GREEN BLADE Stratifiés renouvelables fabriques à partir de bananiers. **FIBANDCO**, 2022 Disponível em: <https://fibandco.com/#s-home>. Acesso em: jul. de 2023.

GUSMÃO, L. R. C. de. **Influência de ciclos secagem-molhagem no comportamento hidráulico -mecânico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras de coco verde**. 2020. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

HARMIA, T. Fatigue behaviour of net na long glass fiber (LGF) reinforced blends of nylon 66 and isotactic PP. **Polymer composites**. v. 17, n. 6, p. 926-935. Brookfield, 1996.

HISTORY. **DuPont**, 2019. Disponível em: [https:// www.dupont.com/corporate-functions/our-company/dupont-history.html](https://www.dupont.com/corporate-functions/our-company/dupont-history.html). Acesso em: jul.2023.

HOLANDA, E. B. N. Morfologia e propriedades mecânicas de fibra de sisal unidirecional e em sobreposição de compósitos com resina epóxi. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Tecnologia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

KALIA, S., KAITH, B. S., KAUR I. Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites-a review. **Polym. Eng. Sci.**, v. 49, n. 7, p. 1253–1272, 2009.

KEMERICH, P. D. da C., PIOVESAN, M. BERTOLETTI, L. L., ALTMAYER, S. HORMVORPAGEL, T. Fibras de vidro: Caracterização, disposição final e impactos ambientais gerados. **REGET: Revista eletrônica e, gestão, educação e tecnologia ambiental**. v. 10. N. 10, p. 2112-2121. 2013. e-ISSN: 2236-1170

KUASNE, A. **Fibras têxteis. Curso Têxtil em Malharia e Confecção**. 2008. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Araranguá.

KUNST, E. Materiais verdes tem muito espaço a ganhar no carro. **Automotive Business**, 2012. Disponível em: <http://www.automotivebusiness.com.br/>. Acesso em: set 2022.

LIMA, A. C. **Caracterização e propriedades de compósitos de tecido de juta reforçando matriz de polietileno reciclado**. 2009. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro.

MALLICK, P. K. **Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design**. CRC Press: Boca Raton. 3ª Ed. 2007. 638p. Possui índice. ISBN: 978-04291-2206-4. DOI: <https://doi.org/10.1201/978140005981>

MANO, E.B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991.

MARINELLI, A. L., MONTEIRO, M. R., AMBRÓSIO, J. D., BRANCIFORTI, M. C., KOBAYASHI, M. NOBRE, A. D. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: Uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros: Ciência e tecnologia**. v. 18, n. 2, p.92-99, 2008.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e tecnologia**. Artliber Editora: São Paulo. 2011, 329 p. ISBN: 978-85-88098-63-3.

MARQUES, M. de S. **Obtenção e caracterização de um compósito polimérico de matriz poliéster e reforço/carga de tecido plano de algodão**. 2016. 135 f. Tese

(Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MASUELLI, M. A. Introduction of fibre-reinforced polymers – polymers and composites: Concepts, properties and processes. **Intech Open Science**. 2013.

MEDINA, H. V.; NAVEIRO, R. M. Materiais avançados: Novos produtos e novos processos na indústria automobilística. **Belo Horizonte**, v. 8, n. 1, p. 29-44, 1998.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compósitos e estruturas sanduíche: Projeto e análise**. Editora Manole: Santana da Parnaíba, 2003, 656 p. 28 cm. Inclui índice. ISBN:978-85-204-1882-6.

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

MERLINI, C.; SOLDI, V.; BARRA, G. M. Influence of fiber surface treatment and length on physico-chemical properties of short random banana fiber-reinforced castor oil polyurethane composites. **Polymer Testing**, v.30, n.8, p. 833-840, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.08.008>

MERLINI, C. **Análise experimental de compósitos de poliuretano derivado de óleo de mamona e fibras de bananeira**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MOREIRA, M. H. P. **Elastômeros termoplásticos de EPDM/PP: Uso do enxofre e caulim na vulcanização dinâmica**. 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

NASCIMENTO, D. C. O. **Análise das propriedades de compósitos de fibras de piaçava e matriz de resina epóxi**. 2009. 137 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

NASSEH, J. Barcos – Métodos avançados de construção de compósitos. Rio de Janeiro: [s.n.], 2007.

NAVARRO, R. F. A evolução dos materiais. Parte 1: da Pré-história ao início da Era Moderna. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.1, 2006. ISSN: 1809-8797. Disponível em: <http://www.dema.ufcg.edu.br/revista>. Acesso em jun. 2023.

NEGRÃO, A. G. **Painel compósito de fibra de folha de abacaxizeiro e resina vegetal para uso na arquitetura**. 2018. 145 f. Tese (Doutorado Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

NEGRÃO, A. G.; PINTO, E. M.; SILVA, L. B. da. Material compósito de fibra da folha do abacaxizeiro (*Ananascomosus*) para uso no ambiente construído. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 627-645, 2020. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000300459>

NÓBREGA, M. S. **Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá *Neoglaziovia variegata*: Caracterização mecânica e sorção de água**. 2007. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

OLIVEIRA, L. C. S. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz de resina de poliéster e resíduos de madeira produzidos em marcenarias**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

PANTHAPULAKKAL, S.; LAW, S.; SAIN, M.: Enhancement of processability of rice-husk filled high-density polyethylene profiles – **Journal of Thermoplastic composite Materials**, v.18, n.5, p. 445-458, 2005.

PAUL, S. A.; BOUDENNE, A.; IBOS, L.; CANDAU, Y.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.39, n.9, pp.1582-1588, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.06.004>

PAUL, V.; KANNY, K.; REDHI, G. G. Mechanical, thermal and morphological properties of a bio-based composite derived from banana plant source. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.68, pp. 90-100, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.032>

PARDINI, L. C. LEVY NETO, F. **Compósitos estruturados: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. 2006, 336 p. 24 cm. Inclui índice. ISBN 85-212-0397-7

PEREIRA, A. C. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras de tecido de fique**. 2016. 67 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Exército Brasileiro, Rio de Janeiro.

PEREIRA, G. S. **Introdução à tecnologia têxtil**. Apostila – Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Araranguá, 2008.

PINTO, A. R. A. G. **Fibra de curauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.

POLYMER DATABASE. **Synthetic polymer fibers**. 2019. Disponível em: <https://polymerdatabase.com/Fibers/Fibers.html>. Acesso em: jan. 2023.

PRODUÇÃO AGRÍCOLA. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, 2022. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/>. Acesso em: set de 2022.

RAZERA, I. A. T. Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica. 2006. 189f. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2006.

RÊGO, J. S., SOARES, N. S., LYRIO, M. M. P. Geração de resíduos sólidos na produção brasileira e internacional de celulose. **Ensaio sobre desenvolvimento econômico e políticas públicas: um olhar sobre a Bahia e o Brasil**. 2022. Disponível em: <http://books.google.com.br/html>. Acesso em: set de 2022.

REZENDE, M.C; COSTA, M.L; BOTELHO, E.C. **Compósitos Estruturais: Tecnologia e prática**. Artliber Editora Ltda: São Paulo. 2011, 396 p. Possui índice. ISBN:97-8858-0986-26

RONG, M. Z.; ZHANG, M. Q.; LIU, Y.; YANG, G. C.; ZENG, H. M. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisalreinforced epoxy composites. **Composites science and technology**, v.61, p. 1437-1447, 2001.

RWAWIIRE, S. TOMKOVA, B. MILITKY, J. et al. Acoustic and thermal properties of a cellulose nonwoven natural fabric (barcloth). **Applied Acoustics**, v. 116, 2017, p.177-183. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.027>

SANCHEZ, E. M. S. et al. Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: Influência do tratamento das fibras nas propriedades. **Polímeros**, vol. 20, n. 3, 2010, p. 194-200.

SANTOS, A. C. L. et al. Efeito dos tratamentos superficiais na fibra de bananeira proveniente do Estado da Bahia. **Anais 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Joinville, v.1, p. 3261-3268, 2012 (a)

SANTOS, F. R. dos. **Desenvolvimento e aplicação de compósitos à base de matriz polimérica reforçado com fibras de curauá (*Ananás erectifolius*) e resíduos de madeiras amazônicas**. 2013. Dissertação (Mestrado). – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus:

SAPUAN, S. M., HARUN, N., ABBAS, K. A. Design and fabrication of a multipurpose table using a composite of epoxy and banana pseudostem fibres. **Journal of Tropical Agriculture**, v.45, n.1, pp. 66-68, 2008

SABEEL AHMED, K.; VIJAYARANGAN, S.; NAIDU, A. C. B. Elastic properties, notched strength and fracture criterion in untreated woven jute–glass fabric reinforced polyester hybrid composites.. **Materials e Design**, v. 28, issue 8, p. 2287-2294., 2007. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.08.002>

SERCEL – Soluções em fibras. <http://www.sercel.com.br/blog/resina-poliester.html> maio 2018, acesso em 04 de fev. 2023.

SHACKELFORD, J. F. **Materials Science for Engineers**. 8.ed. Peason Prentice Hall: New Jersey/USA, 2014. 696 p. 26 cm. Possui índice. 978-01338-2665-4

SILAEX QUÍMICA LTDA, 2022. Disponível em: [http //silaex.ind.br/resina-poliester](http://silaex.ind.br/resina-poliester). Acesso em: set. 2022. Clóvis Sakamoto: **Resina Poliéster Insaturado**

SILVA, C. C. **Influência da umidade nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos híbridos (sisal/vidro)**. 2012. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SILVA, F. S. **Utilização da malha entrecruzada da fibra de bananeira como reforço na laminação de rochas ornamentais artificiais e naturais**. 2020. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goitacazes.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretana derivada de óleo de mamona e fibra vegetais**. 2003. 157 p. Dissertação (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, R. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, N 3, 2009, p. 661-671.

SILVA, C. C.; CUNHA, R. A. D; FELIPE, R. C. T. S.; FELIPE, R. N. B. 2009. Desenvolvimento de tecidos de sisal para utilização em compósitos poliméricos. **Holos**, v. 4, p. 12-19, <https://doi.org/10.15628/holos.2009.340>.

SILVA, L. J. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais**. 2011. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei.

SOUZA, L. G. V. M. de. **Efeitos da adição de tecido de fibra de vidro tipo E a um compósito de resina poliéster e tecido de fibra de algodão**. 2019. 130f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SOUZA, G. N. S.; SELOS, P. P.; DE MOURA, T. R. C.; COSTA, W. O.; CARVALHO, F. A. Substituição da fibra de vidro por fibra de bananeira em compósitos. **ÚNICA Cadernos Acadêmicos**, v.2, n.1, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/S0104-14282013005000010>

SOUZA, N. F. Caracterização das fibras da prensagem do mesocarpo do dedê para posterior utilização em nanomateriais. In: **Congresso norte-nordeste de pesquisa e inovação**, 5, 2010, Maceió. Anais. Maceió: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2010.

TRIPATHI, N.; TRIPATHI, N.; HILLS, C. D.; SINGH, R. S.; ATKINSON, C. J. Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. *Nature*, n.p. **Climate and Atmospheric Science**, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, UNEP. Converting waste agricultural biomass into a resource. **United Nations Environment Programme Division of Technology**, Industry and Economics International Environmental Technology Centre, Osaka/Shiga, 2009. Disponível em: <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7614>. Acesso em: jun. de 2023.

VENTURA, A. M. F. M. Os compósitos e s sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v.21, n. 3/4, pag. 10-19, 2009.

VENKATESHWARAN, N.; ELAYAPERUMAL A.; JAGATHEESHWARAN M.S. Effect of fiber length and fiber content on mechanical properties of banana fiber/epoxy composite. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.30, pp. 1621, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684411426810>

VENKATESHWARAN, N.; ELAYAPERUMAL, A. Hole quality evaluation of natural fiber composite using image analysis technique. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.32, n.16, p.1188-1197, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684413486847>

VENKATESHWARAN, N.; PERUMAL, A. E.; ARUSUNDARANAYAGAM, D. Fiber surface treatment and its effect on mechanical and visco-elastic behavior of banana/epoxy composite. **Materials & Design**, v.47, pp.151-159, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.001>

WIWBECK, H., HARADA, J. **Plásticos de engenharia**. Artliber: São Paulo. 2005. 349 p. ISSN: 858809827X.

ZHU, Y.; ROMAIN, C.; WILLIAMS, C. K. Sustainable polymers from renewable resources. **Nature**, v. 540(7633), p. 354-362, 2016.