



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**



CARLOS HENRIQUE GONÇALVES CAMPBELL

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO COM
FIBRA DE BANANEIRA PARA APLICAÇÃO EM AEROMODELOS.**

VOLTA REDONDA

2020

CARLOS HENRIQUE GONÇALVES CAMPBELL

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO COM
FIBRA DE BANANEIRA PARA APLICAÇÃO EM AEROMODELOS.**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em
Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda –
UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do
título de Mestre em Materiais, na área de
concentração de processamento e caracterização de
materiais poliméricos e linha de pesquisa em materiais
compósitos com fibras naturais e resinas poliméricas.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro

VOLTA REDONDA

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

C189d Campbell, Carlos Henrique Gonçalves
Desenvolvimento e caracterização de compósito com fibra de
bananeira para aplicação em aeromodelos. / Carlos Henrique
Gonçalves Campbell. - Volta Redonda: UniFOA, 2020. 144 p.: Il

Orientador (a): Alexandre de Alvarenga Palmeira

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em
Materiais, 2020

1. Materiais - dissertação. 2. Compósitos. 3. Fibras naturais. 4. Bananeira. 5. Aeromodelo. I. Palmeira, Alexandre de Alvarenga. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



CARLOS HENRIQUE GONÇALVES CAMPBELL

Desenvolvimento e caracterização de compósito com fibra de bananeira para aplicação em aerodelos

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
"MESTRE EM MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM MATERIAIS

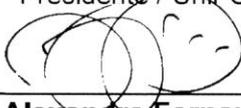


Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira
Presidente / UniFOA



Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe
Examinador interno / UniFOA



Profa. Dra. Daniella Regina Mulinari
Examinador externo / UERJ

Dezembro de 2020.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a minha esposa, e aos meus filhos, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia chegar a bom porto sem o precioso apoio de várias pessoas.

Agradeço primeiramente a minha esposa Maria Ângela e aos meus filhos Thalita, Igor e Victor pela grande motivação e apoio nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Professor Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira, por toda a paciência, empenho e sentido prático com que sempre me orientou neste trabalho e em todos aqueles que eu realizei durante os seminários do mestrado.

Ao coordenador do MEMAT Professor. Dr. Roberto de Oliveira Magnago, por me dar forças na continuidade deste trabalho e pela disponibilidade de acesso.

Ao Professor Dr. Sérgio Roberto Montoro e a Professora Dr. Cirlene Fourquet Bandeira, pelo suporte técnico e incentivo no desenvolvimento deste projeto.

Ao Professor Dr. Alexandre Fernandes Habibe, pelo apoio incondicional a minha persistência e dedicação.

Ao Engenheiro Claudio Alvares Menchise, por seu apoio, companheirismo e suporte técnico ao disponibilizar as instalações e os laboratórios da Faculdade Sul Fluminense – Fasf,

As colegas Mayara Lisboa e Vanusa Tubbs, pelo apoio e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

A Engenheira Marlina Schaefer Dornellas pelo incentivo, apoio logístico e fornecimento de matéria prima para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos profissionais de laboratório da UNIFOA, Luciano e Dirceu, pelo seu profissionalismo e disponibilidade para auxiliar nos ensaios de laboratório.

A Pedagoga Ana Maria Oliveira de Carvalho e Isabela Teixeira Domingos da Secretaria do MEMAT, pelo apoio incondicional.

*“Saber não é o bastante, é preciso aplicar.
Querer não é o bastante, é preciso fazer”.*

Albert Einstein

CAMPBELL, C. H. **Desenvolvimento e Caracterização de Compósito com Fibra de Bananeira para Aplicação em Aeromodelos**. 2020. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2020.

RESUMO

O presente trabalho buscou desenvolver e caracterizar um compósito reforçado com fibras de bananeira e resina epóxi para aplicar na fabricação de aeromodelos. A fibra de bananeira apresenta propriedades importantes como: baixa massa específica, estrutura homogênea e porosa que permitem a fácil impregnação de polímeros na forma líquida, agregando resistência mecânica à resina polimérica. Com este propósito, foram desenvolvidos compósitos usando a resina epóxi como matriz polimérica e três formas de fibras de bananeira (aleatórias, trituradas e longas unilaterais) como reforço. Os resultados dos ensaios dos compósitos mostraram que a tensão de ruptura aumentou proporcionalmente ao percentual de fibra, alcançando valores máximos com 30% de fibras aleatórias e trituradas, e 40% para fibras longas unilaterais. No compósito com fibras aleatórias o ensaio de tração alcançou 33,35 (MPa) e o de flexão 36,87 (MPa), para as fibras trituradas obteve-se 43,89 (MPa) de tração e 54,38 (MPa) de flexão, já para as fibras longas o limite máximo de resistência a tração alcançou 54,25 (MPa) e 97,50 (Mpa) para flexão.. Nas análises morfológicas as imagens do (MEV) mostraram que as fibras tratadas com NaOH apresentaram paredes celulares externas mais porosas devido à mudança na morfologia da superfície das fibras tratadas, facilitando a impregnação da resina epóxi. O compósito com fibras longas unilaterais apresentou o melhor resultado de tração e flexão devido ao alinhamento das fibras na direção dos esforços atuantes, otimizando seu desempenho mecânico, enquanto o compósito com fibras trituradas apresentou o melhor resultado de dureza, já o compósito com manta de fibras aleatórias apresentou ótima homogeneidade e acabamento superficial, sendo os três tipos de organização de fibras indicados para diferentes aplicações. Os resultados mostraram que a leveza e resistência dos compósitos estudados, tornaram a sua utilização possível para a confecção das peças estruturais e revestimento do aeromodelo, Indicando uma alternativa mais sustentável para manufatura desses aviões.

Palavras-chave: compósitos, fibras naturais, bananeira, epóxi, aeromodelo.

CAMPBELL, C, H. **Development and Characterization of Banana Fiber Composite for Application in Model Airplanes**. 2020. Dissertation (Professional Master of Material) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2020.

ABSTRACT

The present work sought to develop and characterize a composite reinforced with banana fibers and epoxy resin to apply in model airplanes' manufacture. Banana fiber has important properties such as low specific mass, homogeneous and porous structure that allows easy impregnation of polymers in liquid form, adding mechanical resistance to the polymeric resin. For this purpose, composites were developed using an epoxy resin as a polymeric matrix and three different banana fiber organizations (random, crushed, and long) as reinforcement. The results of composite tests showed that the tensile strength increases proportionally to the percentage of fiber, reaching maximum values with 30% of random and crushed fibers, and 40% for long unilateral fibers. In the composite with random fibers the tensile test reached 33.35 (MPa) and the flexion test 36.87 (MPa), for crushed fibers 43.89 (MPa) of tension and 54.38 (MPa) of flexion were obtained. For long fibers the maximum limit of tensile strength reached 54.25 (MPa) and 97.50 (MPa) for flexion. For the morphological analyzes the images of the (SEM) showed that the fibers treated with NaOH presented more porous external cell walls due to the change in the surface morphology of the treated fibers, helping the epoxy resin's impregnation. The composite with unilateral long fibers showed the best result of traction and flexion due to the alignment of the fibers in the direction of the acting efforts, optimizing their mechanical performance, while the composite with crushed fibers presented the best result of hardness, whereas the composite with random fiber mat samples showed excellent homogeneity and finish surface, the three types of fiber organization being indicated for different applications. The results showed that the lightness and resistance of the studied composites, made their use possible for the manufacture of structural parts and coating of the model aircraft, indicating a more sustainable alternative for the manufacture of these planes.

Keyword: composites, natural fibers, banana, epoxy, model airplane

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição química das fibras vegetais.	27
Figura 2 – Trópicos úmidos.	30
Figura 3 – Corte esquemático de uma touceira de bananeira e sua formação inicial.	31
Figura 4 – Cacho de bananeira e Característica morfológica - <i>Musa acuminata</i>	32
Figura 5 – Partes da bananeira.	33
Figura 6 – A: Fibras longas de bananeira após secagem, B: Fibras de bananeira trituradas.	35
Figura 7 – MEV 400x: A- Sem tratamento alcalino, B- Com tratamento de NaOH.	35
Figura 8 – A: Pseudocaule; B: Fibras penduradas para secar; C: Fibras aleatórias de bananeira; D- Artesanato com fibra de bananeira prensada.	37
Figura 9 – Fórmula do Epóxi Bisfenol-A.	39
Figura 10 – Fórmula do Epóxi Novolaca.	40
Figura 11 – Fórmula do Epóxi Cíclicas Alifáticas.	40
Figura 12 – Fórmula do Epóxi Bromadas.	41
Figura 13 – Representação de diferentes tipos de reforço com fibras.	45
Figura 14 – Resistência a Tração de fibras de bananeira.	47
Figura 15 – Desenho esquemático do ensaio de flexão de três pontos.	49
Figura 16 – Curvas típicas de um ensaio de três pontos.	50
Figura 17 – Interação de fatores que modificam os resultados dos ensaios de flexão.	51
Figura 18 – Análise química de uma fibra de bananeira in natura.	54
Figura 19 – Série de fibras de bananeira em corte longitudinal.	54
Figura 20 – Fibra de Bananeira levemente torcida.	55
Figura 21 – A- Fibras tratadas com ar ionizante; B- Tratadas com NaOH.	56
Figura 22 – Compósito fenólico reforçado com fibras de bananeira evidenciado a interface matriz/fibra após ensaio de impacto.	56
Figura 23 – Imagem das fibras de bananeira obtida pela microscopia ótica.	57
Figura 24 – Fluxograma das etapas do trabalho.	58
Figura 25 – Resina Epóxi 2004-BB e Endurecedor Aradur 3154.	59

Figura 26 – Fórmula do Epóxi Bisfenol-A.	60
Figura 27 – A: Espécie Musa Acuminata; B: Pseudocaule; C: Fibra de Bananeira.	60
Figura 28 – Borracha de silicone e catalisador.	61
Figura 29 – Vaselina solida em pasta Industrial – Moriá.	61
Figura 30 – Fluxograma com a rota de beneficiamento da fibra de bananeira.	63
Figura 31 – A: Pseudocaule, B: Cortes longitudinais, C: Corte das talas em bainhas.....	64
Figura 32 – Bainhas imersas em solução de água destilada e ácido acético.	64
Figura 33 – Bainhas imersas no caldeirão, B- Cozimento com H ₂ O, C- Separação.	65
Figura 34 – A- Adição água filtrada, B- Agitação com NaOH, C- Fervura da mistura.	65
Figura 35 – Massa de fibra pronta para ser clareada.	66
Figura 36 – A: Fibra antes do tratamento e B: Após o tratamento com NaOH.	67
Figura 37 – A - Massa fibrosa antes e B - após o Branqueamento.	67
Figura 38 – Moldagem da manta de fibra sobre a peneira.	68
Figura 39 – Manta colocada sobre mesa lisa com uma placa superior.	68
Figura 40 – A- Aspecto da manta após a primeira prensagem; B- Prensa mecânica; C- aspecto da manta após a segunda prensagem.	69
Figura 41 – Forma para a preparação dos moldes.....	69
Figura 42 – Preparação dos moldes dos corpos de prova.	70
Figura 43 – Molde de borracha de silicone ainda na fase liquida.	71
Figura 44 – Moldes de silicone para CPs de tração e flexão.	71
Figura 45 – Resina epóxi; B - Endurecedor; C- Mistura dos componentes.	72
Figura 46 – A- Preparo dos CPs de flexão; B – Preparo dos CPs de tração; C- CPs em fase de cura.....	72
Figura 47 – A- Desmoldando os CPs de flexão, B- Desmoldando os CPs de tração, C- CP's de flexão e tração prontos para os ensaios.	73
Figura 48 – A - Recorte da manta; B-Pesagem.....	73
Figura 49 – Preparação da resina: A – Resina Epóxi 100 ml, B – Endurecedor 50 ml.	74
Figura 50 – A- Resina no bowl, B- Adição do endurecedor, C- Mistura.....	74

Figura 51 – A - Inserção da resina nos moldes; B – Sobreposição das mantas de fibra de bananeira; C- Corpos de prova prontos para os ensaios mecânicos.	75
Figura 52 – Corpos de prova do compósito com manta de fibras aleatórias.	75
Figura 53 – Estufa de circulação de ar para secagem.	76
Figura 54 – A – Fibra de bananeira picada, B – Moinho de facas, C – Fibras de bananeira tritura e D – Fibra de bananeira peneirada.	77
Figura 55 – A vista frontal; 47- B Vista de topo.	78
Figura 56 – A: Adição da resina epóxi pura na fibra triturada; B: Mistura da resina epóxi pura com as fibras trituradas.	78
Figura 57 – A: Adição do endurecedor na fibra impregnada pela resina; B: Mistura dos componentes.	78
Figura 58 – Preenchimento dos moldes com fibras trituradas e resina epóxi.	79
Figura 59 – CP's em fase de cura; A- Com 10% de fibra; B- Com 20% de fibra; C- Com 30% de fibra e D- Com 40% de fibra.	79
Figura 60 – Corpos de prova de compósitos com fibras trituradas.	80
Figura 61 – A: Corte transversal do pseudocaulo; B: Corte longitudinal (1- bainhas foliares e 2- talo floral).	80
Figura 62 – A: Pseudocaulo; B: Corte Longitudinal; C: Bainhas.	81
Figura 63 – Obtenção das fibras longas: A: Bainhas dispostas sobre a mesa para a extração das camadas; B: Desdobramento das bainhas foliares; C: Região interna extraída das bainha foliares.	81
Figura 64 – Extração da fibras longas longitudinais.	82
Figura 65 – A: Fibras longas tratadas e secas; B: Fibras longas fixadas em armação de metal; C: Fibras longas preparadas para a impregnação com resina epóxi.	83
Figura 66 – Preparação do compósito com 30% de fibras longas e unilaterais.	84
Figura 67 – Placa do compósito marcada para corte no formato dos CPs.	84
Figura 68 – Corte da placa no formato dos CPs para ensaio de tração.	85
Figura 69 – Corte da placa no formato dos CPs para ensaio de flexão.	85
Figura 70 – Corpos de prova do compósito de resina epóxi com fibras longas.	86
Figura 71 – Corpos de prova com os três tipos de fibra, prontos para os ensaios.	87
Figura 72 – A: Durômetro; B: Ensaio de dureza.	88
Figura 73 – A: Máquina universal, B- Célula de carga, C- Mandril ou garra.	89

Figura 74 – Imagens de um ensaio de tração até o rompimento do CP.....	89
Figura 75 – Máquina de Ensaio EMIC DL-10000: A– Apoios. B– Cutelo de aplicação de força. C– Célula de Carga de 5 KN.	90
Figura 76 – Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de flexão.	90
Figura 77 – Indicação das regiões dos corpos de prova que foram analisados. .	91
Figura 78 – Pastilhas de acrílico com as amostras.	92
Figura 79 – Politriz AROTEC.....	92
Figura 80 – Microscópio ótico OPTON TNM – 07T – PL.....	93
Figura 81 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV - ZEISS EVO-10).	94
Figura 82 – Indicação das regiões onde foram retiradas as amostras para a análise no MEV.....	94
Figura 83 – Amostras de resina epóxi pura, resina epóxi com fibras aleatórias, trituradas e longas.....	95
Figura 84 – Máquina EMITECH de Pulverização de Partículas de Ouro.....	96
Figura 85 – Amostra preparada para a análise no MEV.....	96
Figura 86 – Gráfico com a curva de tendência dos ensaios de dureza versus percentual de fibra aleatória no compósito.....	98
Figura 87 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de tração versus percentual de fibra aleatória no compósito.	99
Figura 88 – A - Resina pura, B - Resina com 30% de fibras aleatórias no compósito.	100
Figura 89 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de flexão versus percentual de fibra aleatória no compósito.....	101
Figura 90 – Flexão: A- Resina pura; B- 30% de fibras aleatórias no compósito.	102
Figura 91 – Gráfico com a sobreposição das curvas de dureza, tração e flexão dos compósitos com manta de fibras aleatórias e resina epóxi.	104
Figura 92 – Gráfico com os resultados dos ensaios de dureza (Shore D) dos CPs de fibra de bananeira triturada com resina epóxi.	105
Figura 93 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de tração para cada percentual de fibra triturada.....	106
Figura 94 – A – Resina epóxi pura, B - 30% de fibras trituradas e resina epóxi.	107

Figura 95 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de flexão, em percentagem de fibras trituradas com resina epóxi.	109
Figura 96 – Flexão: A- Resina pura, B - 30% de fibras trituradas no compósito.	110
Figura 97 – Gráfico com a sobreposição das curvas de dureza, tração e flexão dos compósitos com fibras trituradas e resina epóxi.....	111
Figura 98 – Gráfico com os resultados dos ensaios de dureza (Shore D) dos CPs com fibras longas alinhadas e resina epóxi.....	113
Figura 99 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de tração para cada tipo de percentual de fibras longas.	114
Figura 100 – A - Resina epóxi pura, B - 40% de fibras longas e resina epóxi...	115
Figura 101 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de flexão para cada tipo de percentagem de fibras longas.	117
Figura 102 – A- Resina epóxi pura, B - 40% de fibras longas e resina epóxi...	118
Figura 103 – Gráfico de comparação dos resultados de dureza, tração e flexão dos compósitos com fibras longas unilaterais e resina epóxi.....	119
Figura 104 – Corte transversal, fibras aleatórias. I- Ampliação de 100 vezes. II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.	120
Figura 105 – Corte longitudinal, fibras aleatórias. I- Ampliação de 100 vezes. II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.	121
Figura 106 – Corte transversal, fibras trituradas; I- Ampliação de 100 vezes; II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.	121
Figura 107 – Corte longitudinal, fibras trituradas. I- Ampliação de 100 vezes; II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.	122
Figura 108 – Corte transversal, fibras longas. I- Ampliação de 100 vezes. II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.	122
Figura 109 – Corte longitudinal, fibras longas. I- Ampliação de 100 vezes. II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.	123
Figura 110 – Imagem com ampliação de 150 e 450 vezes.	124
Figura 111 – A Ampliação de 150 vezes; B - Ampliação de 450 vezes.....	124
Figura 112 – A: Ampliação de 150 vezes; B: Ampliação de 450 vezes.....	125
Figura 113 – Corte Longitudinal Ampliação de 150 vezes.....	126
Figura 114 – A esquerda ampliação de 150 vezes e a direita ampliação de 450	126

Figura 115 – Protótipo com compósito com manta de fibra aleatória de bananeira.	129
Figura 116 – Compósito com fibra de bananeira triturada e resina epóxi.....	130
Figura 117 – Compósito com fibras de bananeira longas unilaterais e resina epóxi.	130
Figura 118 – Desenvolvimento da parte inferior da asa composta de fibras longas alinhadas e resina epóxi.....	131
Figura 119 – Asa carregada com carga três vezes maior que o peso do corpo do aeromodelo.	132
Figura 120 – Moldes de borracha de silicone e as nervuras das asas e as longarinas da fuselagem já desmoldadas.	132
Figura 121 – Nervuras e longarinas da asa feitas com fibras trituradas e resina epóxi já montada sobre a parte inferior da asa.	133
Figura 122 – Revestimento da asa e da fuselagem do aeromodelo com manta de fibra aleatória e resina epóxi.	133
Figura 123 – Conclusão do revestimento da asa e do corpo do aeromodelo....	134
Figura 124 – A- Peso do aeromodelo com motor 0,439 Kg; B- Carga a ser aplicada 4,050 Kg.....	135
Figura 125 – A: Asa sem a carga - B: Asa suportando a carga de 4,050 Kg.....	135
Figura 126 – Aeromodelo completo com todos os corpos de prova dos compósitos que lhe deram origem.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades estruturais de fibras lignocelulósicas.	28
Tabela 2 – Composição de alguns compósitos celulósicos.	29
Tabela 3 – Classificação taxonômica.....	32
Tabela 4 – Resinas e algumas características mecânicas.....	42
Tabela 5 – Apresentação de dados relevantes da resina epóxi.....	43
Tabela 6 – Resistência à tração das fibras de bananeira.	48
Tabela 7 – Composição do compósito de Resina epóxi e Fibra de bananeira triturada.	77
Tabela 8 – Ensaio de dureza (Shore D) dos CPs de manta de fibras aleatórias de bananeira com resina epóxi.	97
Tabela 9 – Ensaio de tração com manta de fibra aleatória e resina epóxi.	99
Tabela 10 – Ensaio de flexão dos CPs de fibras aleatórias com resina epóxi.	101
Tabela 11 – Valores médios dos ensaios de: dureza, tração e flexão para os corpos de prova com fibras aleatórias.	103
Tabela 12 – Ensaio de dureza (Shore D) dos CPs de fibra de bananeira triturada com resina epóxi.	105
Tabela 13 – Ensaio de tração com fibras trituradas e resina epóxi.	106
Tabela 14 – Ensaio de flexão dos CPs de fibras trituradas com resina epóxi.	108
Tabela 15 – Valores médios: dureza, tração e flexão.	111
Tabela 16 – Ensaio de dureza (Shore D) dos CPs com fibras longas unilaterais e resina epóxi.....	112
Tabela 17 – Ensaio de tração dos CP's com fibras longas e resina epóxi.	114
Tabela 18 – Ensaio de flexão dos CPs de fibras longas unilaterais e resina epóxi.	116
Tabela 19 – Valores médios: dureza, tração e flexão.	119
Tabela 20 – Tabela comparativa entre o compósito desenvolvido neste trabalho e outros compósitos da literatura com fibra de bananeira.	128
Tabela 21 – Comparação entre os três tipos de compósitos de fibra de bananeira desenvolvidos neste trabalho.	129
Tabela 22 – Dimensões geométricas do aeromodelo.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
JSP	Java <i>Server Pages</i> (Páginas do Servidor Java)
MeMat	Mestrado Profissional em Materiais
SQL	<i>Structured Query Language</i> (Linguagem de Consulta Estruturada)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
1.2 OBJETIVOS.....	23
1.2.1 Objetivo geral	23
1.2.2 Objetivo específico	24
1.3 JUSTIFICATIVA.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 FIBRAS DE VEGETAIS.....	26
2.2 ESPÉCIE MUSA ACUMINATA.....	29
2.3 UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE BANANEIRA.....	33
2.4 SUSTENTABILIDADE.....	36
2.5 UTILIZAÇÃO DE RESINA EPÓXI.....	38
2.6 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS.....	44
2.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	46
2.7.1 Ensaio de Tração	47
2.7.2 Ensaio de Flexão	48
2.7.3 Ensaio de dureza	51
2.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	53
2.9 MICROSCOPIA ÓTICA	56
3. MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 MATERIAIS.....	59
3.1.1 Resina epóxi	59
3.1.2 Fibra de bananeira	60

3.1.3 Moldes para confecção dos corpos de prova	60
3.1.4 Desmoldante	61
3.2 MÉTODOS	61
3.2.1 Preparo do compósito e fabricação dos corpos de prova	62
3.2.2 Extração e preparo da manta de fibras aleatórias de bananeira	62
3.2.3.1 Branqueamento das fibras	67
3.2.3.2 Preparação da manta de fibras aleatórias de bananeira	68
3.2.3 Preparo dos moldes para a confecção dos corpos de prova	69
3.2.3.1 Preparo do corpo de prova com Resina Epóxi sem reforço	71
3.2.3.2 Preparo do compósito com manta de fibras de bananeira e resina epóxi. ...	73
3.2.5 Preparo do compósito com fibras de bananeira trituradas e resina epóxi.....	76
3.2.6 Preparo do compósito com fibras de bananeira longas e resina epóxi	80
3.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	86
3.3.1 Ensaio de dureza	87
3.3.2 Ensaio de tração	88
3.3.3 Ensaio de Flexão.....	89
3.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	91
3.4.1 Microscopia ótica.....	91
3.4.2 Microscopia eletrônica de varredura	93
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	97
4.1 ENSAIOS MECÂNICOS	97
4.1.1 Ensaio mecânicos dos compósitos com manta de fibras aleatórias e resina epóxi.	97

4.1.1.1	Ensaio de dureza dos compósitos com manta de fibras aleatórias e resina epóxi.....	97
4.1.1.2	Ensaio de tração dos compósitos com manta de fibras aleatórias e resina epóxi.....	98
4.1.1.3	Ensaio de flexão dos CP's de fibras aleatórias de bananeira e resina epóxi.....	101
4.1.1.4	Curvas de tendência dos ensaios de dureza, tração e flexão para fibras aleatórias.....	103
4.1.2	Ensaio mecânico dos compósitos com fibras trituradas e epóxi	105
4.1.2.1	Ensaio de dureza dos CP's de fibras de bananeira trituradas e resina epóxi.....	105
4.1.2.2	Ensaio de tração dos CPs de fibras de bananeira trituradas e resina epóxi.....	106
4.1.2.3	Ensaio de flexão dos CP's de fibras de bananeira trituradas e resina epóxi.....	108
4.1.2.4	Curvas de tendência dos ensaios de dureza, tração e flexão para fibras trituradas e resina epóxi.	110
4.1.3	Ensaio mecânico dos compósitos com fibras longas e resina epóxi	112
4.1.3.1	Ensaio de dureza dos CP's de com fibras longas unilaterais e resina epóxi.....	112
4.1.3.2	Ensaio de tração	113
4.1.3.3	Ensaio de flexão dos CP's de fibras longas unilaterais e resina epóxi.	116
4.1.3.4	Curvas de tendência dos ensaios de dureza, tração e flexão para fibras longas unilaterais.	118
4.2	MICROSCOPIA ÓTICA.....	120
4.2.1	Microscopia ótica dos compósitos com fibras aleatórias e resina epóxi.....	120

4.2.2 Microscopia ótica dos compósitos com fibras trituradas e resina epóxi.....	121
4.2.3 Microscopia ótica dos compósitos com fibras longas e resina epóxi...122	122
4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	123
4.3.1 MEV da resina pura.....	123
4.3.2 MEV do compósito com fibras aleatórias e resina epóxi	124
4.3.3 MEV do compósito com fibras trituradas e resina epóxi	125
4.3.4 MEV do compósito com de fibras longas unilaterais e resina epóxi.	125
4.3.4.1 Análise microestrutural de um corte longitudinal.	125
4.3.4.2 Análise da microestrutura de um corte transversal.....	126
4.4 PROTÓTIPOS DESENVOLVIDOS	127
4.4.1 Aplicações práticas	130
5. CONCLUSÃO	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas duas décadas houve um grande desenvolvimento de materiais compósitos constituídos de fibras e resinas para usos estruturais, esse progresso se deu pela possibilidade de substituir materiais como aço e madeira, por possuírem excelentes propriedades mecânicas e baixa densidade. Agentes de reforços, na forma de fibras, têm sido utilizados em compósitos para aprimorar algumas propriedades mecânicas e térmicas. As propriedades dos materiais compósitos fibrosos são fortemente dependentes das propriedades da fibra, bem como de seus parâmetros microestruturais como o diâmetro, comprimento, distribuição e arranjo das fibras na matriz (NERY, 2018).

As fibras naturais têm conquistado a atenção da comunidade científica e industrial como alternativa às inorgânicas, apresentando vantagens devido à grande abundância na natureza por serem provenientes de fontes renováveis, além de serem biodegradáveis, economicamente acessíveis e provocarem menor impacto ambiental. Essas fibras apresentam início de degradação entre 200-220°C, sendo adequadas para reforçar polímeros que sejam processados até essa temperatura, como o polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC) e polietilenos de baixa densidade (LDPE) e resinas epóxi (BLEDZKI; FRANCISZCZAK; MELJON, 2015; LACERDA et al., 2014). Dentre as fibras vegetais mais usadas destacam-se as de sisal, côco, curuá, bambu, pinus e bananeira (GODOY, 2018).

Como contraponto, a fibra de vidro é o material mais utilizado para a criação de compósitos até o dado momento, devido ao fato de não ser inflamável, ter baixo custo e apresentar boa resistência mecânica (MIOTTO; DIAS, 2015; ZANG et al., 2015). Os avanços tecnológicos e econômicos conquistados através da descoberta deste material misto trouxeram muitos benefícios à população. Tais materiais são descartados no meio ambiente continuamente e de forma cada vez mais frequente desde a descoberta das fibras sintéticas. Esses rejeitos demoram muito para se decompor naturalmente e não podem ser incinerados por liberarem gases tóxicos (BLEDZKI; FRANCISZCZAK; MELJON, 2015; MIOTTO; DIAS, 2015).

É visível que o estudo e o investimento em materiais que possam substituir os sintéticos tornam-se cada vez mais importantes para que sejam desenvolvidas opções que contribuam para a segurança do meio ambiente, bem como para a sustentabilidade da saúde e vida humana (ALKBIR et al., 2016; ASIM et al., 2015).

A descoberta do potencial da fibra de bananeira como reforço no compósito polimérico surgiu a partir de uma experiência vivenciada em uma pequena fábrica de objetos artesanais, situada em São Bento do Sapucaí – SP. Os artesãos, que trabalhavam anteriormente apenas com a folha da bananeira para confecção de objetos artesanais, começaram a utilizar seu pseudocaule como matéria prima, cortando-o em tiras muito finas e cozinhando-as com sal grosso para formar uma liga aglutinante capaz de transformar a mistura em uma manta resistente e macia, para ser usada na confecção de objetos artesanais. Este material apresentava propriedades interessantes como: estrutura homogênea, moldabilidade e superfície porosa que sugeriam uma fácil impregnação de polímeros em forma de resina líquida (AGROARTE, 2019).

A aparente versatilidade da manta feita de fibra de bananeira somado à disponibilidade natural da planta, levou o interesse de aprofundamento no estudo desse material e guiou as experimentações contidas neste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

A tendência do mercado atual de adaptar-se ao uso de fibras naturais se tornou crescente devido à busca por matérias-primas provenientes de fontes renováveis que não causem danos ao meio ambiente e possam competir com os materiais tradicionais. Fundamentado nesta proposta e na facilidade de acesso à matéria prima, o presente trabalho buscou desenvolver e caracterizar compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de bananeira para a confecção de um aeromodelo.

1.2.2 Objetivo específico

Definir a rota de beneficiamento da fibra de bananeira;

Verificar as propriedades mecânicas do compósito estudado de acordo com a porcentagem de fibra na matriz epóxi e com os tipos de distribuição da fibra de bananeira no compósito, para que, em função disso, identificar melhores resultados de dureza e resistência à tração e à flexão.

1.3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de materiais ecologicamente responsáveis e a melhor adequação de suas aplicações, bem como de seus processos produtivos, são ferramentas fundamentais na busca de alternativas para minimizar os impactos ambientais causados pela indústria. O uso de matérias-primas de fontes renováveis vem sendo objeto de diversos estudos e pesquisas, devido ao seu potencial na substituição de derivados petroquímicos (ALKBIR et al., 2016; ASIM et al., 2015).

Por serem de origem vegetal, e por isso de fonte renovável, as fibras naturais apresentam baixo custo, são biodegradáveis, recicláveis, não tóxicas e podem ser incineradas (MIOTTO; DIAS, 2015; ZANG et al., 2015; ALKBIR et al., 2016). Além disto, geram um balanço energético atmosférico positivo, já que, durante o crescimento do vegetal, o gás carbônico do ambiente é retirado para produzir moléculas orgânicas que são utilizadas para sua formação e crescimento. O grande potencial brasileiro na produção de fibras naturais possibilita que o segmento industrial olhe com atenção para as vantagens do uso destes materiais. Estima-se que as plantações de bananeiras, no Brasil, sejam responsáveis pela ocupação de uma área de cerca de 500 mil hectares, sendo a segunda fruta mais cultivada no país (SEBRAE, 2007).

O tema dos materiais é complexo devido à quantidade e diversidade de materiais disponíveis, o estudo e a análise para a concepção de um compósito requer maior atenção para a investigação de suas características, levando em consideração as propriedades adequadas para cada tipo de aplicação (ALVES et al., 2011). Neste contexto, a fibra de carbono e fibra de vidro apresentam propriedades de resistência muito acima das exigidas para fabricação de aeromodelos. Levando em consideração

que durante o voo e principalmente em manobras acrobáticas, é comum ocorrerem acidentes com a queda dos aeromodelos, nem sempre possíveis de serem resgatados. É neste cenário que a fibra de carbono e de vidro, embora sejam mais resistentes, apresentam um alto impacto ambiental devido ao seu longo tempo de degradação (KERSTING; MARICCI; WIEBECK, 2012; ESPER, 2016)

Dessa forma, a exploração de novas fibras para reforço de compósitos vem também como uma opção para desenvolvimento de materiais alternativos mais adequados para usos específicos. Avaliando o ciclo de vida do produto, que envolve todos os processos durante sua produção, incluindo a extração das matérias-primas e passando por todas as fases intermediárias de processamento como manufatura, transporte, o uso e o descarte de resíduos (ASIM et al., 2015; FEI et al., 2016; MESDAGHINIA et al., 2015), as peças feitas com fibra de carbono e de vidro não se mostram como as mais adequadas para aplicação em aeromodelos, já que seu descarte é difícil de ser rastreado, além do alto custo/benefício que as fibras sintéticas apresentam para este emprego, especificamente. Sendo assim, a fibra de bananeira mostra-se potencialmente promissora para a fabricação das peças de aeromodelos, reforçando a importância do aprofundamento e da investigação das características técnicas do seu compósito como um caminho possível para a evolução e ampliação de seu uso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FIBRAS DE VEGETAIS

As fibras vegetais, também chamadas de fibras lignocelulósicas, apresentam células esclerenquimáticas, ou seja, células que compõem os tecidos de sustentação dos vegetais, caracterizados pela resistência e flexibilidade de suas paredes celulares (BALLESTEROS et al., 2019; BRITO DINIZ et al., 2021). Essas células são morfológicamente alongadas com comprimento igual a muitas vezes a largura (MEDINA, 2005).

As fibras vegetais são compostas principalmente por celulose, hemicelulose e lignina e são consideradas de grande importância comercial, pois podem ser utilizadas como reforço em compósitos na construção civil e em diversas áreas da indústria (BALLESTEROS et al., 2019; BRITO DINIZ et al., 2021). Em processos industriais, é relevante que se conheça a constituição dos materiais a serem utilizados, portanto, autores como Singh et al. (2014) realizaram estudos sobre a composição química das fibras vegetais e caracterizaram suas partes constituintes da seguinte forma:

- Celulose

A celulose é um componente homopolissacarídeo formado por unidades de β -Dglicoses que encontra-se ligeiramente unidas por ligações químicas β -1,4 glicosídicas. Sua estrutura é composta por hidroxilas e pode permitir a ocorrência de ligações químicas como de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares, além de interações entre as unidades de glicose, contribuindo para a formação de uma estrutura que apresenta alto grau de rigidez.

- Hemicelulose

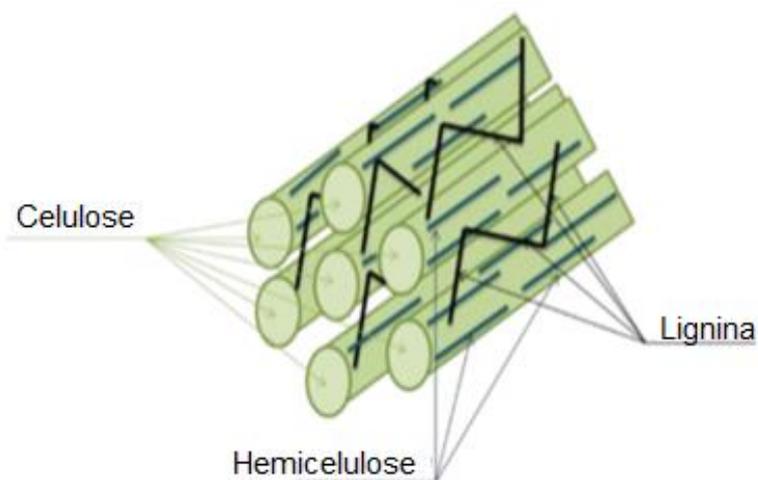
A Hemicelulose é um componente da classe heterogênea de polímeros que representa em geral 15-35 % da biomassa vegetal lignocelulósica. As unidades de açúcares consistem em cadeias compostas por quatro grupos principais, tais como as pentoses (xilose, arabinose), hexoses (manose, glicose, galactose), ácidos hexourônicos (ácido galacturônico, ácido metilgalacturônico e ácido glicurônico) e

desoxi-hexoses (fucose e ramnose). Destaca-se, que as hemiceluloses se encontram normalmente ligada aos outros componentes como celulose, proteínas e lignina através de ligações covalentes, de hidrogênio e por interações iônicas e hidrofóbicas.

- Lignina

A Lignina é um material que dá a rigidez e resistência às paredes celulares, representando 15-40 % em peso do material lignocelulósico. Na natureza, é considerado o biopolímero aromático encontrado em grande quantidade. A estrutura da lignina consiste em unidades de fenilpropano derivadas da polimerização oxidativa de três álcoois, álcool-trans-p cumarínico, álcool transconiferílico e álcool transsinapílico. A figura 1 mostra a composição química das fibras vegetais (GODOY, 2010).

Figura 1 – Composição química das fibras vegetais.



Fonte: GODOY (2010).

Com relação aos fatores correspondentes às propriedades químicas, as fibras vegetais são consideradas compósitos de fibras compostas por celulose mantidas por uma matriz constituída de lignina e hemicelulose, cuja função é agir como barreira natural à degradação microbiana e servir como proteção mecânica, suas características estruturais estão relacionadas à natureza da celulose e à sua cristalinidade (GODOY, 2010; ORTEGA et al., 2016).

As fibras vegetais quando comparadas às fibras sintéticas, apresentam vantagens ecológicas sendo biodegradáveis, renováveis, isto é, quando são incineradas liberam a mesma quantidade de dióxido de carbono consumida durante

seu desenvolvimento. Estas fibras apresentam vantagens em relação a fibra de vidro por serem mais leves e mais econômicas, considerando que sua produção requer pouca energia (ALKBIR et al., 2016; BRITO DINIZ et al., 2021; SENGUPTA et al., 2020).

A fibra retirada do seu pseudocaule da bananeira é do tipo lignocelulósica, cujas propriedades estruturais comparadas com as fibras de coco, cana de açúcar, palha de trigo e palha de arroz (ORTEGA et al., 2016; VENKATESHWARAN, 2011), estão demonstradas na (Tabela 1).

Tabela 1 – Propriedades estruturais de fibras lignocelulósicas.

Estrutura das Fibras			
Fibra	Dimensão da célula		
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Cristalinidade
Coco	0,3 – 1,0	100 – 450	-
Cana de açúcar	0,8 – 2,8	10 – 34	27 - 33
Banana	0,9 – 4,0	80 – 250	-
Palha de trigo	0,4 – 3,2	8 – 34	45
Palha de Arroz	0,4 – 3,4	4 - 16	45

Fonte: VENKATESHWARAN (2011).

A fibra de bananeira destaca-se dentre as fibras naturais por ter o maior comprimento, grau de cristalinidade, além de apresentar um alto percentual de celulose na sua composição química e uma ótima resistência a tração. (SILVA, 2011).

A tabela 2 mostra a comparação da composição química da fibra de bananeira com algumas fibras vegetais encontradas na natureza.

Tabela 2 – Composição de alguns compósitos celulósicos.

Compósitos Celulósicos - Composição %				
Material	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Referências
Bagaço de Cana	40	29	23	Oliveira et al., 2013
Palha de cana	44	31	19	Santos et al., 2014.
Palha de milho	32	17	13	Liu et al., 2013.
Sabugo do milho	40	27	17	Du et al., 2015.
Palha de trigo	32	17	21	Wang et al., 2014.
Palha de arroz	39	23	21	Suriyachai et al., 2015.
Casca de arroz	34	34	19	Soltani et al., 2015.
Capim elefante	60	24	8	Minmunin et al., 2015.
Palha de cevada	39	41	19	Oun & Rhim, 2016.
Pseudocaule de bananeira	52	10	11	Romero-Anaya et al., 2011.

Fonte: SILVA (2011).

Conforme apontado por Velásquez-Cocket (2016) a aplicação biotecnológica dos materiais lignocelulósicos como a utilização da fibra de bananeira, envolve a separação de seus componentes de acordo com as características estruturais e composição química. Parte dos compostos lignocelulósicos estão em pesquisa para serem utilizados na indústria, entre eles se encontra os resíduos provenientes da bananicultura devido sua ampla disponibilidade na natureza.

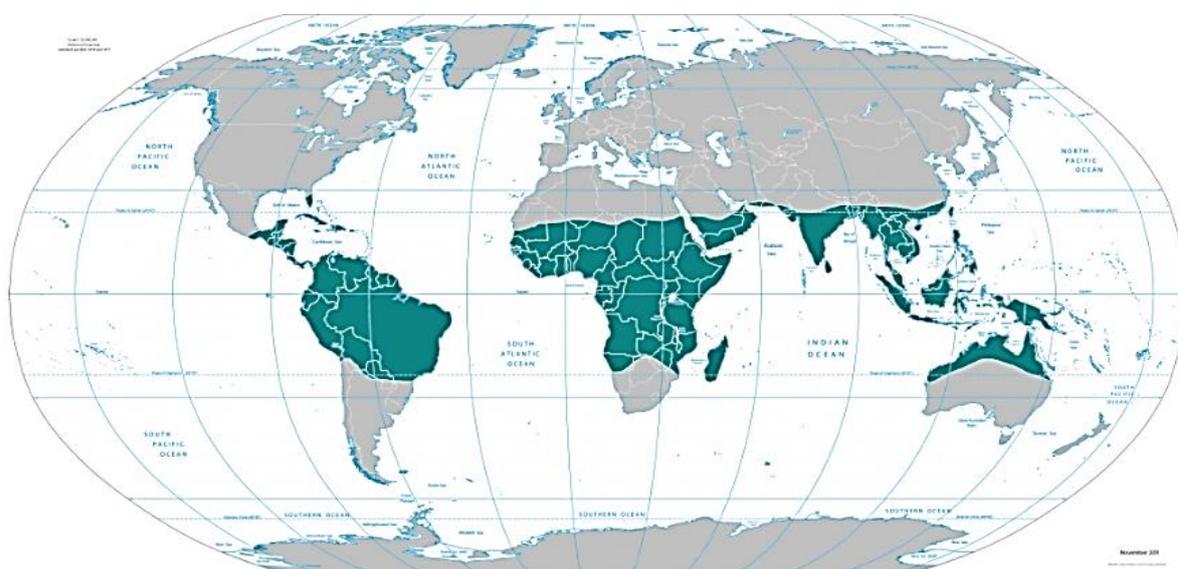
2.2 ESPÉCIE MUSA ACUMINATA

Conforme a sistemática botânica de classificação hierárquica, a Musa Acuminata é uma espécie de planta popularmente conhecida como bananeira, pertence à divisão das Angiospermas, classe das Monocotiledôneas, ordem Scitamineae e família Musaceae (AKPOMIE; CONRADIE, 2020; SENGUPTA et al., 2020).

Sendo uma das frutas mais consumidas na maioria dos países tropicais e subtropicais, constitui um dos componentes básicos da alimentação de mais de 400 milhões de pessoas.

Segundo Alves (2011), a banana tem sua origem no sudeste da Ásia, se espalhou para a África e migrou até a Índia. No Século XVI, durante a colonização de novas terras, os europeus levaram esta cultura para a América. Os plantios se concentraram inicialmente nos trópicos úmidos e nos subtropicais e logo se espalhou por todo mundo, conforme mostra a (Figura 2).

Figura 2 – Trópicos úmidos.



Fonte: ALVES (2011).

Dentre os países que produzem a espécie, a Índia é o maior produtor mundial, com cerca de (21,7 milhões de toneladas/ano), seguida pela China (8,03 milhões t/ano) e Brasil (7,1 milhões de t/ano) (FAO, 2012). A bananeira *Musa Acuminata* está representada por uma planta típica das regiões úmidas dos países tropicais. Seu tronco é formado por um conjunto de bainhas das folhas conhecido como pseudocaule. (BOONRUANGROD et al., 2009).

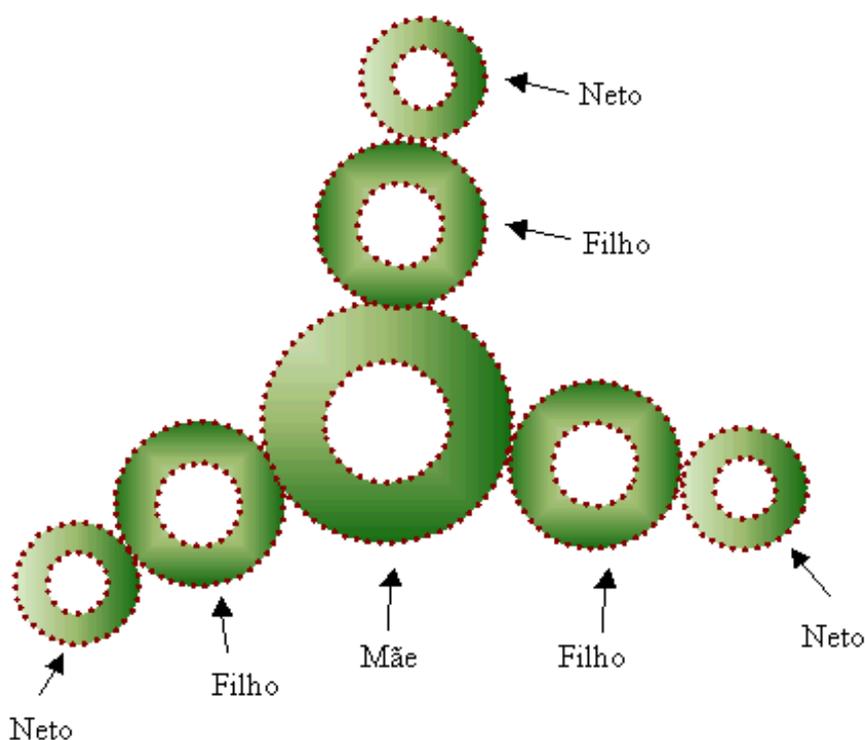
É uma planta herbácea, caracterizada pela exuberância de suas formas e dimensões de suas folhas. Torna-se importante destacar neste estudo que a multiplicação da bananeira se processa naturalmente por via vegetativa, o seu nascimento começa com a geração de um broto de uma bananeira adulta, o início da contagem de sua vida somente se faz com seu surgimento ao nível do solo. O seu plantio pode também ser feito por meio de sementes, quando se deseja produzir

novas variedades. Ao longo de sua vida a bananeira irá produzir um único cacho, cujas frutas se desenvolvem, amadurecem e ao se retirar o cacho já maduro, todas as folhas ficam secas, é quando se diz que a planta chegou ao final de sua vida (BALZER, 2007).

O ciclo de desenvolvimento da planta é um processo dinâmico e contínuo, na qual, uma bananeira adulta apresenta sempre ao seu redor, outras bananeiras em diversos estádios de crescimento. Ressalta-se ainda, que desse conjunto de bananeiras com diferentes idades que surgiram de uma bananeira mãe, denomina-se touceira figura, figura 3, nela pode-se ter espécies de plantas que constituem a primeira, segunda, terceira e até quarta geração, oriundas de uma muda original (ALVES, 2011).

Ao pé da bananeira nascem mudas que são retiradas, replantadas e darão origem a novos membros da família (Figura 3). A época propícia para o plantio é normalmente o mês de outubro e, após um ano, começa a colheita. (FERIOTTI, 2010).

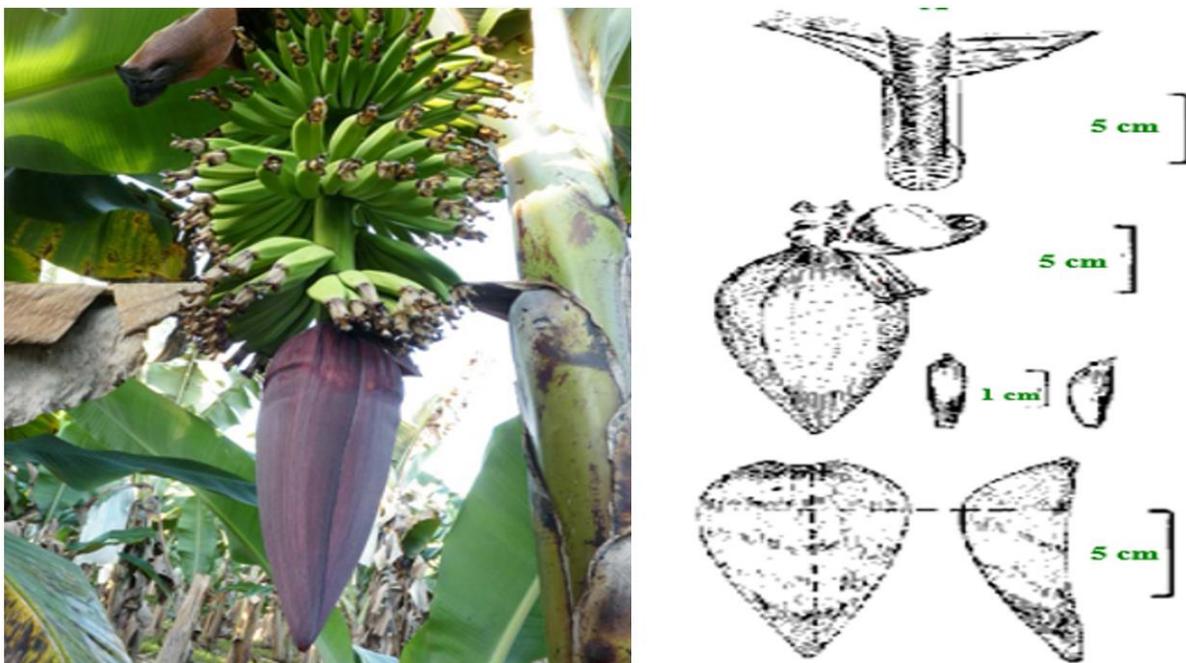
Figura 3 – Corte esquemático de uma touceira de bananeira e sua formação inicial.



Fonte: SIMMONDS (1973).

O diagrama da figura 4 mostra a característica morfológica da bananeira *Musa Acuminata*.

Figura 4 – Cacho de bananeira e Característica morfológica - *Musa acuminata*.



Fonte: AMORIM (2011)

Há vários anos pesquisadores vêm desenvolvendo estudos com taxonômicos e utilização do fruto de bananeiras onde Amorim (2011) disserta que as bananeiras produtoras de frutos comestíveis são classificadas como mostra a (Tabela 3).

Tabela 3 – Classificação taxonômica.

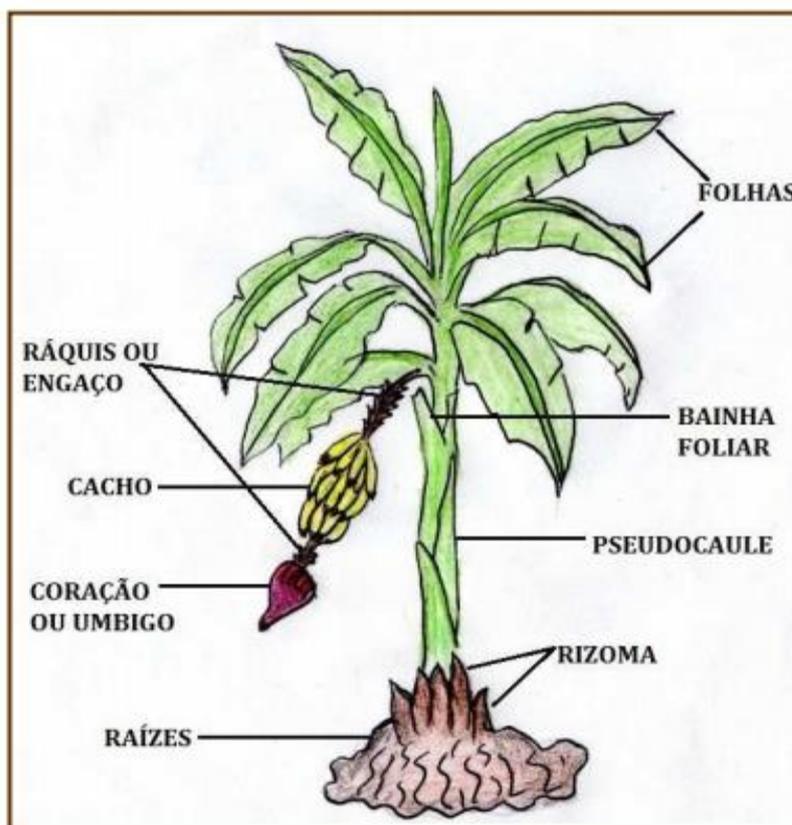
Classe	Monocotyledonea
Ordem	Scitaminea
Família	Musaceae
Subfamília	Musoideae
Gênero	Musa
Espécies comestíveis	<i>Musa acuminata</i>

Fonte: AMORIM (2011).

As colocações dos autores apontam para as condições mais favoráveis ao cultivo da bananeira aquelas situadas na faixa compreendida entre os paralelos de 30° e 40° de Latitude Norte e Sul nas regiões onde as temperaturas se situam entre os limites de 10°C e 40°C. Na abordagem sobre a condição de cultivo, o caule chamado rizoma é subterrâneo e se desenvolve paralelamente junto à superfície, deste emergem folhas aéreas que possuem bainhas desenvolvidas que juntas formam o pseudocaule conhecido popularmente por tronco da bananeira (Figura 5).

Também do rizoma, parte um ramo caulinar que atravessa longitudinalmente o pseudocaule para sustentar em sua extremidade livre a inflorescência que, uma vez no desenvolver da bananeira, originará o cacho de bananas (FERIOTTI, 2010).

Figura 5 – Partes da bananeira.



Fonte: LACERDA (2009).

2.3 UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE BANANEIRA

Além dos frutos, a bananeira produz fibras têxteis que podem ser empregadas na fabricação de móveis, papel, adornos para casa, revestimentos diversos, seiva adstringente para uso medicinal, vinagre, aguardente, açúcar dentre outros. (EMBRAPA, 2019).

No Brasil, a diversidade de culturas agrícolas contribui para uma expressiva possibilidade das indústrias de produção de matérias com compósitos, utilizarem matérias-primas com as fibras vegetais, até mesmo para utilização como reforço em compósitos para a linha automotiva e de construção civil. (TEMER, 2010).

As fibras de bananeira se destacam por ser de cultivo fácil em países tropicais, porém deve-se ter uma especial atenção no tempo de resgate do pseudocaule, pois após oferecer o fruto, ele é cortado e depositado no solo e se ali ficar por muito tempo, pode facilitar a proliferação de fungos devido à alta umidade incidente nas plantações, causando danos ao meio ambiente. Por esse motivo o pseudocaule tem que ser resgatado logo depois do corte (BRIDGWATER, 2012).

O reaproveitamento das fibras do pseudocaule da bananeira, que normalmente eram descartadas no meio ambiente, está crescendo e são aplicadas em usos diversos com o objetivo de reaproveitar adequadamente as suas características usando-as inclusive em compósitos como um material sustentável e economicamente viável que envolve desde o cultivo da planta até a comercialização de produtos confeccionados com a fibra. Observa-se que as pesquisas com fibras naturais têm aumentado consideravelmente, por ser renovável e de baixo impacto ambiental este material tem sido testado no uso em substituição a materiais sintéticos com objetivo de torna-lo mais eficiente e propício para industrialização (ALBINANTE et al., 2011).

Um dos desafios na utilização das fibras de bananeira em compósito polimérico é a obtenção de uma adequada interação entre a fibra e a matriz, os métodos mais estudados é a interação química através da adição de agentes de acoplamento, modificação da fibra ou modificação da matriz. Vários tratamentos para modificação da fibra são utilizados em compósitos com polímeros termoplásticos para melhorar as propriedades, podendo ser físicos ou químicos. O processo físico de moagem possibilita obter fibras com tamanho menores aumentando a área de contato entre a fibra e a matriz polimérica (Djidjelli, et al. 2007).

Na figura 6A podemos observar a fibra longa após secagem e na figura 6B a fibra triturada.

Figura 6 – A: Fibras longas de bananeira após secagem, B: Fibras de bananeira trituradas.

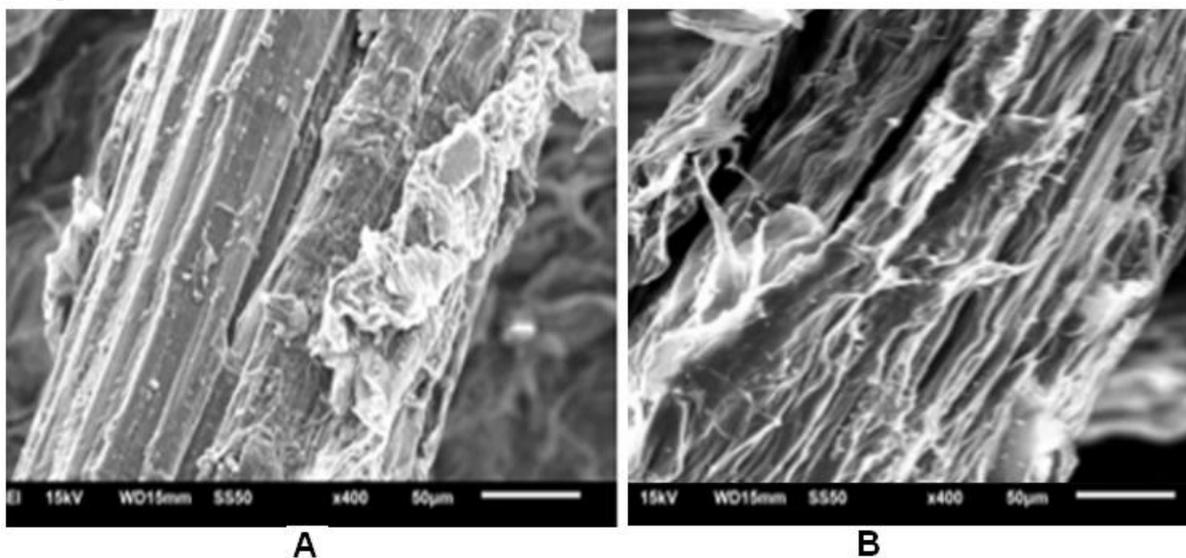


Fonte: BALZER et al. (2007).

O método químico de mercerização é o mais comum por ser de simples exequibilidade e um dos mais econômicos, que consiste em um tratamento alcalino a base de hidróxido de sódio NaOH, (BALZER et al., 2007).

Com base nas colocações de Nery e José (2018), pode-se destacar, que pesquisadores verificaram através de microscopia eletrônica de varredura as fibras brutas e tratadas, e concluíram que os tratamentos são efetivos na redução da hemicelulose, aumentando a resistência das fibras à degradação térmica, sendo de boa utilização em projetos mais sustentáveis. Na figura 7 verifica-se as diferenças superficiais entre a fibra sem tratamento e a fibra tratada com NaOH.

Figura 7 – MEV 400x: A- Sem tratamento alcalino, B- Com tratamento de NaOH.



Fonte: GAFUR (2013).

Conforme Nery; José (2018), o conhecimento da estrutura interna das fibras lignocelulósicas e da sua composição química por meio de MEV, é importante para se entender a sua importância nas características do compósito e na escolha dos tratamentos químicos.

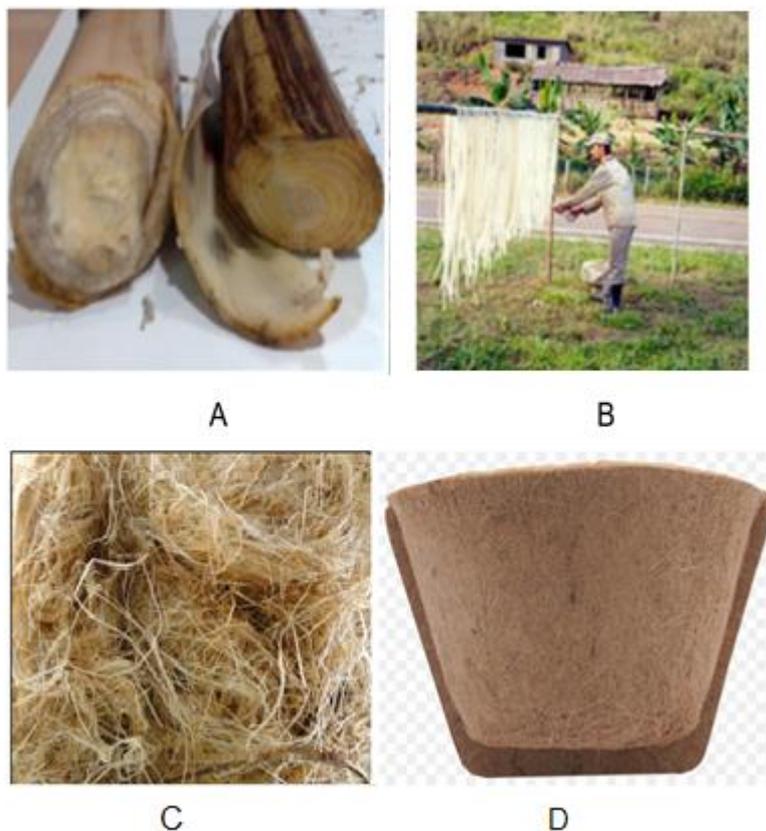
Neste cenário, segundo Demarchi (2010), as fibras celulósicas despertam grande interesse por apresentarem altos valores de módulo de Young, quando comparadas a outras fibras poliméricas, pois seu alto conteúdo de lignina proporciona um incremento de resistência à tração.

2.4 SUSTENTABILIDADE

A sustentabilidade é a manutenção progressiva das capacidades de sustentação dos ecossistemas (LOZANO, 2020). O desenvolvimento sustentável, se fundamenta na minimização da produção de lixo e na prevenção do meio ambiente, na redução da poluição ambiental e na produção de materiais recicláveis. Assim, o empreendedorismo sustentável consiste no uso inteligente dos recursos disponíveis, sendo o único caminho para a permanência da vida no planeta (UNITED NATIONS, 2015).

Autores como Capitani e Garavello (2007) realizaram estudos nos quais citam que este tipo de fibra do pseudocaule de bananeira vem sendo utilizado como atividade artesanal sob a perspectiva do ecodesenvolvimento e acrescentam que pode assim, promover a melhoria da qualidade de vida com artesanato como, ações de educação ambiental e sustentabilidade, geradoras de trabalho e renda. É interessante observar que os métodos de extração artesanal da fibra são de baixa complexidade, realizados manualmente e tratadas com ácido acético em solução aquosa para evitar a oxidação e a proliferação de fungos e colocada para secar ao ar livre (Figura 8).

Figura 8 – A: Pseudocaule; B: Fibras penduradas para secar; C: Fibras aleatórias de bananeira; D- Artesanato com fibra de bananeira prensada.



Fonte: SANTOS (2005).

O uso de fibras lignocelulósicas tem despertado interesse devido a sua aplicação como matéria prima na produção de compósitos poliméricos e representa uma oportunidade de agregar valor econômico a resíduos industriais e ao desenvolvimento tecnológico sustentável.

Observa-se, que compósitos reforçados por fibras lignocelulósicas e, também, materiais estruturais de origem vegetal, vêm sendo cada vez mais empregados em diversos segmentos da indústria brasileira, tendo em vista a necessidade de utilização de materiais provenientes de recursos naturais renováveis, visando o bem estar da população e a preservação do meio ambiente (ROSA et al., 2011).

A preservação do meio ambiente é uma das grandes questões globais. Dessa tomada de consciência ambiental surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável, uma vez que, a conscientização acerca dos problemas ambientais e a importância da preservação do meio ambiente levaram à discussão e reorientação de novos comportamentos sociais, isto é, da procura por produtos e serviços ecologicamente

corretos e sustentáveis, motivando desta forma, o desenvolvimento de ações mitigadoras, novos projetos e serviços (21 GLOBAL, 2007).

Nery e José (2018) apontam em seus estudos, envolvendo fibras de bananeira pré-tratadas e in natura, como este tipo de fibra é essencial, sendo uma matéria-prima para reforço em compósitos poliméricos. E afirmam que o uso de fibras lignocelulósicas e seus constituintes têm representado uma oportunidade de agregar valor econômico a resíduos vegetais e ao desenvolvimento tecnológico sustentável.

A questão da sustentabilidade requer soluções inusitadas e muitas vezes complexas, parece ser um problema árduo, de difícil compreensão, exige maior abertura às mudanças e sua resposta não será encontrada nessa dissertação. Porém continua sendo um dos fatores motivadores e condição limite para a criação de produtos e serviços, que devem ser mantidos como prioridade para qualquer pensamento criativo (ROSA et al., 2011).

Para Franco (2004), produzir materiais constituídos de compósito polimérico reforçado com fibras naturais é interessante, por serem altamente eficientes e, principalmente, por não poluir o ambiente de trabalho, que é um dos grandes problemas para quem trabalha com polímeros. Além de serem considerados, não somente como uma alternativa isolada, mas também uma estratégia para cumprir as exigências ambientais desde a extração da matéria prima.

2.5 UTILIZAÇÃO DE RESINA EPÓXI

A resina epóxi ou poliepóxi do (*Handbook of Epoxy Resins*) é a resina termorrígida que endurece quando se mistura com um agente catalisador ou "endurecedor". São obtidos à partir de uma reação entre epícloridrina e Bisfenol-A (BRAGA, 2004).

Conforme Romão et al. (2003), dentre os polímeros termorrígidos as resinas epóxi são uma das mais importantes classes de polímeros termoestáveis usados para aplicações estruturais ou como adesivos, pois mostram alta força de tensão e módulo, fácil processamento, boa resistência química e térmica além de baixo custo. São de uma família de resinas sintéticas, incluindo produtos que variam de líquidos a sólidos.

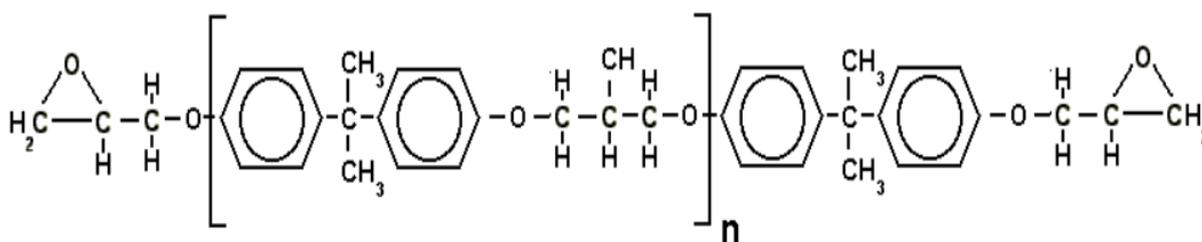
No Brasil o uso das resinas, como forma de promover o reforço nos materiais, vem apresentando um grande aumento devido as suas propriedades como colas e adesivos. As primeiras tentativas comerciais de preparo da resina através da epícloridrina aconteceram em 1927 nos Estados Unidos. O mérito da primeira síntese de uma resina baseada no Bisfenol-A foi compartilhado entre o Dr. Pierre Castan da Suíça e o norte-americano Dr. S. O. Greenlee em 1936, com a sua exploração comercial em 1938, porem com o declínio na produção na Segunda Guerra Mundial. O trabalho do suíço foi licenciado pela empresa química Ciba-Geigy, também Suíça, que se converteu rapidamente em uma das três maiores fabricantes mundiais de resina epóxi, encerrando os negócios nos finais dos anos 90, e transferindo sua marca à Vantico que posteriormente foi adquirida pela Huntsman. O trabalho do Dr. Greenlee foi desenvolvido para uma pequena empresa que, posteriormente, foi comprada pela Shell e então adquirida pela Hexion que hoje faz parte da Momentive (SIKARWAR et al., 2012).

Segundo Sikarwar et al (2012), as resinas epóxi têm diversos gêneros, cada uma de acordo com a produção de um tipo de substância que compõe o epóxi, sendo classificadas como: epóxi novalacas, epóxiclicas, epóxi acíclicas alifáticas e epóxi fenóxi, sendo abaixo a sua explicação sobre cada um dos processos de produção:

- Epóxi Bisfenol-A:

As resinas epóxi à base de Bisfenol-A, figura 9, são as mais utilizadas, pois são versáteis e de menor custo, proveniente da reação de Epícloridrina e Bisfenol-A, podem ser líquidas, semissólidas ou sólidas dependendo do peso molecular (SIKARWAR et al., 2012).

Figura 9 – Fórmula do Epóxi Bisfenol-A.

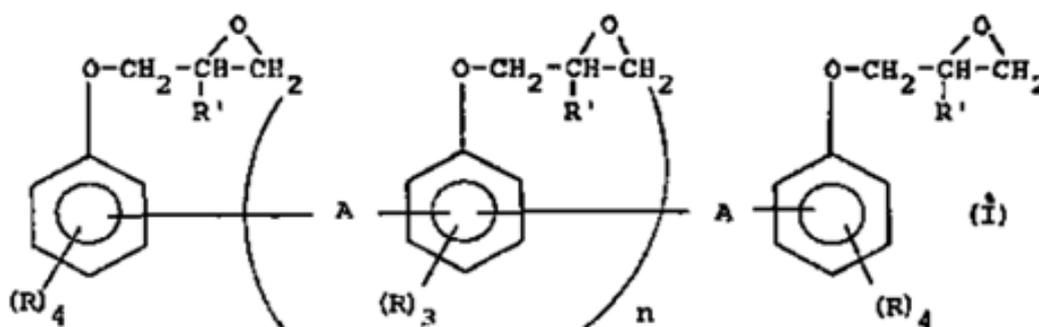


Fonte: SILAEX (2019).

- Epóxi Novolaca:

A produção da resina epóxi novolaca, figura 10, é feita pela polimerização de condensação dos grupos de hidroxila de uma resina de fenol-formaldeído com epicloridrina, muito similar as resinas de Bisfenol-F. Devido ao seu alto índice de cross-linking, possui maior resistência térmica, química e elevada dureza (SIKARWAR et al., 2012).

Figura 10 – Fórmula do Epóxi Novolaca.

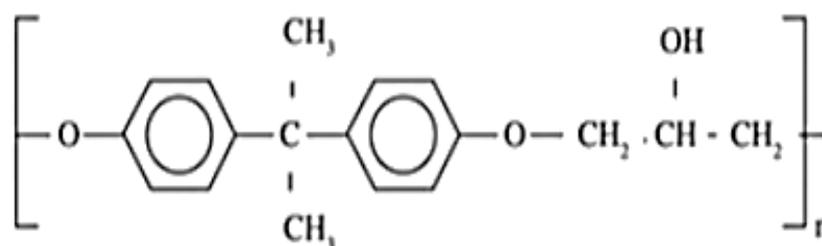


Fonte: SILAEX (2019).

- Epóxi Cíclicas Alifáticas:

Esta resina da figura 11 é obtida através da reação das substâncias: dióxido de vinil-ciclo-hexano e o dióxido de dicitlopentadieno e por sua reatividade, mais próxima entre as substâncias. É possível a produção de ciclos de carbono no epóxi, assim, caracterizando este produto. Sua principal característica é resistência à ação do UV, (SIKARWAR et al., 2012).

Figura 11 – Fórmula do Epóxi Cíclicas Alifáticas.

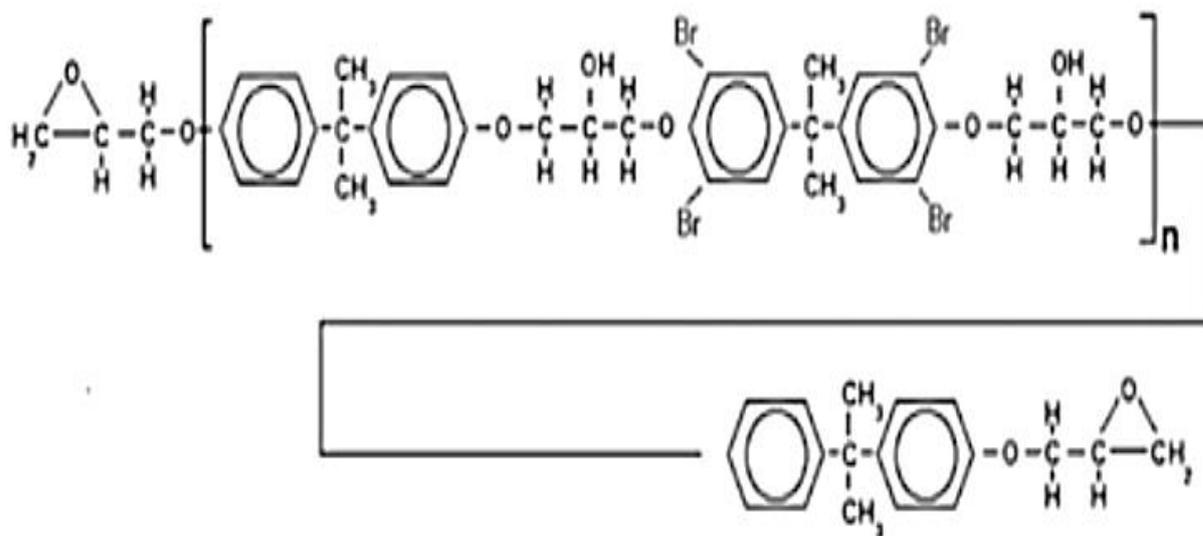


Fonte: PUIG et al. (2012).

- Epóxi Bromadas:

Esta resina (Figura 12) é obtida através da reação do tetrabromo Bisfenol-A com epicloridrina. A principal utilização dela é em compósitos onde se necessite de características de retardamento da chama, como laminados elétricos (SIKARWAR et al., 2012).

Figura 12 – Fórmula do Epóxi Bromadas.



Fonte: SILAEX (2019).

Segundo Leng et al. (2011), existem atualmente diversas empresas no mundo que se especializaram em formular produtos com características próprias para cada necessidade do usuário. Os agentes de cura (*Chemistry and Thechnology*) mais comuns são as poliamidas, poliaminoamidas, aminas alifáticas, aminas cicloalifáticas, aminas aromáticas, anidridos, polimercaptanas e polissulfetos. Anidridos e aminas são os agentes mais utilizados, porém, polimercaptanas são também utilizadas em compósitos com resinas epoxídicas e outros de última geração à base de aminas modificadas ou poliaminoamida são tradicionais no mercado.

As principais empresas, que e produzem as resinas epóxi são: *Dow Química*, Huntsman, Momentive e Nan-ya. No Brasil temos produtos vindos de diversos lugares como China, Coréia, Itália, República Checa, Arábia Saudita, Índia, Tailândia, Estados Unidos e Suíça, entre outros.

A tabela 4 representa algumas características mecânicas das resinas, com relação as suas estruturas e características.

Tabela 4 – Resinas e algumas características mecânicas.

Resinas	Características
Bisfenol-F	Baixa Viscosidade; Resistente a cristalização; Alta resistência química;
Novolacas	Alta funcionalidade; Maior grau de reticulação; Alto Tg; Alta resistência química;
Poliglicóis	Viscosidade muito baixa; Flexível;
Bromadas	Resistência a chamas; Alto Tg;

Fonte: FRANCO (2010).

As resinas epóxi são utilizadas em manutenção industrial e como adesivo, calafetante, solda a frio, primer anticorrosivo, revestimento com resistência química, etc. Na construção civil elas são utilizadas para reconstituição de concreto, adesão de concreto novo com velho, remenda de trincas e fissuras, junta de dilatação e rejunte piso industrial monolítico. Além de uso como adesivos nas indústrias eletrônicas e na construção civil, as resinas epóxi também são utilizadas como adesivos de metais e madeiras para colagem automotivas, naval, lazer (ex.: barcos, móveis, aeronaves, estruturas, etc.) e onde houver necessidade de um adesivo termo fixo de grande poder aderente, com boa resistência química, térmica e mecânica. (SILAEX, 2019).

A tabela 5 apresenta os sistemas de resina epóxi que se encontra em utilização, sendo exposto ainda alguns tipos como exemplos, fatores envolvendo exposição quanto a inalação, ingestão e toxicidade.

Tabela 5 – Apresentação de dados relevantes da resina epóxi.

SISTEMA DE RESINA EPÓXI	TIPOS	EXPOSIÇÃO DÉRMICA	EXPOSIÇÃO A INALAÇÃO
Resina epóxi líquida	Baseada no produto da reação de Bisfenol–A ou Bisfenol–F	Irritantes leves a moderados, sensibilizadores leves a moderados.	Baixa volatilidade; Pode causar irritação quando pulverizada e espalhada em superfícies não ventilada
Resina epóxi sólida	Baseada no produto da reação de Bisfenol–A ou Bisfenol–F	Irritantes leve a moderado, sensibilizadores leves, não absorvidos através da pele.	Baixa volatilidade, mas pode causar irritação se amassada ou triturada
Resina epóxi modificadas	Resinas epóxi líquidas com diluentes ativos ou adicionados a solventes	Irritantes leves a moderados, sensibilizadores moderados a forte	Baixa volatilidade, mas pode causar irritação se aquecida em locais não ventilados
Agente de cura - amina	-	Irritantes, sensibilizadores, absorvidos através da pele	Irritantes respiratórios
Agente de cura – Amina aromáticas	Sensibilizadores, efeitos na saúde à longo prazo, absorvidos através da pele	Sensibilizadores, efeitos na saúde à longo prazo, absorvidos através da pele	Irritantes respiratórios
Agente de cura - anidro	Corrosivo, sensibilizadores severos	Corrosivo e sensibilizadores severos	Podem ser irritantes
Diluentes reativos	Éteres glacial	Sensibilizadores moderados a forte	Volatilidade moderada, irritação
Solventes	Acetonas, metil-etil-cetona, tolueno, xileno, ésteres	Desengordura e resseca a pela	Volatilidade, alta irritação, depressão do SNC

2.6 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Materiais compósitos representam uma classe de materiais compostos por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço), cujas propriedades apresentam uma combinação das propriedades dos constituintes individuais.

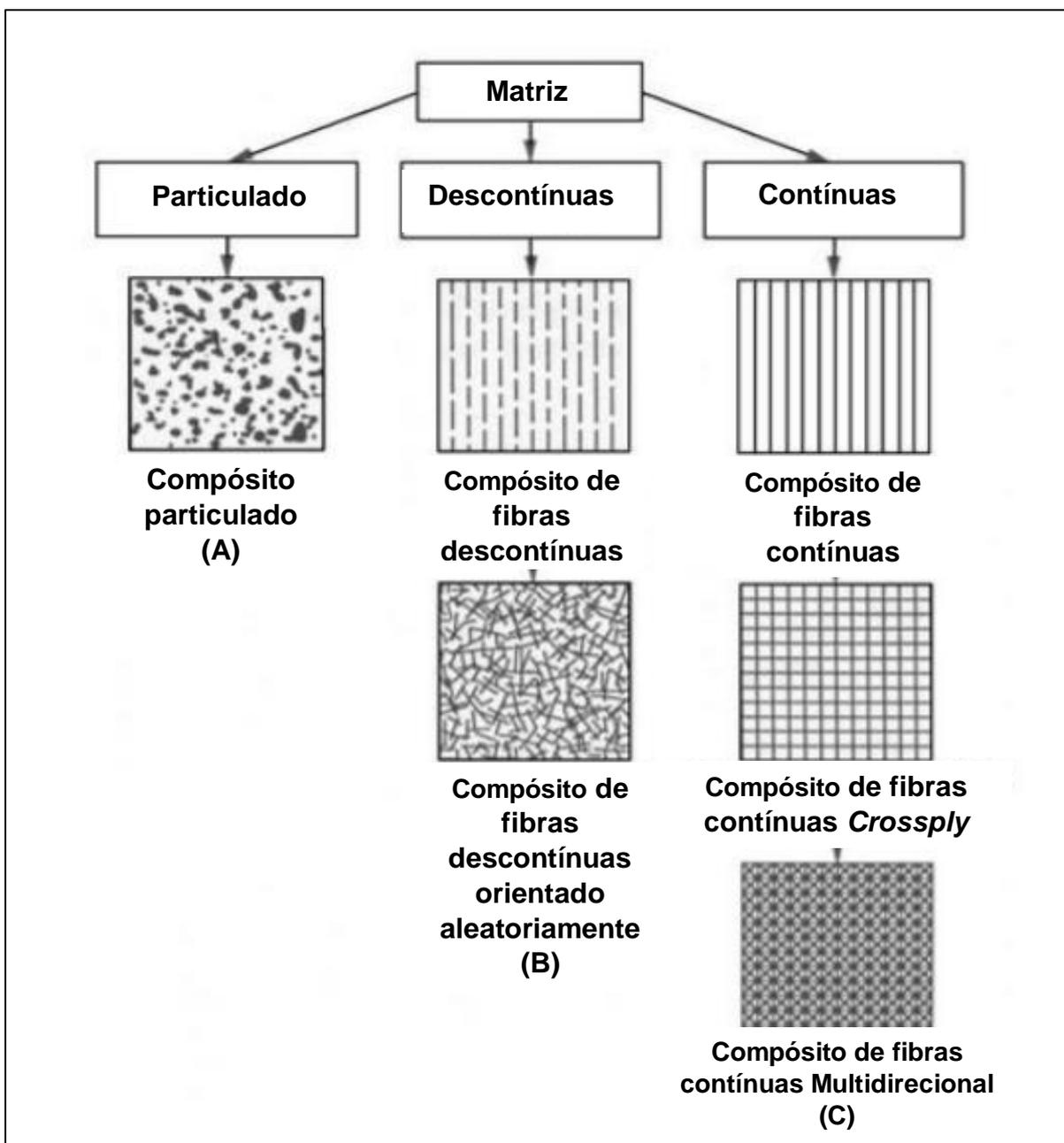
Os constituintes do material compósito podem ser divididos em matriz ou reforço. O material da matriz é o que confere estrutura ao material compósito. Os materiais compósitos têm sido considerados materiais multifásicos de modo combinar de forma criteriosa as melhores propriedades de dois ou mais materiais distintos. Nesta perspectiva, destaca-se que as propriedades dessas resinas podem ser controladas por mudanças de formulação bem como as condições de preparo de cura, (COSTA, 2008).

Vale ressaltar, que nos últimos anos houve um grande avanço tecnológico no desenvolvimento de materiais compósitos reforçados com fibras naturais, proveniente do aumento do interesse de grupos de pesquisa e de indústrias em desenvolver e utilizar materiais feitos a partir de matérias primas renováveis, que se deu principalmente pelo grande apelo mundial para a utilização de produtos naturais e pela preservação do meio ambiente, (BENINI, 2011).

Os compósitos podem ser classificados em compósitos carregados com partículas, também chamados de compósitos particulados. Compósitos carregados com fibras descontínuas, sendo que essas fibras podem ser unidirecionais ou dispostas aleatoriamente e compósito carregados com fibras contínuas que também podem ser fibras contínuas unidirecionais, bidirecionais ou multidirecionais. Possuem duas subclassificações que são os compósitos com partículas grandes e os compósitos reforçados com pequenas partículas por dispersão cuja diferença entre eles está baseada no mecanismo de reforço ou de aumento de resistência (DE PAULA, 2011).

Os principais tipos de compósitos estão ilustrados na (Figura 13).

Figura 13 – Representação de diferentes tipos de reforço com fibras.



Fonte: DE PAULA (2011).

Autores como Rodrigues; Silva e Daltro (2014) já vinham pesquisando sobre a utilização dos compósitos, e afirmaram em suas publicações que estes materiais, denominados compósitos poliméricos, podem ser definidos como sistemas constituídos pela combinação de dois ou mais componentes contendo proporções significativas dos mesmos, cujo desempenho mecânico e propriedades são esperados a apresentarem resultados superiores às dos constituintes puros.

Conforme Tomczak (2010), as fibras são capazes de aumentar a resistência mecânica do compósito através da transferência de tensão entre fibra e matriz, sendo geralmente empregadas como reforço em matrizes poliméricas. O autor disserta que estudos indicam que as fibras naturais possuem a capacidade funcional de substituir as fibras sintéticas em compósitos.

A utilização de materiais compósitos poliméricos nas indústrias de construção civil teve um aumentando considerável, onde para cada aplicação, propriedades distintas e específicas são obtidas com diferentes modos de fabricação, de matrizes e de tipos de reforços. Neto (2006) destaca que os compósitos poliméricos podem ser preparados com matrizes constituídas por polímeros termorrígidos, termoplásticos e elastoméricos (TOMCZAK, 2010).

É relevante destacar, que Canevarolo (2010) e Marinucci (2011) afirmam que os compósitos reforçados com fibras em sua fase estrutural apresentam a combinação de um material isotrópico e materiais compósitos resultando em uma estrutura que apresenta um balanço interessante de resistência mecânica. Neste trabalho visou utilizar como matriz o polipropileno reforçado com fibras do coco.

Para De Paula (2011) a facilidade de reciclagem de produtos que sejam ambientalmente corretos estão sendo adotados por todas as áreas. A grande aplicação de polímeros como PP e Resinas poliméricas como o Epóxi também se expandem em competir com os plásticos de engenharia, onde eles estão sendo cada vez mais utilizados na forma de compósitos poliméricos.

Para utilização em compósitos, algumas características como o caráter apolar dos polímeros, definem algumas propriedades, principalmente aspectos relacionados à baixa dispersão com cargas inorgânicas de natureza polar, onde é necessária sua modificação ou o tratamento de um dos componentes para obtenção de melhores propriedades (DE PAULA, 2011).

2.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.

Os ensaios mecânicos são realizados com o objetivo de determinar parâmetros de integridade de certos materiais, verificando a complexidade da relação entre reforço e matriz. No presente trabalho destaca-se a tração, flexão e

dureza com foco em compósitos reforçados com fibra de bananeira. Os estudos a seguir são baseados nas normas de American Society for Testing and Materials (ASTM).

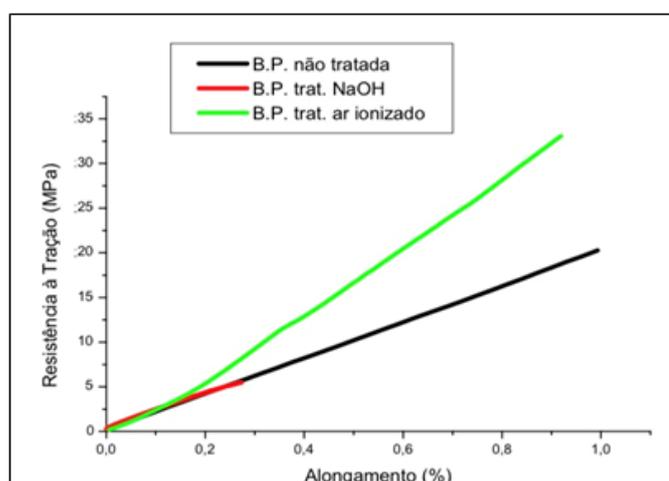
2.7.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração se baseia na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Tal corpo de prova necessita ser previamente padronizado para que os resultados obtidos possam ser mensurados de forma condizente. Ao fixar o espécime em uma máquina universal de ensaios, este pode ser torcido ou alongado até sua ruptura. O ensaio permite que as deformações uniformes distribuídas em todo corpo, também sendo possível a modificar a intensidade com que as forças são exercidas sobre esse, a fim de obter a verificação dos resultados desejados (DALCIN, 2007). Entretanto o ensaio de tração é caracterizado como um evento destrutivo por incapacitar a peça examinada de ser reutilizada devido às fraturas plásticas ou inelásticas, fazendo com que a peça não possua sua forma original após sair da máquina de ensaios (CALLISTER, 2012).

Ao estudar o limite de tração de compósitos, um dos fatores mais importantes a ser levados em conta é a interação entre matriz e fibra, pois é sua interação que estabelece a adesão da fibra sobre a matriz que por sua vez pode ser aprimorada através de tratamentos prévios (DEMARCHI, 2010).

A figura 14 mostra o gráfico do ensaio de tração das fibras de bananeira sem tratamento, comparado com as fibras tratadas com NaOH e tratadas com ar ionizado.

Figura 14 – Resistência a Tração de fibras de bananeira.



Fonte: TANAKA (2006).

Analisando o gráfico é possível observar que em todas as fibras, cada tratamento submetido inferiu diferentes capacidades de suportar a tração induzida, tendo assim diferentes respostas. A fibra de bananeira tratada com ar ionizante e a que não recebeu tratamento algum responderam melhor a tração exercida pela máquina. Já a fibra de bananeira que recebeu tratamento alcalino possuiu uma menor resistência. É possível inferir que as fibras tratadas com o ar ionizante conferiram uma maior flexibilidade nos feixes de fibra, fazendo com que suportassem uma maior carga antes de ceder ao estresse mecânico causado pela máquina (Tabela 6). Esta propriedade pode ter provocado uma melhor separação dos feixes por consequência de ter sido submetido ao tratamento com ar ionizante (TANAKA, 2006).

Tabela 6 – Resistência à tração das fibras de bananeira.

Fibra de Bananeira (B. P.)	Resistência à Tração (Mpa)	Alongamento (%)
Não tratada	19,8 ± 13	1,0 ± 0,2
Trat. Ar Ionizado	33,0 ± 22	0,5 ± 0,2
Trat. NaOH	5,5 ± 7	1,0 ± 0,3

Fonte: TANAKA (2006).

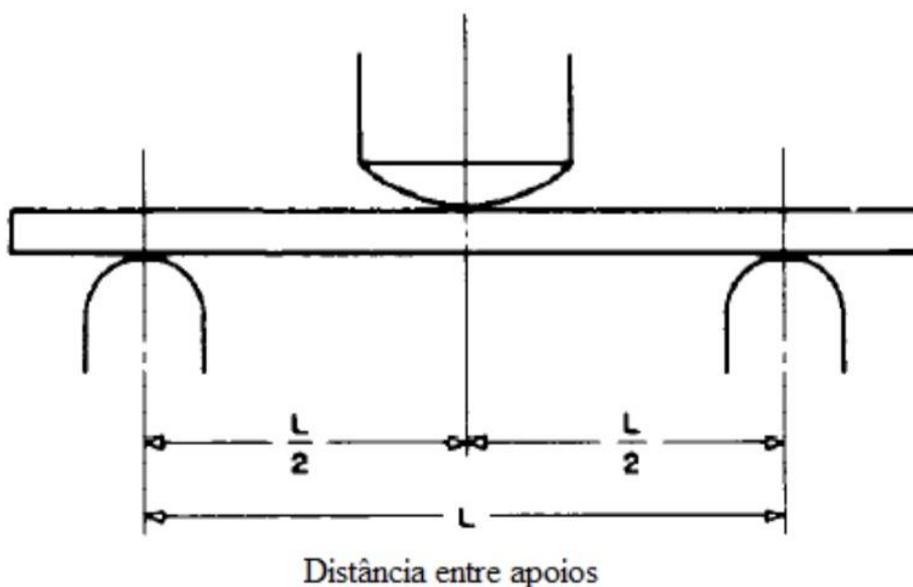
Também é possível inferir que as fibras de bananeira tratadas com hidróxido de sódio sofreram uma perda quanto sua cristalinidade, possivelmente tendo ocorrido à degradação de suas fibras em decorrência da degradação de cadeias de celulose e hemicelulose presentes na estrutura vegetal de uma fibra (TANAKA, 2006).

2.7.2 Ensaio de Flexão

A habilidade de resistência à flexão corresponde a resposta de um material sobre forças de dobragem longitudinais, aplicadas crescentemente em determinados pontos de uma barra previamente padronizada. Mede se o valor de carga em relação à deformação máxima sofrida pelo material. O ensaio de flexão ocorre em uma máquina universal, podendo ser executada de três formas possíveis: ensaio de três pontas, ensaio de quatro pontas e o método de engaste (Garcia, 2000). Entretanto, como estamos dando enfoque aos ensaios mecânicos de compósitos, daremos

relevância ao ensaio de três pontos que consiste em uma barra apoiada em um ponto em cada extremidade e a carga aplicada no centro do comprimento do corpo de prova. A carga é aplicada a partir de um valor nulo e é gradualmente aumentada até que o corpo de prova atinja o seu limite e venha a sofrer uma ruptura (Figura 15).

Figura 15 – Desenho esquemático do ensaio de flexão de três pontos.

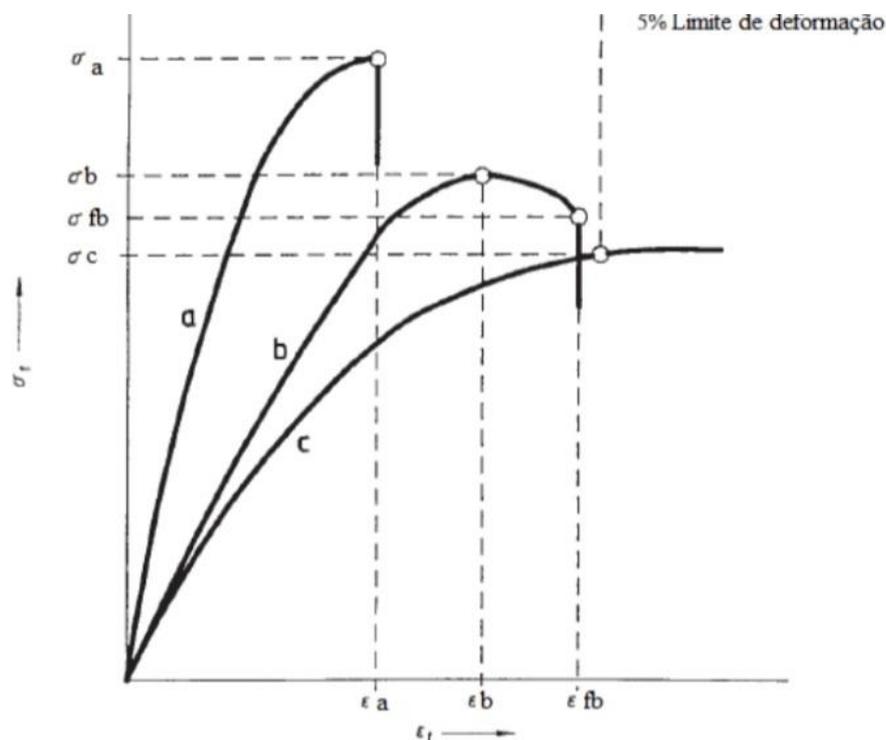


Fonte: TANAKA (2006).

O ensaio de três pontos é a melhor escolha para Compósitos por serem considerados frágeis e de dureza elevada. As principais propriedades estudadas são a tensão de ruptura em flexão e o módulo de elasticidade, podendo variar de acordo com a temperatura e a velocidade da aplicação da carga. A partir dessas características analisadas e mensuradas, é possível plotar um gráfico com diferentes tipos de curvas que seguem um padrão característico, podendo ser do tipo (a), (b), (c) e a deformação 5%. A curva do tipo (a) apresenta a ruptura antes da deformação das fibras, a do tipo (b) representa a ruptura quando esta ocorre após 5% de deformação das fibras, e a curva do tipo (c) apresenta a inexistência da ruptura, neste caso o ensaio deve ser interrompido e o valor máximo deve ser registrado (ASTM, 1997).

A figura 16 mostra o gráfico com as curvas típicas do ensaio de flexão de três pontos, destacando o comportamento típico de cada curva.

Figura 16 – Curvas típicas de um ensaio de três pontos.



Fonte: TANAKA (2006).

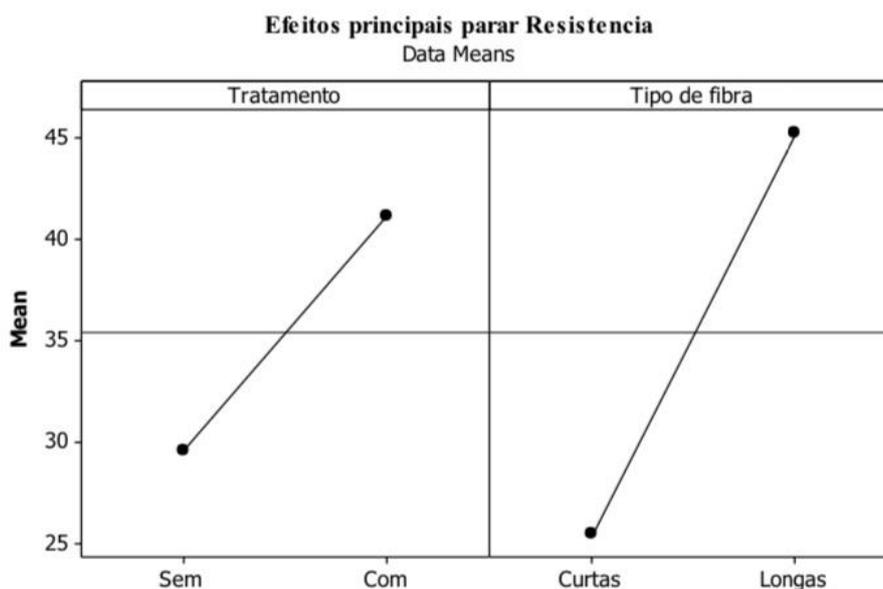
Um fator a ser levado em conta que pode vir a interferir na resposta ao ensaio de flexão de compósitos é o tratamento deste. Em compósitos de matriz epóxi reforçados com fibra de bananeira, aqueles que receberam tratamento alcalino obtiveram melhores resultados quanto ao limite de flexão, porém não obtendo bons resultados no ensaio de tração. Essa resposta evidencia que aparentemente não é possível obter compósitos que possuam uma alta resistência e máxima tenacidade ao mesmo tempo (BISANDA, 2000).

Outro fator a ser levado em conta é a direção que as fibras e as concentrações de fibras presentes no compósito, pois o resultado do ensaio é diretamente proporcional ao tamanho da fibra. Os compósitos reforçados com fibras unidirecionais alinhadas também obtiveram melhores resultados quanto ao módulo de resistência à flexão (DE ROSA; SANTULLI; SARASANI, 2009).

Um dos últimos fatores a ser listado como variável para o resultado do ensaio é a diferença de tamanho entre as fibras utilizadas como reforço. No gráfico da figura 17, pode-se observar que os tamanhos das fibras de bananeira tratadas e utilizadas para reforço de uma matriz epóxi, obtiveram um maior desempenho quanto a

habilidade de resistir a flexão. Esse resultado foi obtido devido a melhoria na interface e maior superfície de contato, aumentando assim a adesão do reforço com a matriz (ADRIANA, 2015).

Figura 17 – Interação de fatores que modificam os resultados dos ensaios de flexão.



Fonte: ADRIANA (2015).

2.7.3 Ensaio de dureza

A dureza por definição é uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada. Logo o ensaio de dureza tem como objetivo o conhecimento das resistências mecânicas e ao desgaste, controle da qualidade de processos de conformação plástica e na verificação das condições de tratamentos químicos. Existem diversos tipos de ensaio de dureza, porém daremos foco ao ensaio de dureza Shore por ser mais utilizado em polímeros.

O ensaio de dureza Shore mede a resistência à penetração, ou ao risco e avalia a resistência relativa à endentação, a qual varia com o tempo, principalmente porque os materiais usados neste tipo de ensaio têm uma grande resiliência e consequência uma grande capacidade para absorver a energia e de se adaptar à deformação (LEE et al., 2017).

O ensaio consiste em altura de rebote ou perda de energia cinética quando uma barra de massa padronizada com uma ponta de diamante arredonda cai de uma altura predeterminada, bate na superfície do corpo-de-prova e retorna. Utiliza-se, portanto os princípios do choque parcialmente elástico. Os testes devem seguir as normas ASTM D2240 – Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness.

A dureza para polímeros pode ser medida em escalas Shore A, e Shore D, caracterizados para polímeros menos duros e mais duros respectivamente. A Dureza Shore A é utilizada em ensaios com materiais mais flexíveis, com o uso de indentador específico e carga de 1Kg, já a dureza Shore D é utilizada para materiais mais rígidos com indentador específico e carga de 5Kg. Para valores superiores a 90 utiliza-se o equipamento Shore D e para valores inferiores a 20 utiliza-se o equipamento Shore A (JOAQUIM, 1995).

Dentre as principais vantagens da realização de um ensaio de dureza Shore é o fato de existirem equipamentos de mesa como também equipamentos portáteis, que por sua vez são amplamente utilizados e de fácil aquisição, possibilitando o uso para medir durezas de peças de grandes dimensões que não cabem em máquinas de bancada. Além desses motivos, o ensaio Shore também é utilizado para controle de qualidade, pois sua impressão é muito pequena, sendo assim utilizado em peças acabadas.

Os valores obtidos somente pelo ensaio de dureza correspondem a uma representação insuficiente para determinação de um dado material. São necessárias outras características para representar e quantificar o referido material, pois a dureza é um parâmetro pouco expressivo para escolha da melhor aplicação a qual o material possui. Por isso é necessário a utilização de outros parâmetros complementares como tensão de ruptura e alongamento para uma melhor análise das características de um material ou compósito (ROGULSKA; KILTYS; PIKUS, 2017).

2.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O princípio fundamental em que a microscopia de varredura se baseia, consiste na utilização de um feixe de elétrons que incide sobre uma amostra do material a ser analisado, com o propósito de obter imagens de alta qualidade em escala manométrica, sendo muito utilizada no estudo de fraturas de compósitos que possuem fibras longas ou curtas. O comportamento dessas análises possui diversas variáveis, incluindo a natureza, carga do meio, quantidade de vazios (“voids”) e interação da fibra com a matriz. As fraturas identificadas pela análise podem revelar áreas nas quais ocorreram falhas em compósitos tais como trincas e falhas de ligação e adesão fibra/matriz (SAWYER, 1994).

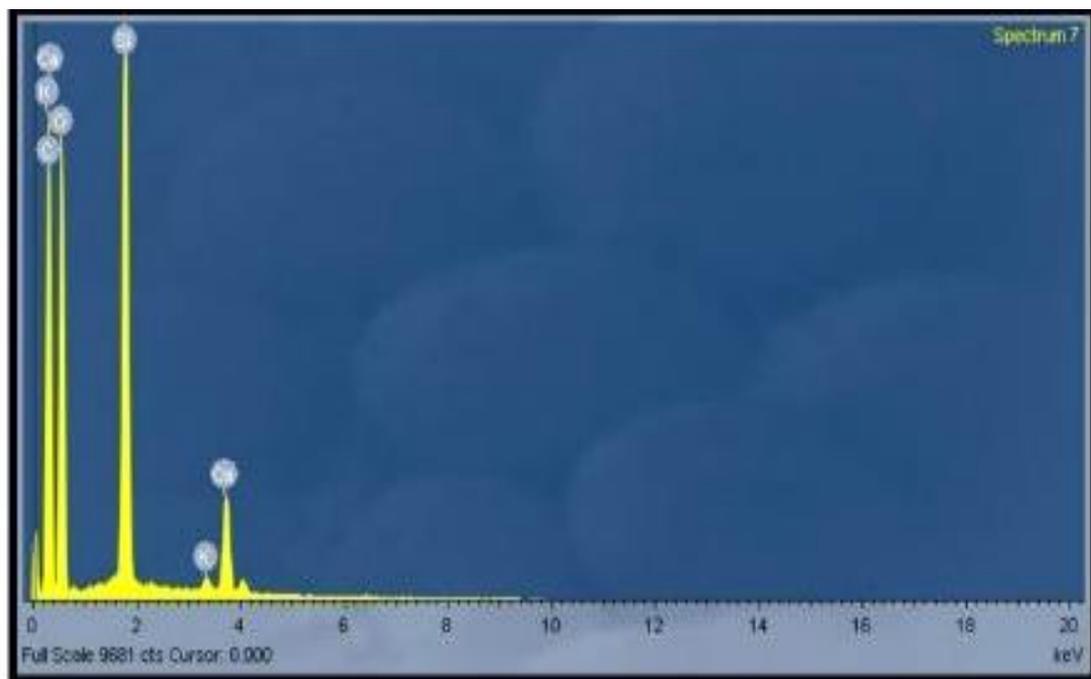
As imagens produzidas pelo MEV são obtidas por meio de feixes através de filamentos previamente aquecidos que ao serem direcionados a amostra são focalizados por lentes eletromagnéticas. Ao atingirem a amostra, diversos tipos de elétrons são obtidos, porém para a imagem desejada no MEV, o foco são os elétrons secundários e os elétrons retro espelhados. Se o número de elétrons que atingem a amostra não for igual ao número de elétrons que saem da amostra, a amostra acumulará uma carga, isso é conhecido como “carregamento” e afeta negativamente a qualidade da imagem resultante. Por isso ao escolher um compósito como amostra, é necessário que esse seja revestido com uma fina camada de metal para que o material opaco não seja carregado indesejavelmente.

Além da carga indesejada, outro fator que pode afetar negativamente a imagem obtida pelo MEV são moléculas de gás do ambiente. Por isso, é necessário que a região onde a amostra for colocada, fique sob vácuo a fim de obter imagens mais focalizadas (SAWYER, 1994).

Além de avaliar características topográficas e produzir imagens tridimensionais por conta da elevada profundidade de foco, o MEV também verifica a composição química de amostras (DEMARCHI, 2010).

A análise realizada na figura 18, obtida no MEV evidencia que a amostra de fibra de bananeira em natura possui O (Oxigênio), N (Nitrogênio), C (Carbono), K (Potássio), Ca (Cálcio) e Si (Silício).

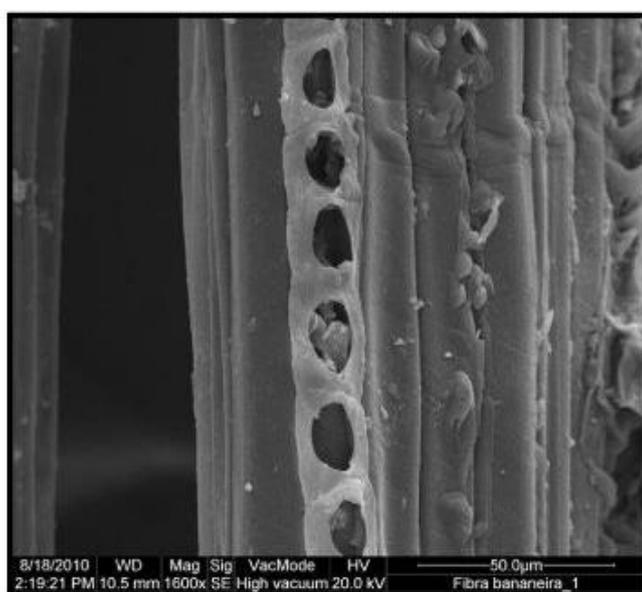
Figura 18 – Análise química de uma fibra de bananeira in natura.



Fonte: DEMARCHI (2010).

A figura 19 apresenta a imagem de uma amostra ampliada 1600 vezes, onde aparecem pequenos conjuntos de fibras e um corte que revela por sua vez uma sequência de células parcialmente abertas (DEMARCHI, 2010).

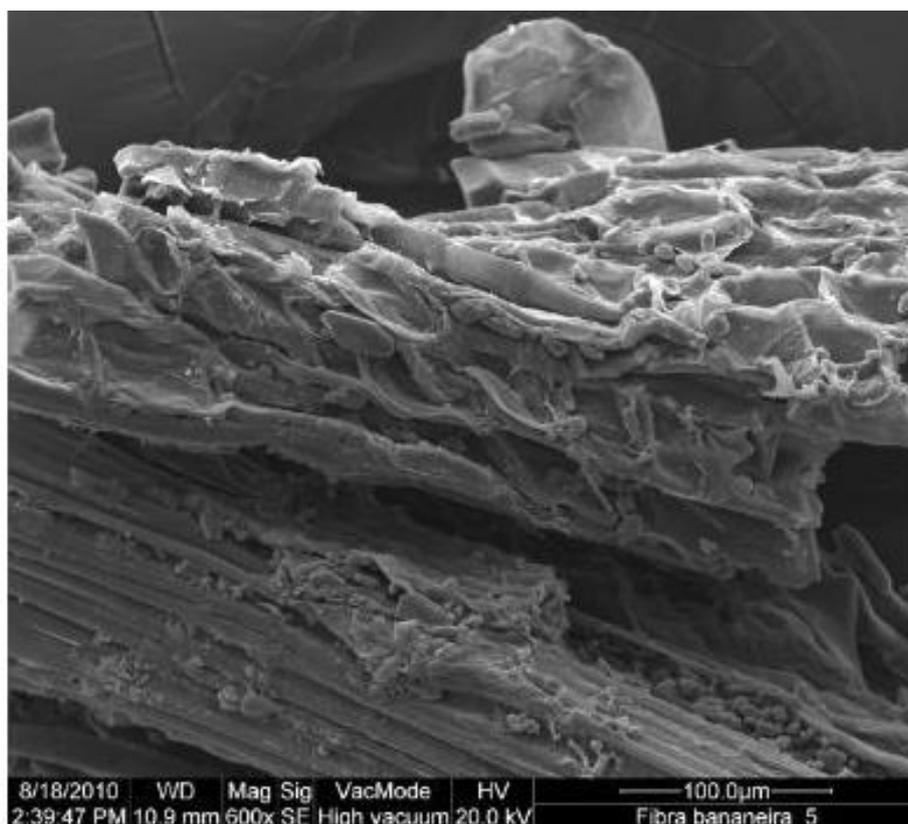
Figura 19 – Série de fibras de bananeira em corte longitudinal.



Fonte: DEMARCHI (2010).

Segundo Demarchi (2010), a partir da microscopia, pela figura ampliada 600 vezes é possível identificar que a fibra de bananeira não só é composta por células, mas também por uma certa quantidade de polpa. Nesta imagem é possível observar que o feixe de fibra apresenta uma leve torção (Figura 20).

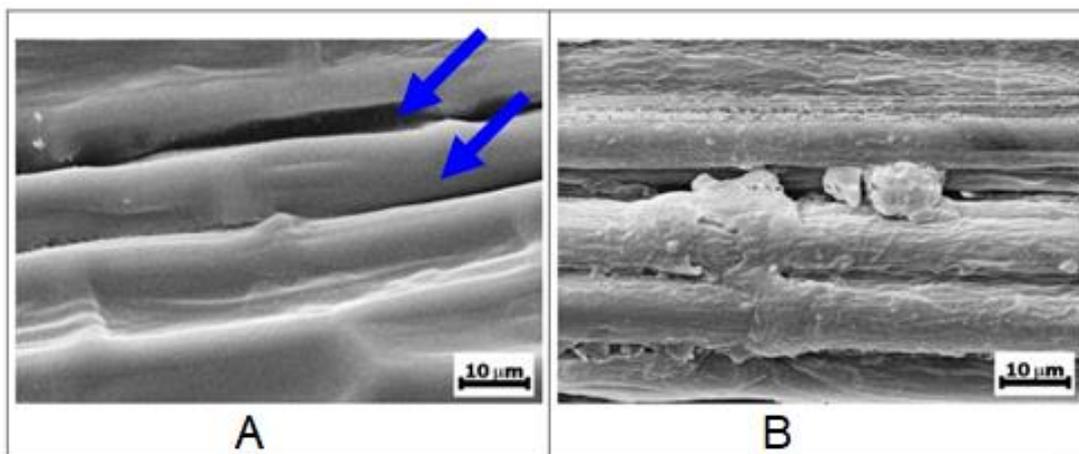
Figura 20 – Fibra de Bananeira levemente torcida.



Fonte: DEMARCHI (2010).

É possível observar a partir da figura 21-A que com uma ampliação de 5000 vezes pode-se identificar o aparecimento de fissuras (apontadas pelas setas azuis) nas fibras de bananeiras que foram tratadas com ar ionizado, porém possuem uma superfície predominantemente lisa. Já a figura 21-B mostra as fibras que receberam tratamento alcalino com NaOH apresentaram uma superfície mais rugosa como resultado do intumescimento a que foi submetida. Essas respostas podem melhorar a interação entre a matriz escolhida e a fibra.

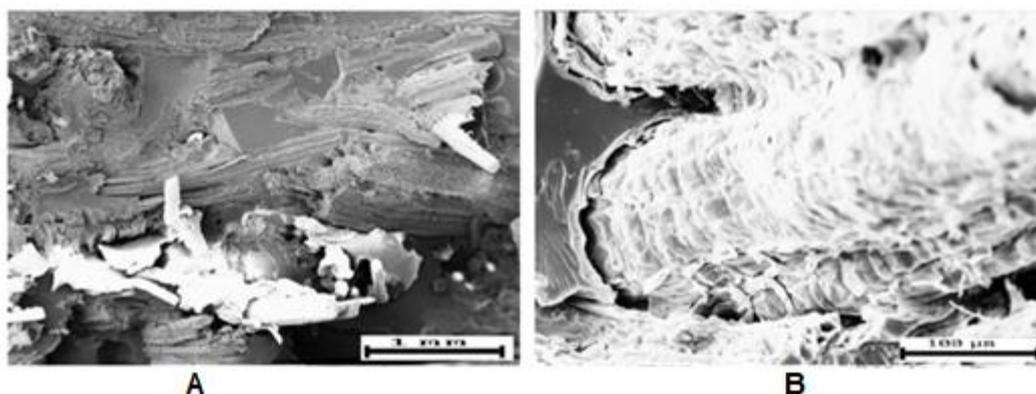
Figura 21 – A- Fibras tratadas com ar ionizante; B- Tratadas com NaOH.



Fonte: TANAKA (2006).

Após o ensaio de impacto, podemos identificar na figura 22 os diferentes tipos de fratura sofridos. Também é possível chegar à conclusão de que houve uma fraca interação por adesão da fibra com a matriz devido a propagação da fratura em volta da fibra.

Figura 22 – Compósito fenólico reforçado com fibras de bananeira evidenciado a interface matriz/fibra após ensaio de impacto.



Fonte: TANAKA (2006).

2.9 MICROSCOPIA ÓTICA

A microscopia ótica é realizada com a finalidade de se observar as características morfológicas de uma amostra. Seu princípio consiste na incidência da luz visível, ou ultravioleta, que incide em um condensador, atravessa o objeto e é encaminhada para o canhão de lentes convergentes, chamadas de objetivas e

oculares. Após o feixe luminoso atingir a lente objetiva, forma-se uma imagem intermediária e aumentada do objeto, funcionando como uma lupa (ROSS; PAWLINA, 2012).

Segundo Demarchi (2012) uma técnica importante para tornar a imagem mais clara e precisa é a espessura da secção. Quanto mais fina for a espécime, maior quantidade de luz o atravessa e, conseqüentemente, mais clara ficará a imagem. A figura 23 apresenta a imagem das fibras de bananeira ampliadas 100 vezes.

Figura 23 – Imagem das fibras de bananeira obtida pela microscopia ótica.

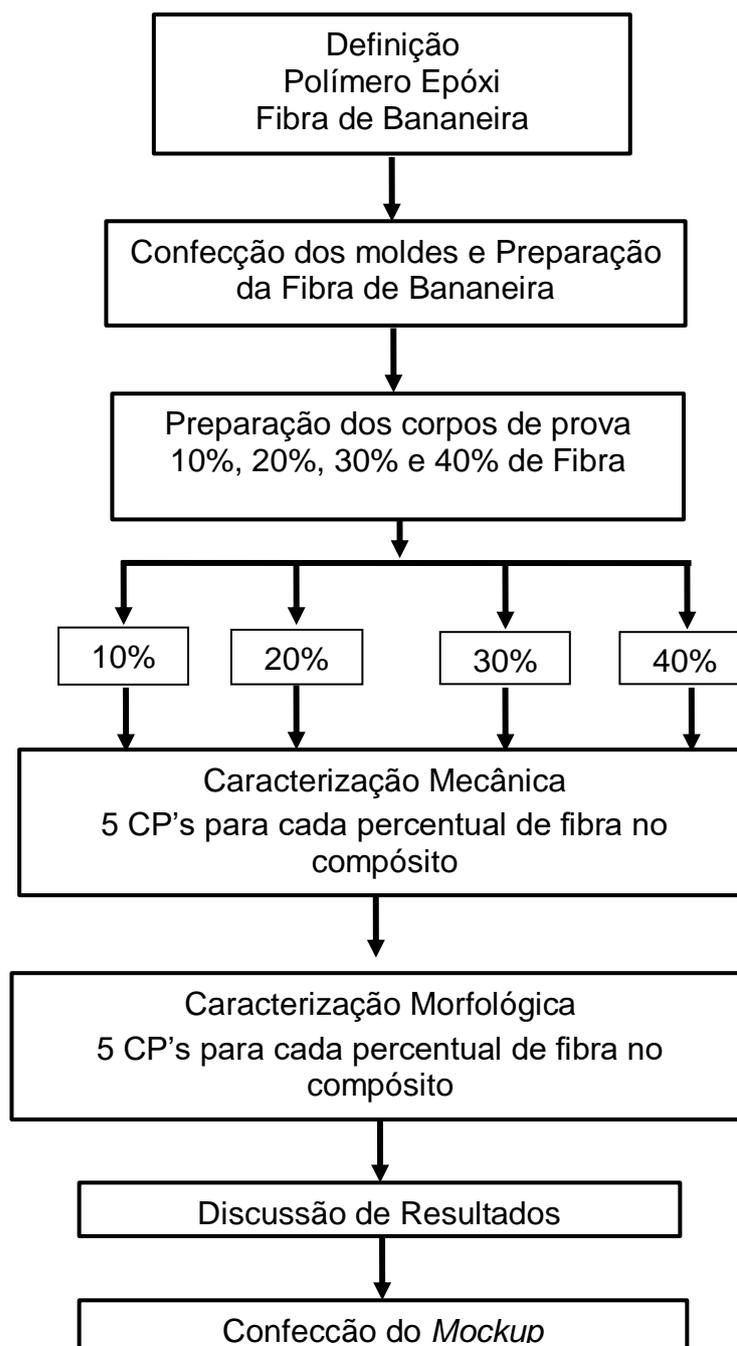


Fonte: DEMARCHI (2010)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta todos os materiais e metodologia utilizada na obtenção de compósitos. A Figura 24 representa o fluxograma das etapas deste trabalho.

Figura 24 – Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: AUTOR (2020).

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Resina epóxi

A matriz polimérica usada foi a resina Epóxi 2004–BB transparente de baixa viscosidade com endurecedor Aradur 3154 na proporção 2:1, como recomenda o fabricante.

A resina Epóxi 2004 – BB, segundo a ficha técnica do fabricante, é uma resina líquida, modificada de baixa viscosidade, formulada à base de bisfenol - A que se solidifica ao reagir com o endurecedor constituído por amina alifática. O endurecedor utilizado foi o Aradur 3154 (Figura 25). Ambos adquiridos da empresa Redecenter S.A. localizada no município de Volta Redonda - RJ, representante regional do fabricante Redelease.

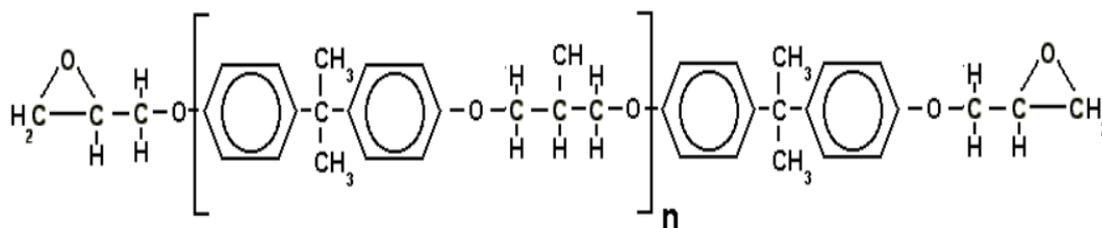
Figura 25 – Resina Epóxi 2004-BB e Endurecedor Aradur 3154.



Fonte: AUTOR (2020)

A Figura 26 mostra a composição química da resina epóxi de bisfenol-A é proveniente da reação de epícloridrina (1-Cloro–2,3-epóxi propano) e bisfenol-A (2, 2-di (4-hidroxifenil) propano). Estas resinas podem ser líquidas, semi-sólidas ou sólidas dependendo de sua massa molar, (SILAEX 2019).

Figura 26 – Fórmula do Epóxi Bisfenol-A.

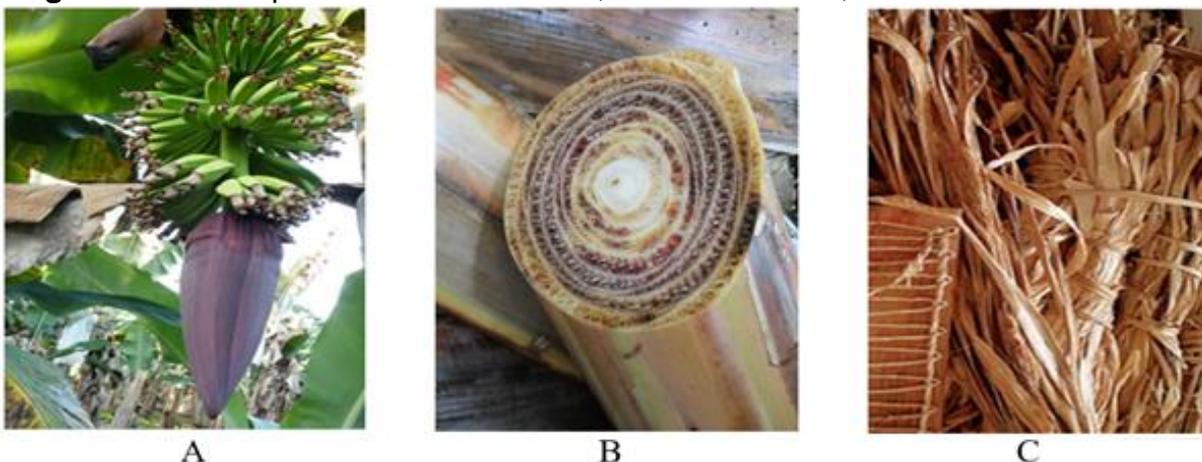


Fonte: SILAEX (2019).

3.1.2 Fibra de bananeira

As fibras de bananeira foram extraídas dos pseudocaules de bananeiras da espécie *Musa acuminata* (Figura 27) doados de uma fazenda de São Bento de Sapucaí SP.

Figura 27 – A: Espécie Musa Acuminata; B: Pseudocaulo; C: Fibra de Bananeira.



Fonte: AUTOR (2020).

3.1.3 Moldes para confecção dos corpos de prova

Para preparação dos moldes dos corpos de prova foi utilizado borracha de silicone branca P5 de baixa viscosidade e catalizador Ref:0711557 (Figura 28), ambos do fabricante Redelease, adquiridos da empresa Redecenter S.A localizada no município de Volta Redonda-RJ.

Figura 28 – Borracha de silicone e catalisador.



Fonte: AUTOR (2020).

3.1.4 Desmoldante

O desmoldante utilizado foi a vaselina sólida em pasta, por não interagir com a resina, ser de fácil aplicação e baixo custo. A vaselina utilizada foi da marca Moriá (Figura 29).

Figura 29 – Vaselina solida em pasta Industrial – Moriá.



Fonte: AUTOR (2020).

3.2 MÉTODOS

Esta pesquisa foi norteadada pela extração de fibras vegetais do pseudocaule de bananeira seguido de seu beneficiamento e preparação para constituir três formas diferentes de fibras de bananeira: A primeira etapa experimental consistiu na extração e preparação de fibras para ser usada como material de reforço. A segunda etapa consistiu na determinação dos teores de fibra no compósito e preparação dos corpos de prova. A terceira etapa consistiu nos ensaios mecânicos e caracterização

microscópica. A última etapa experimental consistiu na montagem de um protótipo para avaliar a eficácia do compósito desenvolvido e comprovação da metodologia aplicada.

3.2.1 Preparo do compósito e fabricação dos corpos de prova

A pesquisa baseou-se em comparar o comportamento mecânico de corpos de prova de epóxi puro com compósitos constituídos por três formas diferentes de fibras de bananeira: aleatórias (em forma de manta), trituradas e longas unilaterais, todas com resina epóxi.

Para conformação dos compósitos nas diferentes formas de fibra, foram adotados os seguintes métodos:

- a) Compósito constituído por manta de fibra aleatória de bananeira como reforço e resina epóxi como matriz, fabricado pelo processo de laminação da manta em camadas sobrepostas;
- b) Compósito constituído por fibras de bananeira trituradas como reforço e resina epóxi como matriz, fabricado pelo processo de moldagem manual;
- c) Compósito constituído por múltiplas fibras de bananeira longas e unilaterais como reforço e resina epóxi como matriz, fabricado pelo processo de impregnação.

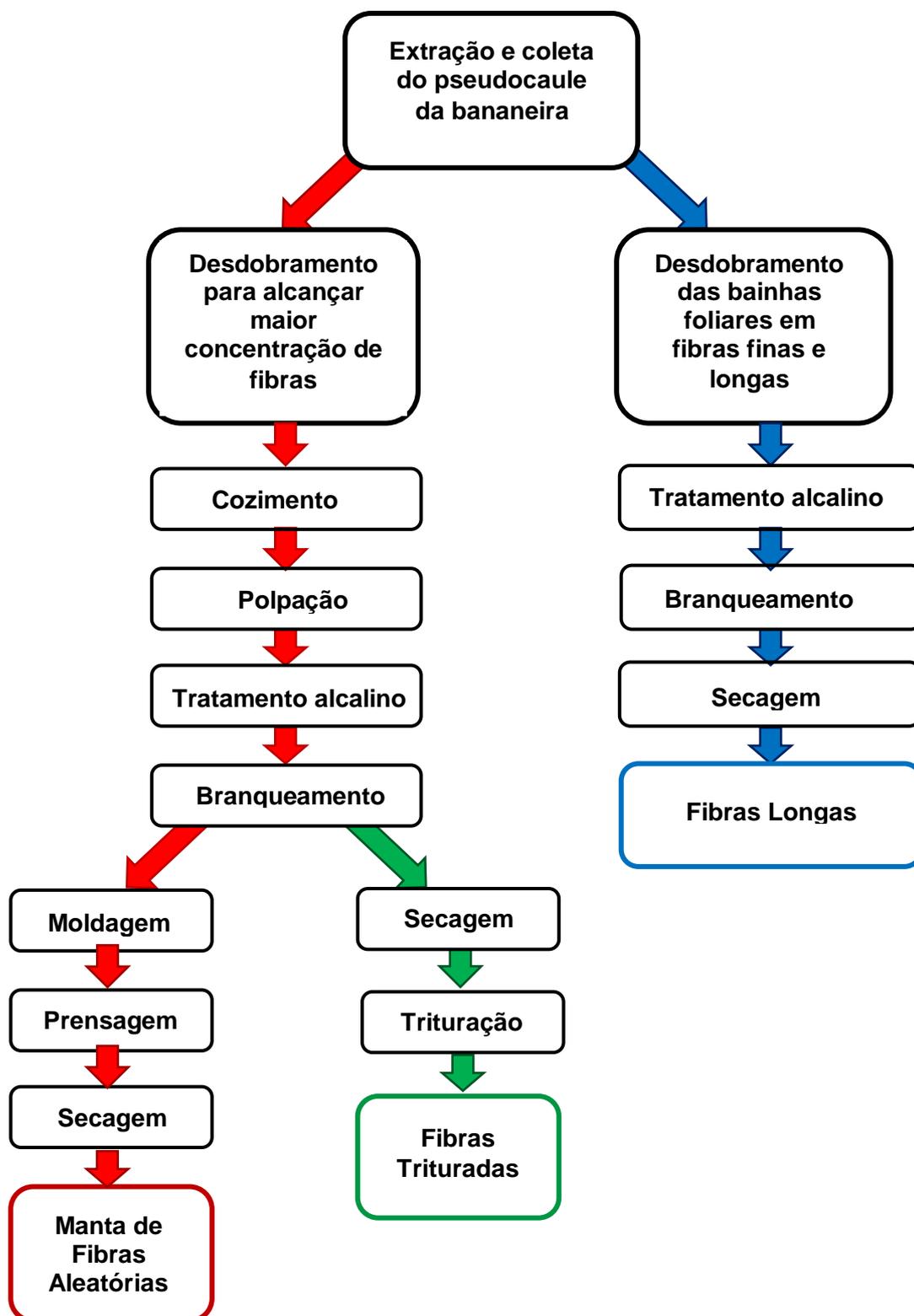
3.2.2 Extração e preparo da manta de fibras aleatórias de bananeira

Após coleta do pseudocaule da bananeira, o processo se dividiu nas seguintes etapas: corte e desdobramento, tratamento alcalino e secagem. Essas etapas foram usadas nas três formas de apresentação das fibras aleatórias, trituradas e longas.

As etapas de cozimento, polpação e branqueamento foram usadas para as fibras aleatórias e trituradas, a moldagem e a prensagem usados somente para as fibras aleatórias.

A Figura 30 mostra o fluxograma com a rota do processo de beneficiamento do pseudocaule da bananeira para a obtenção das três formas de fibras.

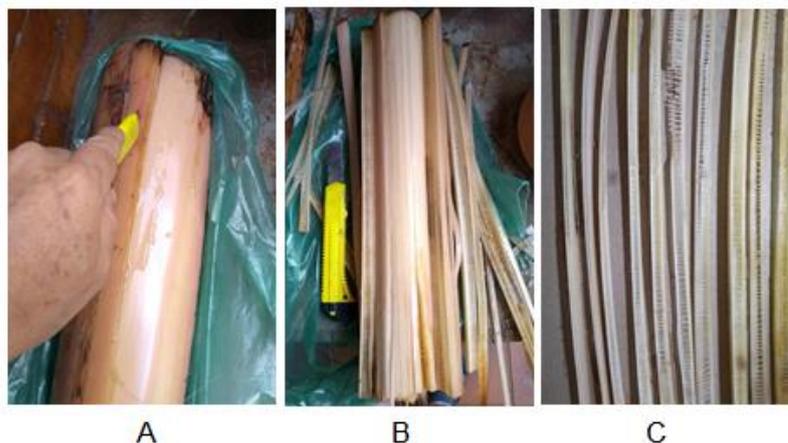
Figura 30 – Fluxograma com a rota de beneficiamento da fibra de bananeira.



3.2.3 Processo de fabricação da manta de fibras aleatórias de bananeira

As bainhas do pseudocaule de bananeira foram obtidas a partir de cortes manuais com estilete comum, nas dimensões de 60 cm de comprimento por 1 cm de largura (Figura 31).

Figura 31 – A: Pseudocaule, B: Cortes longitudinais, C: Corte das talas em bainhas.



Fonte: AUTOR (2020).

As bainhas cortadas foram lavadas com água destilada e ficaram imersas em solução aquosa de ácido acético (CH_3COOH 0,0134 mol/L) durante 12 horas para evitar a oxidação e proliferação de fungos (Figura 32), em seguida as fibras foram lavadas novamente com água destilada até neutralização do pH.

Figura 32 – Bainhas imersas em solução de água destilada e ácido acético.



Fonte: AUTOR (2020).

O processo de extração das fibras das bainhas segue as seguintes etapas: cozimento, tratamento alcalino e branqueamento.

Na etapa de cozimento as bainhas do pseudocaule foram colocadas em um recipiente (balde de alumínio) contendo 2 litros de água filtrada para 1 quilograma de bainhas de bananeira. O cozimento foi realizado em temperatura de aproximadamente de 100°C com agitação da mistura em intervalos de 30 minutos até que as fibras começassem a se desprender das bainhas do pseudocaule (Figura 33), o tempo estimado deste processo foi de aproximadamente 6 horas.

Figura 33 – Bainhas imersas no caldeirão, B- Cozimento com H₂O, C- Separação.



Fonte: AUTOR (2020).

A mistura foi transferida para um recipiente com maior diâmetro, para facilitar a manipulação onde se adicionou 2 litros de água filtrada Figura (34-A), em seguida recebeu um tratamento alcalino com água destilada e hidróxido de sódio (NaOH 15% v/v) marca Iguaçu, (Figura 34-B).

Figura 34 – A- Adição água filtrada, B- Agitação com NaOH, C- Fervura da mistura.

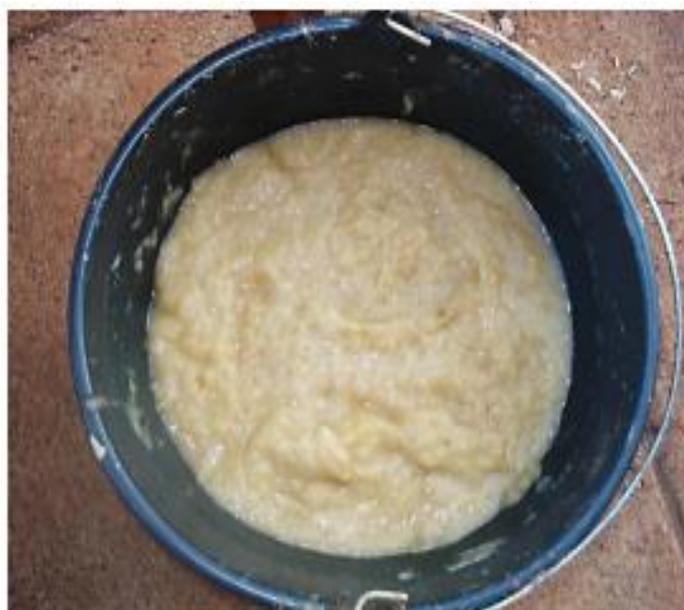


Fonte: AUTOR (2020).

Manteve-se o cozimento a 100°C com a agitação da mistura de 10 em 10 minutos até levantar fervura, conforme mostra a (Figura 34-C). Nesta etapa as fibras delgadas e longas já haviam se separado das bainhas do pseudocaule pelo efeito da temperatura, agitação e tratamento químico.

Após o cozimento e tratamento alcalino, as fibras foram lavadas com água destilada até neutralização do pH, formou-se então uma espécie de massa composta de fibras longas e microfibras banhadas em água, como mostra na (Figura 35).

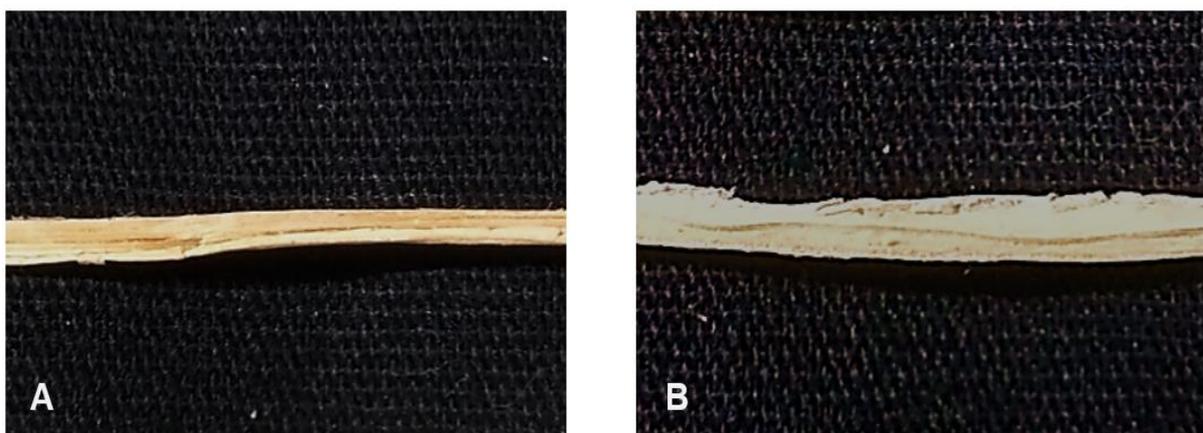
Figura 35 – Massa de fibra pronta para ser clareada.



Fonte: AUTOR (2020).

O uso de soluções alcalinas no tratamento das fibras naturais, favorece a quebra das ligações de hidrogênio que conectam as cadeias de celulose, extraíndo os componentes não celulósicos, facilitando a quebra da lignina e uma parte da celulose amorfa, resultando em fibras com superfícies mais rugosas (Figura 36). Este tratamento proporciona um efeito duradouro sobre o comportamento mecânico da fibra, especialmente na resistência e rigidez, além de apresentar uma superfície mais porosa auxiliando na ancoragem mecânica da matriz polimérica (KHAN et al, 2013).

Figura 36 – A: Fibra antes do tratamento e B: Após o tratamento com NaOH.

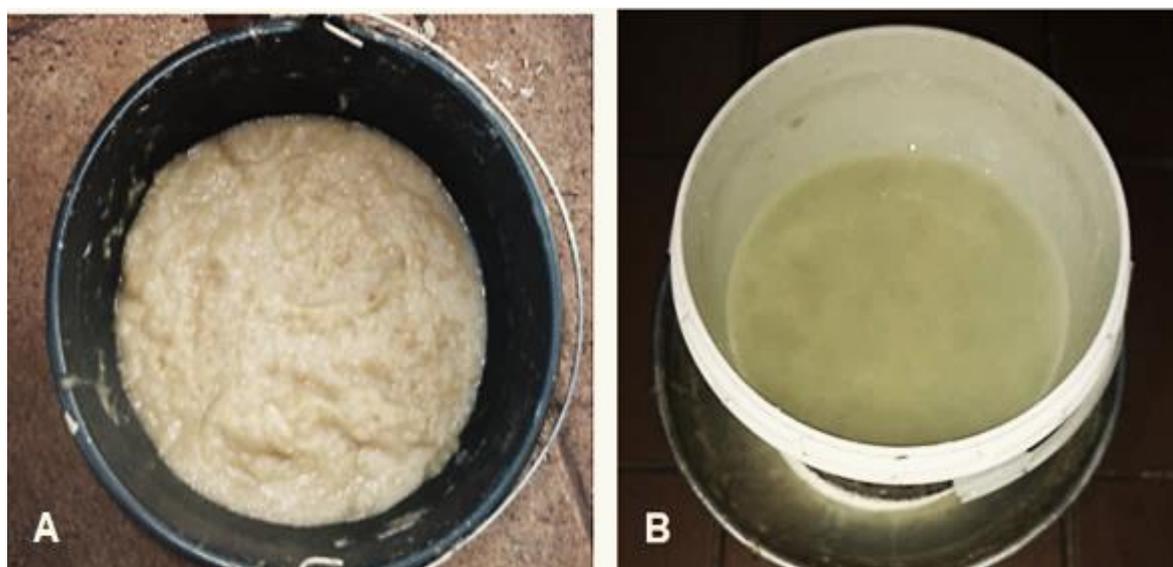


Fonte: AUTOR (2020).

3.2.3.1 Branqueamento das fibras

Para o branqueamento, a massa fibrosa recebeu um tratamento com solução aquosa de 10% v/v de hipoclorito de cálcio e 0,066 mol/L de cloro ativo da marca HTH, (Figura 37).

Figura 37 – A - Massa fibrosa antes e B - após o Branqueamento.



Fonte: AUTOR (2020).

3.2.3.2 Preparação da manta de fibras aleatórias de bananeira

Após passar pelo processo de branqueamento a massa fibrosa foi disposta de forma uniforme em uma peneira circular de 10 Mesh e 50 cm de diâmetro, para o ser moldada em forma de manta durante a secagem (Figura 38).

Figura 38 – Moldagem da manta de fibra sobre a peneira.



Fonte: AUTOR (2020).

As fibras aleatórias já em forma de manta e ainda úmida, foi colocada para secar ao ar livre durante 8 horas. Para receber a primeira prensagem, a manta foi disposta sobre uma mesa lisa e sobre ela foi colocada uma placa de vidro de 10 mm de espessura com peso de 5 quilos, por um período de 24 horas (Figura 39).

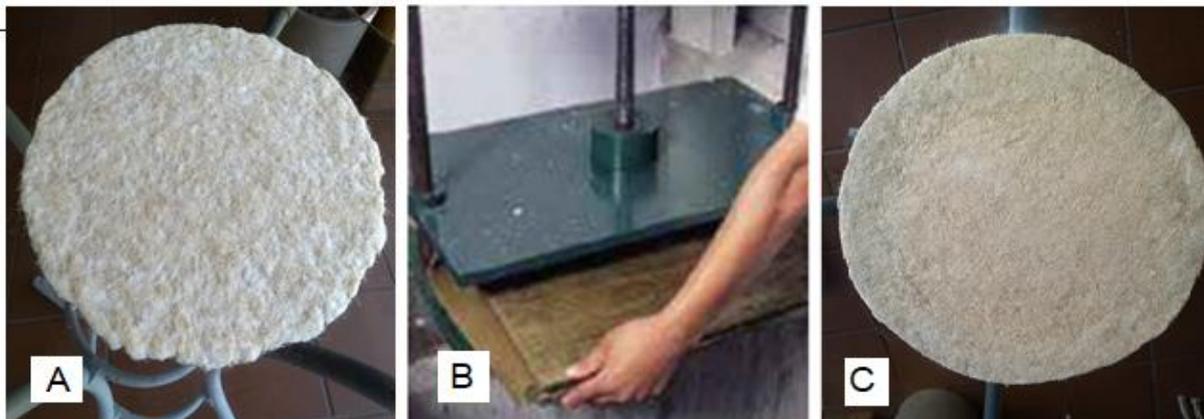
Figura 39 – Manta colocada sobre mesa lisa com uma placa superior.



Fonte: AUTOR (2020).

Após a primeira prensagem, a manta foi colocada em uma prensa hidráulica marca FANET - série 300, da oficina mecânica do Colégio ICT - Volta Redonda e foi aplicada uma força de 120 Kgf durante 12 horas (Figura 34 B). As Figuras 40 A e B mostram a manta de fibra de bananeira antes e após a segunda prensagem.

Figura 40 – A- Aspecto da manta após a primeira prensagem; B- Prensa mecânica; C- aspecto da manta após a segunda prensagem.



Fonte: AUTOR (2020).

3.2.3 Preparo dos moldes para a confecção dos corpos de prova

Para confecção dos moldes dos corpos de prova, foram utilizados: borracha de silicone líquida com catalisador, vaselina sólida como desmoldante, placa de vidro e massa de modelar da marca Acrilex.

Os moldes seguiram as dimensões definidas pela norma ASTM D3039/D3039M-17 para os ensaios de tração e ASTM D790-10 para os ensaios de flexão.

Figura 41 – Forma para a preparação dos moldes.



Fonte: AUTOR (2020).

A placa de vidro, usada como base, foi untada com vaselina sólida Industrial para facilitar a desmoldagem, em seguida corpos de prova no padrão ASTM foram fixados na placa de vidro para dar forma aos moldes. A massa de modelar foi colocada nas bordas da placa de vidro para delimitar o tamanho do molde (Figura 43).

A borracha de silicone líquida, previamente homogeneizada, foi misturada com catalisador na proporção de 5% (m/m), conforme recomendação do fabricante, este processo químico recebe o nome de RTV (*Room Temperature Vulcanizing*), em seguida despejou-se a mistura sobre a placa de vidro com os corpos de prova padrão fixados no fundo desta placa, conforme evidenciado na (Figura 42).

Figura 42 – Preparação dos moldes dos corpos de prova.



Fonte: AUTOR (2020).

A reação química passou por duas etapas de cura: a primeira “tempo de gel” quando o silicone fica gelatinoso e a segunda etapa, após 12 horas, quando a borracha atinge o “tempo de cura” (Figura 43). O endurecimento da borracha pode ser mais lento ou mais rápido dependendo da temperatura ambiente.

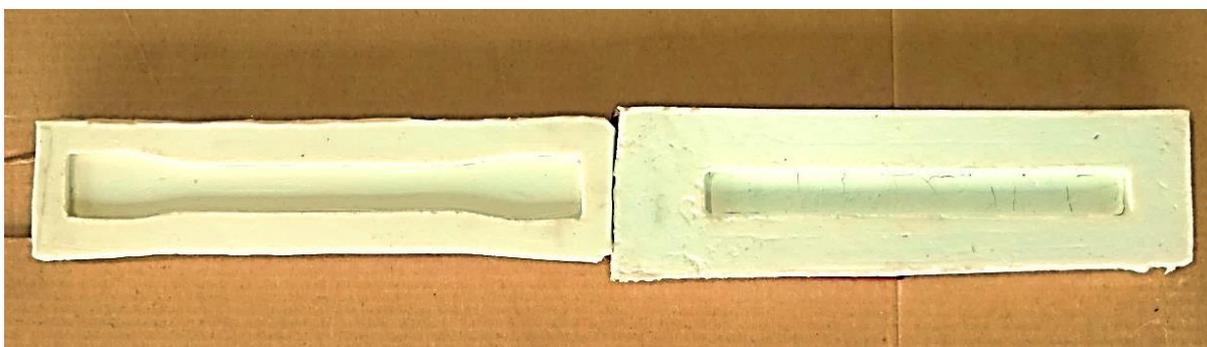
Figura 43 – Molde de borracha de silicone ainda na fase líquida.



Fonte: AUTOR (2020).

O molde foi mantido por 24 horas em local arejado para completa secagem, após este período a massa acrílica se desprende naturalmente da borracha de silicone e em seguida o molde é retirado cuidadosamente da placa de vidro (Figura 44).

Figura 44 – Moldes de silicone para CPs de tração e flexão.

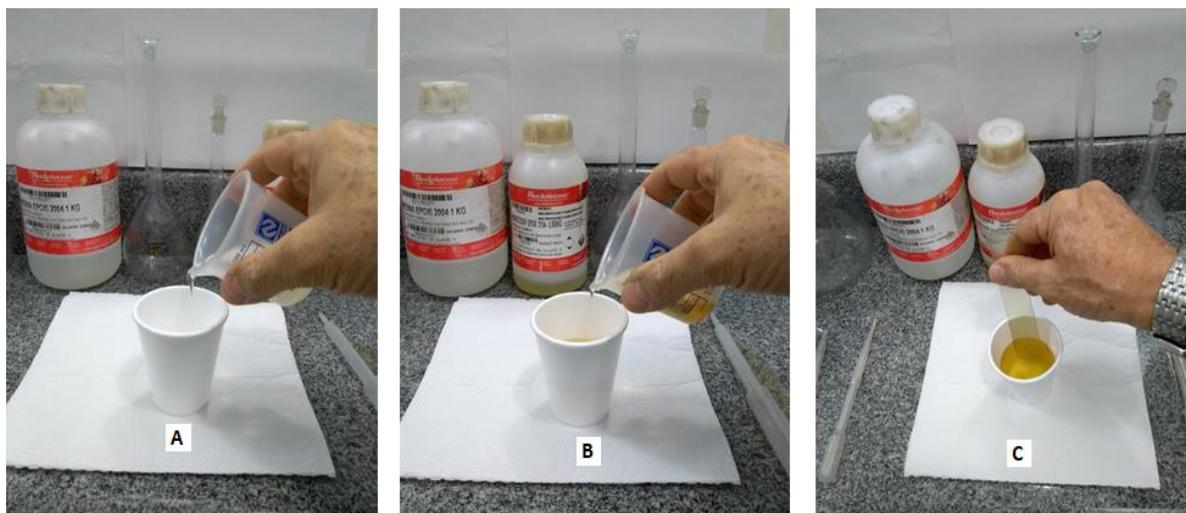


Fonte: AUTOR (2020).

3.2.3.1 Preparo do corpo de prova com Resina Epóxi sem reforço

Para confecção dos corpos de prova preparou-se a mistura de resina epóxi e endurecedor Aradur 3154 na proporção 50 ml de endurecedor para 100 ml de resina, proporção indicada pelo fornecedor para uma cura lenta. O volume de 150 ml da mistura foi suficiente para preparar 5 corpos de prova de resina epóxi sem reforço (Figura 45)

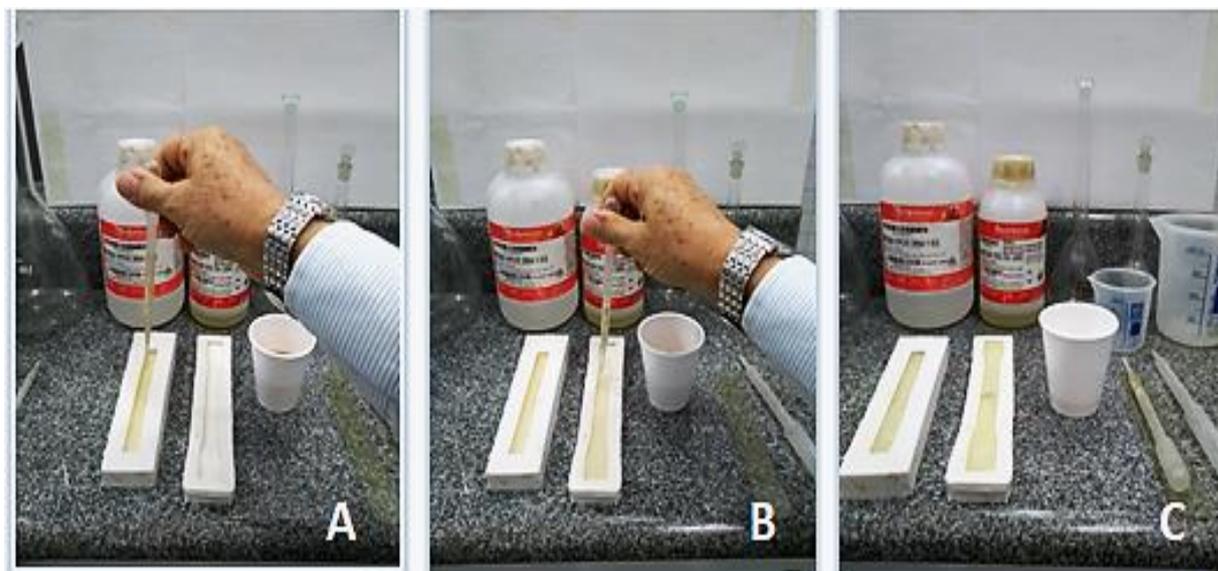
Figura 45 – Resina epóxi; B - Endurecedor; C- Mistura dos componentes.



Fonte: AUTOR (2020).

Com o auxílio de uma pipeta a resina, misturada com o endurecedor, foi inserida nos moldes de silicone desenvolvido neste trabalho (Figura 46).

Figura 46 – A- Preparo dos CPs de flexão; B – Preparo dos CPs de tração; C- CPs em fase de cura.



Fonte: AUTOR (2020).

Os corpos de prova (CP's) com a resina pura foram submetidos ao período de cura de 24 horas na temperatura ambiente, em seguida foram desmoldados (Figura 47).

Figura 47 – A- Desmoldando os CPs de flexão, B- Desmoldando os CPs de tração, C- CP's de flexão e tração prontos para os ensaios.



Fonte: AUTOR (2020).

3.2.3.2 Preparo do compósito com manta de fibras de bananeira e resina epóxi.

A proporção usada para o compósito de fibras aleatórias em forma de manta obedeceu ao seguinte critério: 10%, 20%, 30% e 40% em unidade de massa de reforço (manta) e 90%, 80%, 70% e 60% em unidade de massa de matriz (epóxi), respectivamente.

Primeiramente realizou-se o recorte da manta de fibra de bananeira nas medidas padronizadas dos corpos de prova de tração e flexão, em seguida as peças recortadas foram pesadas na balança digital GEHAKA AG-200 de precisão, do Laboratório de Química do Colégio ICT - Volta Redonda, para determinar a proporção de fibra no compósito, (Figura 48).

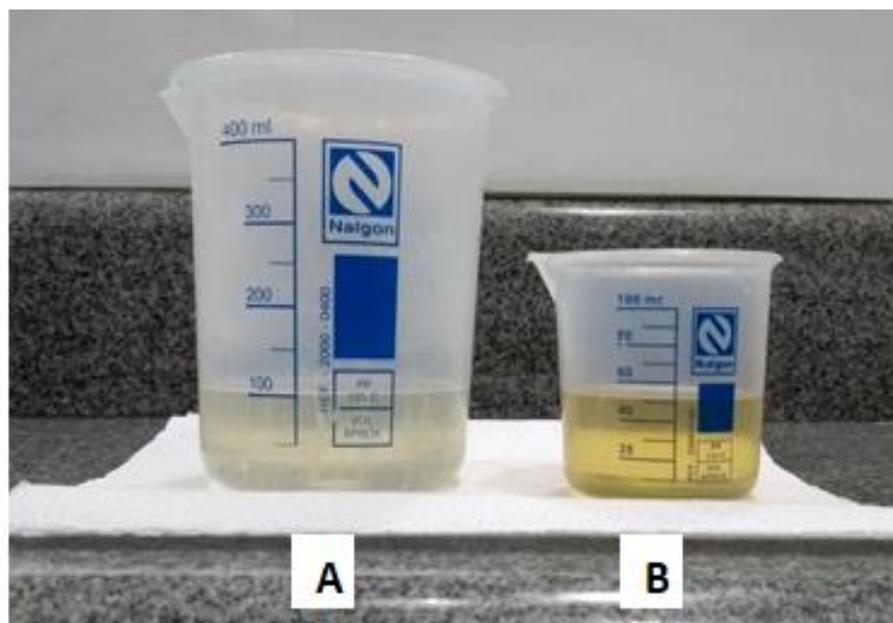
Figura 48 – A - Recorte da manta; B-Pesagem.



Fonte: AUTOR (2020)

Em seguida preparou-se 150 ml da matriz em resina epóxi, sendo 100 ml da resina propriamente dita e 50 ml de endurecedor, quantidade suficiente para preparar todos os corpos de prova com fibras aleatórias em forma de manta (Figura 49).

Figura 49 – Preparação da resina: A – Resina Epóxi 100 ml, B – Endurecedor 50 ml.



Fonte: AUTOR (2020).

Após ter despejado cada componente da resina foi necessário uma espera de 10 minutos para a eliminação das bolhas de ar. A resina foi despejada em um *bowl* de 500 ml de porcelana e em seguida adicionou-se o endurecedor, os componentes foram lentamente misturados com um bastão de vidro durante 4 minutos e a mistura foi colada em repouso durante 10 minutos para facilitar a retirada das bolhas de ar (Figura 50).

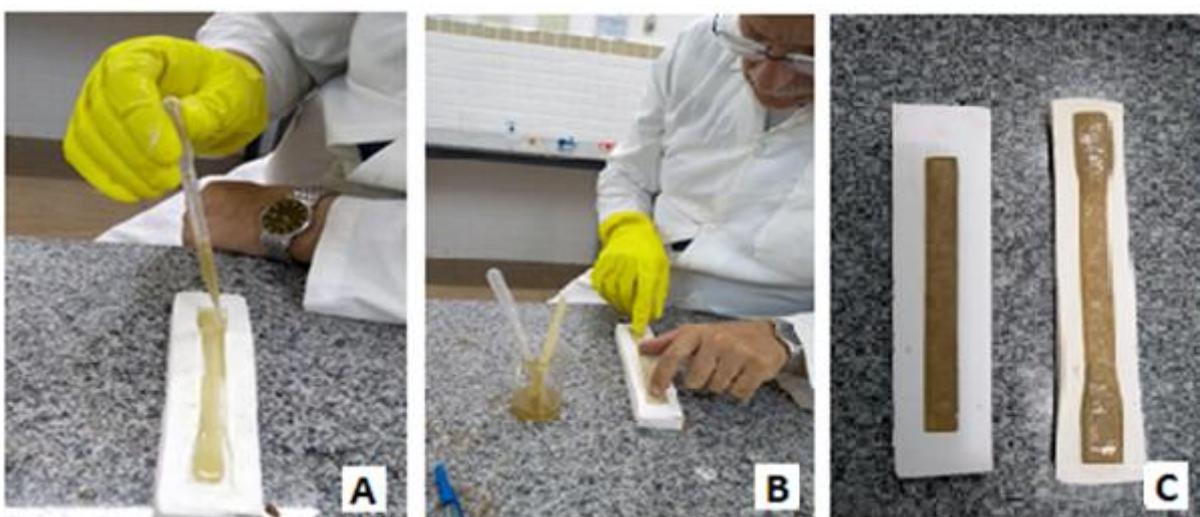
Figura 50 – A- Resina no bowl, B- Adição do endurecedor, C- Mistura.



Fonte: AUTOR (2020).

No preparo dos corpos de prova com manta de fibra aleatória de bananeira e resina epóxi foi retirada do *bowl* uma pequena quantidade de resina, com o auxílio de uma pipeta, depositando uma fina camada nos moldes de silicone. Em seguida foi adicionada a primeira lâmina de manta de fibra aleatória, seguido de mais uma camada de resina líquida e outra lâmina de manta de fibra. Para finalizar foi adicionada a última camada de resina e sobre esta foi adicionada a terceira lâmina de manta de fibra (Figura 51).

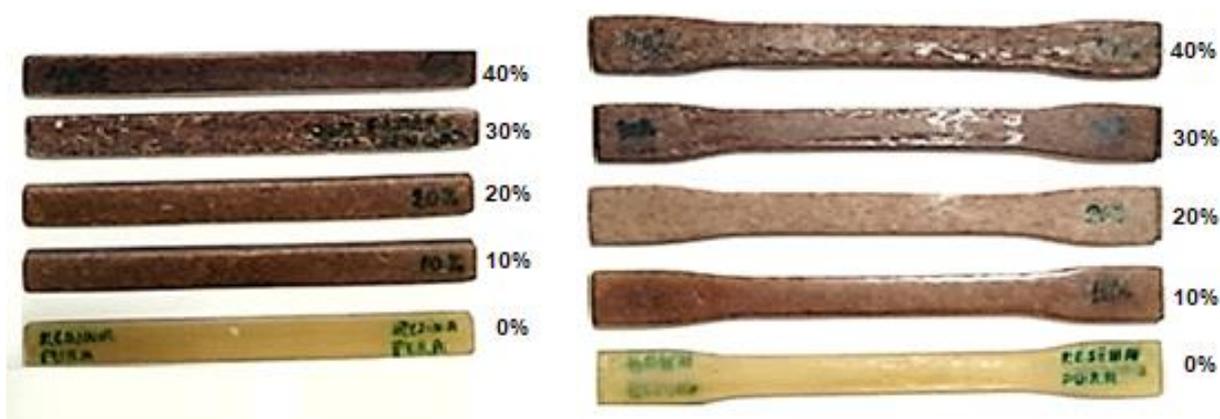
Figura 51 – A - Inserção da resina nos moldes; B – Sobreposição das mantas de fibra de bananeira; C- Corpos de prova prontos para os ensaios mecânicos.



Fonte: AUTOR (2020).

Para os ensaios de tração e flexão foram preparados cinco corpos de prova (CPs) para cada percentual de fibra em forma de manta (Figura 52).

Figura 52 – Corpos de prova do compósito com manta de fibras aleatórias.



Fonte: AUTOR (2020).

3.2.5 Preparo do compósito com fibras de bananeira trituradas e resina epóxi

Inicialmente as fibras foram picadas em pedaços da ordem de 2 a 5 mm e cozidas em temperatura de aproximadamente de 100°C durante 5 horas, com agitação da mistura em intervalos de 30 minutos. Após o cozimento e tratamento alcalino com (NaOH 10% v/v), as fibras picadas foram lavadas com água destilada até neutralização do pH, em seguida foram aquecidas a 60°C durante 12 horas para a retirada de toda umidade e facilitar o processo de trituração, usou-se para o aquecimento a estufa modelo: Q-317B marca Quimis do laboratório de química do Colégio ICT de Volta Redonda-RJ (Figura 53).

Figura 53 – Estufa de circulação de ar para secagem.



Fonte: AUTOR (2020).

Após serem aquecidas e totalmente secas, as fibras foram colocadas em um invólucro plástico hermeticamente fechado e encaminhadas ao Laboratório de Polímeros da UNESP, localizado no município de Guaratinguetá – SP, para serem trituradas no moinho de facas TE-650 do tipo Willye e passadas por uma peneira de 30 Mesh (Figura 54).

Figura 54 – A – Fibra de bananeira picada, B – Moinho de facas, C – Fibras de bananeira tritura e D – Fibra de bananeira peneirada.



Fonte: AUTOR (2020).

Para confecção do compósito com fibras trituradas foram utilizadas as proporções de 10%, 20%, 30% e 40% de fibra de bananeira triturada e 90%, 80%, 70% e 60% de resina epóxi (m/m) respectivamente (Tabela 7).

Tabela 7 – Composição do compósito de Resina epóxi e Fibra de bananeira triturada.

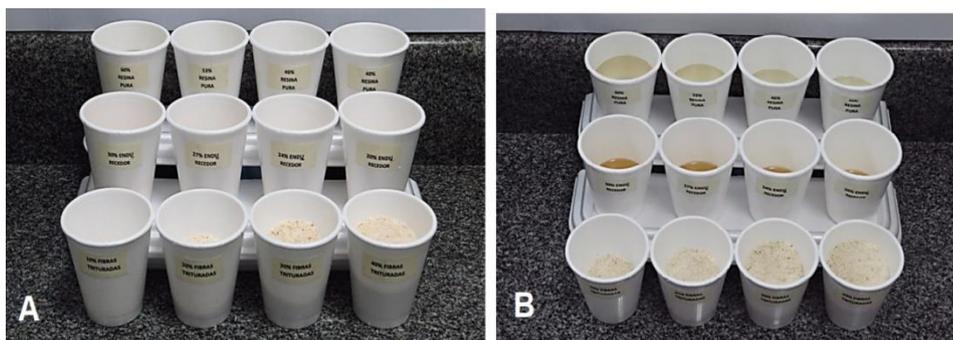
Amostra	% de Fibra	Peso da Fibra	% de Resina + Endurecedor	Peso da Resina Pura	Peso do Endurecedor
CP-1	10%	10 g	90%	60 g	30 g
CP-2	20%	20 g	80%	53 g	27 g
CP-3	30%	30 g	70%	46 g	24 g
CP-4	40%	40g	60%	40 g	20 g

Fonte: AUTOR (2020).

Para determinar o percentual definido pela Tabela 6, a resina epóxi, o endurecedor e a fibra triturada foram pesados na balança digital GEHAKA SF-400 e separados de acordo com suas respectivas proporções.

Na figura 55- A vista frontal mostra as proporções de resina, endurecedor e fibra triturada, a figura 55- B Vista de topo mostra todos os ingredientes já pesados e preparados para a mistura da resina, fibra e endurecedor.

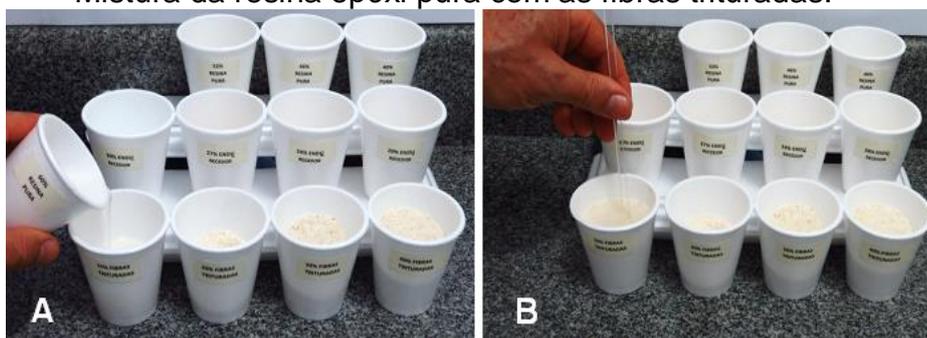
Figura 55 – A vista frontal; 47- B Vista de topo.



Fonte: AUTOR (2020).

Para cada composição definida do compósito adotou-se o procedimento de misturar a resina epóxi pura, sem o endurecedor, à fibra de bananeira triturada, deixando a mistura em repouso por 12 horas para a impregnação total da resina na fibra (Figura 56).

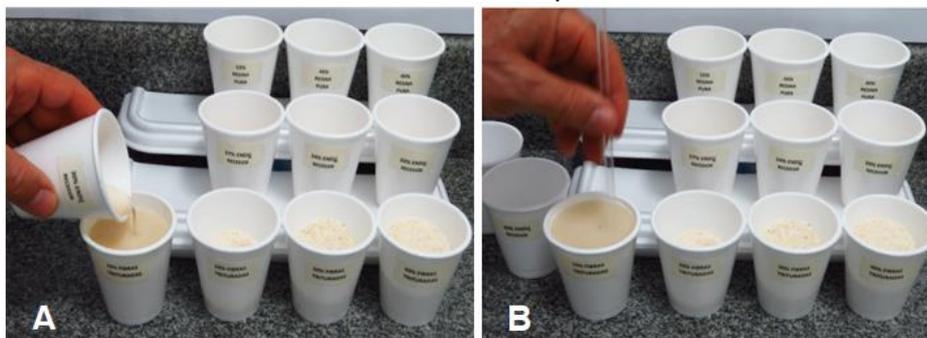
Figura 56 – A: Adição da resina epóxi pura na fibra triturada; B: Mistura da resina epóxi pura com as fibras trituradas.



Fonte: AUTOR (2020).

Após o período de impregnação, adicionou-se o endurecedor, misturando lentamente até atingir a homogeneização total do compósito (Figura 57).

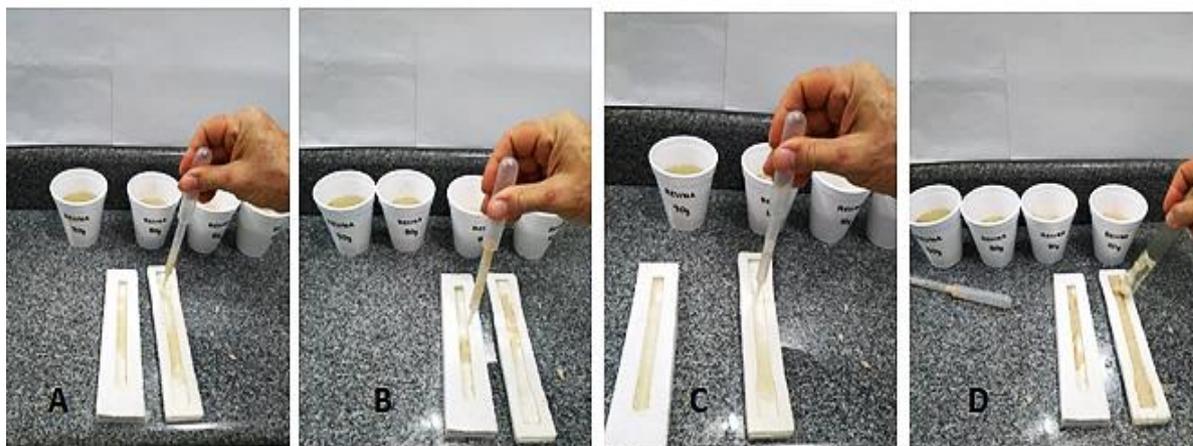
Figura 57 – A: Adição do endurecedor na fibra impregnada pela resina; B: Mistura dos componentes.



Fonte: AUTOR (2020).

Este procedimento se repetiu para todas as proporções de fibras trituradas com suas respectivas proporções de resina epóxi e endurecedor. Com o auxílio de uma pipeta iniciou-se o preenchimento dos moldes dos corpos de prova de flexão e tração (Figura 58).

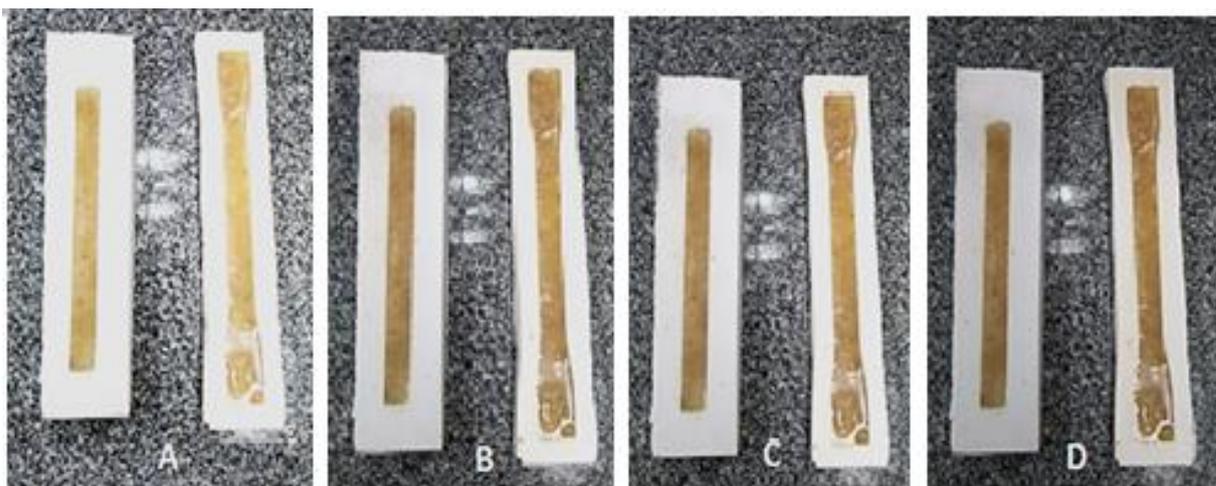
Figura 58 – Preenchimento dos moldes com fibras trituradas e resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

Os corpos de prova ficaram em repouso por 12 horas em temperatura ambiente para completar a fase de polimerização, (Figura 59).

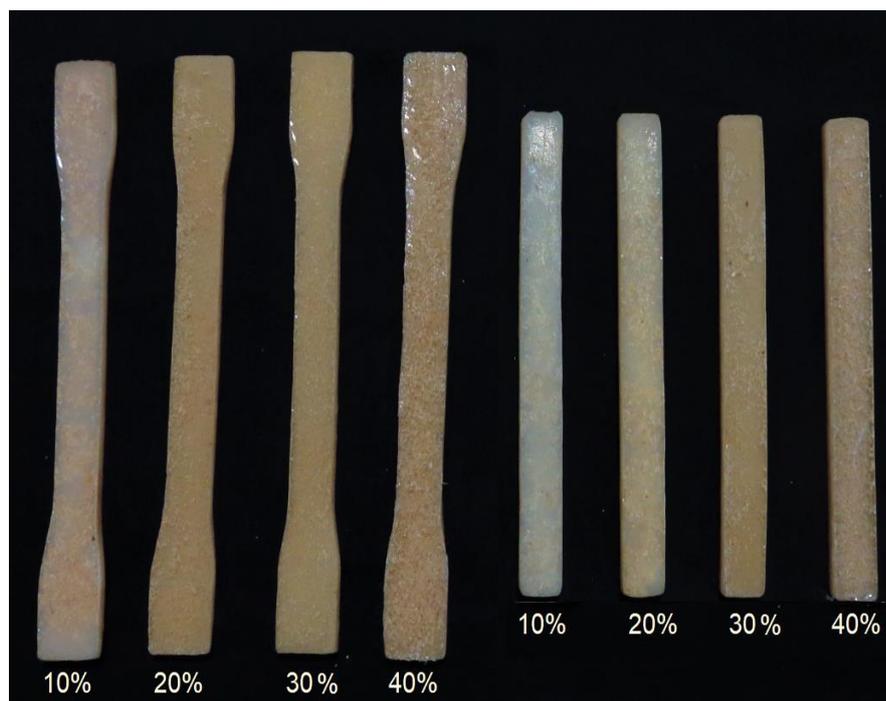
Figura 59 – CP's em fase de cura; A- Com 10% de fibra; B- Com 20% de fibra; C- Com 30% de fibra e D- Com 40% de fibra.



Fonte: AUTOR (2020).

Em seguida os CPs foram retirados das formas e ficaram prontos para os testes mecânicos de tração, flexão e dureza (Figura 60).

Figura 60 – Corpos de prova de compósitos com fibras trituradas.

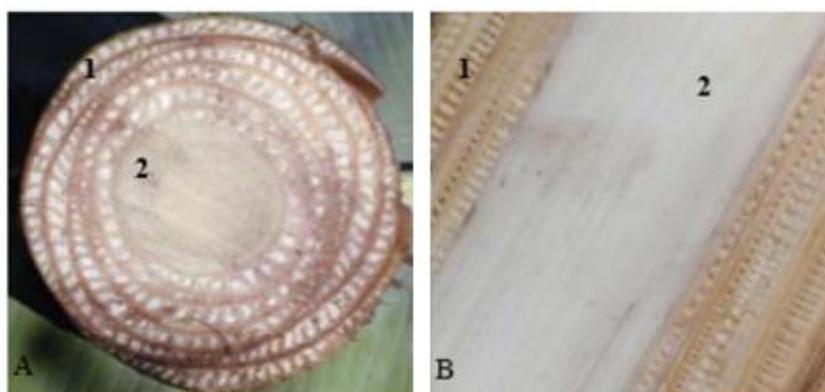


Fonte: AUTOR (2020).

3.2.6 Preparo do compósito com fibras de bananeira longas e resina epóxi

As fibras de bananeira utilizadas neste trabalho são da espécie *Musa. Acuminata* e se originam da região sudeste do Brasil, mais especificamente de Minas Gerais e São Paulo. Após a colheita da planta, houve o corte do seu pseudocaule, e as bainhas foliares foram extraídas manualmente, (Figura 61).

Figura 61 – A: Corte transversal do pseudocaule; B: Corte longitudinal (1- bainhas foliares e 2- talo floral).



Fonte: AUTOR (2020).

Retirou-se a capa externa do pseudocaule e, através de cortes longitudinais, as bainhas foliares foram extraídas, (Figura 62).

Figura 62 – A: Pseudocaule; B: Corte Longitudinal; C: Bainhas.



Fonte: AUTOR (2020).

3.2.6.1 Preparo das fibras.

Na confecção dos compósitos de fibras de bananeira longas realizou-se o corte longitudinal do pseudocaule extraindo manualmente as bainhas foliares do tronco que foram colocadas sobre uma mesa e, através de uma placa de metal e um fio de aço esticado nesta placa, as três camadas das bainhas foram separadas. (Figura 63).

Figura 63 – Obtenção das fibras longas: A: Bainhas dispostas sobre a mesa para a extração das camadas; B: Desdobramento das bainhas foliares; C: Região interna extraída das bainha foliares.



Fonte: AUTOR (2020).

Conforme mostra a Figura (64), as fibras longas longitudinais foram retiradas da camada mais interna das bainhas do pseudocaule por serem mais maleáveis, o que facilita a extração e depois de secas as fibras tornam-se bastante resistentes, ideais para utilização como reforço em compósitos.

Figura 64 – Extração da fibras longas longitudinais.



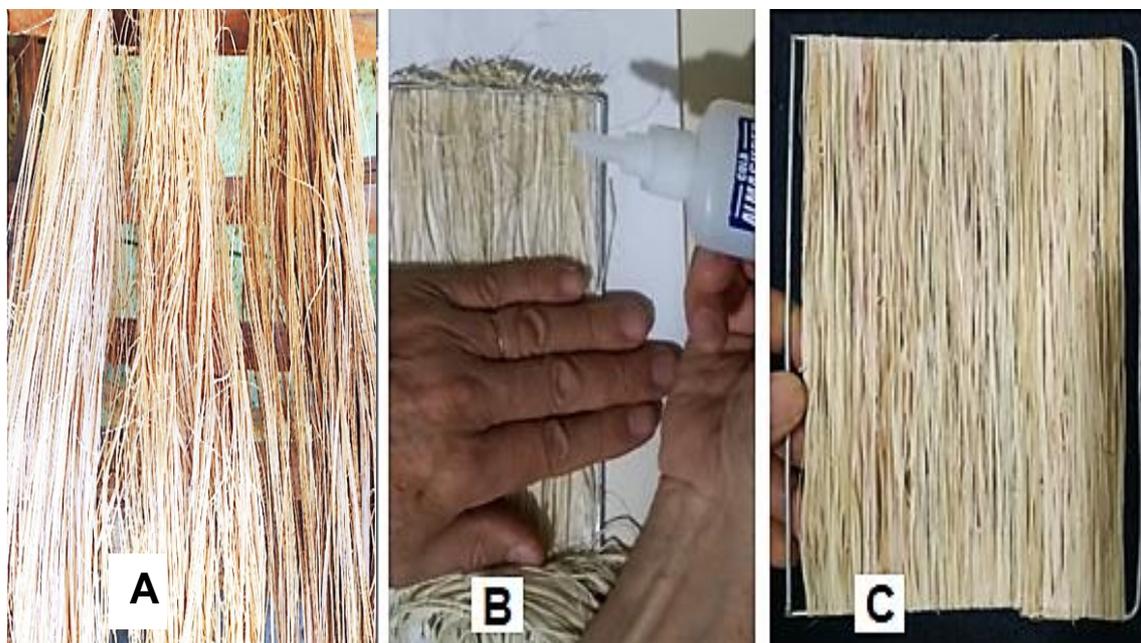
Fonte: AUTOR (2020).

Em seguida as fibras longas foram lavadas com água destilada e inseridas em um recipiente onde recebeu um tratamento alcalino com água destilada e hidróxido de sódio (NaOH 10% v/v) marca Iguaçu. As fibras longas permaneceram em tratamento alcalino durante 6 horas para remover os componentes não celulósicos das fibras, favorecendo a quebra da lignina e uma parte da celulose amorfa, conferindo assim, uma superfície mais rugosa. Durante todo esse processo, evitou-se a agitação e o aquecimento das fibras para manter as suas integridades físicas.

Após o tratamento alcalino, as fibras foram submetidas ao branqueamento com solução aquosa com 10% v/v de hipoclorito de cálcio e 0,066 mol/L de cloro ativo da marca HTH, em seguida foram lavadas e penduradas para secar em um suporte de madeira na temperatura ambiente (27°C) durante 12 horas (Figura 65-A).

Após a secagem as fibras longas foram fixadas e esticadas em uma armação retangular de metal e distribuídas de forma contínua e unilateralmente alinhadas na direção longitudinal aos corpos de prova visto que, segundo Velásquez (2016) o alinhamento das fibras na direção dos esforços atuantes nos compósitos otimizam o seu desempenho mecânico (Figura 65-B e C).

Figura 65 – A: Fibras longas tratadas e secas; B: Fibras longas fixadas em armação de metal; C: Fibras longas preparadas para a impregnação com resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

3.2.6.2 Impregnação e moldagem dos CP's com fibras longas e resina epóxi

A preparação dos corpos de prova com fibras longas não foi realizada nos moldes de borracha de silicone preparados inicialmente para fibras aleatórias e trituradas, isso porque as fibras longas não ficavam assentadas dentro do molde. Como alternativa preparou-se uma placa retangular, usando o compósito com fibras longas unidirecionais, e dela foram cortadas tiras no formato dos corpos de prova de tração e flexão.

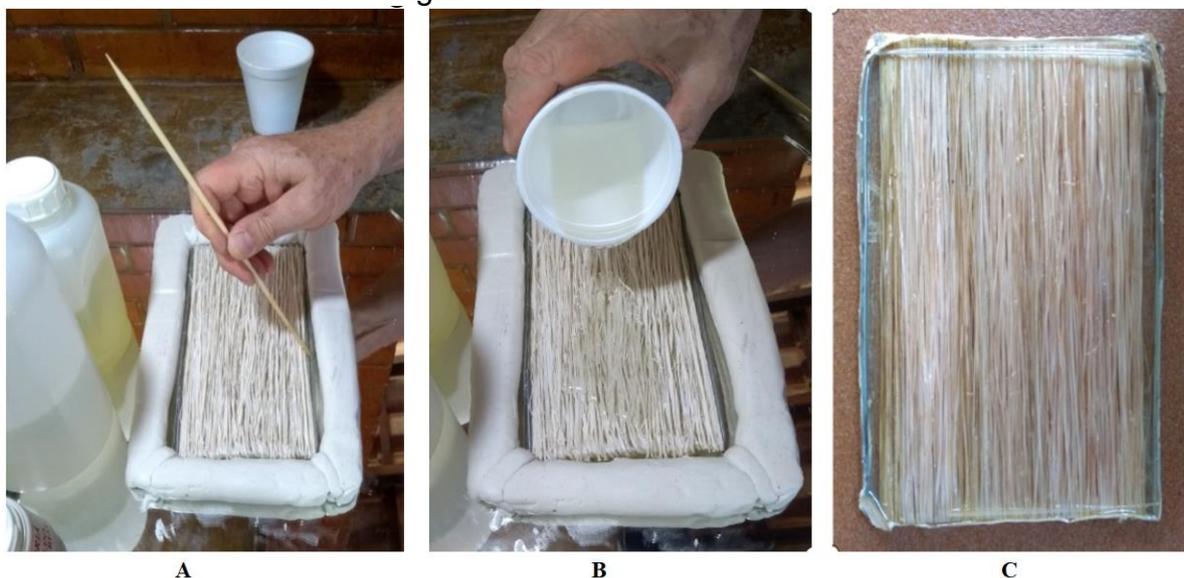
A proporção usada para o compósito de fibras longas unilaterais obedeceu ao seguinte critério: 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de reforço e 90%, 80%, 70%, 60% e 50% da matriz epóxi, (m/m).

A resina epóxi foi pesada na balança digital GEHAKA SF-400, e misturada com endurecedor na proporção 2:1, realizou-se esse procedimento para cada composição definida de compósito com fibras longas.

Sobre a armação de metal com fibras longas paralelamente alinhadas verteuse a resina, já misturada com o seu endurecedor e manteve-se o conjunto em repouso por 24 horas (Figura 66 A e B). A Figura 66 C mostra a armação de metal

com o compósito de fibras longas e resina epóxi pronto para marcação e corte para a confecção dos corpos de prova.

Figura 66 – Preparação do compósito com 30% de fibras longas e unilaterais.



Fonte: AUTOR (2020).

O passo seguinte foi a marcação da placa para o formato dos corpos de prova de tração e flexão, (Figura 67).

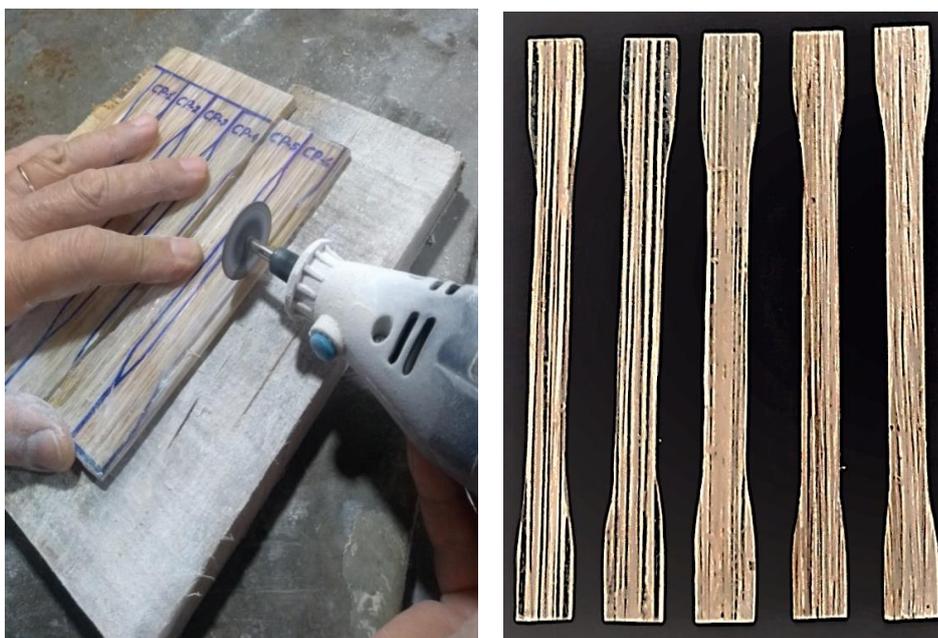
Figura 67 – Placa do compósito marcada para corte no formato dos CPs.



Fonte: AUTOR (2020).

O corte da placa no formato dos corpos de prova de tração e flexão foi realizado na oficina mecânica do ICT, Volta Redonda, utilizando uma mini retífica da marca Einrell, série 2047, (Figuras 68 e 69).

Figura 68 – Corte da placa no formato dos CPs para ensaio de tração.



Fonte: AUTOR (2020).

Figura 69 – Corte da placa no formato dos CPs para ensaio de flexão.



Fonte: AUTOR (2020).

Para os ensaios de tração e flexão foram preparados cinco corpos de prova (CPs) com cada percentual (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) do compósito de fibra longa (Figura 70).

Figura 70 – Corpos de prova do compósito de resina epóxi com fibras longas.



Fonte: AUTOR (2020).

3.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para realizar o estudo bem fundamentado das características mecânicas do material desenvolvido, foi necessário executar os ensaios de tração, flexão e dureza do compósito nas diversas proporções da matriz com o reforço de fibras de bananeira. Portanto foram preparados cinco corpos de prova para cada percentual e tipo de fibra, perfazendo um total de 130 CPs.

Para os ensaios mecânicos foram utilizados os corpos de prova com três tipos diferentes de distribuição das fibras de bananeira no compósito:

- Corpos de provas (CPs) constituídos pelo compósito de manta de fibras aleatórias de bananeira nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40%;

- Corpos de provas constituídos pelo compósito de fibras de bananeira trituradas nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40%;

- Corpos de provas constituídos pelo compósito de fibras longas unilaterais e no sentido longitudinal aos CPs, nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

A figura 71 mostra alguns destes CPs com os três tipos de fibras (aleatórias, trituradas e longas) prontos para os ensaios e dureza, tração e flexão.

Figura 71 – Corpos de prova com os três tipos de fibra, prontos para os ensaios.



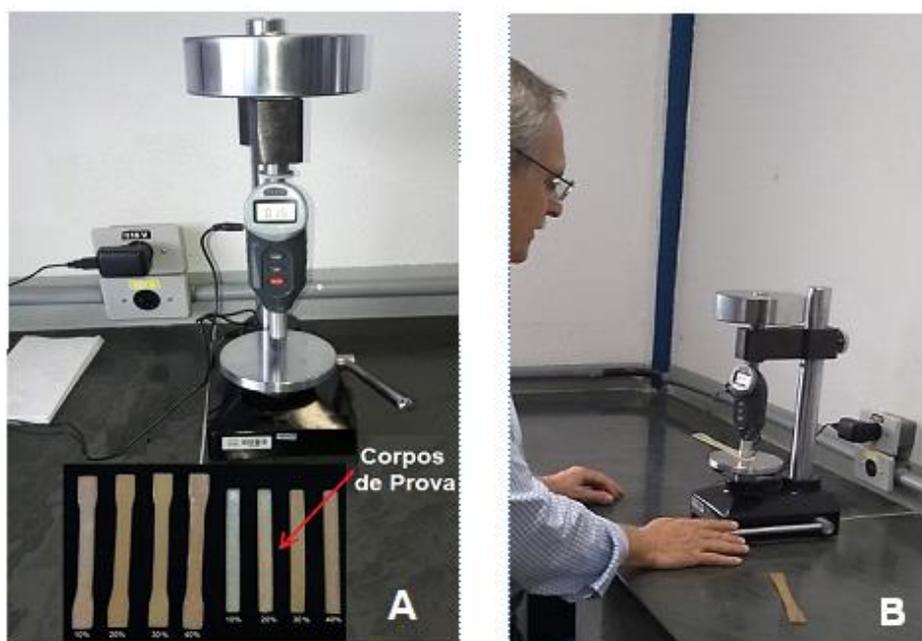
Fonte: AUTOR (2020)

3.3.1 Ensaio de dureza

Dureza constitui a propriedade de um material que permite a ele resistir a deformação plástica, usualmente por penetração. Ou seja, expressa resistência a deformações permanentes de um material.

O ensaio de dureza foi realizado com base na norma NBR 7456, onde é definido o método ideal para utilização e determinação de dureza por penetração nos materiais. Foi utilizado o durômetro digital portátil tipo Shore D-TH 210 do Laboratório de Materiais da Universidade de Volta Redonda UniFOA (Figura 72).

Figura 72 – A: Durômetro; B: Ensaio de dureza.



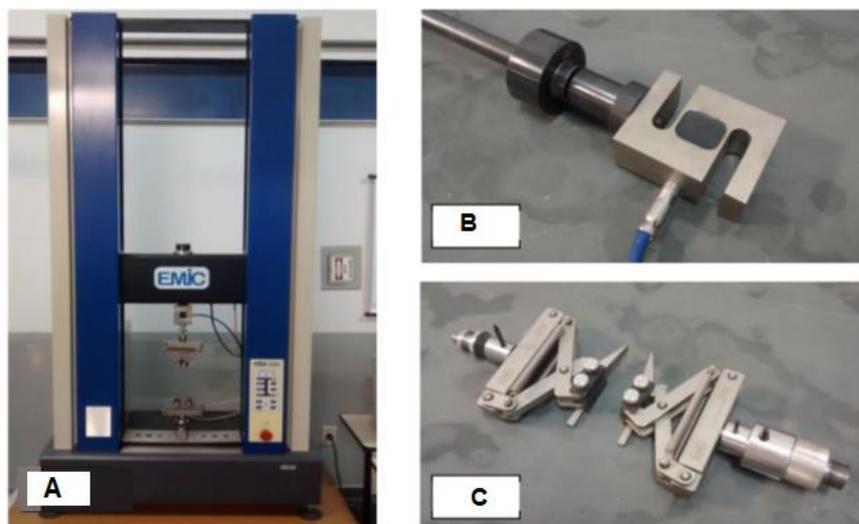
Fonte: AUTOR (2020).

3.3.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Processamento de Materiais do Centro Universitário (UniFOA) de Três Poços, em uma máquina universal de ensaios, da marca EMIC DL-10000, com célula de carga de 5 kN, seguindo as recomendações da ASTM D-3039/D30309M-17, em temperatura ambiente de 25°C. A força de tração foi aplicada com velocidade de 2 mm/min, (Figura 73 e 74).

Para cada compósito avaliado, foram ensaiados cinco corpos de prova com compósitos desenvolvidos neste trabalho. Também foram ensaiados cinco corpos de prova com a resina pura para comparação da evolução da resistência e deformação de acordo com a proporção de fibra no compósito.

Figura 73 – A: Máquina universal, B- Célula de carga, C- Mandril ou garra.



Fonte: AUTOR (2020).

Figura 74 – Imagens de um ensaio de tração até o rompimento do CP.

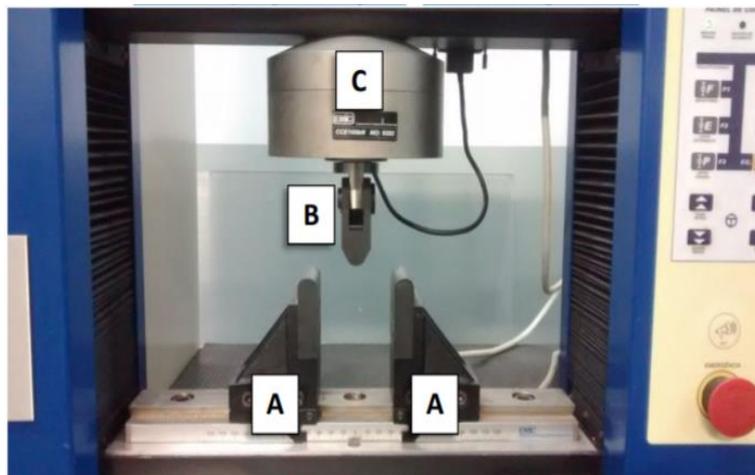


Fonte: AUTOR (2020).

3.3.3 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão foram realizados no Laboratório de Processamento de Materiais do Centro Universitário (UniFOA) de Três Poços, em uma máquina universal de ensaios, da marca EMIC DL-10000, com célula de carga de 5 kN, seguindo as recomendações da ASTM D790-10, em temperatura ambiente de 25°C. Durante o ensaio a força foi aplicada com velocidade de 2 mm/min (Figuras 75 e 76).

Figura 75 – Máquina de Ensaios EMIC DL-10000: A– Apoios. B– Cutelo de aplicação de força. C– Célula de Carga de 5 KN.



Fonte: AUTOR (2020).

Figura 76 – Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de flexão.



Fonte: AUTOR (2020).

Para cada compósito avaliado, foram ensaiados cinco corpos de prova com dimensões de acordo com a norma ASTM D 790 – 10. Também foram ensaiados corpos de prova com a resina pura para comparação da evolução da resistência de acordo com a proporção de fibra no compósito.

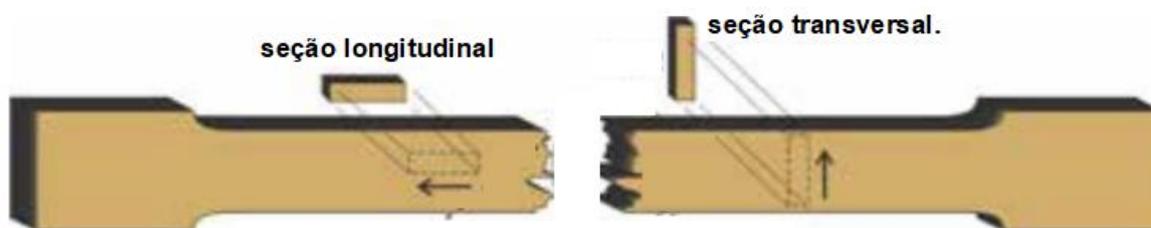
3.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

3.4.1 Microscopia ótica

A microscopia ótica permite visualizar a amostra com ampliações elevadas para identificar a ocorrência de falhas nos compósitos, regiões predominantes de fibra ou de resina e a presença de possíveis bolsas de ar formadas durante a polimerização da resina, (MARINUCCI 2011).

Para a realização das análises morfológicas foram selecionadas seções longitudinais e transversais das amostras fraturadas, provenientes dos ensaios de tração, e delas foram retiradas fatias retangulares nas dimensões de 0.7 x 1.8 cm, (Figura 77).

Figura 77 – Indicação das regiões dos corpos de prova que foram analisados.

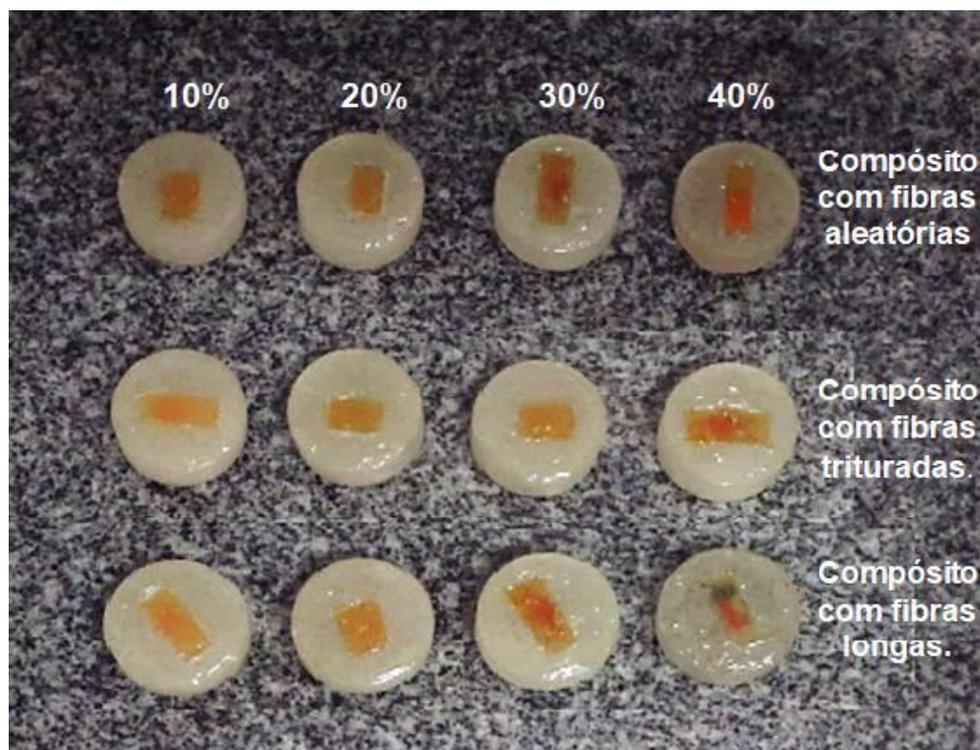


Fonte: AUTOR (2020)

Em seguida as fatias, com as amostras dos compósitos, foram embutidas a frio com resina acrílica em moldes metálicos para facilitar o manuseio e possibilitar o tratamento superficial. Após 5 horas, com a resina já sólida, as pastilhas de acrílico com as amostras foram desenformadas e identificadas.

A Figura 78 mostra as pastilhas de acrílico com os três tipos de compósitos com os percentuais de 10%, 20%, 30% e 40% de fibra de bananeira.

Figura 78 – Pastilhas de acrílico com as amostras.



Fonte: AUTOR (2020).

Para possibilitar as análises de microscopia ótica as pastilhas com as amostras receberam um tratamento superficial através da Politriz AROTEC do Laboratório de Processamento de Materiais do Centro Universitário (UniFOA), e uma bateria de lixas apropriadas de carbeto de silício com variadas granulometrias, a saber: 220, 360, 400, 600, 800, 1200 e 1500, (Figura 79).

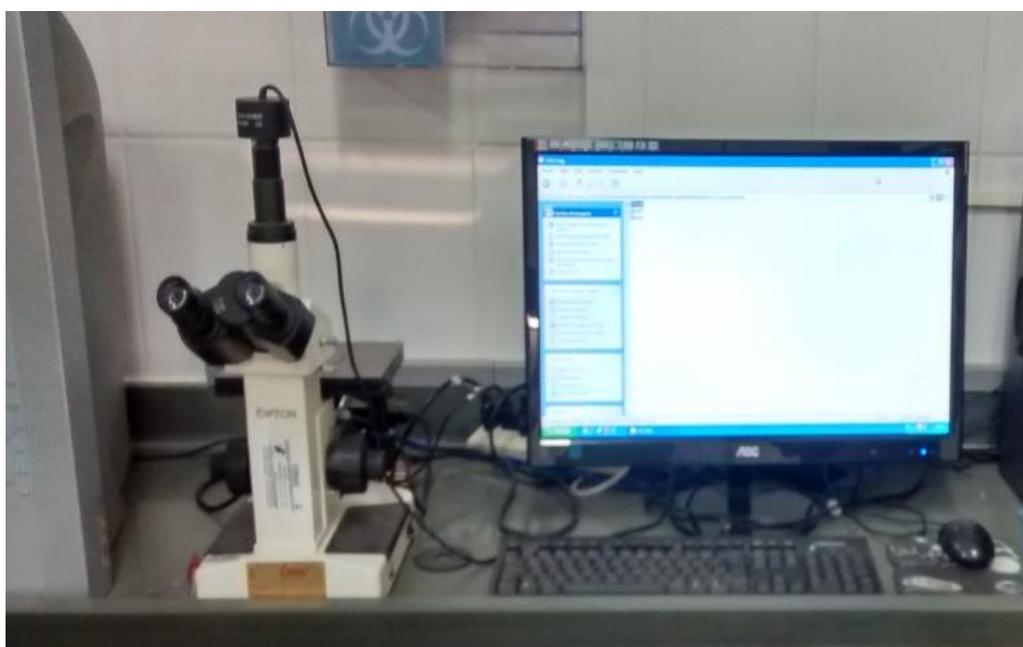
Figura 79 – Politriz AROTEC.



Fonte: AUTOR (2020)

Posteriormente as pastilhas com as amostras foram destinadas ao polimento com feltro e pastas de diamante de 1 μm e alumina de 0,3 μm , e em seguida foram lavadas com álcool 92°C, secas com secador normal e destinadas às análises de microscopia ótica. A microscopia foi realizada com o microscópio metalográfico Invertido OPTON TNM-07T-PL e *software* Scope Photo 3.0 do Laboratório de Processamento de Materiais do Centro Universitário (UniFOA) de Três Poços, onde foi utilizada lente ocular de 10X e as lentes objetivas para ampliação de 100X, 200X e 400X, (Figura 80).

Figura 80 – Microscópio ótico OPTON TNM – 07T – PL.



Fonte: AUTOR (2020)

3.4.2 Microscopia eletrônica de varredura

A análise micro estrutural foi realizada com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV - ZEISS EVO-10) do laboratório de metalurgia da UFF - Volta Redonda – RJ, com um espectroscópio de raios X dispersivo em energia (EDS). Foi utilizado sinal de elétrons secundários (SE1), com tensão de feixe de elétrons (ETH) de 20 kV, com distância de trabalho (WD) de 11,5 mm e magnitude variando de 150 à 450 vezes (Figura 81).

Figura 81 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV - ZEISS EVO-10).

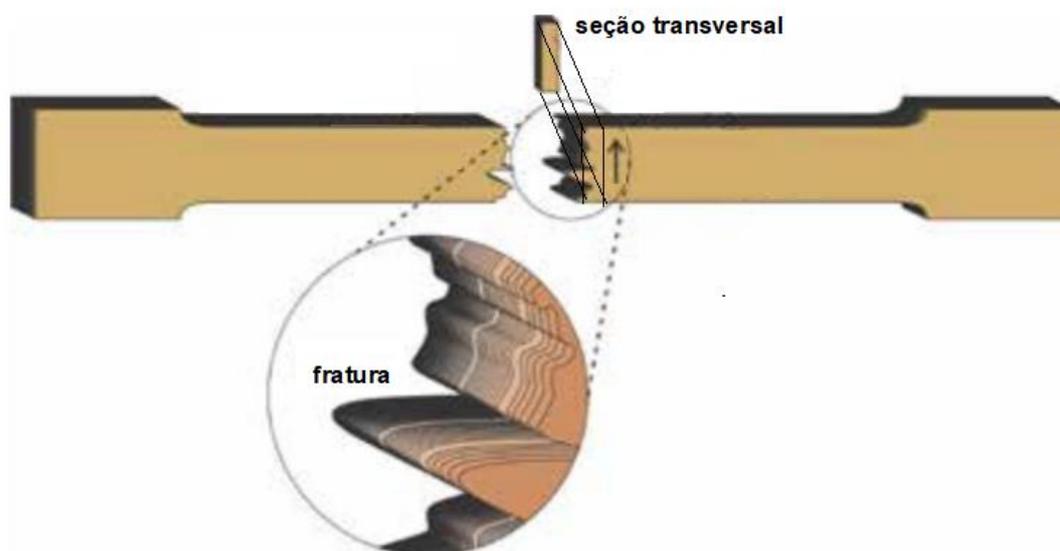


Fonte: AUTOR (2020).

Para análise dos comprimentos e diâmetros das partículas foi utilizado o programa de análises de imagens o Image J.

Para a análise microestrutural no MEV, as amostras foram retiradas da região de rompimento dos corpos de prova após os ensaios de tração e delas foram preparadas fatias retangulares (Figura 82).

Figura 82 – Indicação das regiões onde foram retiradas as amostras para a análise no MEV.



Fonte: AUTOR (2020)

A figura 83 mostra as fatias retangulares, retiradas da região do rompimento dos corpos de prova de: resina epóxi pura e resina epóxi com fibras aleatórias, trituradas e longas.

Figura 83 – Amostras de resina epóxi pura, resina epóxi com fibras aleatórias, trituradas e longas.



Fonte: AUTOR (2020).

Em seguida as fatias retangulares foram embutidas a frio com resina acrílica em moldes metálicos para possibilitar o preparo superficial através da Politriz AROTEC do Laboratório de Processamento de Materiais do Centro Universitário (UniFOA), e uma bateria de lixas apropriadas de carbeto de silício com variadas granulometrias, a saber: 220, 360, 400, 600, 800, 1200 e 1500. As pastilhas com as amostras foram destinadas ao polimento com feltro e pastas de diamante de 1 μm e alumina de 0,3 μm , e em seguida foram lavas com álcool 92°C, secas com secador normal e destinadas às análises de microscopia ótica.

Para a realização da microscopia eletrônica de varredura se faz necessário a deposição de uma camada de Au-Pd na superfície da amostra para possibilitar a condução elétrica superficial que propicia a geração de imagem pela varredura eletrônica. Portanto as amostras da região da fratura foram submetidas a uma pulverização de Au-Pd, pelo tempo aproximado de 2 min, sendo utilizada a máquina EMITECH de Pulverização de Partículas de Ouro da Universidade Federal Fluminense (UFF) de Volta Redonda-RJ, (Figura 84 e Figura 85).

Figura 84 – Máquina EMITECH de Pulverização de Partículas de Ouro



Fonte: AUTOR (2020).

Figura 85 – Amostra preparada para a análise no MEV.



Fonte: AUTOR (2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados obtidos nos estudos, pesquisa e desenvolvimento deste trabalho.

4.1 ENSAIOS MECÂNICOS

O histórico de controle na preparação das amostras e geometria dos corpos de prova e a interação fibra matriz são aspectos fundamentais para a qualidade e exatidão dos ensaios mecânicos, por este motivo procurou-se no desenvolvimento deste trabalho manter um padrão de procedimento rigoroso para a confecção dos corpos de prova de todos os tipos de compósitos, considerando os seguintes fatores: controle da quantidade, comprimento crítico e orientação da fibra utilizada no reforço, característica da resina e endurecedor da matriz, procedimento adequado para a preparação das amostras, temperatura e umidade ambiente.

4.1.1 Ensaios mecânicos dos compósitos com manta de fibras aleatórias e resina epóxi.

4.1.1.1 Ensaios de dureza dos compósitos com manta de fibras aleatórias e resina epóxi.

A Tabela 8 apresenta o resultado dos ensaios de dureza (Shore D) dos CPs com 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de fibra em forma de manta e resina epóxi.

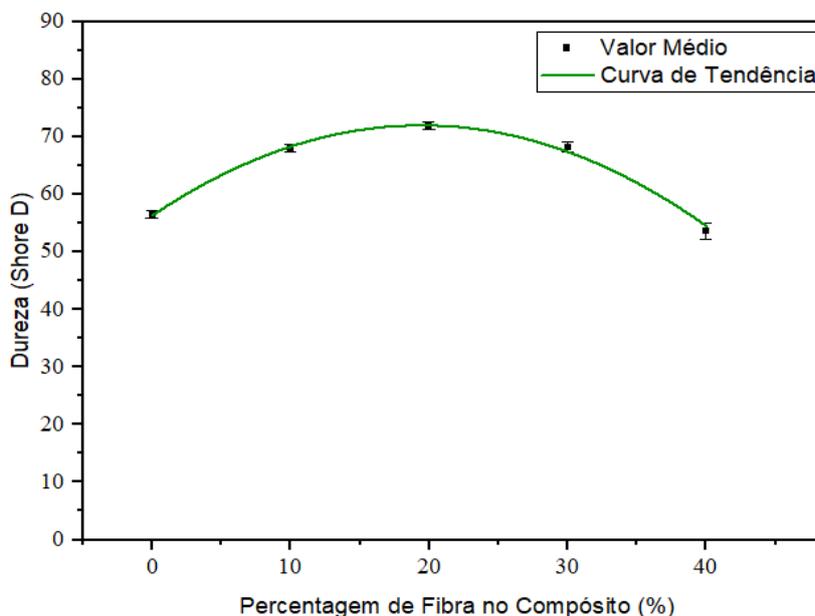
Tabela 8 – Ensaios de dureza (Shore D) dos CPs de manta de fibras aleatórias de bananeira com resina epóxi.

Teor de fibra no compósito	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	Valor Médio	Desvio Padrão
0%	53,58	51,57	54,63	50,72	50,63	52,68	0,67
10%	67,53	63,27	65,78	64,44	65,28	65,87	0,87
20%	71,65	72,38	72,62	71,53	71,88	72,01	0,91
30%	68,82	67,42	68,56	69,42	70,15	69,53	1,06
40%	64,82	65,12	63,98	67,42	60,15	63,52	1,39

Fonte: AUTOR (2020).

A Figura 86 mostra o gráfico que representa os resultados dos ensaios de dureza (Shore D) do compósito com 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de manta de fibras de bananeira aleatórias e resina epóxi.

Figura 86 – Gráfico com a curva de tendência dos ensaios de dureza versus percentual de fibra aleatória no compósito.



Fonte: AUTOR (2020).

O gráfico da Figura 86 apresenta a curva de tendência da média dos valores dos ensaios para cada percentagem de fibra, na interpolação desta curva obteve-se a seguinte equação $Y = -0,0336x^2 + 1,5968x + 52,937$ onde o eixo Y indica a dureza (Shore D) e o eixo X o teor de fibra de bananeira em (%) no compósito, tal equação representa uma curva do 2º grau.

Pode-se claramente observar que o menor valor dos ensaios de dureza ocorreu com os CPs de resina pura e o maior valor alcançado ocorreu com 20% de fibra no compósito e, a partir dos 30% a dureza tende a diminuir.

4.1.1.2 Ensaio de tração dos compósitos com manta de fibras aleatórias e resina epóxi.

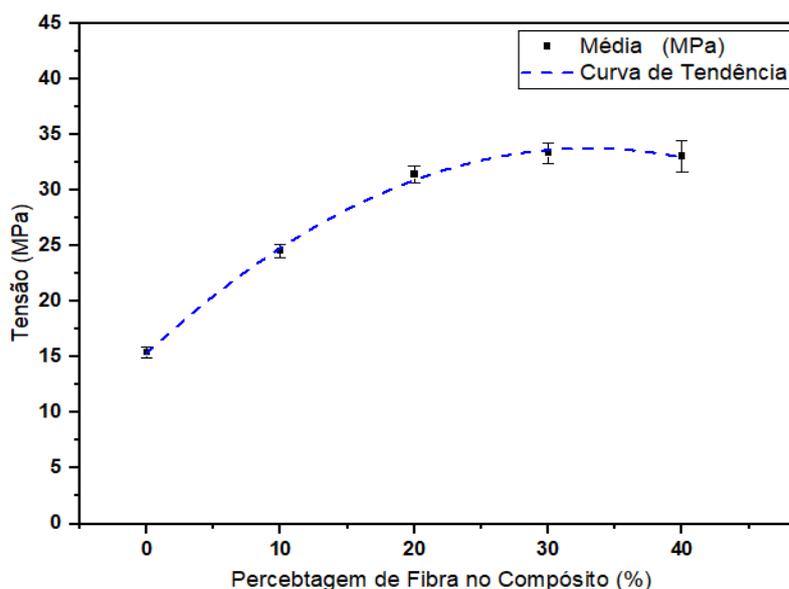
A Tabela 9 apresenta o valor do limite de resistência à tração em (MPa) dos corpos de prova com diferentes percentagens de fibras aleatórias de bananeira e resina epóxi durante os ensaios mecânicos.

Tabela 9 – Ensaio de tração com manta de fibra aleatória e resina epóxi.

Teor de fibra no compósito	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	Valor Médio	Desvio Padrão
0%	15,31	15,63	13,84	14,62	15,18	15,38	0,50
10%	23,45	24,76	24,54	24,85	25,24	24,57	0,60
20%	31,25	32,26	31,42	30,05	32,02	31,40	0,77
30%	33,08	36,02	35,45	32,01	29,28	33,35	0,89
40%	33,98	30,85	32,68	32,92	34,97	33,08	1,38

Fonte: AUTOR (2020).

A Figura 87 mostra o gráfico que representa a média dos resultados dos ensaios de tração (MPa) do compósito com 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de manta de fibras aleatórias de bananeira e resina epóxi.

Figura 87 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de tração versus percentual de fibra aleatória no compósito.

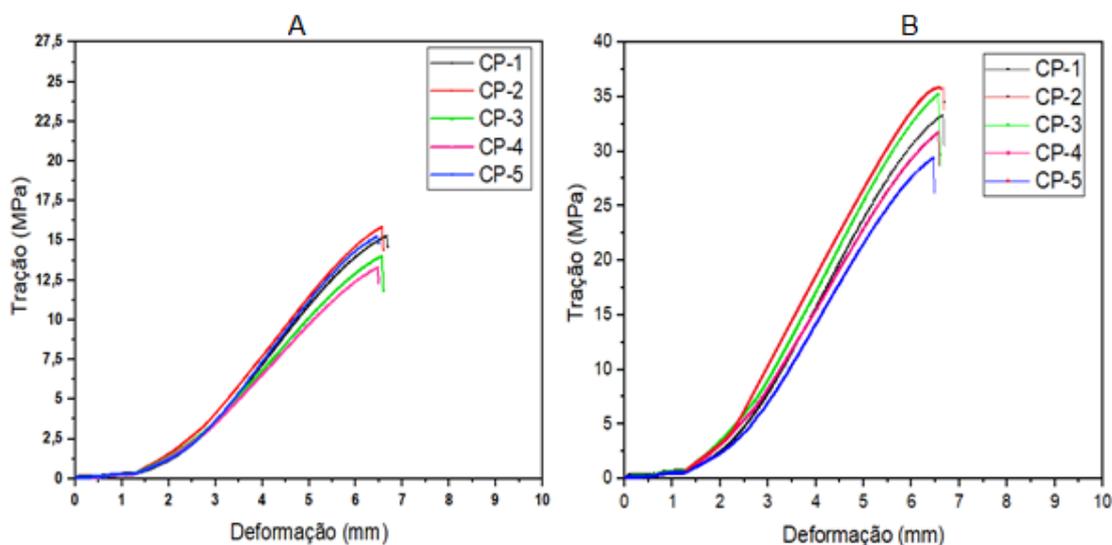
Fonte: AUTOR (2020).

O gráfico da Figura 87 apresenta a curva de tendência da média dos valores dos ensaios de tração para cada percentagem de fibra. Observa-se pelos valores apresentados que a quantidade de fibra no reforço do compósito favorece a resistência à tração, o que pode ser confirmado na comparação dos resultados do compósito com 30% de reforço, com valor médio de 33,35 MPa, equivalente a um aumento de 6,21% sobre a média dos resultados do compósito com 20% de reforço e 35,73% acima da média dos resultados do compósito com 10% de reforço. Pode-se perceber ainda que o maior valor de resistência alcançado nos ensaios ocorreu

com 30% de fibra no compósito, valor acima do atingido pelos corpos de prova com 40% de reforço, indicando um possível ponto ótimo de resistência na faixa de 30% de concentração de fibra. Na interpolação desta curva de tendência obteve-se a seguinte equação: $Y = - 0,017x^2 + 1,1204x + 15,326$ onde o eixo Y indica a tração (MPa) e o eixo X a de percentagem de fibra aleatória no compósito, tal equação representa uma curva do 3º grau.

A Figura 88 apresenta os gráficos com o perfil das curvas de tração versus deformação para CPs com resina pura e CPs com o compósito de 30% de fibras aleatórias de bananeira e resina epóxi, que alcançou o melhor resultado.

Figura 88 – A - Resina pura, B - Resina com 30% de fibras aleatórias no compósito.



Fonte: AUTOR (2020).

Pode-se observar pelo perfil das curvas da figura 88 A, a evolução da deformação sob a força de tração dos cinco corpos de prova com resina epóxi pura, os quais apresentaram os menores valores de resistência. E, na Figura 88 B, a curva de deformação dos cinco corpos de prova com 30% de fibra aleatória e resina epóxi, os quais obtiveram os maiores valores de resistência, sendo o CP-2 com o melhor desempenho (36,02 MPa) e a maior deformação (6,72 mm), já o CP-5 foi o que apresentou o menor desempenho com 29,28 MPa e a menor deformação de 6,49 mm. Observando as curvas dos dois gráficos, conclui-se que a adição do reforço no compósito aumentou consideravelmente o limite de resistência à tração, tendência confirmada pelo desempenho dos cinco corpos de prova com 30% de fibra, que

preservaram o perfil das curvas com uma baixa dispersão. Comparando a média dos resultados dos CPs com 30% de reforço de fibras aleatórias (33,35 MPa) com a média dos resultados dos CPs com resina pura (15,38 MPa), percebe-se um aumento de 116,84% na resistência à tração.

4.1.1.3 Ensaio de flexão dos CP's de fibras aleatórias de bananeira e resina epóxi

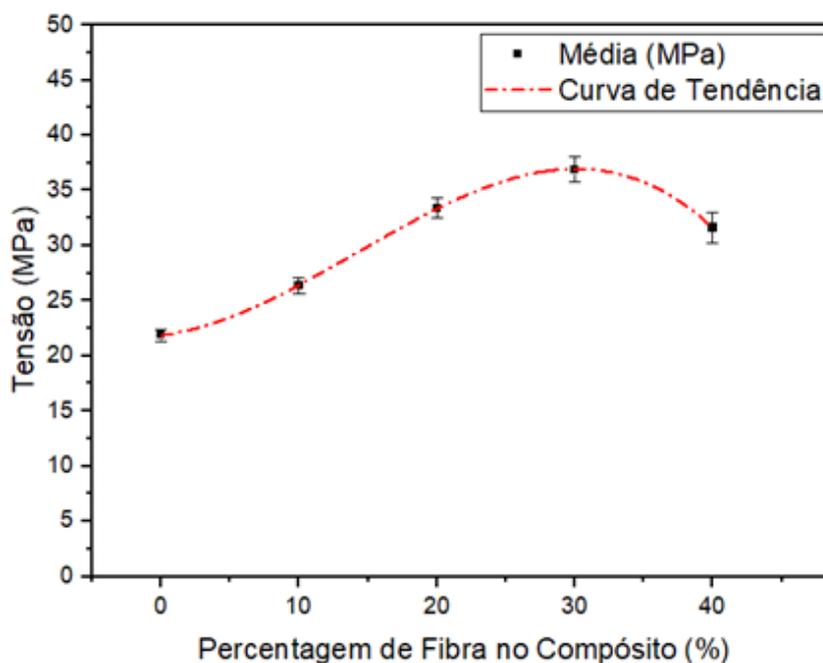
A Tabela 10 apresenta a tensão máxima de flexão em (MPa) aplicada, até a ruptura dos corpos de prova com manta de fibras de bananeira aleatórias e resina epóxi durante os ensaios de flexão.

Tabela 10 – Ensaio de flexão dos CPs de fibras aleatórias com resina epóxi.

Teor de fibra no compósito	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	Valor Médio	Desvio Padrão
0%	23,02	22,36	22,05	23,52	22,03	22,04	0,55
10%	25,82	27,32	26,38	27,42	25,85	26,38	0,69
20%	33,41	34,85	33,98	32,02	32,86	33,41	0,97
30%	37,81	28,53	33,21	31,47	34,58	36,87	1,14
40%	32,52	33,06	31,62	29,02	30,85	31,62	1,42

Fonte: AUTOR (2020).

Figura 89 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de flexão versus percentual de fibra aleatória no compósito.



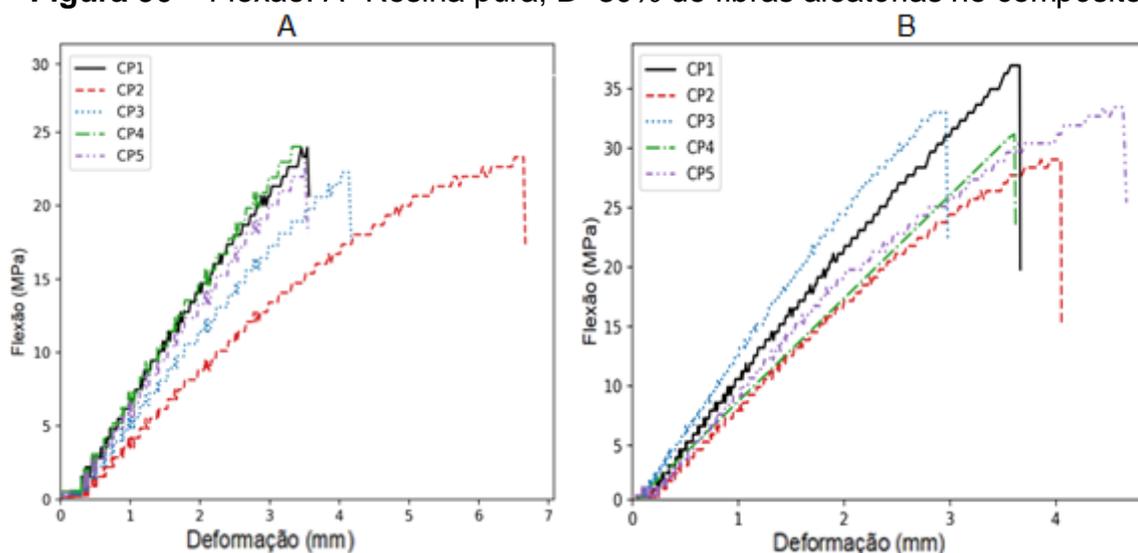
Fonte: AUTOR (2020).

A figura 89 mostra o gráfico que representa a tendência da média dos resultados dos ensaios de flexão (MPa) do compósito com 0%,10%, 20%, 30% e 40% de manta de fibras aleatórias de bananeira e resina epóxi.

Observa-se pelos valores apresentados que o compósito com 30% de reforço se mostrou comparativamente o mais resistente, com valor médio de 36,87 MPa, que equivale a um aumento de 10,36% sobre a média dos resultados do compósito com 20% de reforço, e 39,76% sobre a média dos resultados do compósito com 10% de reforço. Pode-se observar ainda que os corpos de prova com 40% de fibra apresentaram menor valor, indicando que a resistência à flexão tende a diminuir com o aumento do percentual de fibra acima dos 30%. Com a interpolação desta curva de tendência obteve-se a seguinte equação $Y = -0,0009x^3 + 0,0397x^2 + 0,1548x + 21,856$ onde o eixo Y indica a tensão de flexão (MPa) e o eixo X o teor de fibra de bananeira em porcentagem no compósito, tal equação representa uma curva do 3º grau.

A figura 90 apresenta os gráficos com o perfil das curvas de flexão versus deformação para CPs com resina pura e CPs com o compósito de 30% de fibras aleatórias de bananeira e resina epóxi, que alcançou o melhor resultado.

Figura 90 – Flexão: A- Resina pura; B- 30% de fibras aleatórias no compósito.



Fonte: AUTOR (2020).

Pode-se observar pelo perfil das curvas da figura 83A, a evolução da deformação sob a força de tensão de flexão dos cinco corpos de prova com resina epóxi pura os quais apresentaram os menores valores de resistência à flexão, por

outro lado os corpos de prova com reforço de fibras aleatórias que alcançaram os melhores desempenhos de resistência à flexão foram os de 30% de fibra no compósito, com resultados variando entre 28,53 MPa para o CP-2 e 36,871 MPa para o CP-1 como pode ser verificado pela figura 83B. Verifica-se também que a maior deformação foi obtida pelo CP-5 com 4,82 mm, e a menor pelo CP-3 com 2,97 mm. Observando as curvas dos dois gráficos, conclui-se que a adição do reforço no compósito aumentou o limite de resistência à flexão, porém diminuiu a deformação em 34% de média. Comparando a média dos resultados dos CPs com 30% de reforço de fibras aleatórias (36,87 MPa) com a média dos resultados dos CPs com resina pura (21,45 MPa), percebe-se um aumento de 71,89% na resistência à flexão.

4.1.1.4 Curvas de tendência dos ensaios de dureza, tração e flexão para fibras aleatórias.

A Tabela 11 apresenta os valores médios dos ensaios de dureza, tração e flexão dos corpos de prova dos compósitos de resina epóxi com fibras aleatórias de bananeira.

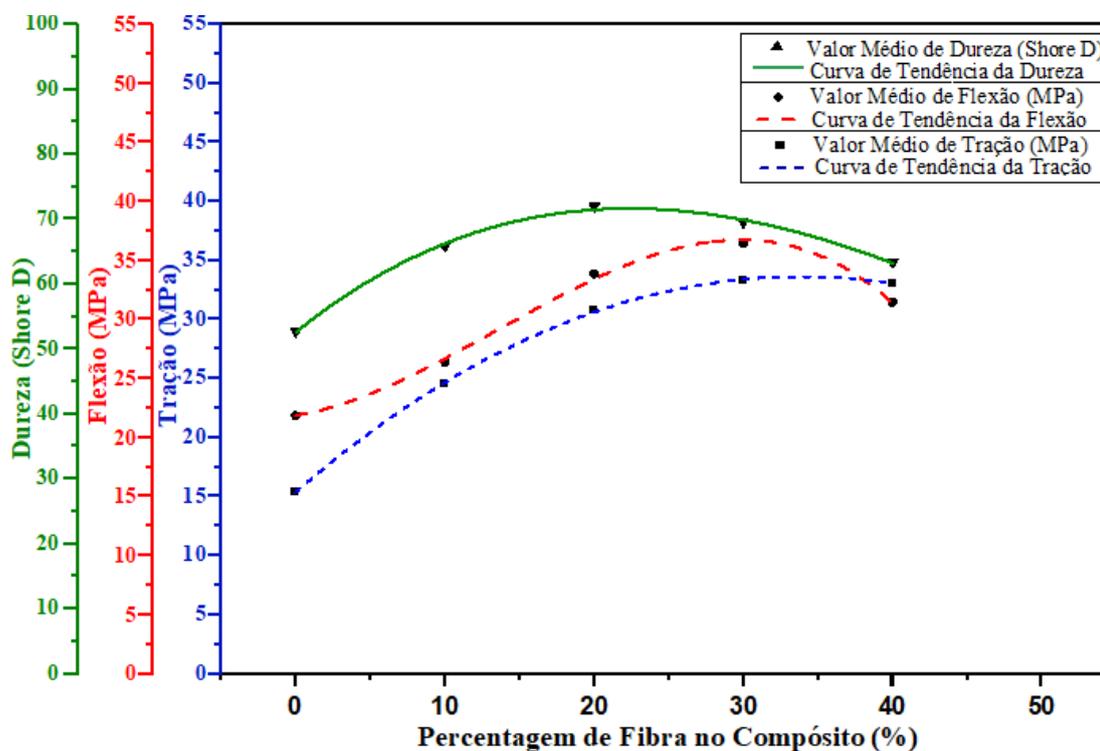
Tabela 11 – Valores médios dos ensaios de: dureza, tração e flexão para os corpos de prova com fibras aleatórias.

Teor de fibra no compósito	Dureza Média (Shore D)	Tração Média (MPa)	Flexão Média (MPa)
0%	52,68	15,38	21,45
10%	65,87	24,57	26,38
20%	72,01	31,40	33,41
30%	69,53	33,35	36,87
40%	63,52	33,08	31,62

Fonte: AUTOR (2020).

A Figura 91 mostra o gráfico com a sobreposição das curvas de tendência dos ensaios de dureza, tração flexão dos corpos de prova dos compósitos de resina epóxi com fibras aleatórias de bananeira, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 11.

Figura 91 – Gráfico com a sobreposição das curvas de dureza, tração e flexão dos compósitos com manta de fibras aleatórias e resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

Analisando a Figura 91, com as curvas de tendência de todos os ensaios sobrepostas, percebe-se o resultado superior dos corpos de prova com 30% de fibra aleatória nos testes de tração e flexão. Mesmo não apresentando o melhor resultado no teste de dureza, o valor obtido ainda é satisfatório, desempenhando o segundo melhor valor de todos os corpos de prova testados com fibras aleatórias. Do ponto de vista de aplicação, por se tratar da cobertura do mockup de um aeromodelo, busca-se materiais com bom desempenho de tração e flexão, com a dureza não sendo o grande diferencial para o seu desempenho. Desta forma, o compósito com 30% de reforço torna-se a escolha mais acertada, encaixando-se satisfatoriamente nas especificações desejadas para servir de cobertura para a carenagem do aeromodelo.

4.1.2 Ensaios mecânicos dos compósitos com fibras trituradas e epóxi

4.1.2.1 Ensaios de dureza dos CP's de fibras de bananeira trituradas e resina epóxi

A Tabela 12 apresenta o resultado dos ensaios de dureza (Shore D) de CPs com 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de fibra triturada e resina epóxi (m/m).

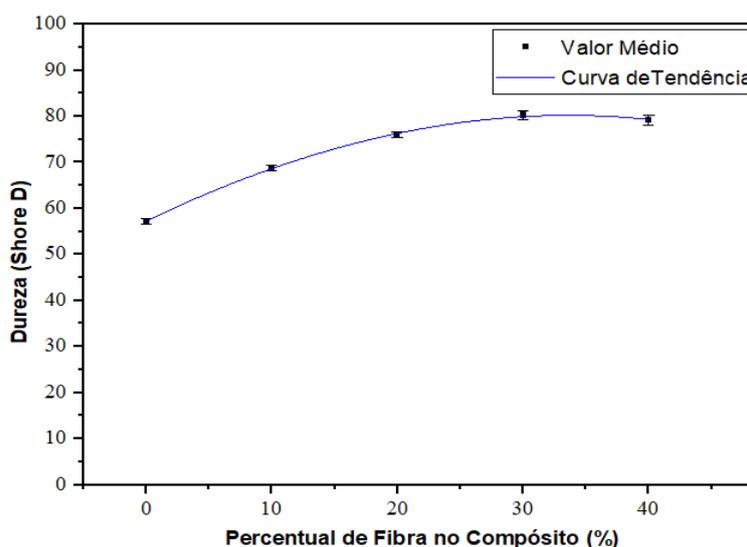
Tabela 12 – Ensaios de dureza (Shore D) dos CPs de fibra de bananeira triturada com resina epóxi.

Teor de fibra no compósito	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	Valor Médio	Desvio Padrão
0%	53,58	54,57	54,63	55,72	57,63	57,78	0,67
10%	68,23	68,97	69,48	69,14	67,98	67,36	0,57
20%	75,65	76,38	76,62	75,53	75,88	76,01	0,42
30%	80,82	79,42	80,56	81,42	82,15	80,27	0,91
40%	79,65	80,12	78,98	81,78	78,35	79,58	1,17

Fonte: AUTOR (2020).

A figura 92 mostra o gráfico que representa curva de tendência da média dos valores dos ensaios de dureza (Shore D) para os compósito com 0%,10%, 20%, 30% e 40% de fibras de bananeira trituradas e resina epóxi.

Figura 92 – Gráfico com os resultados dos ensaios de dureza (Shore D) dos CPs de fibra de bananeira triturada com resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

O gráfico da figura 92 acima apresenta a curva de tendência da média dos valores dos ensaios para cada teor de fibra, na interpolação desta curva obteve-se a seguinte equação $Y = -0,0251x^2 + 1,6707x + 52,82$ onde o eixo Y indica a dureza

(Shore D) e o eixo X o teor de fibra de bananeira em (%) no compósito, tal equação representa uma curva do 2º grau. Pode-se claramente observar que o menor valor dos ensaios de dureza ocorreu com os CPs de resina pura e o maior valor alcançado ocorreu com 30% de fibra no compósito, a partir dos 40% a dureza tende a diminuir.

4.1.2.2 Ensaio de tração dos CPs de fibras de bananeira trituradas e resina epóxi.

A tabela 13 apresenta o valor do limite de resistência à tração em (MPa) dos corpos de prova com diferentes percentagens de fibras bananeira trituradas e resina epóxi durante os ensaios mecânicos.

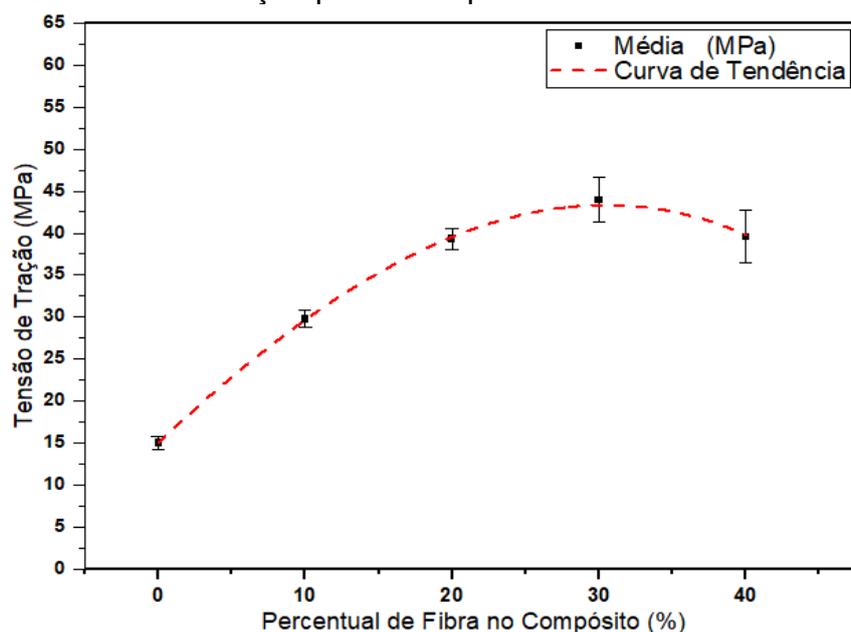
Tabela 13 – Ensaio de tração com fibras trituradas e resina epóxi.

Teor de fibra no compósito	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	Valor Médio	Desvio Padrão
0%	15,28	14,54	13,74	14,27	15,03	14,99	0,77
10%	28,74	26,31	29,13	28,46	27,31	29,73	1,03
20%	38,51	41,23	39,06	37,49	40,19	39,3	1,34
30%	47,01	41,52	46,81	45,06	44,85	43,98	2,31
40%	33,07	42,66	37,71	36,97	31,38	39,58	3,15

Fonte: AUTOR (2020).

A Figura 93 mostra o gráfico que representa a média dos resultados dos ensaios de tração (MPa) do compósito com 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de manta de fibras trituradas de bananeira e resina epóxi.

Figura 93 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de tração para cada percentual de fibra triturada.

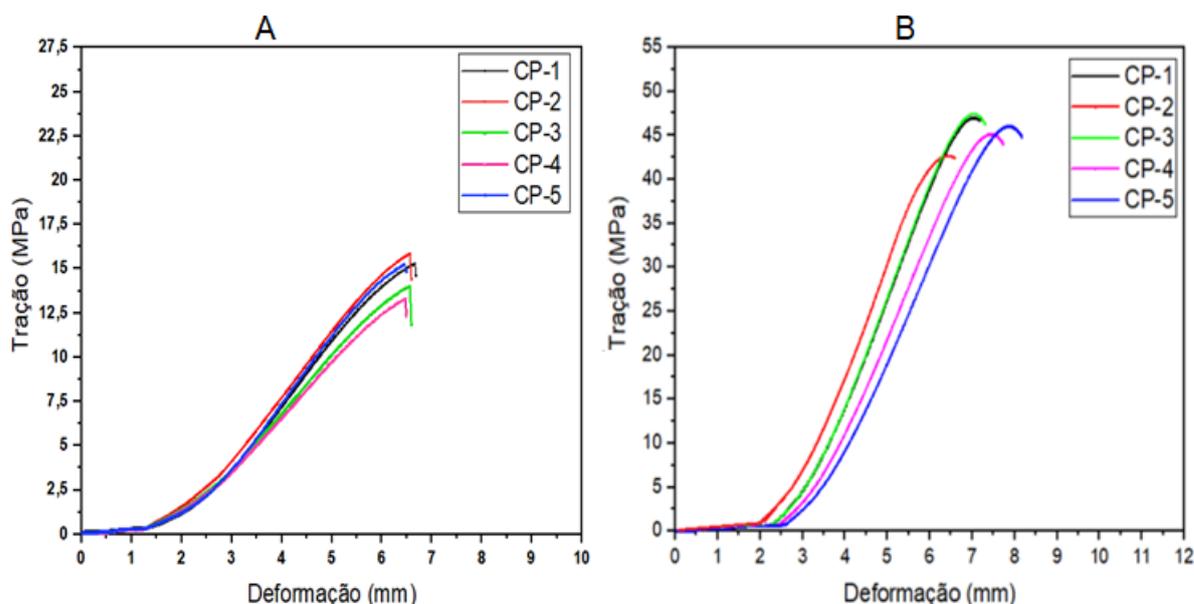


Fonte: AUTOR (2020).

Observa-se pelos valores apresentados no gráfico da figura 93 que a quantidade de fibra triturada no compósito favorece a resistência à tração até atingir 30% de reforço, com seus corpos de prova alcançando os maiores valores nos ensaios mecânicos e, a partir desse valor, a resistência tende a diminuir com o aumento do percentual de fibra, conforme visto nos corpos de prova com 40% de reforço. Pela comparação dos resultados, nota-se que os corpos de prova do compósito com 30% de reforço alcançou em média o valor de 43,98 MPa, que equivale a um aumento de 11,91% sobre a média dos resultados do compósito com 20% de reforço e 53,08% sobre a média dos resultados do compósito com 10% de reforço. Com a interpolação desta curva de tendência obtém-se a seguinte equação $Y = -0,0003x^3 - 0,0113x^2 + 1,5879x + 15,05$ onde o eixo Y indica a tração (MPa) e o eixo X a percentagem de fibra triturada no compósito, tal equação representa uma curva do 3º grau.

A Figura 94 apresenta os gráficos com o perfil das curvas de tração versus deformação para CPs com resina pura e CPs com o compósito de 30% de fibras trituradas de bananeira e resina epóxi, que apresentou o maior valor.

Figura 94 – A – Resina epóxi pura, B - 30% de fibras trituradas e resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

A figura 94A apresenta o gráfico com as curvas da deformação sob a força de tração dos cinco corpos de prova com resina epóxi pura com valores máximos que variam de 13,74 MPa à 15,28 MPa, e a figura 94B apresenta o gráfico com as curvas da deformação sob a força de tração dos cinco corpos de prova do compósito com 30% de fibra triturada e resina epóxi os quais obtiveram os maiores valores de resistência, com resultados variando entre 41,52 MPa e 46,81 MPa. A maior deformação registrada foi com o CP-5 (8,27 mm) e a menor foi com o CP-2 (6,64 mm). Observando as curvas dos dois gráficos, conclui-se que a adição do reforço no compósito aumentou consideravelmente o limite de resistência à tração, além de preservar o perfil das curvas com baixa dispersão. Comparando a média dos resultados dos CPs com 30% de reforço de fibras trituradas (43,98 MPa) com a média dos resultados dos CPs com resina pura (15,38 MPa), percebe-se que houve um aumento de 185,96% na resistência à tração.

4.1.2.3 Ensaio de flexão dos CP's de fibras de bananeira trituradas e resina epóxi.

A Tabela 14 apresenta a tensão máxima de flexão em (MPa) aplicada, até a ruptura dos corpos de prova com fibras de bananeira trituradas e resina epóxi durante os ensaios de flexão.

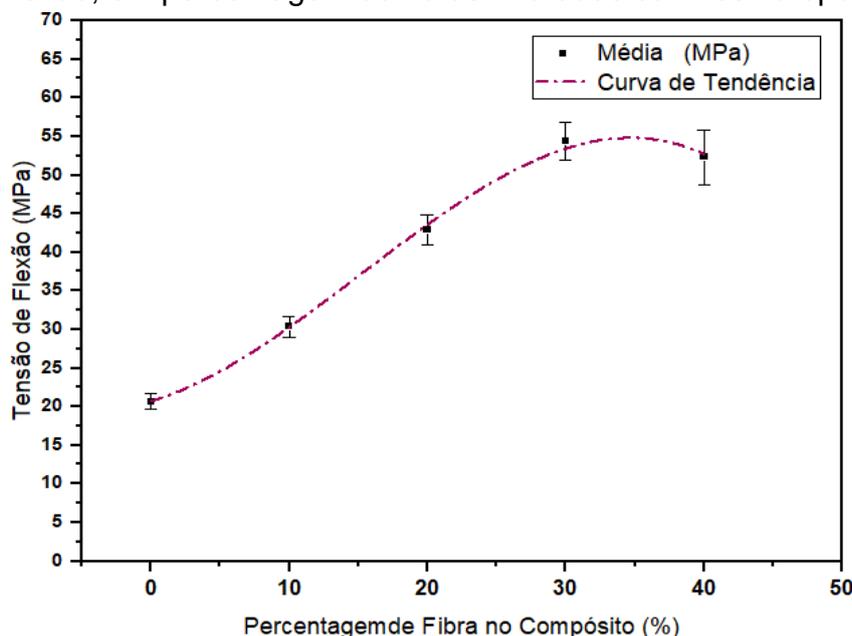
Tabela 14 – Ensaio de flexão dos CPs de fibras trituradas com resina epóxi.

Teor de fibra no compósito	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	Valor Médio	Desvio Padrão
0%	20,18	20,36	21,47	19,87	22,12	21,89	0,97
10%	29,16	28,59	32,06	31,51	30,51	30,37	1,13
20%	38,12	41,38	44,97	46,45	43,77	42,94	1,93
30%	67,02	62,63	49,53	53,18	60,27	54,38	2,41
40%	44,95	46,56	54,42	57,45	58,16	52,31	3,98

Fonte: AUTOR (2020).

A Figura 95 mostra o gráfico que representa os resultados dos ensaios de flexão (MPa) do compósito com 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de fibras trituradas de bananeira e resina epóxi.

Figura 95 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de flexão, em porcentagem de fibras trituradas com resina epóxi.

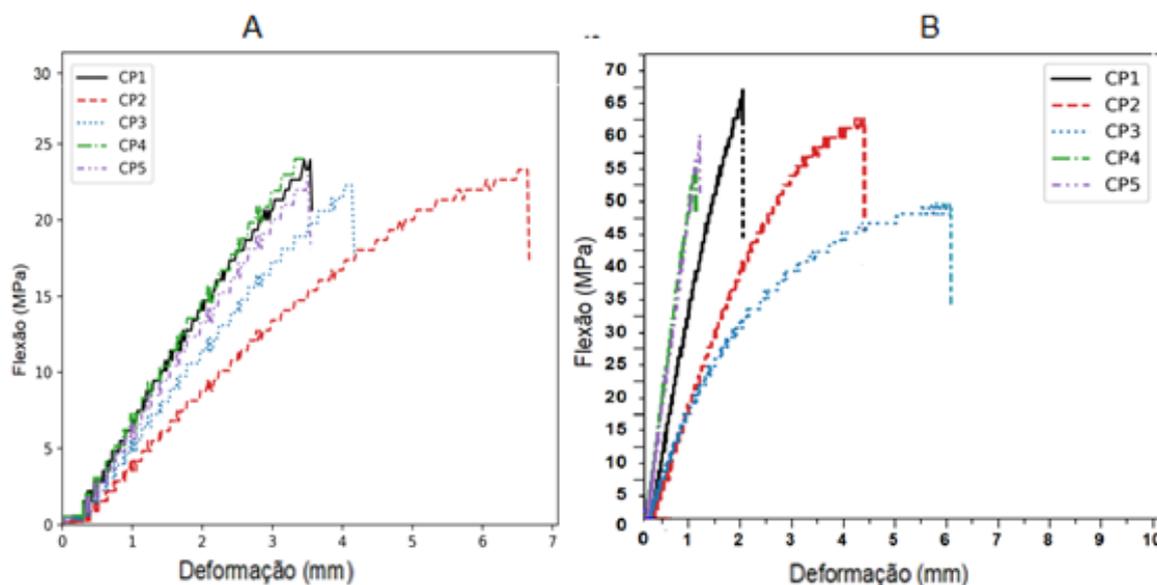


Fonte: AUTOR (2020).

O gráfico da Figura 95 apresenta a curva de tendência da média dos valores dos ensaios para cada porcentagem de fibra, observa-se pelos valores apresentados que a quantidade de fibra no reforço do compósito favorece a resistência à flexão o que pode ser confirmado na comparação dos resultados do compósito com 30% de reforço, cujo valor médio foi de 54,38 MPa, que equivale a um aumento de 26,64% sobre a média dos resultados do compósito com 20% de reforço e 79,06% sobre a média dos resultados do compósito com 10% de reforço. Observa-se pelo gráfico que a média dos resultados atingiu o maior valor com 30% de fibra triturada no compósito e a partir desse valor, a resistência à flexão tende a diminuir com o aumento do percentual de fibra, conforme visto nos corpos de prova com 40% de reforço. Com a interpolação desta curva de tendência obtém-se a seguinte equação $Y = -0,0014x^3 + 0,0644x^2 + 0,4011x + 20,82$ onde o eixo Y indica a tensão de flexão (MPa) e o eixo X o teor de fibra triturada de bananeira em (%) no compósito, tal equação representa uma curva do 3º grau.

A Figura 96 apresenta os gráficos com o perfil das curvas de flexão versus deformação para CPs com resina pura e CPs com o compósito de 30% de fibras trituradas de bananeira e resina epóxi, que alcançou o melhor resultado.

Figura 96 – Flexão: A- Resina pura, B - 30% de fibras trituradas no compósito.



Fonte: AUTOR (2020).

Pode-se observar pelo perfil das curvas da Figura 96A, a evolução da deformação sob a tensão de flexão dos cinco corpos de prova com resina epóxi pura os quais apresentaram os menores valores de resistência, por outro lado, os cinco corpos de prova com 30% de fibra triturada e resina epóxi (Figura 96B) obtiveram os maiores valores de resistência, sendo o CP-1 com o melhor desempenho (67,02 MPa), a maior deformação foi do CP-3 com 6,08 mm apesar de ter apresentado o menor desempenho para a tensão de flexão com 49,53 MPa, e a menor deformação foi do CP-4 com 1,24 mm.

Observando as curvas dos dois gráficos, conclui-se que a adição do reforço no compósito aumentou o limite de resistência à flexão porem diminuiu a deformação em 10% em média. Comparando a média dos resultados dos CPs com 30% de reforço de fibras trituradas (54,38 MPa) com a média dos resultados dos CPs com resina pura (21,45 MPa), percebe-se um aumento de 159,20% da resistência à flexão.

4.1.2.4 Curvas de tendência dos ensaios de dureza, tração e flexão para fibras trituradas e resina epóxi.

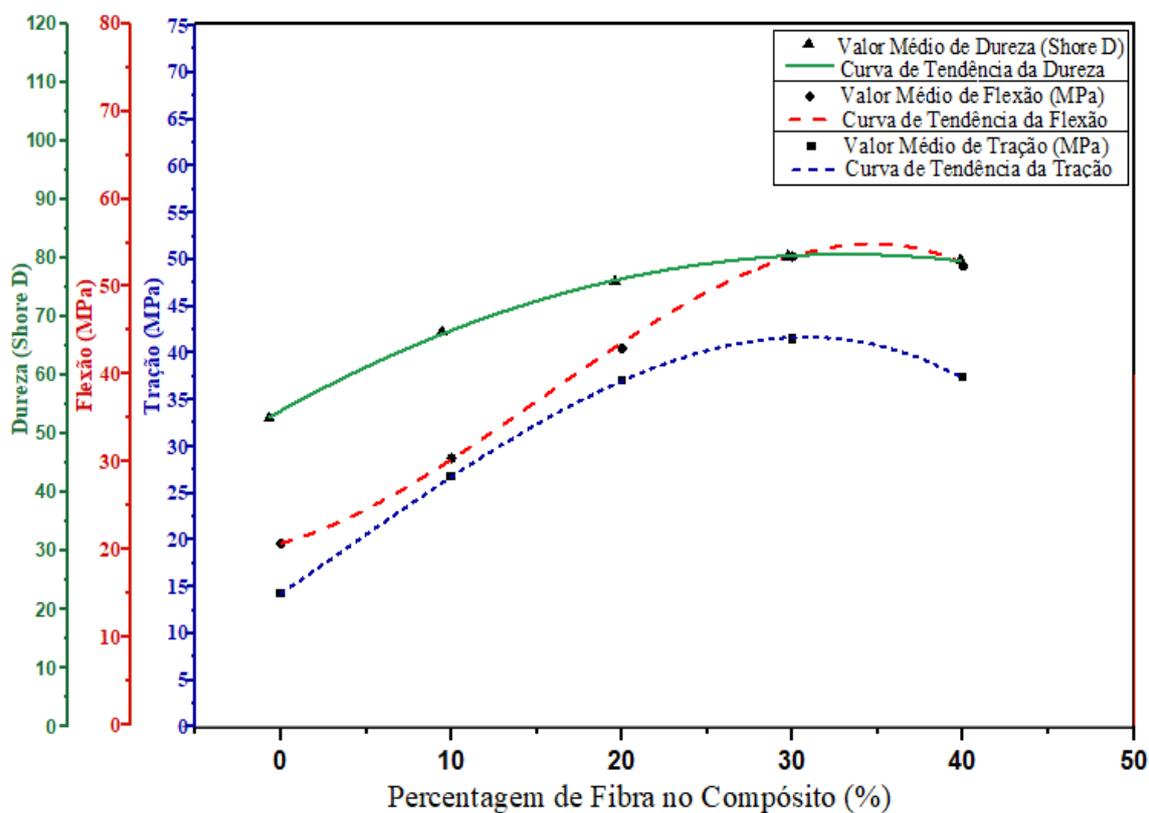
A tabela 15 apresenta os valores médios dos ensaios de dureza, tração e flexão dos corpos de prova com compósito de fibras trituradas.

Tabela 15 – Valores médios: dureza, tração e flexão.

Teor de fibra no compósito	Dureza Média (Shore D)	Tração Média (MPa)	Flexão Média (MPa)
0%	52,68	14,99	20,98
10%	67,36	29,73	30,37
20%	76,01	39,30	42,94
30%	80,27	43,98	54,38
40%	79,58	39,58	52,31

Fonte: AUTOR (2020).

A figura 97 mostra o gráfico com a sobreposição das curvas de tendência dos ensaios de dureza, tração e flexão dos corpos de prova dos compósitos de resina epóxi com fibras de bananeira trituradas, de acordo com os resultados apresentados na (Tabela 15).

Figura 97 – Gráfico com a sobreposição das curvas de dureza, tração e flexão dos compósitos com fibras trituradas e resina epóxi.

Fonte: AUTOR (2020).

Analisando a Figura 97, que mostra as curvas de tendência de todos os ensaios sobrepostas, percebe-se que o compósito com 30% de fibra triturada foi, dentre os tipos de compósitos desenvolvidos nesse trabalho, o que obteve melhores resultados nos ensaios de dureza, com bom desempenho nos ensaios de tração e flexão. Do ponto de vista de aplicação, busca-se materiais com dureza elevada para compor as longarinas e nervuras do aeromodelo que possam suportar os esforços transversais, o cisalhamento e a torção no corpo e nas asas, pelas forças aerodinâmicas. Desta forma, o compósito com 30% de fibras trituradas como reforço, que adquiriu um elevado valor de dureza, torna-se a escolha mais acertada para a fabricação das nervuras e longarinas do mockup.

4.1.3 Ensaios mecânicos dos compósitos com fibras longas e resina epóxi

4.1.3.1 Ensaios de dureza dos CP's de com fibras longas unilaterais e resina epóxi

A Tabela 16 apresenta o resultado dos ensaios de dureza (Shore D) de CPs com fibras longas alinhadas em resina epóxi, na proporção de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de fibra (m/m).

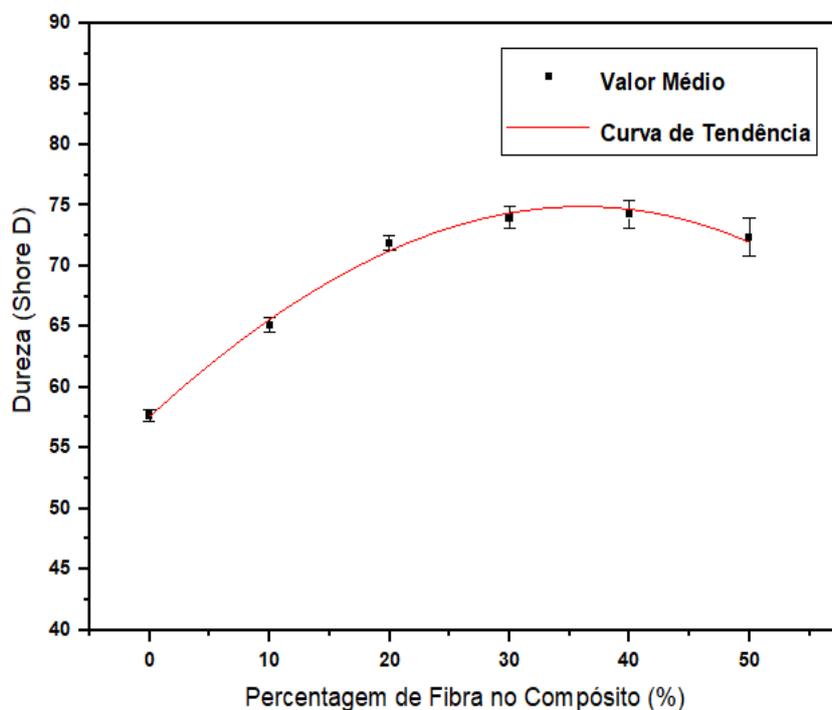
Tabela 16 – Ensaios de dureza (Shore D) dos CPs com fibras longas unilaterais e resina epóxi.

Teor de fibra no compósito	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	Valor Médio	Desvio Padrão
0%	57,48	57,67	57,73	58,82	56,73	57,69	0,51
10%	64,23	64,97	65,48	65,14	63,98	65,14	0,57
20%	72,15	71,88	73,12	72,03	72,38	72,51	0,62
30%	73,97	72,85	72,83	74,78	72,32	73,97	0,91
40%	74,82	73,42	74,56	75,42	76,15	74,27	1,12
50%	71,88	72,15	72,03	73,97	72,78	72,38	1,57

Fonte: AUTOR (2020).

A figura 98 mostra o gráfico que representa os resultados dos ensaios de dureza (Shore D) do compósito com 0%,10%, 20%, 30% e 40% de fibras longas alinhadas e resina epóxi.

Figura 98 – Gráfico com os resultados dos ensaios de dureza (Shore D) dos CPs com fibras longas alinhadas e resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

O gráfico da Figura 98 acima apresenta a curva de tendência da média dos valores dos ensaios para cada teor de fibra, na interpolação desta curva obteve-se a seguinte equação $Y = -0,00005x^3 - 0,016x^2 + 1,0096x + 57,99$ onde o eixo Y indica a dureza (Shore D) e o eixo X o teor de fibra de bananeira em (%) no compósito, tal equação representa uma curva do 3º grau. Pode-se claramente observar que o menor valor dos ensaios de dureza ocorreu com os CPs de resina pura e o maior valor alcançado ocorreu com 30% de fibra e a partir dos 40% a dureza tende a diminuir.

4.1.3.2 Ensaio de tração

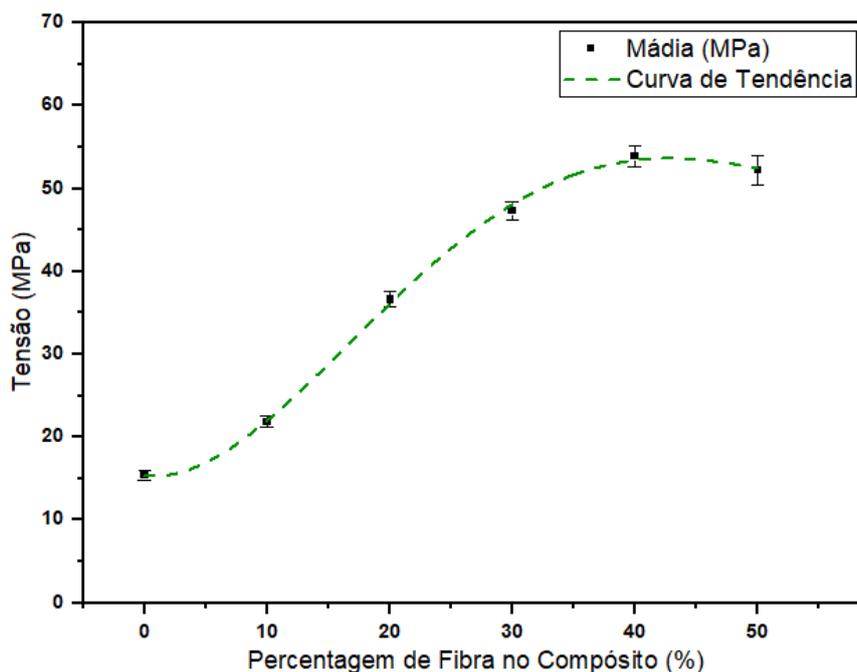
A Tabela 17 apresenta o valor do limite de resistência à tração em MPa dos corpos de prova com diferentes porcentagens de fibras longas alinhadas e resina epóxi, durante os ensaios mecânicos.

Tabela 17 – Ensaio de tração dos CP's com fibras longas e resina epóxi.

Teor de fibra no compósito	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	Média (MPa)	Desvio Padrão
0%	15,36	15,62	13,85	14,51	15,29	15,34	0,56
10%	21,56	21,95	22,83	22,19	20,75	21,86	0,69
20%	36,02	37,86	35,23	36,87	37,01	36,60	0,90
30%	48,34	45,57	47,53	48,53	46,42	47,28	1,13
40%	52,53	57,25	60,52	53,15	65,37	54,73	2,14
50%	54,91	49,58	53,26	52,03	51,49	52,25	3,78

Fonte: AUTOR (2020).

A Figura 99 mostra o gráfico que representa a média dos resultados dos ensaios de tração (MPa) do compósito com 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de manta de fibras longas de bananeira e resina epóxi.

Figura 99 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de tração para cada tipo de percentual de fibras longas.

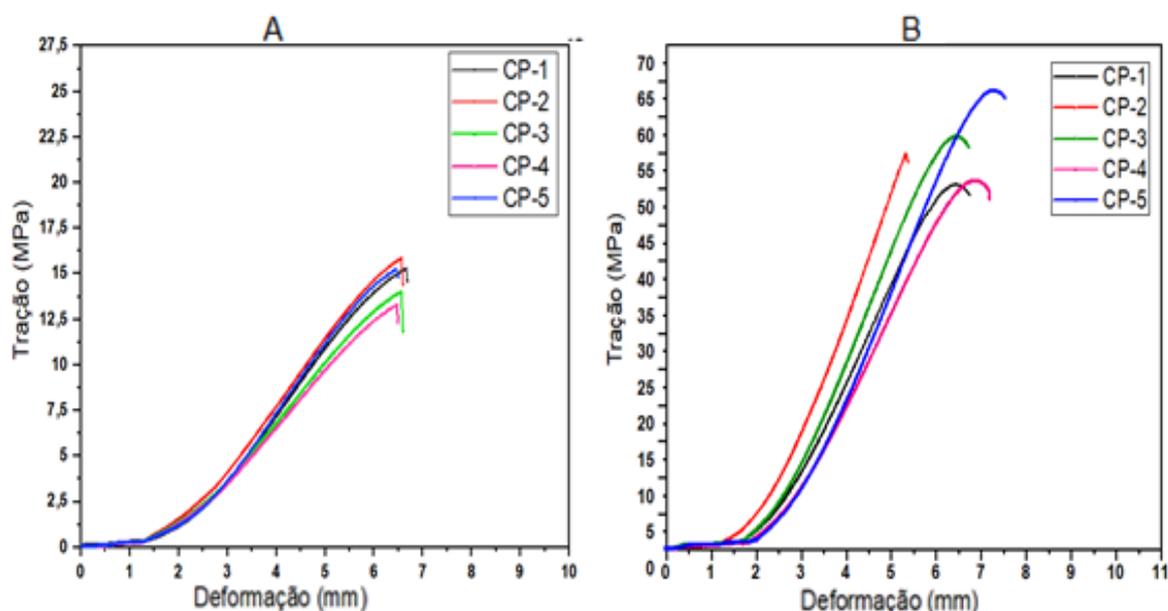
Fonte: AUTOR (2020).

O gráfico da figura 99 apresenta a curva de tendência da média dos valores dos ensaios para cada percentagem de fibra, observa-se pelos valores apresentados que a quantidade de fibra no reforço do compósito favorece a resistência à tração o que pode ser confirmado na comparação dos resultados do compósito com 40% de

reforço, com valor médio de (54,73 MPa), que equivale a um aumento de 15,76% sobre a média dos resultados do compósito com 30% de reforço, e 29,18% sobre a média dos resultados do compósito com 20% de reforço, além de apresentar um aumento 96,29% sobre a média dos resultados do compósito com 10% de reforço. Pode-se perceber ainda que o maior valor alcançado nos ensaios de flexão ocorreu com 40% de fibra no compósito e a partir dos 50% a resistência tende a diminuir com o aumento da percentagem de fibra. Na interpolação desta curva de tendência obteve-se a seguinte equação $Y = -817,22x^3 + 480,49x^2 + 38,20x + 15,05$ onde o eixo Y indica a tração (MPa) e o eixo X o teor de fibra longa em (%) no compósito, tal equação representa uma curva do 3º grau.

A Figura 100 apresenta os gráficos com o perfil das curvas de tração versus deformação para CPs com resina pura e CPs com o compósito de 40% de fibras de bananeira longas unilaterais e resina epóxi, que alcançou o melhor resultado.

Figura 100 – A - Resina epóxi pura, B - 40% de fibras longas e resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

Pode-se observar pelo perfil das curvas da Figura 100 acima, a evolução da deformação sob a força de tração dos cinco corpos de prova com resina epóxi pura, os quais apresentaram os menores valores de resistência à flexão e dos cinco corpos de prova com 40% de fibra longa e resina epóxi, os quais obtiveram os maiores

valores de resistência, sendo o CP-5 com o melhor desempenho (65,37 MPa) e a maior deformação 7,53 mm, já o CP-1 foi o que apresentou o menor desempenho com (52,53 MPa), porém a menor deformação foi do CP-2 com 5,41mm. Observando as curvas dos dois gráficos, conclui-se que a adição do reforço no compósito aumentou consideravelmente o limite de resistência à flexão, além de preservar o perfil das curvas e baixa dispersão. Comparando a média dos resultados dos CPs com 40% de reforço de fibras longas (54,73 MPa) com a média dos resultados dos CPs com resina pura (15,38 MPa), percebe-se um aumento de 207,41% da resistência à tração.

4.1.3.3 Ensaio de flexão dos CP's de fibras longas unilaterais e resina epóxi.

A Tabela 18 apresenta a tensão máxima de flexão em (MPa) aplicada, até a ruptura dos corpos de prova com fibras de bananeira longas e alinhadas e resina epóxi durante os ensaios de flexão.

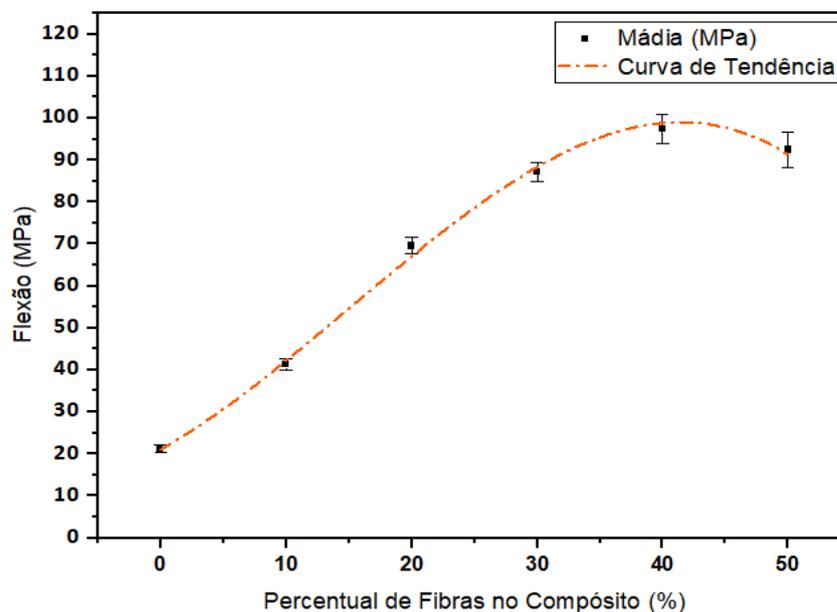
Tabela 18 – Ensaio de flexão dos CPs de fibras longas unilaterais e resina epóxi.

Teor de fibra no compósito	CP-1	CP-2	CP-3	CP- 4	CP-5	Média (MPa)	Desvio Padrão
0%	20,73	22,06	21,37	21,87	20,12	21,15	0,92
10%	40,23	41,98	42,12	39,97	40,78	41,25	1,32
20%	68,24	70,13	69,45	71,02	69,55	69,68	1,94
30%	89,07	85,74	90,12	87,98	86,31	87,27	2,25
40%	96,28	95,78	98,42	99,03	97,58	97,5	3,41
50%	87,94	93,81	95,86	90,61	93,45	92,48	4,22

Fonte: AUTOR (2020)

A figura 101 mostra o gráfico que representa os resultados dos ensaios de flexão (MPa) do compósito com 0%,10%, 20%, 30%, 40% e 50% de fibras longas alinhadas e resina epóxi.

Figura 101 – Gráfico com a curva de tendência da média dos valores máximos de flexão para cada tipo de percentagem de fibras longas.

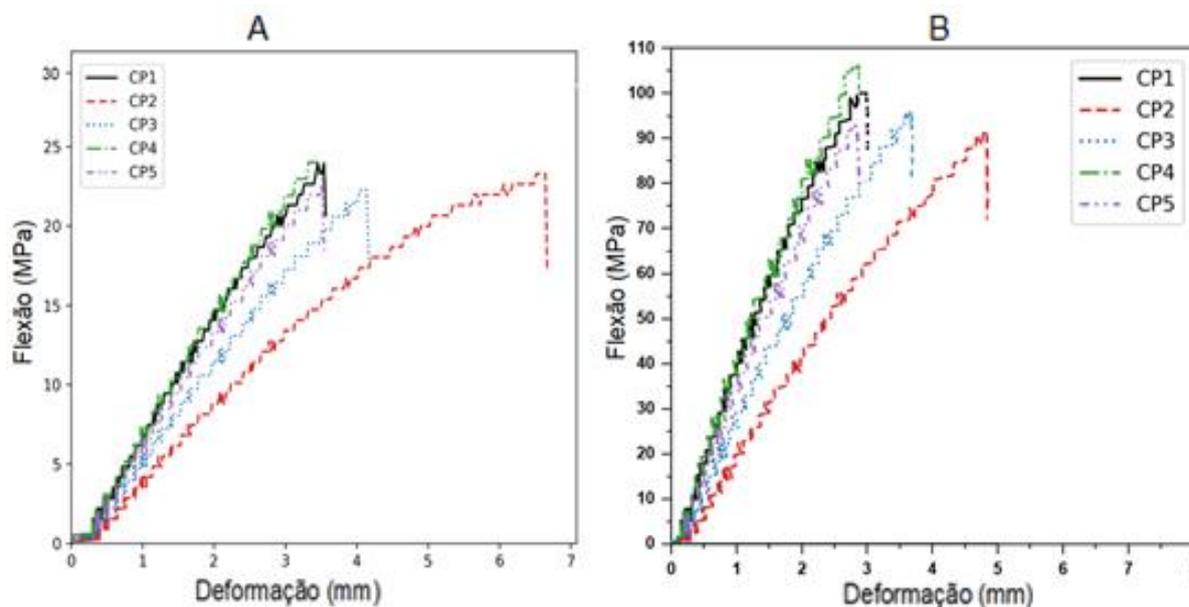


Fonte: AUTOR (2020).

O gráfico da Figura 101 acima apresenta a curva de tendência da média dos valores dos ensaios para cada percentagem de fibra, observa-se pelos valores apresentados que a quantidade de fibras longas no reforço do compósito favorece a resistência à flexão o que pode ser confirmado na comparação dos resultados do compósito com 40% de reforço, com valor médio de (97,52 MPa), que equivale a um aumento de 11,72% sobre a média dos resultados do compósito com 30% de reforço, além de apresentar um aumento de 25,24% sobre a média dos resultados do compósito com 20% de reforço e 111,56% sobre a média dos resultados do compósito com 10% de reforço. Observa-se pelo gráfico que a média dos resultados atingiu o maior valor com 40% de fibras longas no compósito e a partir desse valor, a resistência à flexão tende a diminuir com o aumento do percentual de fibra, conforme visto nos corpos de prova com 50% de reforço. Na interpolação desta curva de tendência obteve-se a seguinte equação $Y = -0,0012x^3 + 0,0396x^2 + 1,9504x + 20,622$ onde o eixo Y indica a tração (Mpa) e o eixo X o teor de fibra de bananeira em (%) no compósito, tal equação representa uma curva do 3º grau.

A Figura 102 apresenta os gráficos com o perfil das curvas de flexão versus deformação para CPs com resina pura e CPs com o compósito de 40% de fibras longas de bananeira e resina epóxi, que alcançou o melhor resultado.

Figura 102 – A- Resina epóxi pura, B - 40% de fibras longas e resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

Pode-se observar pelo perfil das curvas da figura 102 acima, a evolução da deformação sob a força de flexão dos cinco corpos de prova com resina epóxi pura, os quais apresentaram os menores valores de resistência à flexão e dos cinco corpos de prova com 40% de fibra longa e resina epóxi, os quais obtiveram os maiores valores de resistência, sendo o CP-4 com o melhor desempenho (105,72 MPa), o CP-2 foi o que apresentou a maior deformação 4,82 mm e o menor desempenho (91,52 MPa), o CP-5 foi o corpo de prova que apresentou a menor deformação 2,79 mm.

Observando as curvas dos dois gráficos, conclui-se que a adição do reforço no compósito aumentou o limite de resistência à flexão porém diminuiu a deformação em 22% de média. Comparando a média dos resultados dos CPs com 40% de reforço de fibras longas (97,50 MPa) com a média dos resultados dos CPs com resina pura (21,45 MPa), percebe-se um aumento de 258,41% da resistência à flexão.

4.1.3.4 Curvas de tendência dos ensaios de dureza, tração e flexão para fibras longas unilaterais.

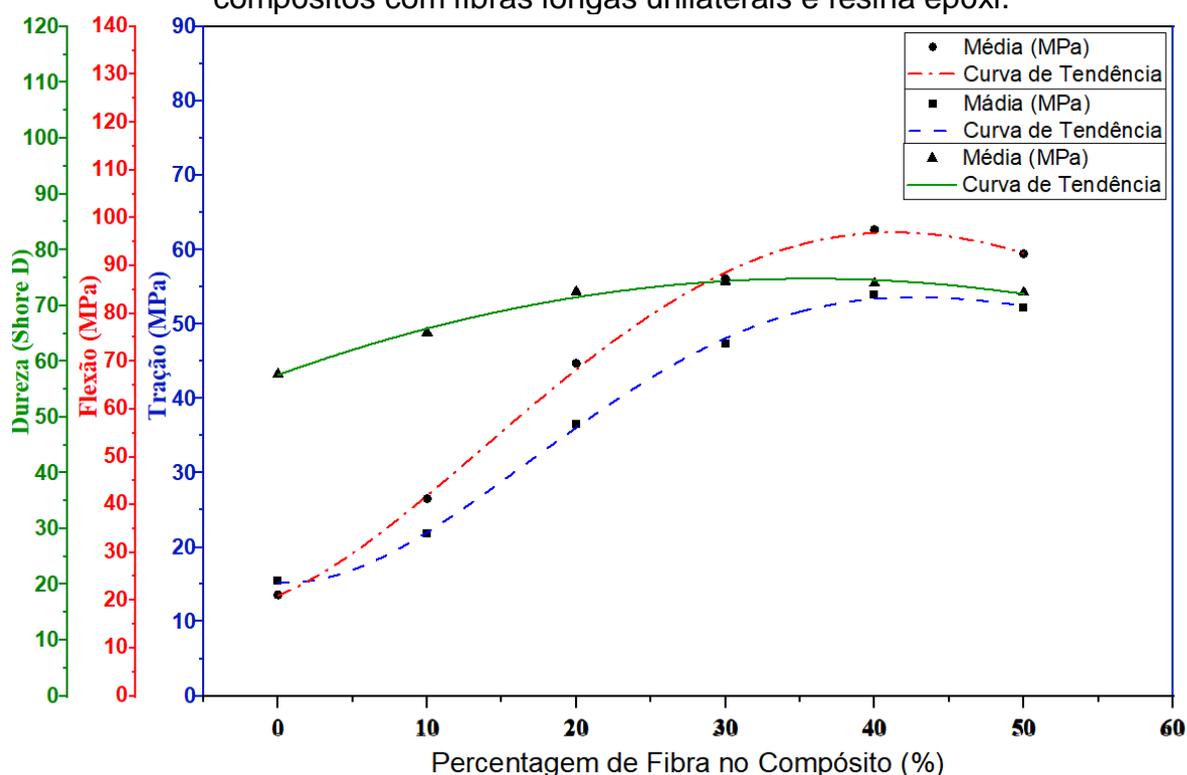
A Tabela 19 apresenta os valores médios dos ensaios de dureza, tração e flexão dos corpos de prova com compósito de fibras longas.

Tabela 19 – Valores médios: dureza, tração e flexão.

Teor de fibra no compósito	Dureza Média (Shore D)	Tração Média (MPa)	Flexão Média (MPa)
0%	57,69	15,34	21,75
10%	65,14	21,86	41,25
20%	72,51	36,60	69,68
30%	73,97	47,28	87,27
40%	74,27	54,73	97,50
50%	72,38	52,25	92,48

Fonte: AUTOR (2020).

A figura 103 mostra o gráfico com a sobreposição das curvas de tendência dos ensaios de dureza, tração e flexão dos corpos de prova com compósitos de resina epóxi e fibras de bananeira longas unilaterais, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 19.

Figura 103 – Gráfico de comparação dos resultados de dureza, tração e flexão dos compósitos com fibras longas unilaterais e resina epóxi.

Fonte: AUTOR (2020).

Analisando a figura 103 que apresenta as curvas de tendência sobrepostas de todos os ensaios (dureza, tração e flexão), conclui-se que o compósito com 40% de fibras longas unilaterais foi o que obteve melhores resultados de tração e flexão, dentre os outros tipos de compósitos desenvolvidos nesta dissertação, além de

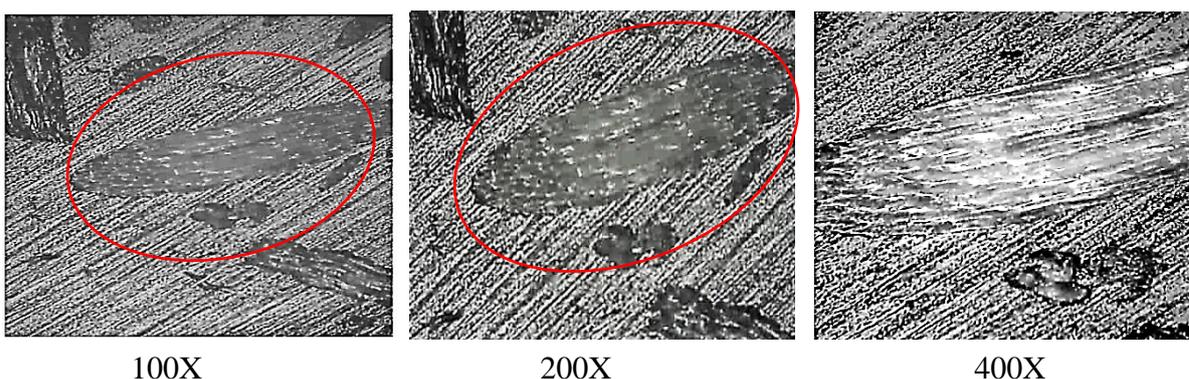
apresentar um desempenho razoável nos ensaios de dureza, constituindo um material ideal para confecção das estruturas mecânicas mais exigidas na confecção do mockup. São elas: a parte inferior da asa, onde ficam alojados os servo-motores que acionam os aleirons, e a parte inferior do corpo do aeromodelo, que suporta as vibrações e esforços axiais no momento do impacto do trem de pouso ao tocar o solo. Desta forma, o compósito com 40% de reforço de fibras longas unilaterais torna-se a escolha mais acertada para esta função.

4.2 MICROSCOPIA ÓTICA

4.2.1 Microscopia ótica dos compósitos com fibras aleatórias e resina epóxi

A figura 104 mostra imagens ampliadas da amostra retirada de um corte no sentido transversal de um corpo de prova do compósito com 30% fibras aleatórias e resina epóxi, após rompimento no ensaio de tração. Podemos observar que houve uma razoável distribuição da fibra no compósito porém apresentando formas e dimensões variadas com aglomerações pontuais de fibra.

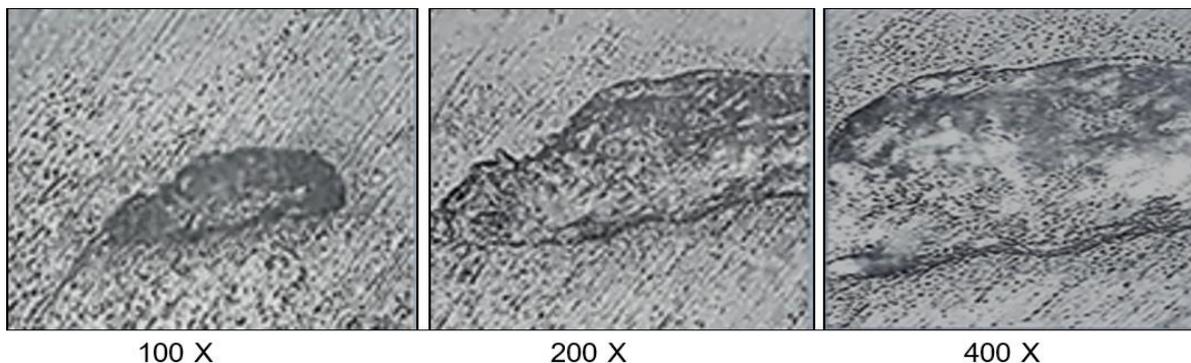
Figura 104 – Corte transversal, fibras aleatórias. I- Ampliação de 100 vezes. II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.



Fonte: AUTOR (2020).

A figura 105 mostra imagens ampliadas 100, 200 e 400 vezes da amostra retirada de um corte no sentido longitudinal do corpo de prova do compósito com 30% fibras aleatórias e resina epóxi. Observa-se uma boa aderência superficial da matriz no reforço, a resina envolveu completamente a fibra.

Figura 105 – Corte longitudinal, fibras aleatórias. I- Ampliação de 100 vezes. II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.



Fonte: AUTOR (2020).

4.2.2 Microscopia ótica dos compósitos com fibras trituradas e resina epóxi

Imagens ampliadas da amostra retirada de um corte no sentido transversal do corpo de prova do compósito com 30% fibras trituradas e resina epóxi. A figura 106 mostra que as fibras ficaram uniformemente distribuídas no compósito indicando que houve uma mistura homogeneia entre matriz e reforço, não havendo concentrações pontuais ao longo da amostra analisada. Foi possível verificar também a presença de fibras maiores, com geometria alongada e de fibras menores com geometrias mais circulares. É importante ressaltar que embora as fibras trituradas tenham sido peneiradas, as fibras longas com diâmetros menores passaram pela peneira da mesma forma que as partículas de fibras curtas.

Figura 106 – Corte transversal, fibras trituradas; I- Ampliação de 100 vezes; II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.



Fonte: AUTOR (2020).

Imagens ampliadas da amostra retirada de um corte no sentido longitudinal do corpo de prova do compósito com 30% fibras trituradas e resina epóxi (Figura 107).

Observa-se que a resina acompanhou a fibra até o momento da ruptura, sem a presença de espaços vazios entre a matriz e o reforço.

Figura 107 – Corte longitudinal, fibras trituradas. I- Ampliação de 100 vezes; II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.

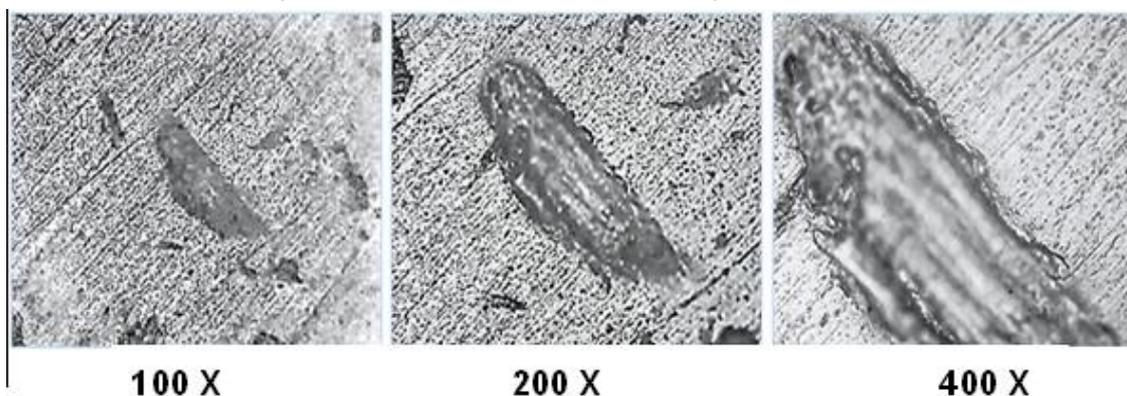


Fonte: AUTOR (2020).

4.2.3 Microscopia ótica dos compósitos com fibras longas e resina epóxi.

A figura 108 mostra imagens ampliadas da amostra retirada de um corte no sentido transversal do corpo de prova do compósito com 40% de fibras longas unilaterais e resina epóxi. Observa-se uma perfeita interação da fibra com a resina sem a evidência de espaços vazios, isso se deve principalmente ao tratamento com hidróxido de sódio (NaOH) que proporcionou às fibras uma superfície mais porosa facilitando uma perfeita impregnação da resina nas suas cadeias reticulares.

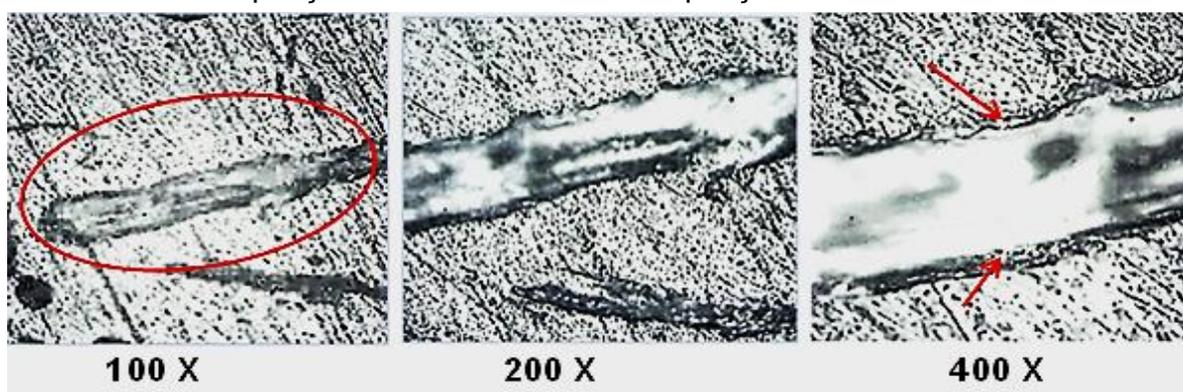
Figura 108 – Corte transversal, fibras longas. I- Ampliação de 100 vezes. II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.



Fonte: AUTOR (2020).

A figura 109 mostra imagens ampliadas da amostra retirada de um corte no sentido longitudinal do corpo de prova do compósito com 40% de fibras longas unilaterais e resina epóxi, observa-se perfeitamente as fibras longas paralelamente alinhadas e totalmente envolvidas pela resina epóxi, com uma excelente interação entre matriz e reforço. As setas indicam que houve uma perfeita interação da fibra com a resina sem a evidência de espaços vazios.

Figura 109 – Corte longitudinal, fibras longas. I- Ampliação de 100 vezes. II- Ampliação de 200 vezes e III- Ampliação de 400 vezes.



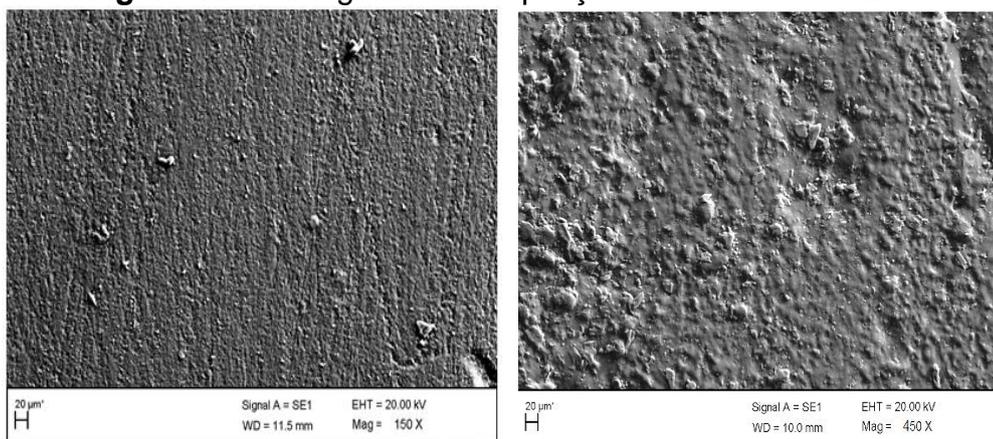
Fonte: AUTOR (2020).

4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

4.3.1 MEV da resina pura

Na avaliação dos resultados das análises macroestruturais da resina epóxi pura com endurecedor, observou-se que as amostras apresentaram uma matriz de resina bem uniforme, isenta de defeitos que garantem uma boa uniformidade das propriedades do material. Este fato pode ser observado pelas imagens da amostra, retirada de um corte transversal de um dos corpos de prova usados nos ensaios de tração e ampliadas 150 e 450 vezes (Figura 110).

Figura 110 – Imagem com ampliação de 150 e 450 vezes.

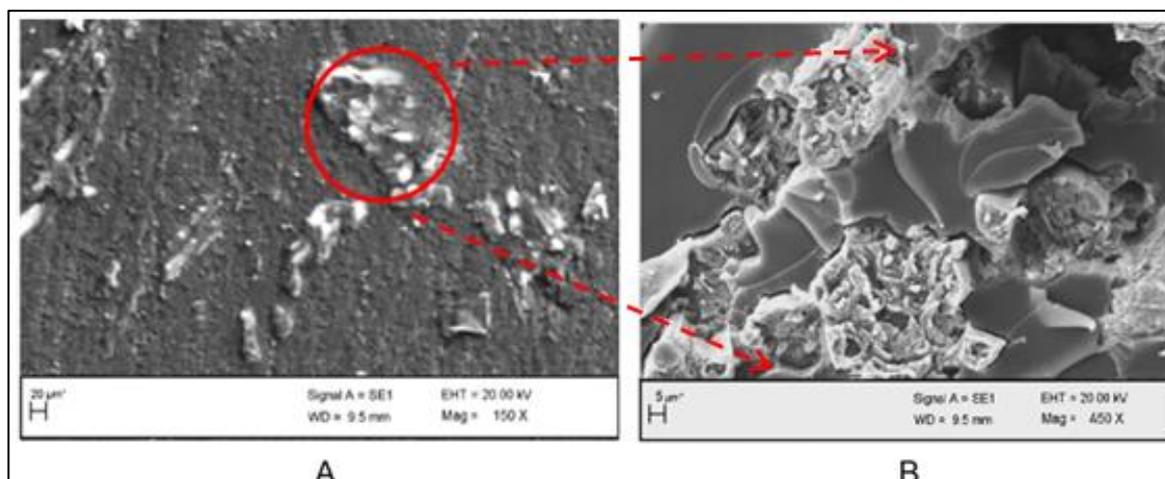


Fonte: AUTOR (2020).

4.3.2 MEV do compósito com fibras aleatórias e resina epóxi

Para a análise microestrutural a amostra foi retirada da região de rompimento de um dos corpos de prova dos ensaios de tração com 30% de fibras aleatórias. A imagem obtida em uma ampliação de 150 vezes mostrou uma matriz de resina bem impregnada, isenta de defeitos, garantindo uma uniformidade das propriedades. As fibras se distribuíram aleatoriamente pela matriz em blocos cilíndricos e bem definidos, com diâmetro de $14,2 \pm 3$, que podem ser observadas no detalhe circulado em vermelho (Figura 111-A). Ao lado, na figura 111-B, pode-se observar pela imagem da amostra ampliada em 450 vezes que a resina apresentou uma boa penetração nas cadeias reticulares da fibra.

Figura 111 – A Ampliação de 150 vezes; B - Ampliação de 450 vezes

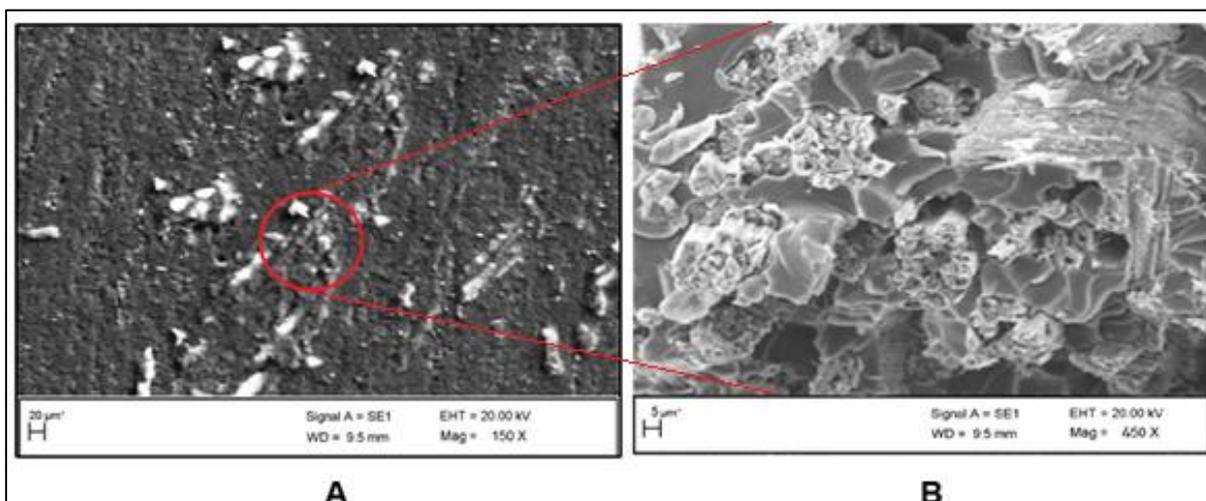


Fonte: AUTOR (2020).

4.3.3 MEV do compósito com fibras trituradas e resina epóxi

Para a análise microestrutural a amostra foi retirada da região do rompimento de um dos corpos de prova dos ensaios de tração com 30% de fibras trituradas. A imagem obtida em uma ampliação de 150 vezes mostrou uma matriz de resina bem definida, isenta de defeitos, que garante uma uniformidade das propriedades, as fibras se distribuíram pela matriz em partículas com morfologia não definida apresentando comprimento médio de $50,2 \pm 6 \mu\text{m}$, que podem ser observadas no detalhe circulado em vermelho (Figura 112-A). Ao lado, na Figura 112-B, pode-se observar pela imagem da amostra ampliada em 450 vezes que a resina apresentou uma boa penetração nas cadeias reticulares da fibra.

Figura 112 – A: Ampliação de 150 vezes; B: Ampliação de 450 vezes.



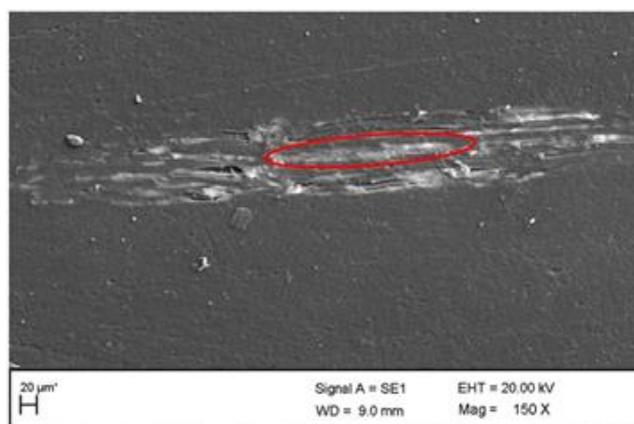
Fonte: AUTOR (2020).

4.3.4 MEV do compósito com de fibras longas unilaterais e resina epóxi.

4.3.4.1 Análise microestrutural de um corte longitudinal.

Para a análise microestrutural a amostra foi retirada de um corte longitudinal, próximo da região de rompimento de um dos corpos de prova dos ensaios de tração com 40% de fibras longas. A imagem foi obtida em uma ampliação de 150 vezes, essa amostra apresentou a matriz de resina bem uniforme, isenta de defeitos, que garante uma uniformidade das propriedades. A fibras se distribuíram pela matriz em blocos longitudinais com comprimentos de $204,3 \pm 30 \mu\text{m}$ e diâmetros de $12,4 \pm 3 \mu\text{m}$, que podem ser observadas no detalhe circulado em vermelho (Figura 113).

Figura 113 – Corte Longitudinal Ampliação de 150 vezes.

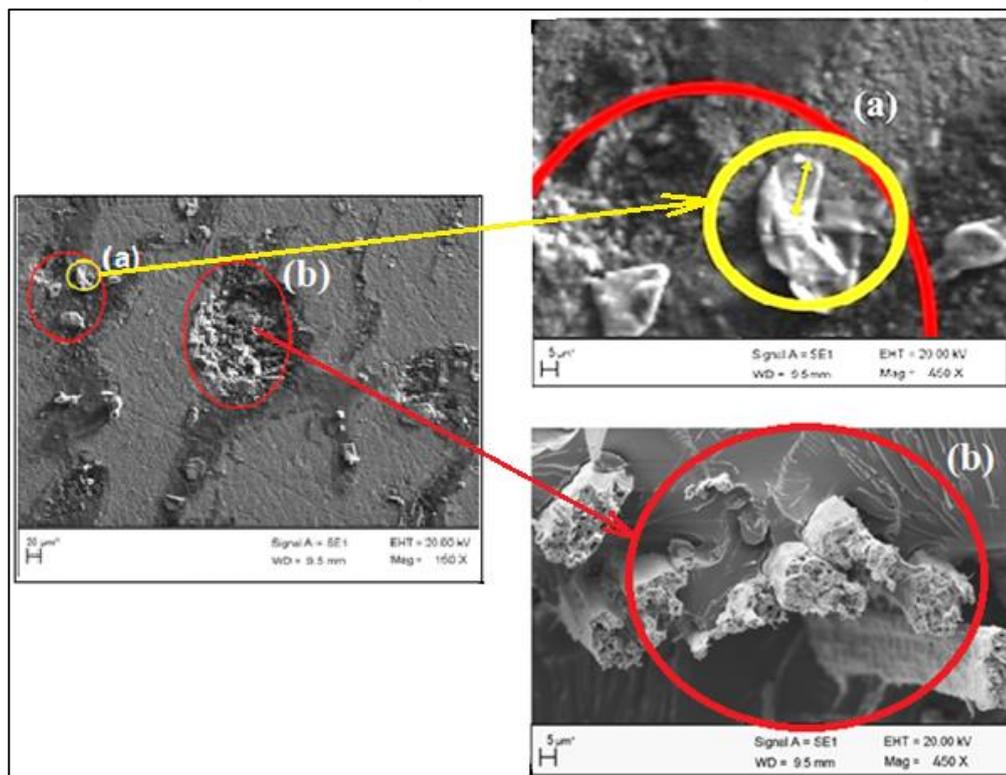


Fonte: AUTOR (2020).

4.3.4.2 Análise da microestrutura de um corte transversal

Para a análise microestrutural a amostra foi retirada da região do rompimento de um dos corpos de prova, com 40% de fibras longas, que foi submetido ao ensaio de tração. As imagens da Figura 114 foram ampliadas em 150 e 450 vezes mostrando uma matriz de resina bem distribuída e isenta de defeitos, garantindo uma uniformidade de suas propriedades.

Figura 114 – A esquerda ampliação de 150 vezes e a direita ampliação de 450



Fonte: AUTOR (2020).

Na imagem da Figura 114 pode-se perceber que as fibras se distribuíram pela matriz, dispostas perpendicularmente ao plano de observação com diâmetros de $12,4 \pm 3 \mu\text{M}$, como pode ser verificado nos detalhes (a) circulado em amarelo e (b) circulado em vermelho indicando que a resina apresentou uma boa penetração nas cadeias reticulares da fibra.

4.4 PROTÓTIPOS DESENVOLVIDOS

O protótipo desenvolvido baseou-se nos resultados obtidos em cada compósito analisado e maneira a combinar as melhores propriedades na aplicação dos componentes de um aeromodelo. Sendo assim, utilizou-se os três tipos de compósitos: com fibras aleatórias, trituradas e alongadas na confecção do protótipo.

No compósito constituído por fibras aleatórias e resina epóxi as matrizes apresentaram boa interação com o reforço. No compósito com fibras de bananeira trituradas, o reforço se apresenta bem distribuído pela matriz com morfologia não definida. No compósito constituído por fibras longas alinhadas a resina epóxi apresentou uma boa penetração nas cadeias reticulares da fibra com uma orientação bem definida.

A Tabela 20 apresenta uma comparação dos resultados dos ensaios mecânicos dos compósitos desenvolvidos neste trabalho em relação aos outros compósitos com fibra de bananeira provenientes da literatura. Observa-se que houve um ganho substancial tanto em relação ao limite de resistência à tração quanto à flexão, provavelmente devido ao tratamento alcalino das fibras com hidróxido de sódio (NaOH) e a pré-impregnação da resina pura nas cadeias reticulares das fibras, durante a fabricação do compósito, garantindo uma boa interação interfacial entre a matriz e o reforço.

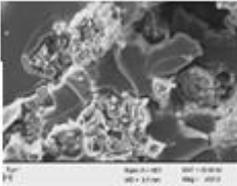
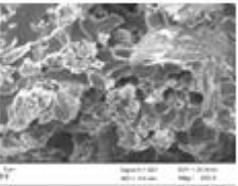
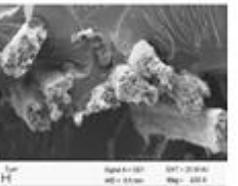
Tabela 20 – Tabela comparativa entre o compósito desenvolvido neste trabalho e outros compósitos da literatura com fibra de bananeira.

Compósitos com fibras de bananeira	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
Compósitos desenvolvidos neste trabalho:		
30% de fibras aleatórias e resina epóxi	33,35	36,87
30% de fibras trituradas e resina epóxi	43,98	54,38
40% fibras longas unilaterais e resina epóxi	54,73	97,50
BADRINATH; SENTHILVELAN, 2004. Fibras de bananeira (matriz epóxi, fibra de bananeira unidirecional, sem tratamento)	20,00	126,67
BOOPALAN et al, 2013. Fibras de banana da Índia (matriz epóxi, hand lay up convencional, tecido de fibra de bananeira)	17,92	58,06
SAPUAN et al, 2006. Tecido de fibra de bananeira (matriz de poliuretano, sanduíche fibra de bananeira a 190°C, sem tratamento)	47,02	75,15
SHARMA; KUMAR, 2012. Fibra de bananeira e poliuretano (matriz de poliuretano, sanduíche, banana, 190°C, sem tratamento)	27,40	10,80
ZAMAN et al, 2012. Fibras de banana de Bangladesh (matriz de polipropileno, sanduíche a 190°C, banana, vários tratamentos).	36,30	-

Fonte: AUTOR (2020).

A tabela 21 apresenta a comparação entre os próprios compósitos desenvolvidos neste trabalho, considerando os três tipos de fibras de bananeira: aleatórias trituradas e longas unilaterais. Comparou-se os melhores resultados de dureza, os limites de resistência à tração e flexão, as imagens da microscopia ótica e microscopia de varredura eletrônica (MEV), e o aspecto das peças feitas com cada tipo de compósito de fibra de bananeira.

Tabela 21 – Comparação entre os três tipos de compósitos de fibra de bananeira desenvolvidos neste trabalho.

Compósito	30% de Fibras Aleatórias e Resina Epóxi	30% de Fibras Trituradas e Resina Epóxi	40% de Fibras Longas e Resina Epóxi
Máxima Dureza (Shore D)	72,01	80,27	74,27
Máxima Tração (MPa)	33,32	43,98	54,73
Máxima Flexão (MPa)	36,87	54,38	97,5
Imagem da Microscopia Ótica			
Imagem do MEV			
Aspecto dos compósitos			

Fonte: AUTOR (2020).

A figura 115 apresenta uma placa com 300 mm de comprimento, 100 mm de largura e 3 mm de espessura, fabricada como protótipo do compósito de manta de fibras aleatória de bananeira e resina epóxi.

Figura 115 – Protótipo com compósito com manta de fibra aleatória de bananeira.



Fonte: AUTOR (2020).

A figura 116 apresenta uma placa com 300 mm de comprimento, 100 mm largura e 3,5 mm de espessura, fabricada como protótipo do compósito de fibras trituradas de bananeira e resina epóxi.

Figura 116 – Compósito com fibra de bananeira triturada e resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

A figura 117 apresenta uma placa com 300 mm de comprimento, 100 mm de largura e 4 mm de espessura fabricada como protótipo do compósito de fibras longas unilaterais bananeira e resina epóxi.

Figura 117 – Compósito com fibras de bananeira longas unilaterais e resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

4.4.1 Aplicações práticas

Os estudos e pesquisas desenvolvidos neste trabalho mostraram, pelos resultados experimentais obtidos, que os compósitos com as três configurações diferentes de fibra de bananeira apresentaram bons resultados relativos à dureza, resistência à tração e flexão. Além disso, na confecção dos protótipos, o material estudado apresentou características que sugerem diferentes aplicações práticas. O compósito com manta de fibras aleatórias e resina epóxi, por exemplo, embora não tenha obtido os melhores resultados de resistência mecânica, como era esperado na proposta inicial deste trabalho, apresentou uma distribuição homogênea do reforço na matriz oferecendo uma estrutura flexível, com superfície lisa e uniforme, ideal

para revestimento de produtos, peças e componentes; já o compósito com fibras trituradas apresentou dureza elevada, além de permitir modelagem durante o processo de cura, possibilitando a confecção de qualquer tipo de peça e, por fim, o compósito com fibras longas unilaterais, que apresentou elevada resistência à tração e flexão com pouca deformação aos esforços mecânicos, sendo útil para reforços estruturais.

Como prova de conceito e para evidenciar as características mecânicas dos compósitos desenvolvidos neste trabalho optou-se por construir um aeromodelo de competição usando os três tipos de fibras. A escolha do aeromodelo foi considerada pelo autor um grande desafio para confirmar o bom desempenho dos compósitos, por exigir leveza e resistência para atender às exigências aerodinâmicas.

Para a parte inferior da asa e a parte inferior da fuselagem do aeromodelo usou-se o compósito com fibras longas e resina epóxi, por apresentar excelente resistência à tração e flexão (Figura 118).

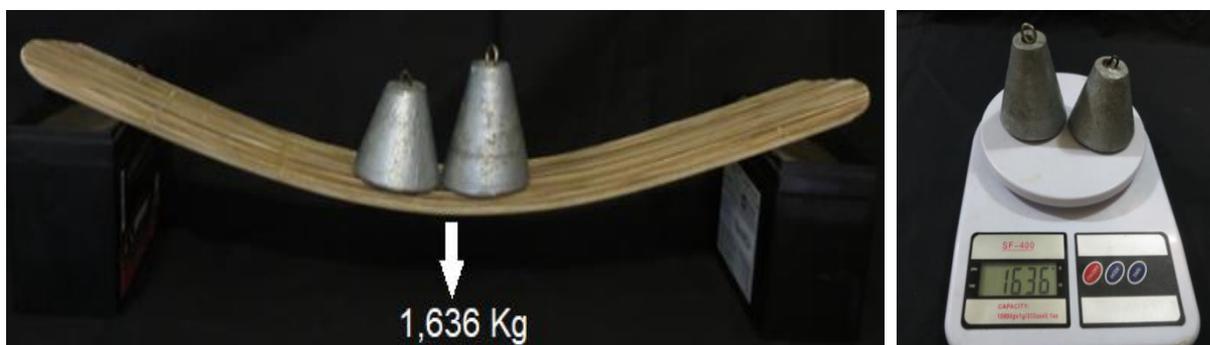
Figura 118 – Desenvolvimento da parte inferior da asa composta de fibras longas alinhadas e resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

Teste de esforço transversal na lâmina inferior da asa carregada com 1,6 kg, que equivale a três vezes o peso do aeromodelo, (Figura 119).

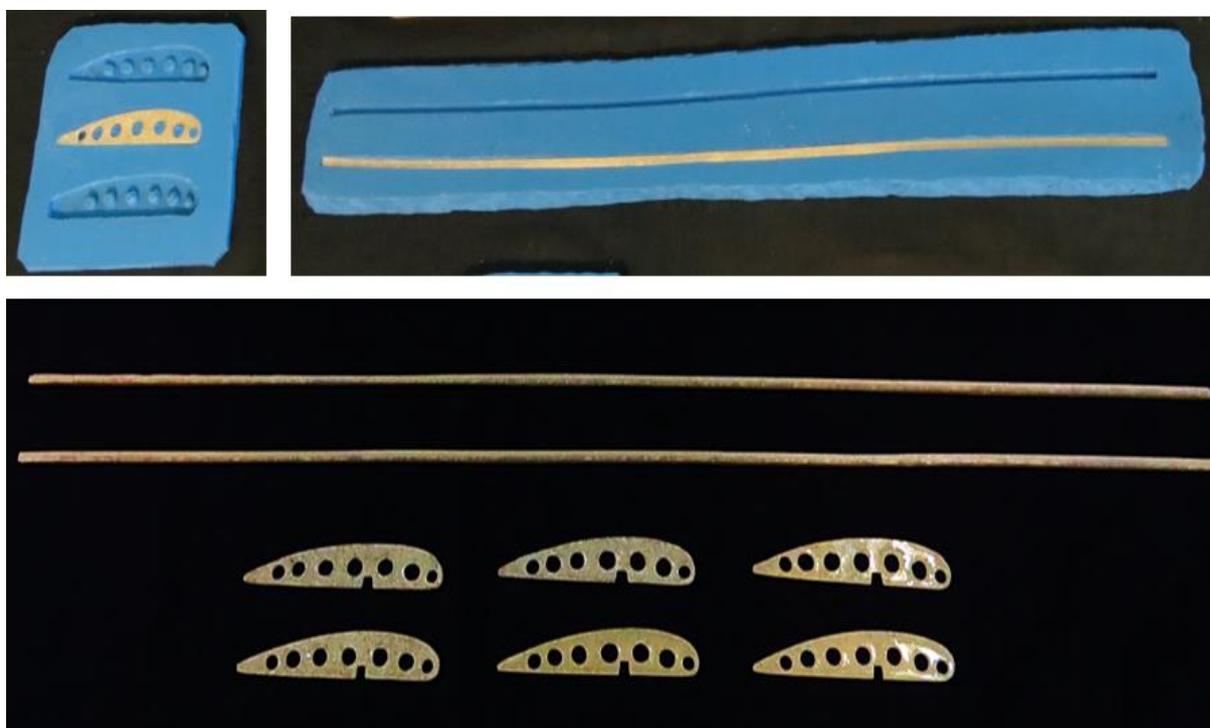
Figura 119 – Asa carregada com carga três vezes maior que o peso do corpo do aeromodelo.



Fonte: AUTOR (2020).

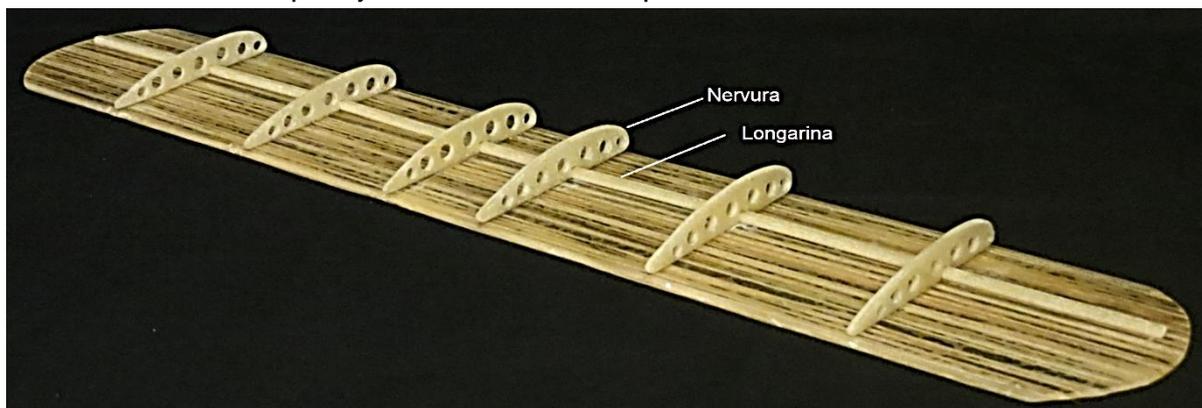
Para a fabricação das nervuras das asas e longarinas da fuselagem foi usado o compósito com fibras trituradas e resina epóxi por apresentar um elevado valor de dureza e boa resistência a tração (Figuras 120 e 121). Todos os moldes foram desenvolvidos pelo autor neste trabalho.

Figura 120 – Moldes de borracha de silicone e as nervuras das asas e as longarinas da fuselagem já desmoldadas.



Fonte: AUTOR (2020).

Figura 121 – Nervuras e longarinas da asa feitas com fibras trituradas e resina epóxi já montada sobre a parte inferior da asa.



Fonte: AUTOR (2020).

O compósito com manta de fibras aleatórias e resina epóxi foi usado no revestimento da asa e corpo do aeromodelo, por apresentar uma dureza razoável e oferecer uma superfície lisa, ligeiramente flexível e uniforme permitindo um acabamento adequado para diminuir o “arraste” aerodinâmico do aeromodelo. A Figura 122 mostra o revestimento da asa e da fuselagem do aeromodelo sendo preparados com a aplicação da resina pelo método de laminação.

Figura 122 – Revestimento da asa e da fuselagem do aeromodelo com manta de fibra aleatória e resina epóxi.



Fonte: AUTOR (2020).

A figura 123 mostra o aeromodelo nos diversos ângulos com revestimento completo do corpo e das asas.

Figura 123 – Conclusão do revestimento da asa e do corpo do aeromodelo.



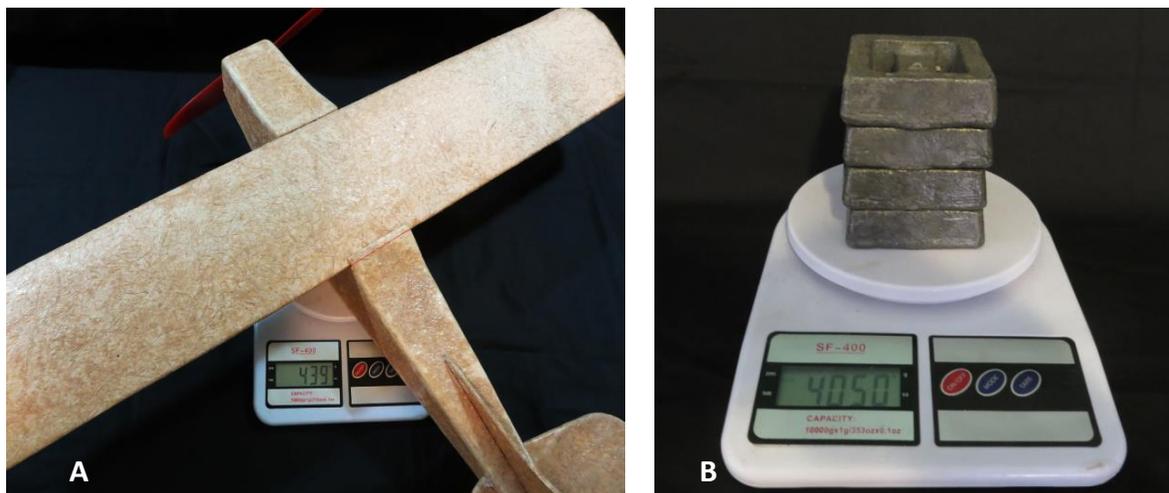
Fonte: AUTOR (2020).

Na regra prática da construção de aeromodelos a asa tem que suportar de 5 a 6 vezes o peso do avião para resistir os esforços sobre a mesma durante os processos de decolagem, pouso e arremetida, além das manobras acrobáticas (BARBOSA, 2016).

Para demonstrar que a asa do aeromodelo construído com fibra de bananeira e resina epóxi, cumpre essa exigência aplicou-se uma carga de aproximadamente 10 vezes o peso do aeromodelo.

A figura 124-A mostra o peso total do aeromodelo (0,439 Kg) e a figura 124-B apresenta a carga de 4,050 kg que será colocada no centro da asa para simular o teste de resistência.

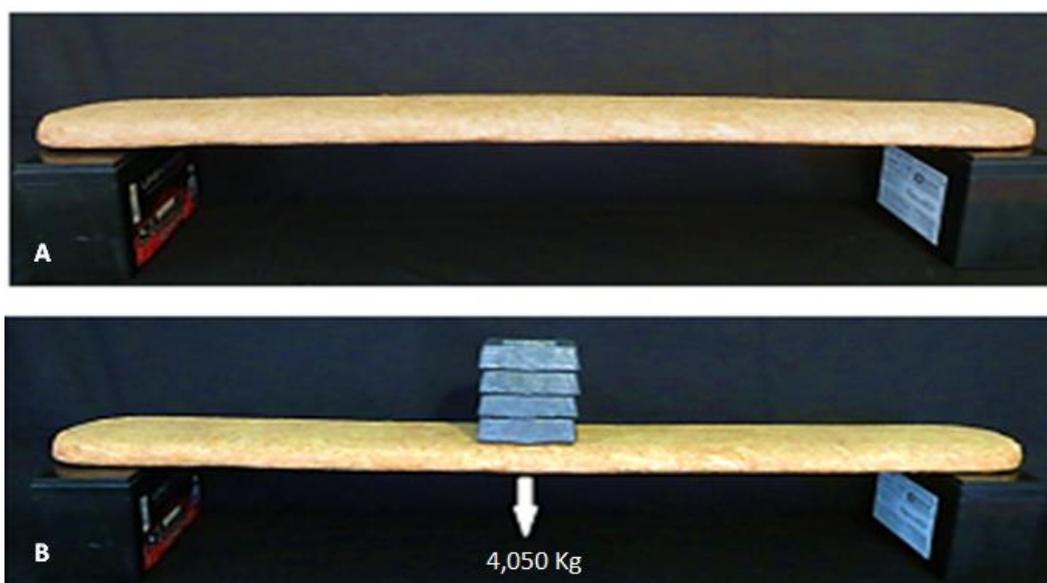
Figura 124 – A- Peso do aeromodelo com motor 0,439 Kg; B- Carga a ser aplicada 4,050 Kg.



Fonte: AUTOR

A figura 125-A, mostra a asa sem carga, apoiada nas extremidades e a figura 125-B mostra a asa suportando a carga de 4,050 kg com o mínimo de deformação.

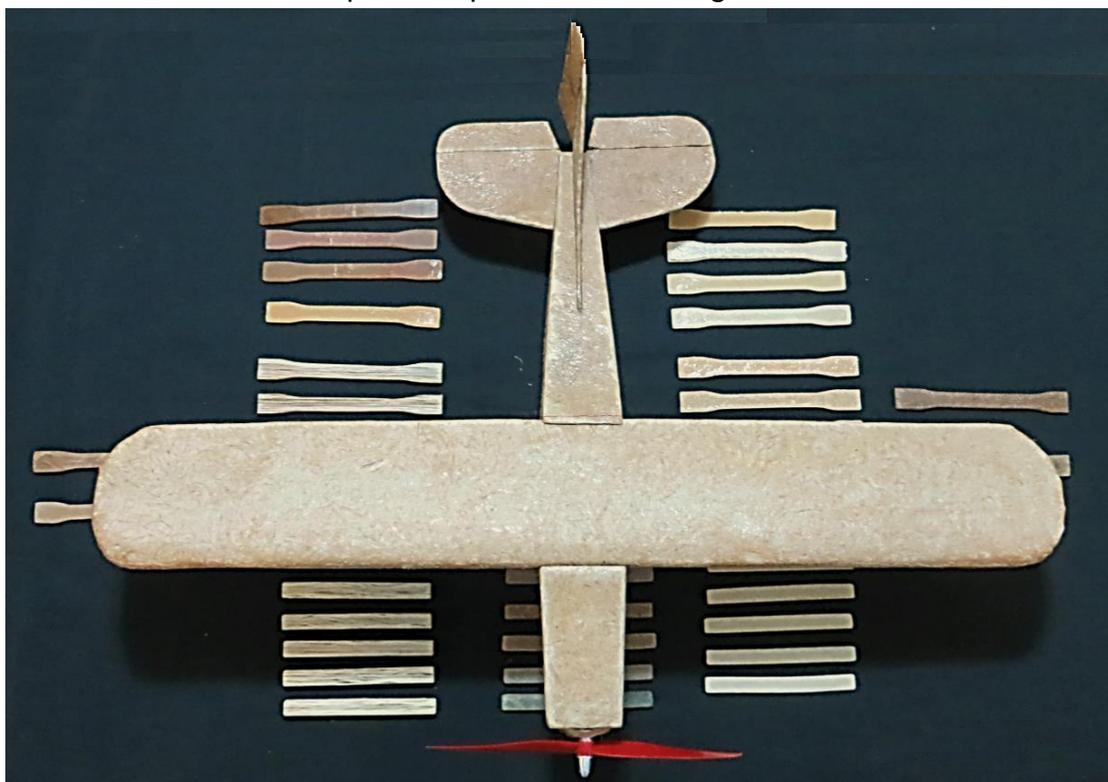
Figura 125 – A: Asa sem a carga - B: Asa suportando a carga de 4,050 Kg.



Fonte: AUTOR (2020).

A figura 126 mostra o aeromodelo completo e os corpos de prova de todos os compósitos que lhe deram origem.

Figura 126 – Aeromodelo completo com todos os corpos de prova dos compósitos que lhe deram origem.



Fonte: AUTOR (2020).

As propriedades geométricas foram medidas com o auxílio de um paquímetro marca DIGIMESS-100-020 e régua milimetrada marca Trident. Para avaliar o peso das peças, foi usada a balança digital SF- 400. O peso total equivale a soma do peso da asa em conjunto com o corpo e o motor do aeromodelo. Todos os dados foram dispostos na (Tabela 22).

Tabela 22 – Dimensões geométricas do aeromodelo.

Asa	Envergadura	720 (mm)
	Corda	120 (mm)
	Peso	185 (g)
Corpo	Comprimento	580 (mm)
	Peso	194 (g)
Motor	Peso	60 (g)
Total	Peso	439 (g)

Fonte: AUTOR (2020).

5. CONCLUSÃO

Mesmo diante da grande disponibilidade das fibras de bananeira no ambiente, por se tratar de um recurso natural renovável, elas ainda permanecem como um produto subutilizado para o desenvolvimento de novos materiais. Estudos como este, que investigam e demonstram a boa qualidade de fibras naturais em compósitos poliméricos, estimulam o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias que possam servir como alternativa às fibras artificiais, que provocam um grande impacto ambiental, como as de carbono e as de vidro.

A partir dos resultados obtidos conclui-se que a distribuição das fibras de bananeira na matriz polimérica exerce influência direta nos resultados de resistência mecânica do compósito. O melhor desempenho foi obtido com os compósitos constituídos com 40% de fibras longas e resina epóxi, apresentando um limite máximo de resistência de 54,25 (MPa) para tração e 97,50 (MPa) para flexão. Já os compósitos com fibras aleatórias e fibras trituradas apresentaram melhor desempenho mecânico com o teor de 30% de fibra em resina epóxi, sendo que para fibras aleatórias o limite máximo de tração alcançou 33,35 (MPa) e 36,87 (MPa) de flexão, e para fibras trituradas o limite máximo de tração alcançou 43,89 (MPa) e 54,38 (MPa) de flexão.

Vale salientar que os compósitos com as fibras que receberam tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH) apresentaram melhores resultados de dureza, tração e flexão quando comparadas aos compósitos que usaram as fibras sem tratamento, tal fato indica que o tratamento proporcionou às fibras uma superfície mais porosa facilitando a perfeita impregnação da resina em suas cadeias reticulares. A boa adesão interfacial aumenta a eficiência da transferência de tensão ou deformação entre a matriz e o reforço, aumentando o desempenho mecânico do compósito, adequando rigidez, ductilidade e resistência. Fato que sugere uma oportunidade de aprimoramento do processo de beneficiamento da fibra e possibilidade de aumento do valor agregado como produto final.

De acordo com as análises micro estruturais (MEV e Microscopia Ótica) os compósitos apresentaram uma matriz isenta de defeitos e bem distribuída. Nos compósitos com teor de 30% de fibra aleatória uma pequena aglomeração pontual de

fibras foi observada na microscopia óptica do compósito, porém não gerou interferência nos resultados mecânicos.

Em síntese, de acordo com os resultados dos testes realizados, concluiu-se que será possível o desenvolvimento de compósitos de resina epóxi reforçado com fibras de bananeira, bastante resistentes e versáteis, podendo ser utilizado tanto para finalidades que exijam esforços mecânicos (como dureza, tração e flexão), quanto para usos em coberturas que necessitem de maleabilidade, oferecendo soluções adequadas de acordo com a forma de preparo de cada compósito específico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGROARTE, S. B. S. **Fibras de bananeira no agronegócio**. Nov. 2019. Disponível em: <http://www.agroartefibradebananeira.com.br>. Acesso em 12 jun. 2020.
- AKPOMIE, K. G.; CONRADIE, J. **Efficient synthesis of magnetic nanoparticle-*Musa acuminata* peel composite for the adsorption of anionic dye**. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 13, n. 9, p. 7115–7131, set. 2020.
- ALBINANTE, S.R.; PACHECO, E.B.A.V.; VISCONDE; L. L.Y.; BATISTA. L. N. **Caracterização química e física das fibras de bananeira dos tipos d'água (*Musa sepientum*) e prata (*musa balbisiana*)**. 11 Congresso Brasileiro de Polímeros, 2011.
- ALKBIR, M. F. M. et al. **Fibre properties and crashworthiness parameters of natural fibre-reinforced composite structure: A literature review**. *Composite Structures*, v. 148, p. 59–73, jul. 2016.
- ALVES; REGINA, E. **Caracterização de fibras lignocelulósicas pré-tratadas por meio de técnicas espectroscópicas e microscópicas ópticas de alta resolução**. 2011. 115p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- AMORIM, E.P.; AMORIM, V.B.O.; SILVA, S.O.; PILLAY, M. **Quality improvement of cultivated *Musa*. Banana breeding: progress and challenges**. New York: CRC Press, 2011. p. 252-280.
- ASIM, M. et al. **A Review on Pineapple Leaves Fibre and Its Composites**. *International Journal of Polymer Science*, v. 2015, p. 1–16, 2015.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2240-14: Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness**. 2014.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3039/D3039M-17: Standard Test Method for tensile properties of polymer matrix composite materials**. 2017.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D790-10: Standard Test Methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials**. 2010.
- BADRINATH, R.; SENTHILVELAN, T. **Comparative investigation on mechanical properties of banana and sisal reinforced polymer based composites**. *Procedia Materials Science*, v. 5, p. 2263-2272, 2014.
- BALLESTEROS, J. E. M. et al. **Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance**. *Construction and Building Materials*, v. 205, p. 52–60, abr. 2019.
- BALZER, P.S., et al. **Polímeros: Ciência de Tecnologia**, 2007, XVII, 1.
- BARBOSA, R. **16ª Competição SAE Brasil Aero Design**. [S.l.: s.n.], 2016.
- BLEDZKI, A. K.; FRANCISZCZAK, P.; MELJON, A. **High performance hybrid PP and PLA biocomposites reinforced with short man-made cellulose fibres and softwood flour**. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 74, p. 132–139, jul. 2015.

BOONRUANGROD, R.; FLUCH, S.; BURG, K. **Elucidation of origin of the present day hybrid banana cultivars using the 5'ETS. sequence information.** *Molecular Breeding*, v. 24, n. 1, p. 77– 91, 2009.

BOOPALAN, M.; NIRANJANAA, M.; UMAPATHY, M. J.; **Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites.** *Composites: Part b*, p 54-57, 2013.

BRAGA, C.R.C.; **Preparação e análise das propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas de filmes de poliuretano utilizados no revestimento de stents esofágicos.** 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2004.

BRITO DINIZ, J. F. et al. **Vegetable Fiber Drying: Theory, Advanced Modeling and Application.** p. 31–60.

CALHLEEN A.; JONHSON; GLEEN H. **Engeneering Plastics**, Volume 2, Editora ASM Internacional, 1987, Páginas 240-241.

CALLISTER JR, W. D., RETHWISCH, D. G. **Material science and engeneering an introducton.** 8.ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2009, 885p.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 2ª Edição. Artliber Ed. 2006. 277p.

CAPITANI, D.; GARAVELLO, M. E. A Atividade Artesanal com Fibra de Bananeira sob a Perspectiva do Ecodesenvolvimento. **Resumos do II Congresso Brasileiro de Agroecologia 1402** Rev. Bras. Agroecologia, v.2, n.1, fev. 2007.

COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. **Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósitos com resina epóxi com diferentes arranjos das fibras na presença de vazios.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol 11, n 4, p 182-189, 2001.

DE PAULA, P. G. **Formulação e Caracterização de Compósitos com Fibras Vegetais e Matriz Termoplástica.** 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense - Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ. 2011.

DEMARCHI, C. A. **Aplicabilidade de placas de fibra de bananeira: produção , caracterização e absorção sonora.** 2010. 110 f. Dissertação de Mestrado - Engenharia de Edificações e Saneamento, da Universidade Estadual de Londrina – UEL 2010

DJIDJELLI, H. **Journal of Applied Polymer Science** . 2007, 103, 3630.

EMBRAPA. **O produtor pergunta, a Embrapa responde.** 2ed. Revista amplitude. 2012. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/82218/1/500>>. Acesso em: 05 de Fev 2019.

ESPER, F. J.; KERSTING, D. F.; MARICCI, G. **Estudo sobre o tratamento de resíduos de compósitos estruturais produzidos com fibra de vidro e fibra de carbono – uma revisão.** 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 06 a 10 de Novembro de 2016, Natal, RN, Brasil.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <http://www.foostat.fao.org/site/340/default.aspx>. Acesso em: 6 ago. 2020.

FAO/IAEA. **Mutant variety search**. 2012. Disponível em: <http://mvgs.iaea.org/Search.aspx/>. Acesso em: 8 ago. 2020.

FAOSTAT- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2014. **FAOSTAT Agriculture Data**. [Online] Available at: <http://faostat3.fao.org>. Acesso em: 05 de Fev 2020.

FEI, F. et al. **How to integrate the informal recycling system into municipal solid waste management in developing countries: Based on a China's case in Suzhou urban area**. Resources, Conservation and Recycling, v. 110, p. 74–86, jul. 2016.

FERIOTTI, A. **Proposta de reaproveitamento de pseudocaule da bananeira – musa Cavendish**. 2010.

FRANCO, F. J. P. **Aproveitamento da fibra do epicarpo do coco babaçu em compósito com matriz epóxi: estudo do efeito do tratamento da fibra**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. RN. 2010.

FRANCO, P. J. H.; GONZALEZ, A. V. **Compositics**. Part A, 2004 339p.

GAFUR, M. A.; Khan, G. M. A.; Shams, M. S. A.; Kabir, M. R.; Terano, M.; Alam, M. S. **Influence of chemical treatment on the properties of banana stem fiber and banana stem fiber / coir hybrid fiber reinforced maleic anhydride grafted polypropylene / low-density. Polyethylene Composites** 2013, 1020.

GLOBAL. **Fibra de bananeira sai do campo para revestir móveis de luxo**. In: Valor econômico, São Paulo: 13 jul. 2007. Disponível em: http://www.totalmoveis.com.br/show_news.asp?IDNOT=NT0445. Acesso em: 10 de Fev 2019.

GLOBAL. **Fibra de bananeira sai do campo para revestir móveis de luxo**. In: Valor econômico, São Paulo: 13 jul. 2007. Disponível em: http://www.totalmoveis.com.br/show_news.asp?IDNOT=NT0445. Acesso em: jun. 2020.

GODOY, F. D. **Proposta de reaproveitamento o pseudocaule da bananeira – São Caetano do Sul, SO: CEUN-EEM**, 2010.

ISHIZAKI, M. H.; VISCONTE, L. L. Y.; FURTADO, C. R. G.; LEITE, M. C. A. M.; LEBLANC, J. L. **Polímeros**, 16, p.182 (2006). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282006000300006>. Acesso em: 10 de Abr 2019.

JOAQUIM, E.F. **Ensaio medem dureza Shore e resistências à tração e flexão – parte III. Plástico Moderno**, 258/95, p.38-40, Set, 1995.

KERSTING, D. F.; MARICCI, G.; WIEBECK, H. **Reciclagem de compósitos carbono/epóxi: uso de reciclagem química associadaa outros métodos**. 20º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 04 a 08 de Novembro de 2012, Joinville, SC, Brasil.

LACERDA, K. A. et al. **Influência da relação estequiométrica resina/endurecedor em propriedades mecânicas de compósitos ternários hierárquicos resina -**

epóxi/tecido de fibra de carbono/nanotubos de carbono. *Polímeros Ciência e Tecnologia*, v. 24, n. 2, p. 222–227, 2014.

LENG, J., LAN, X., LIU, Y., DU, S. (2011) **Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and applications.** *Progress in Materials Science*. 56: 1077-1135.

LOZANO, R. **Analysing the use of tools, initiatives, and approaches to promote sustainability in corporations.** *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, v. 27, n. 2, p. 982–998, 2 mar. 2020.

MARIOTTI, C. A. M. **Aplicabilidade de placas de fibra de bananeira: produção caracterização, e absorção sonora.** 110 f. Dissertação de Mestrado - Engenharia de Edificações e Saneamento, da Universidade Estadual de Londrina – UEL 2010.

MESDAGHINIA, A. et al. **A bibliometric analysis on the solid waste-related research from 1982 to 2013 in Iran.** *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, v. 4, n. 3, p. 185–195, 8 set. 2015.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. **Structural efficiency of full-scale timber–concrete composite beams strengthened with fiberglass reinforced polymer.** *Composite Structures*, v. 128, p. 145–154, set. 2015.

MOTA, R. C. A. **Análise de viabilidade Técnica de Utilização da Fibra de Bananeira com resina sintética em Compósitos.** 2010. 108 f. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em: < <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15617/1>>. Acesso em: 08 maio 2020.

MULINARI, D. R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP. (2009)

NERY, T. B. R.; JOSÉ, N. M. **Estudo das Fibras de Bananeira Pré-tratadas e in natura como Possível Matéria-prima para Reforço em Compósitos Poliméricos.** *Rev. Virtual Quim.*, 2018, 10 (2), no prelo. Data de publicação na Web: 2 de abril de 2018.

ORTEGA, Z. et al. **Production of Banana Fiber Yarns for Technical Textile Reinforced Composites.** *Materials*, v. 9, n. 5, p. 370, 13 maio 2016.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da engenharia aeronáutica, aerodinâmica e desempenho.** [S.l.]: Salto/SP - Edição do Autor, 2014.

ROLIM, A. M. **A Reciclagem de Resíduos Plásticos Pós-consumo em Oito Empresas do Rio Grande do Sul.** 2010. 125 f. Dissertação (Mestre em Administração) - Escola de Administração, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. RS. 2010.

ROMÃO, B. M. V.; DINIZ, M. F.; AZEVEDO, M. F. P.; LOURENÇO, V. L.; PARDINI, L. C.; DUTRA, C. L. **Caracterização por FT-IR de Agentes de Cura Utilizados em Resinas Epoxídicas-II-Polimercaptana, Poliaminoamida e Amina Modificada.** Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA - CTA. São José dos Campos, SP. 2003.

ROSA, A.F.; ARAÚJO; S.P.; CARVALHO, M.F.D.A. **A fibra de bananeira e o design de ambientes sustentável**. 2012

ROSS H; PAWLINA M.– **Correlação da Microscopia Ótica com Biologia Celular e Molecular**. 2012. Histologia – Texto e Atlas 6 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan,

SAMARA PEREIRA DE ARAÚJO; S.F.; RIBEIRO, S.M.A.; CARVALHO, M.F.D.A. **Fibra de bananeira e o design de ambientes sustentável**. 2010.

SANTOS, A. G.; APATI, G. P.; SILVEIRA, M. L. L.; PEZZIN, A. P. T. **Estudo e caracterização de compósitos de resina epóxi em gel coat com diferentes teores de cargas inorgânicas**. 2017.

SANTOS, K.M.P. **Atividade artesanal com fibra de bananeira em comunidades quilombolas do Vale Ribeira São Paulo**. Piracicaba. SP. 1116p. 2005.

SAPUAN, S. M.; LEENI, A.; HARIMI, M.; BENG, Y. K. **Mechanical properties of woven banana fiber reinforced epoxy composites**. Journal of Materials and Design. 2006, p.689-693.

SEBRAE. **Estudo de mercado: Banana**, Série Mercado, 2007.

SENGUPTA, S. et al. **Development of Unconventional Fabric from Banana (Musa Acuminata) Fibre for Industrial Uses**. Journal of Natural Fibers, v. 17, n. 8, p. 1212–1224, 2 ago. 2020.

SHARMA, N. K; KUMAR, V. **Studies on properties of banana fiber reinforced green composite**. Journal of Reinforced Plastics & Composites, p 525-532, 2012.

SIKARWAR, R.S.; VELMURUGUAN, R.;MADHU, V. 2012. **Experimental and analytical study of high velocity impact on kevlar/epoxy composite plates**. Central European journal of engineering. 2 (4): 634-649. DOI: 10.2478/S13531-012-0029-X. Acesso em: 10 fev. 2020.

SILAEX, Química LTDA. **Resinas epóxi**. Abr.2019. Disponível em:< <http://www.silaex.com.br>> Acesso em: 01 ago. 2020.

SILVA, L. J. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos laminados com fibras vegetais**. 2011, 141 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei – MG.

SIMMONDS, N. W. & SHEPHARD, K. **The taxonomy and origin of the cultivated bananas**. The journal of the Linnean Soc. Botany, London, v.55(359): 302-303, 1973.

SINGH, R., SHUKLA, A., TIWARI, S., SRIVASTAVA, M.A. **Review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of etanol production potential. Renewable and Sustainable**. Disponível em: Energy Reviews. v.32, April 2014. 713-728. Acesso em: 30 de Jun. 2020.

TOMCZAK, F. **Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras no Brasil**. 2010. 82 f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil. 2010.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Disponível em:

<https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E>.
Acesso em: 16 jun. 2020.

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento Sustentável: o desafio do século XXI**. 3 ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2008 35p.

VELÁSQUEZ-COCK, C. P.; GAÑÁN, M.; OSORIO, J.L.; PUTAUX, A. **Influence of the maturation time on the physico-chemical properties of nanocellulose and associated constituents isolated from pseudostems of banana plant** c.v.Valery. *Industrial Crops and Products* 83 (2016) 551-560.

VENKATESHWARAN, N.; ELAYAPERUMAL, A. **Banana Fiber Reinforced Polymer Composites** - A Review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2010, 29, 2387.

YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Brasil 2004.

ZAMAN, H. U.; KHAN, M. A.; KHAN, R. A. **Banana fiber-reinforced polypropylene composites: a study of the physico-mechanical properties**. *Fibers and polymers*, 2005, v. 14, n.1, p. 121-126.

ZANG, D. et al. **Superhydrophobic coating on fiberglass cloth for selective removal of oil from water**. *Chemical Engineering Journal*, v. 262, p. 210–216, fev. 2015.