



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ARTHUR RUAN DIAS TAVARES

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MORFOLÓGICA DE COMPOSITOS COM
FIBRAS DE VIDRO E PALHA DA COSTA (*Raphia Taedigera Mart*)**

ANANINDEUA- PA

2018

ARTHUR RUAN DIAS TAVARES

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MORFOLÓGICA DE COMPOSITOS COM
FIBRAS DE VIDRO E PALHA DA COSTA (*Raphia Taedigera Mart*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva Costa.

ANANINDEUA- PA

2018

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

- D541c Dias Tavares, Arthur Ruan.
 Caracterização Mecânica e Morfológica de Compositos com Fibras de Vidro e Palha da Costa (*Raphia Taedigera Mart*) / Arthur Ruan Dias Tavares. — 2018.
 75 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva Costa
 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.
1. Materiais. Fibras. Caracterização. I. Título.

CDD 620.118

ARTHUR RUAN DIAS TAVARES

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MORFOLÓGICA DE COMPOSITOS COM
FIBRAS DE VIDRO E PALHA DA COSTA (*Raphia Taedigera Mart*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Data de aprovação: ____ / ____ / ____.

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Deibson Silva Costa
(FEMAT/CAMPANIN/UFPA – Orientador)

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
(FEMAT/CAMPANIN/UFPA – Examinador interno)

Prof. Me. Franciele Gomes Ferreira
(FACET/CAMPANIN/UFPA – Examinadora externa)

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Alexandre da Silva Tavares e Rosecleide Silva Dias. À minha esposa Camila Ribeiro Barbosa. Aos meus irmãos Ana Beatriz, Ana Sophia, João Victor e Gabriel. A minha avó Marlene Pantoja Dias.

AGRADECIMENTOS

Nesta oportunidade em que é alcançada uma meta importante em minha vida profissional, quero expressar os meus sinceros agradecimentos a Deus, pelo dom da vida.

À minha esposa Camila Ribeiro Barbosa, pela paciência, compreensão, apoio irrestrito, carinho e Amor a mim concedido.

Aos meus pais, Alexandre da Silva Tavares e Rosecleide Silva Dias, pela dedicação, esforço, apoio e compreensão em todos os momentos.

Ao meu amigo e pai de criação, Edimar de Sousa Silva Chaves, pelos ensinamentos e dedicação na minha formação como homem e profissional.

A minha avó, Marlene Pantoja Dias que com muito carinho e apoio, não mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Ao Prof. Dr. Deibson Silva Costa, pela forma segura, dedicada e competente com que orientou este trabalho.

Ao Aluno de mestrado e Eng. Bruno Mendes, que compartilhou o seu conhecimento, de forma competente e segura, e contribuiu para o meu crescimento profissional.

A todos da Engenharia de Materiais (colegas de turma, professores) em especial ao grupo de pesquisa de compósitos do Campus Ananindeua, que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação profissional compartilhando conhecimento.

Aos meus amigos que acreditaram e oraram por mim.

RESUMO

Neste trabalho foram produzidos materiais compósitos de matriz poliéster isoftálica com inserção de fibra de vidro e fibras de palha da costa nos comprimentos de 15, 30 e 45 mm. Os compósitos foram confeccionados de acordo com o método *hand lay-up*. Para cada ensaio foram produzidos 7 (sete) corpos de prova para cada composição. A matriz utilizada foi a resina poliéster isoftálica, utilizando iniciador (1,0 % v/v) e acelerador de cobalto (1,5 % v/v). As fibras inseridas tiveram valores de fração mássica de 2,5 e 5 %. Foram realizados ensaios físicos de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente adotando a NBR 12766, ensaios de tração dos compósitos segundo a ASTM D 3039, ensaios de flexão segundo a norma ASTM D 790 e análises da superfície de fratura através da microscopia eletrônica de varredura – MEV. Os resultados mostraram que houve aumento no limite de resistência a tração dos compósitos com fibra de vidro em relação à matriz plena. Os melhores resultados de limite de resistência a tração foi de 21,25 MPa para fibras de vidro; 9,20 MPa para fibras de palha da costa; a resistência a flexão para compósitos com fibras de vidro foi de 85,83 MPa, e para compósitos de palha da costa foi de 45,65 MPa. As análises morfológicas das superfícies de fraturas foram eficientes para a determinação dos mecanismos de falhas e características presentes nos materiais, onde os fenômenos de fibras dispostas transversalmente na direção do carregamento e fibras rompidas foram observados. Os materiais produzidos e caracterizados apresentaram propriedades mecânicas similares com a literatura consultada.

Palavras chave: Materiais. Fibras. Caracterização.

ABSTRACT

In this work we were produced composite materials isophthalic polyester matrix with glass fiber insert and the coast straw fibers in lengths of 15, 30 and 45 mm. The composites were made according to the hand lay-up method. For each test seven (7) test bodies were produced for each composition. The matrix used was the isophthalic polyester resin, using initiator (1.0% v / v) and cobalt accelerator (1.5% v / v). The inserted fibers had mass fraction values of 2.5 and 5%. Physical tests were conducted for water absorption, porosity and bulk density apparent adopting NBR 12766, tensile testing of composites according to ASTM D 3039, flexural test according to ASTM D 790 and analysis of the fracture surface by electron microscopy of scanning - SEM. The results showed that there was an increase in the tensile strength limit of the fiberglass composites in relation to the full matrix. The best tensile strength limit results were 21.25 MPa for glass fibers; 9.20 MPa for straw fibers from the coast; the flexural strength for composites with glass fibers was 85.83 MPa, and for composites of straw the coast was 45.65 MPa. The morphological analysis of the fracture surfaces were efficient for the determination of failure mechanisms and features present in the material, where the phenomena of fibers arranged transversely in the direction of loading and broken fibers were observed. The materials produced and characterized presented similar mechanical properties with the literature.

Keywords: Materials. Fibers. Characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Classificação dos materiais compósitos.....	18
Figura 2.2 - Macromoléculas de um poliéster curado.....	21
Figura 2.3 - Palmeira palha da costa.....	24
Figura 2.4 - Estrutura do matapí.....	25
Figura 2.5 - a) Pecíolo, b) fibra de palha da costa.....	26
Figura 2.6 - Resistencia a tração dos materiais.....	29
Figura 2.7 - Curva tensão deformação.....	30
Figura 2.8 - Comportamento tensão deformação de compósitos formados por (matriz termofixa).....	31
Figura 2.9 - Teste de flexão de três pontos.....	32
Figura 2.10 - Desenho esquemático dos componentes básicos do MEV.....	33
Figura 3.1 - Equipamentos a) prensa hidráulica, b) molde metálico, c) balança analítica e d) estufa.....	34
Figura 3.2 - Resina de poliéster insaturado (a), iniciador peróxido de etil-metil cetona (MEK-P) (b) e acelerador de cobalto (c).	35
Figura 3.3 - Fibra de Vidro na forma de tecido.....	35
Figura 3.4 - Fibra de Palha da Costa.....	37
Figura 3.5 - (a) Fios de fibra de vidro desmanchados, (b) Corte da fibra de vidro (c) Fibra de palha da costa cortada e acondicionada.....	37
Figura 3.6 - Fluxograma do processo de fabricação dos compósitos.....	38
Figura 3.7 - Máquina de corte de bancada.....	39
Figura 3.8 - (a) Corpos de prova para os ensaios físicos, (b) aparato para pesagem dos corpos de prova.....	40
Figura 3.9 - Dimensões do CP de tração.....	42
Figura 3.10 - CP's para ensaio de tração.....	42
Figura 3.11 - Máquina de ensaio de tração.....	43
Figura 3.12 - Dimensões do CP de flexão.....	43
Figura 3.13 - CP's para ensaio de flexão.....	44
Figura 3.14 - Máquina universal para ensaio de flexão.....	44
Figura 3.15 - Amostra para análise no MEV.....	45
Figura 3.16 - Equipamento para MEV de bancada marca HITACHI (modelo TM 3000).....	45
Figura 4.1 - Comportamento de resistência à tração dos materiais compósitos com reforço de fibras de vidro.....	50

Figura 4.2 - Gráfico força x deslocamento.....	51
Figura 4.3 - Comportamento de resistência à tração dos materiais compósitos com reforço de fibras de palha da costa.....	54
Figura 4.4 - Gráfico força x deslocamento.....	55
Figura 4.5 - Comportamento de resistência à flexão dos materiais compósitos com reforço de fibras de vidro.....	58
Figura 4.6 - Comportamento de resistência à flexão dos materiais compósitos com reforço de palha da costa.....	61
Figura 4.7- Micrografia obtida por MEV do compósito com a incorporação de fibras de vidro. (a) Aumento 41x	64
Figura 4.8 - Micrografias obtidas por MEV do compósito com a incorporação de fibras de vidro. (a) Aumento 25x. (b) Aumento 80x.....	63
Figura 4.9 - Micrografias obtidas por MEV do compósito com a incorporação de fibras de palha costa. (a) Aumento 25x. (b) Aumento 30x.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das propriedades entre termoplásticos e termorrígidos.....	19
Tabela 2 - Valores para confecção de placas de matriz plena.....	38
Tabela 3 - Valores para confecção de placas utilizando fibras.....	38
Tabela 4 - Resultados dos ensaios físicos para compósitos com fibra de vidro.....	46
Tabela 5 - Resultados dos ensaios físicos para os compósitos com inserção de palha da costa.....	47
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração de compósitos com fibras de vidro.....	48
Tabela 7 - Dados gerados pela ANOVA: dois fatores para ensaio de tração dos compósitos de fibra de vidro.....	51
Tabela 8 - A análise comparativa de médias para os ensaios de tração de compósitos com fibras de vidro.....	52
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de tração de compósitos com reforço de fibras de palha da costa.....	53
Tabela 10 - Dados gerados pela ANOVA: de dois fatores para ensaio de tração dos compósitos com palha da costa.....	55
Tabela 11 - A análise comparativa de médias para os ensaios de tração de compósitos com fibras de palha da costa.....	56
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de flexão a três pontos de compósitos com reforço de fibras de vidro.....	57
Tabela 13 - Dados gerados pela ANOVA: de dois fatores para ensaio de flexão dos compósitos com fibras de vidro.....	58
Tabela 14 - Análise comparativa de médias para os ensaios de flexão de compósitos com fibras de vidro.....	59
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de flexão a três pontos de compósitos com reforço de fibras de palha da costa.....	60
Tabela 16 - Dados gerados pela ANOVA: de dois fatores para ensaio de tração dos compósitos com inserção de fibras de palha da costa.....	61
Tabela 17 - A análise comparativa de médias para os ensaios de flexão de compósitos com fibras de palha da costa.....	62
Tabela 18 - Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com fibras naturais encontradas na literatura.....	63

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURA

AA	Absorção de Água
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAT MET UMEDECIDO	Solução de Octoato de Cobalto
Co	Cobalto
ISO	Internacional Organization for Standardization
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
MEA	Massa Específica Aparente
MEK-P	Peróxido de Metil Etil Cetona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PA	Porosidade Aparente
PFRV	Compósito com Fibra de Vidro
UFPA	Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Geral.....	15
1.2.2 Especifico.....	15
1.3 Composição do Trabalho	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Compósitos	17
2.2 Classificação dos Compósitos	17
2.3 Matriz Poliéster	20
2.4 Fibras	21
2.4.1 Fibras Sintéticas.....	21
2.4.1.1 Fibra de Vidro.....	22
2.4.2 Fibras Vegetais.....	23
2.4.2.1 Fibra de Palha da Costa.....	24
2.5 Processo de Fabricação dos Compósitos	26
2.5.1 Processo Hand Lay-Up.....	27
2.6 Ensaio Mecânicos	28
2.6.1 Ensaio de Tração.....	28
2.6.2 Ensaio de Flexão.....	31
2.7 Morfologia e Distribuição das Fibras na Matriz	32
3 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAIS	34
3.1 Equipamentos Utilizados	34
3.2 Materiais	34
3.2.1 Matriz Polimérica.....	34
3.2.2 Fibra de Vidro.....	35
3.2.3 Fibra de Palha da Costa.....	36
3.3 Procedimentos Experimentais	36
3.3.1 Cortes das Fibras.....	36
3.3.2 Produção dos Compósitos.....	37
3.3.2.1 Etapas da produção dos compósitos.....	37
3.3.3 Propriedades Físicas.....	40

3.3.4 Propriedades Mecânicas.....	41
3.3.4.1 Ensaio de Tração.....	41
3.3.4.2 Ensaio de Flexão.....	43
3.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1 Caracterização Física.....	45
4.2 Caracterização Mecânica.....	48
4.2.1 Ensaio de Resistência à Tração.....	48
4.2.1.1 Material Compósito com Reforço de Fibra de Vidro.....	48
4.2.1.2 Material Compósito com Reforço de Fibra de Palha da Costa.....	52
4.2.2 Ensaio de Flexão.....	56
4.2.2.1 Material Compósito com Reforço de Fibra de Vidro.....	57
4.2.2.2 Material Compósito com Reforço de Fibra de Palha da costa.....	59
4.3 Comparações dos Resultados Obtidos com a Literatura.....	62
4.4 Caracterização Morfológica.....	63
5 CONCLUSÃO.....	67
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	68
REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação global com o meio ambiente tem trazido uma maior importância ao estudo de materiais que causem o menor impacto ambiental possível e sejam, ao mesmo tempo, eficientes (SATYANARAYANA *et al.*, 2007). Dentro de tal contexto, as fibras naturais, ou lignocelulósicas, têm se destacado, pois são biodegradáveis (TOMCZAK *et al.*, 2007) e neutras em relação à emissão de gás carbônico na atmosfera (MONTEIRO *et al.*, 2009).

Compósitos com fibras de vidro (chamados PFRV) proporcionam excelentes propriedades térmicas e mecânicas. No entanto estas propriedades dificultam o desenvolvimento de processos eficientes de reciclagem. De fato, dificuldades de descarte, reciclagem ou reutilização são hoje preocupações ambientais e por isso objeto de estudo de muitas pesquisas. O estabelecimento de métodos de disposição ou descarte para compósitos reforçados com fibras de vidro e suas leis de reciclagem são temas contemporâneos importantes, porque muitos problemas ambientais surgiram recentemente e vêm se agravando mundialmente (ZAH *et al.*, 2007).

Fibras naturais contam com diversas vantagens em relação a fibras sintéticas. Devido a tais vantagens, o interesse na substituição de fibras sintéticas pelas naturais na formulação de compósitos poliméricos tem aumentado significativamente (TOMCZAK *et al.*, 2007); (SANCHEZ *et al.*, 2010); (ALSINA *et al.*, 2005). Nos últimos anos, pressões ambientais revigoraram o interesse pelas fibras naturais. No caso de reforço de polímeros, o uso de fibras vegetais representa uma alternativa para a substituição parcial de PFRV (GOMES *et al.*, 2007). De fato, diversos setores começaram a utilizar compósitos reforçados com fibras vegetais como, por exemplo, a indústria automotiva, que as utiliza em painéis internos de portas, painéis dos encostos de bancos e de cabeça, botões, maçanetas, tampas internas do porta mala e painéis internos do teto em alguns veículos (WUZELLA e KANDELBAUER, 2007).

Fibras vegetais, em comparação com fibras de vidro, são muito eficientes na absorção de som, têm baixo custo, são leves, não estilhaçam em caso de acidentes, são biodegradáveis e podem ser obtida utilizando-se 80% menos energia que fibras de vidro (TRINDADE *et al.*, 2005). No entanto, problemas de adesão fibra-matriz, de absorção de água e também de propriedades mecânicas variáveis e limitadas vêm dificultando sua utilização em determinados ambientes e situações de carregamento que exijam um melhor desempenho mecânico.

Esta pesquisa insere-se na linha da incorporação de fibras naturais e sintéticas em matriz polimérica termofixa a fim de fabricar materiais compósitos. Especificamente, este trabalho compara as propriedades mecânicas dos compósitos de fibras naturais de palha da costa com os compósitos de fibras sintéticas de vidro, utilizando o método de fabricação por laminação manual, para analisar as propriedades mecânicas e morfológicas, utilizaram ensaios mecânicos de tração e flexão e microscopia eletrônica de varredura (MEV) respectivamente.

1.1 Justificativa

O estudo pode ser claramente justificado pela necessidade do uso de materiais novos e biorenováveis, capazes de substituir matérias primas usadas pela sociedade humana à milênios. Os compósitos de fibras naturais aparecem como uma alternativa “verde” a materiais derivados de fontes não renováveis, causadores de agressões muito acentuadas ao meio ambiente.

De acordo com esse contexto, este trabalho tem por justificativa principal, analisar o comportamento mecânico de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais de palha da costa, para substituição de matérias primas não renováveis e também para substituir compósitos de custo mais elevados.

1.2 Objetivos:

1.2.1 Geral

Desenvolver e caracterizar mecanicamente (tração e flexão) e morfologicamente, os compósitos de matriz polimérica com fibras de vidro e fibras de palha da costa na forma de fibras curtas (15, 30, 45 mm) fabricadas pelo processo *hand lay-up*.

1.2.2 Específicos

- Confeccionar e caracterizar as placas de matriz poliéster plena;
- Produzir compósitos com fibras curtas de fibra de vidro e palha da costa nos comprimentos de 15 mm, 30 mm, 45 mm, nas proporções de 2,5 % e 5 % pelo processo *hand lay-up*;
- Avaliar mecanicamente através de ensaio de tração e flexão, todas as séries de compósitos fabricados;
- Analisar a superfície da fratura e a interface fibra matriz, através de microscopia eletrônica de varredura, relacionando com suas propriedades mecânicas;
- Avaliar e comparar os resultados das propriedades mecânicas dos compósitos entre as séries fabricadas e com a literatura pesquisada.

1.3 Composição do Trabalho

A secção 1 apresenta as motivações e justificativa para a utilização de fibras vegetais e sintéticas especificamente a palha da costa e a fibra de vidro respectivamente, como alternativa para novos materiais. Para tanto, nesse capítulo são apresentados o objetivo geral do trabalho e os objetivos específicos.

A secção 2 apresenta o embasamento teórico que dá suporte as atividades desenvolvidas abrangendo os materiais compósitos, processo de fabricação e técnicas de caracterização desse material.

A secção 3 apresenta os materiais e métodos experimentais utilizados para o desenvolvimento do trabalho, com descrições sucintas e representações esquemáticas.

A secção 4 apresenta os resultados obtidos através da metodologia aplicada e do tratamento dos dados obtidos, disponibilizando sempre que necessário, representações gráficas.

A secção 5 apresenta as principais conclusões para melhor explicar as respostas obtidas na pesquisa. De forma sintetizada, é apresentado o fechamento do trabalho em resposta aos objetivos traçados na sua concepção. Ainda no capítulo 5, são apresentadas sugestões de trabalhos futuros, a partir de ramificações ao longo da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos

Denominam-se compósitos os materiais que possuem dois ou mais constituintes diferentes que estejam em proporções razoáveis (pelo menos 5 % em volume), devem possuir diferentes propriedades químicas e físicas (MATTHEWS e RAWLINGS, 1999). O material resultante deve ter propriedades ímpares, as quais não são atingidas individualmente, ou seja, os materiais devem agir em sinergia. Um exemplo típico é o compósito de fibra de vidro em resina polimérica. A fibra de vidro confere resistência mecânica enquanto a matriz polimérica, muitas vezes composta de resina poliéster, é responsável pela flexibilidade do compósito (PADILHA, 2007).

Os constituintes de reforços proporcionam resistência e rigidez, mas também aumentam a resistência ao calor, corrosão e condutividade. Para o reforço representar uma vantagem para o compósito este deve ser mais resistente e rígido que a matriz. Deste modo a boa interação entre matriz e reforço pode ser garantida pela criação de uma interface entre ambos que possa adequar a rigidez do reforço com a ductilidade da matriz (VENTURA, 2009).

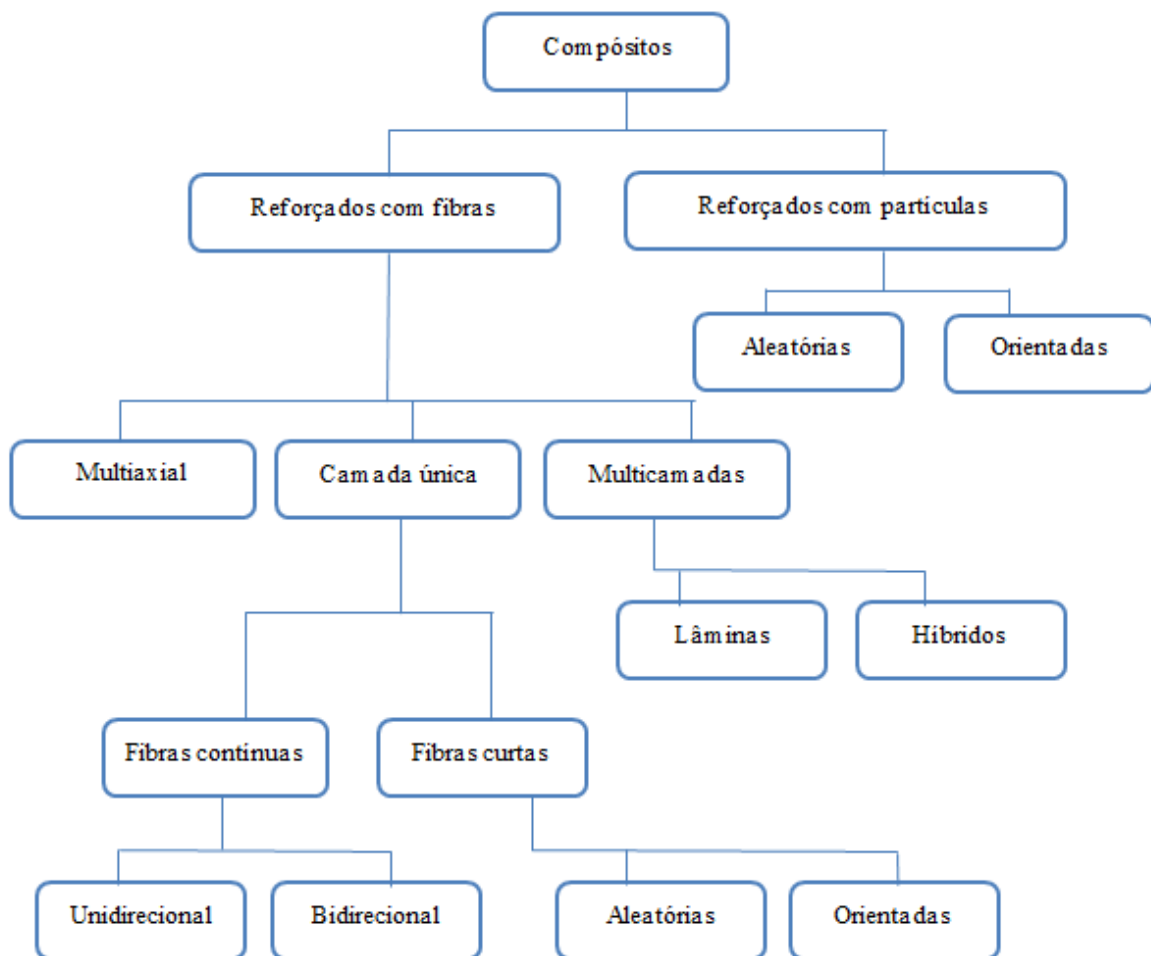
Devido a reduzidas dimensões da seção transversal, as fibras não são empregadas diretamente na fabricação de peças e componentes de engenharia. Para formar o compósito, há necessidade ainda da matriz. Assim nos compósitos esses elementos aparecem envoltos em um material homogêneo que mantém seu posicionamento relativo e serve como elemento de conformação básica, ou seja, define as dimensões e o formato da peça, tendo também a função de atuar como meio de distribuição das tensões entre os filamentos, bem como criar uma proteção contra ações externas e facilitar o manuseio. Esse material, comumente denominado matriz, tem como exemplos mais usuais os polímeros termofixos, sendo, entretanto utilizado também em aplicações mais específicas os cerâmicos e os metálicos, constituindo-se assim as matrizes cerâmicas e metálicas (MARINUCCI, 2011).

2.2 Classificação dos Compósitos

Os compósitos podem ser classificados de acordo com o tipo de matriz, tipo do reforço utilizado e com a geometria ou a forma dos reforços presentes. Materiais com características orgânicas podem ser conjugados com aqueles de natureza inorgânica. Componentes na forma

de fibras (longas ou curtas), partículas, podem ser incorporadas a matrizes dúcteis ou frágeis de maneira aleatória ou em laminados orientados, gerando compósitos com diferentes estruturas e propriedades (CALLISTER, 2012). A Figura 2.1 ilustra a classificação dos materiais compósitos.

Figura 2.1 – Classificação dos materiais compósitos



Fonte: LEVY NETO; PARDINI, 2006.

Os materiais compósitos também são convencionalmente classificados de acordo com a sua matriz em: cerâmicos, metálicos e poliméricos. Os materiais cerâmicos são inorgânicos e têm como características principais, elevada resistência ao calor e sua extrema fragilidade; os materiais metálicos apresentam como características gerais, ductilidade e excelentes condutividades térmicas e elétricas. A grande limitação do uso de metais em compósitos é a sua elevada densidade e custo do processo de fabricação. Os materiais poliméricos, por sua

vez destacam-se pela sua baixa densidade, fácil conformação e elevada resistividade elétrica (SANTOS, 2006).

Os compósitos de matriz polimérica podem ser termoplásticos ou termorrígidos. A principal diferença entre estes dois tipos está no comportamento característico quando aquecidos, isto é, os termoplásticos são polímeros capazes de serem moldadas várias vezes devido às suas características de se tornarem fluidos sob ação da temperatura e depois se solidificarem quando a temperatura diminui. Já os termorrígidos não tem o comportamento de fluidos devido à presença de ligações cruzadas entre as cadeias macromoleculares (SANTOS, 2006)

Na Tabela 1 estão as principais características de polímeros termoplásticos e termorrígidos.

Tabela 1 - Comparação das propriedades entre termoplásticos e termorrígidos

Termoplástico	Termorrígidos
Reciclável mecanicamente	Não reciclável mecanicamente
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidade durante o processamento
Baixa resistência à fluência	Alta resistência à fluência
Temperatura de uso limitada à Tg e Tm. Baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta resistência térmica e dimensional

Fonte: SANTOS, 2006.

A escolha da matriz depende da aplicabilidade do compósito e das propriedades desejadas. Industrialmente, as matrizes termoplásticas são mais viáveis, pelo número de peças que podem ser produzidas em curto espaço de tempo, com um número reduzido de mão de obra qualificada. Os polímeros termoplásticos, macromoléculas de cadeia linear ou ramificada, normalmente são fundidos durante o processamento e podem ser reciclados, pois fundem e retornam ao seu estado anterior sem degradação do material. Os termoplásticos, e por consequência os compósitos de termoplásticos, podem ser moldados por injeção, extrusão ou por outras técnicas de moldagem por aquecimento. As maiores restrições de peças de termoplásticos são as dimensões e o custo de equipamentos de processo, quanto maior a peça, maior susceptibilidade ao empenamento e mais caro o equipamento de processo (ALBINANTE *et al.*, 2013).

Os polímeros termorrígidos, macromoléculas de cadeia reticulada, são polimerizados durante o processamento, não podendo ser reciclados devido à decomposição térmica. Esses polímeros são comercializados principalmente para fabricação de compósitos, além de uso como adesivo e revestimento. O processamento desses compósitos pode ser realizado em moldes de simples confecção e a disposição dos constituintes pode ser feita à mão ou automaticamente. A cura ou endurecimento da resina pode ocorrer com ou sem auxílio de pressão, temperatura ou vácuo. As propriedades alcançadas por esses materiais consagraram o uso de compósitos. A produção desses materiais é limitada pelo tempo de produção. Ainda sim são muitos utilizados por apresentarem propriedades de resistência maiores (SANTOS, 2006).

Pode-se citar como exemplo de matrizes de termoplástico: polietileno, poliestireno e polipropileno; e de termorrígido epóxi, poliéster e poliuretano. Um dos aspectos importante na manufatura de compósitos consiste na obtenção de adequada adesão fibra e matriz. Fatores como a determinação do comprimento crítico de fibras para determinada matriz, fração volumétrica de fibra nos compósitos influenciam na estabilidade de uma adequada interação entre fibra e matriz. O desempenho de compósitos reforçados por fibras depende de três diferentes fatores (SANTOS, 2006):

- A resistência e módulo da fibra.
- Resistência e estabilidade química da resina.
- Efetiva interação entre a resina e fibra para a transferência de esforços na interface.

2.3 Matriz Poliéster

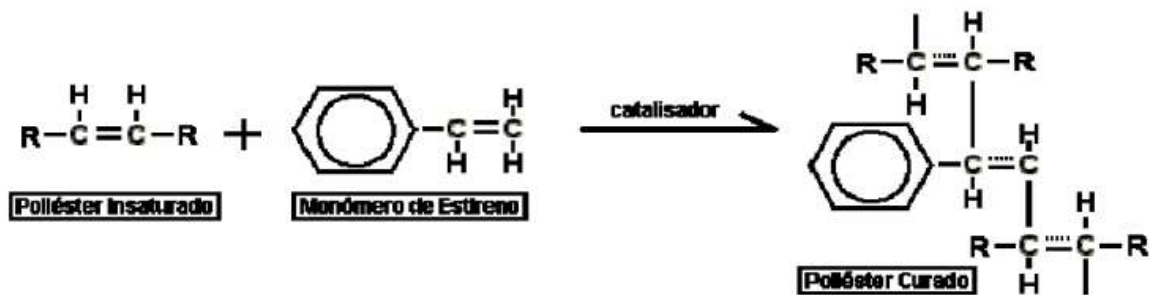
Quando se trabalha com compósitos, as resinas poliméricas, têm se tornado o principal material utilizado nas matrizes destes compósitos, elas são formadas por longas moléculas ou macromoléculas compostas por uma rede de entidades estruturais simples denominadas meros. Essas cadeias moleculares podem combinar-se entre si, com outras moléculas semelhantes, ou outros compostos (FERREIRA *et al.*, 2006).

As resinas de poliéster são uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos (anidrido maleico ou ftálico) e glicóis, que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. O tipo de ácido influencia as propriedades finais da resina e poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas podem ser produzidas. Se

um ou ambos constituintes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla reativa entre átomos de carbono, a resina resultante é insaturada (SILVA, 2010).

Os principais tipos de resinas de poliéster insaturado (UPR – Unsaturated Polyester Resin) são: resina Ortoftálica, Tereftálica, Isoftálica e Bisfenólica. Como a UPR é sólida à temperatura ambiente, normalmente usam-se monômeros apropriados, como por exemplo, o estireno, que é usado para diminuir a viscosidade e facilitar a processabilidade da resina, além de participar do processo de polimerização da resina (TARGA *et al.*, 2009). A Figura 2.2 apresenta a macromolécula de um poliéster curado.

Figura 2.2 - Macromolécula de um poliéster curado



Fonte: SILAEX, 2018.

2.4 Fibras

Existem algumas formas distintas de se classificar as fibras. A primeira distinção que se faz é entre fibras sintéticas e naturais. Em seguida, as fibras naturais são divididas em vegetais, animais e minerais. Por último, as fibras vegetais são separadas de acordo com a sua origem na planta, fibras de semente, de fruto, de caule, de folha, de talo e de cana.

2.4.1 Fibras Sintéticas

Várias fibras sintéticas foram desenvolvidas especificamente para substituir as fibras naturais, pois as primeiras têm comportamento mais previsível e são geralmente mais uniformes no tamanho, além de custarem menos que as equivalentes. As mais comuns são o nylon 6, o nylon 66, os poliésteres saturados, o polipropileno, as elastoméricas e as acrílicas.

Algumas fibras sintéticas ocupam um papel como fibras de reforço e as suas principais utilizadas são:

- **Fibras de vidro:** as mais importantes substâncias que podem obter o estado vítreo são sílica (SiO_2) e os silicatos, óxido bórico (B_2O_3) e os boratos, pentóxido de fósforo (P_2O_5) e os fosfatos (CHRÉTIEN, 1986);
- **Fibras de aramida:** são fibras de poliamidas aromáticas com, no mínimo, 85% das funções amidas atadas diretamente a dois anéis aromáticos, como o kevlar e FA arenka;
- **Fibras de boro:** sua fabricação é feita pela deposição em fase vapor do boro sobre um filamento de tungstênio a uma temperatura de 1500K e seus compósitos custam mais que os de fibra de carbono, porém apresentam propriedades mecânicas superiores (DAVIAUD e FILLIATRE, 1983);
- **Fibras carbônicas:** são fibras de elevada resistência à tração, porém é um material quebradiço com baixa deformação e
- **Grafíticas:** são fibras de alto módulo obtido a partir da grafitização da fibra de carbono em uma temperatura superior a 1800°C , onde se obtém uma estrutura cíclica quase perfeita que se aproxima da célula grafítica (teor de carbono superior a 99%, dependendo da temperatura de tratamento).

2.4.1.1 Fibra de Vidro

Existem muitos grupos de vidros, por exemplo, a sílica, o oxinitrito e o fosfato, porém a sílica é a mais importante para uso em compósitos (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994). As fibras de vidro curtas do tipo E (E-glass), obtidas a partir de uma mistura de óxidos de Si, Al, B, Ca e Mg (Borosilicato de alumina e cálcio), são normalmente usadas como reforços para termoplásticos devido ao seu baixo custo, comparados com a aramida e o carbono (WAMBUA *et al.*, 2003

A fibra de vidro é bastante difundida devido às suas boas propriedades mecânicas, porém uma de suas desvantagens é a irritação que causa na pele, quando as fibras contidas na matriz têm contato com a pele humana. Devido a isto, fibras minerais têm sido utilizadas como alternativas para estas como basalto de baixo custo, que possuem excelentes propriedades mecânicas, no lugar das fibras de vidro (SZABÓ e CZINGANY, 2003).

As fibras de vidro são facilmente produzidas por aquecimento do vidro e por moldagem por força gravitacionais a partir de um mandril de platina. O mandril contém aproximadamente 200 canais e então 200 fibras de diâmetro de 10 microns são feitas simultaneamente (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994).

Uma emulsão é geralmente aplicada nas fibras de vidro para melhorar a processabilidade e para reduzir danos durante o manuseio. Coberturas superficiais podem também ser aplicadas para melhorar a adesão entre matriz e a fibra (DE e WHITE, 1996). Estas emulsões contêm agentes de acoplamento que são os complexos organossilanos (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994).

O vidro é um ótimo agente de reforço porque tem uma alta resistência á tração (acima de $3,6 \text{ GN/m}^2$) e um alto modulo de Young (94 GN/m^2). A fibra tem boa estabilidade dimensional, não sofrem fluência e estas características são repassadas para os compósitos reforçados com estas fibras. Com o vidro é relativamente um material inerte, as fibras também são imunes aos ataques biológico

os e tem uma resistência aos ataques de solventes e produtos químicos. As fibras de vidro não são inflamáveis e tem boas propriedades elétricas (DE E WHITE, 1996).

2.4.2 Fibras Vegetais

As fibras vegetais são estruturas alongadas de secção transversal vazada e arredondadas, são distribuídas por o todo vegetal podendo ser classificadas de acordo com a origem anatômica como fibras de talo, fibras de folha, fibras de lenho e fibras de superfície.

As fibras de talo ocorrem no floema que fica na entrecasca do talo, por exemplo, as fibras de juta, rami, linho, algodão, e piaçava. As fibras de folha são extraídas das folhas dos vegetais, podemos citar as de sisal, curauá, abacaxi, banana e palma. As fibras de lenho são obtidas do lenho como no caso as fibras de bambu e as fibras de bagaço de cana. As fibras de superfície formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas, como as fibras de açaí, coco e as fibras de algodão. (FAGURY, 2005).

As principais vantagens das fibras vegetais em relação às fibras sintéticas tradicionais são: abundância, baixo custo, baixa densidade, boas propriedades específicas, facilidade de obtenção e manuseio, não-tóxicas, baixa abrasão de equipamentos e moldes, absorção de dióxido de carbono do meio-ambiente, biodegradabilidade, e o aspecto ecológico e renovável. Por outro lado, também possuem desvantagens que prejudicam a sua aplicação em muitas situações e ambientes, como por exemplo: alta absorção de umidade, alta variação de propriedades, baixa resistência a microorganismos e baixa estabilidade térmica. Apesar das propriedades mecânicas das fibras vegetais serem muito inferiores às de fibras sintéticas, sua densidade é aproximadamente metade da fibra de vidro, por exemplo. (SILVA, 2003).

Fibras de plantas, também chamadas de fibras técnicas, possuem comprimento longo, de até um metro, e diâmetro aproximado de 50-100 μm . Estas fibras são formadas por feixes de células mortas de planta, também conhecidas por fibras individuais, que possuem formato tubular, parede espessa e no centro uma cavidade, chamada de lúmen. Essas células, ou fibras individuais, têm comprimento aproximado de 1-50 mm e diâmetro aproximado de 10-50 μm .

Cada camada das células ou fibras individuais é formada basicamente por microfibrilas de celulose semicristalina, circundadas por uma matriz de hemicelulose e lignina. As microfibrilas têm diâmetro de cerca de 10-30 nm e são responsáveis por dar a resistência mecânica às fibras. A matriz de hemicelulose é ligada por pontes de hidrogênio com as microfibrilas de celulose formando uma rede tridimensional. Já a lignina, forma outra rede que se intercala tridimensionalmente com a rede de hemicelulose e microfibrilas, e ajuda na rigidez da parede da célula. (SILVA, 2003).

2.4.2.1 Fibra de Palha da Costa

A Palha da costa, também conhecida no Brasil como ráfia africana ou jupatí (do tupi Iupatí), é uma palmeira da família *Arecaceae*, da espécie *Raphia taedigera Mart.* (Figura 2.3), de caules múltiplos ou solitários e estipe com altura de até 15 m, encontrada na região norte do país mais frequentemente em áreas de várzea e igapós. De crescimento moderado, deve ser cultivada sob o sol, com sombra ou luz difusa, em solo fértil e drenável, irrigado regularmente (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Figura 2.3 – Palmeira Palha da costa



Fonte: SIMÕES, 2013.

No Pará, o local mais conhecido pelo uso dessa espécie é o município de São Sebastião da Boa Vista, na microrregião dos furos de Breves, e mesorregião do Marajó, em comunidades ribeirinhas como a de Nazaré, Chaves e Urucuzal (JARDIM, 2012). Assim como outras espécies de palmeiras, dela são aproveitadas o caule, as sementes e as fibras. Suas talas mais grossas são muito utilizadas em cestarias e diversos artefatos do dia-a-dia das populações ribeirinhas, como chapéus, coberturas de garrafas e o tradicional matapí utilizado na captura do camarão. Suas sementes vêm sendo utilizadas na produção das conhecidas biojóias, que ganham cada vez mais espaço no mercado. Na Figura 2.4 é apresentada a estrutura do matapí, produto feito a partir da matéria-prima jupatí.

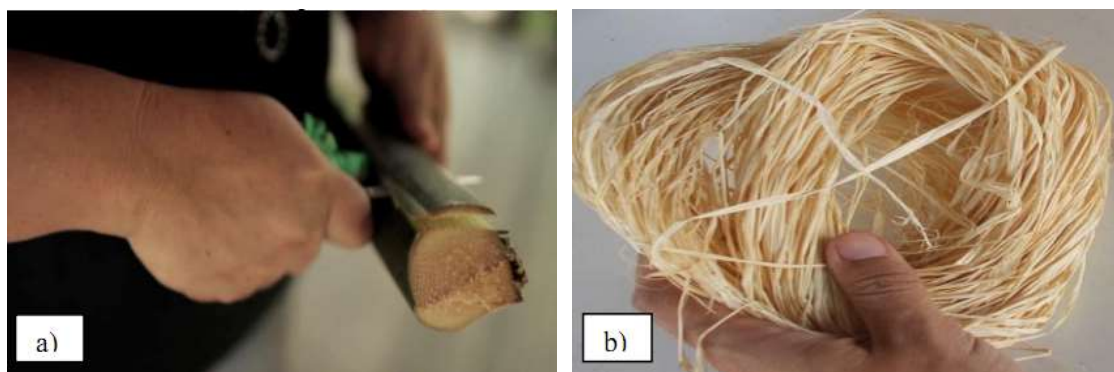
Figura 2.4 – Estrutura do matapí.



Fonte: CAMARGO *et al.*, 2009.

As fibras de palha da costa são extraídas da parte interna do pecíolo (Figura 2.5a), a medula, constituída por um tecido parenquimático que envolve as fibrilas. São compridas, no formato cilíndrico, macias, de coloração amarelo-brilhante (OLIVEIRA *et al.*, 2003), como vistas na Figura 2.5b.

Figura 2.5 – a) Pecíolo; b) Fibras de palha da costa.



Fonte: BARBOSA, 2013; SIMÕES, 2013.

2.5 Processos de Fabricação dos Compósitos

O desenvolvimento e a maneira com que os diferentes componentes dos compósitos são combinados estão intimamente relacionados com seus métodos e processos de fabricação. O processo de fabricação a ser utilizado na fabricação de um compósito depende do que se quer obter como produto final (formato da peça, dimensão, e acabamento) e a escala de produção necessária na fabricação. Kelly e Mileiko (1983) classificam os tipos de processos mais em uso nos plásticos reforçados em função do tipo de molde a ser utilizado: molde aberto ou fechado.

Processos em molde aberto utilizam, em geral, baixa tecnologia e baixa escala de produção. São eles:

- **Laminação manual (Hand Lay Up):** Feltros de fibras enrolados, mechas trancadas, mantas e outros tecidos de fibras são colocados sobre o molde e impregna-se com resina utilizando-se um pincel. Para melhorar o processo de impregnação, são usados rolos como objetivo de eliminar bolhas. O processo continua com a colocação das camadas até a obtenção da espessura (ou configuração) desejada para a peça. O moldado é curado sem calor nem pressão.
- **Laminação à pistola (Spray Up):** Fios cortados e resina são projetados simultaneamente em um molde preparado e um rolo é passado para melhorar o processo de impregnação (diminuindo a presença de bolhas) e antes que a resina endureça.
- **Centrifugação:** Misturas de fibras e resina são introduzidas em um molde rotatório e curadas "in situ".

- **Enrolamento (Filament Winding):** A modelagem é feita através de enrolamento das fibras contínuas (roving) sobre molde rotatório. Também podem ser utilizadas mantas ou tecidos intercalados as etapas de enrolamento do roving. Este processo é bastante utilizado na fabricação de peças cilíndricas e tubulações.

Os processos em molde fechado são caracterizados pela presença de molde e contramolde, bem como pelo uso de alta tecnologia e produção em média e alta escala. São eles:

- **Moldagem por compressão:** Processo utilizando o pré-impregnado (preg-preg - SMC, BMC, HMC, etc.), ou seja, semi produtos acabados, onde as fibras já se encontram previamente impregnadas pela resina ao serem colocadas no molde aquecido.

- **Injeção:** Processo utilizado para alta produção e na confecção de peças de formas variadas. A injeção da resina é feita por pressão em um molde fechado contendo em seu interior um reforço pré-formado. Os processos mais conhecidos são: RTM (Resin Transfer Molding), RIM (Resin Injection Molding) e R-RIM (Reinforced RIM).

- **Pultrusão:** Neste processo fibras impregnadas com resinas são tracionadas através de moldes aquecidos, produzindo assim a polimerização da resina. É o processo utilizado na obtenção de perfis.

2.5.1 Processo Hand Lay-up

O processo hand lay-up inicia com a deposição de um agente desmoldante sobre o molde. Além de facilitar a separação da peça na etapa de desmoldagem, este produto evita a aderência da peça no molde, contribuindo para um melhor acabamento da superfície do laminado. Os tipos principais são ceras e filmes (ABMACO, 2008) e segundo Abmaco (2009) a sua aplicação deve ser feita sobre molde limpo e seco.

A seguir, opcionalmente, pode ser feita a aplicação do gelcoat (ABMACO, 2009). Marinucci (2011) explica que este material é, na verdade, uma resina com características especiais. A depender da composição, pode conferir ao laminado proteção contra intempéries, raios ultravioletas e ação da água. Também pode proporcionar acabamento liso, colorido e brilhante na superfície da peça.

A seguir, são colocadas sucessivas camadas de reforço devidamente impregnadas pela matriz (MARINUCCI, 2011). Carvalho (1992) comenta que tanto os reforços – mantas e tecidos – quanto a resina são colocados manualmente sobre o molde, com rolos de pintor ou pincéis. Após a adição do iniciador, a resina permanece líquida durante algum tempo antes da

etapa de vitrificação. As fibras de vidro são assentadas no molde e as bolhas de ar são removidas com roletes compactadores, enquanto a resina ainda está neste estado.

Abmaco (2009) também afirma que a desmoldagem deve ser feita após a resina entrar em estágio avançado de cura. Após este procedimento, é feita a rebarbagem da peça e a limpeza do molde. E, antes de utilizar o molde novamente, deve haver uma inspeção criteriosa para detectar possível ocorrência de trincas e defeitos.

As vantagens deste processo são o baixo investimento em ferramentas, a não limitação dimensional (ABMACO, 2008), a simplicidade e custo dos moldes, o vasto leque de formas (ABMACO, 2008) e a possibilidade de laminação no campo de trabalho (MARINUCCI, 2011).

Quanto às desvantagens, é um processo pouco reprodutível (ABMACO, 2008), poluidor e insalubre (NASSEH, 2011), cuja qualidade do compósito depende da habilidade do laminador (MARINUCCI, 2011). Além disso, apresenta acabamento rugoso no lado interno (ABMACO, 2009) e seu teor de fibras fica entre 20 e 30 % (NASSEH, 2011).

2.6 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos possuem como principal objetivo verificar a complexibilidade entre reforço e matriz, de acordo com Humphreys e Goodhew (1988), as propriedades mecânicas de maior interesse são: resistência à tração, impacto, fadiga e abrasão, módulo de elasticidade, dureza e tenacidade à fratura além de compressão.

Em relação à integridade, são considerados ensaios destrutivos, já que, provocam inutilização parcial ou total da peça.

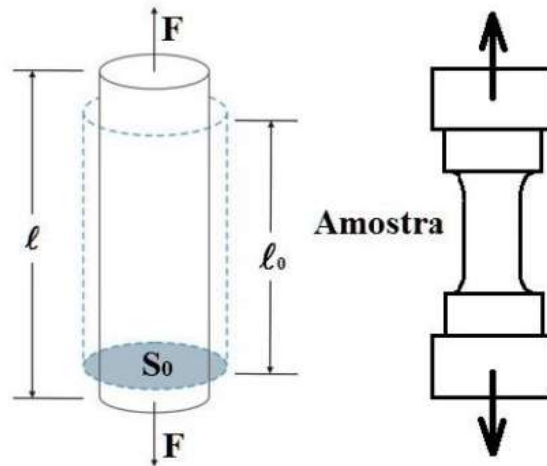
2.6.1 Ensaio de Tração

O desempenho dos compósitos em relação às propriedades mecânicas depende intimamente de dois constituintes básicos: o reforço (relacionado com o tamanho, quantidade, forma e distribuição) e matriz (CALLISTER, 2012).

Os materiais de engenharia dependem essencialmente das avaliações das propriedades mecânicas. Um dos testes mais utilizados é o teste de tração, que determina a resistência e a deformação a ser esperada após a aplicação de uma determinada carga. Que aplicada produz certa deformação até ocorrer o rompimento ou a falha do material. Em que o resultado é

expresso por uma curva construída pela carga aplicada versus a deformação sofrida pelo material, obtida imediatamente após o ensaio. Conforme ilustra a Figura 2.6.

Figura 2.6- Resistência a tração em materiais.



A Equação 1 expressa a relação de tensão exercida pelo material representada por σ conforme equação.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

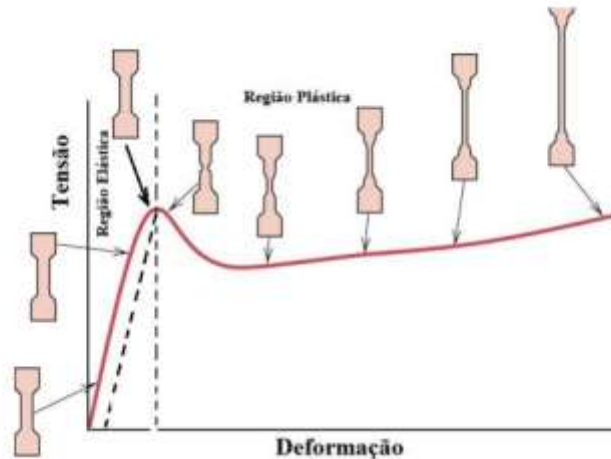
Em que F é a carga aplicada à amostra e A é a área da seção original (sem carregamento). A deformação, ε é definida na Equação 2.

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

onde l é o comprimento longitudinal em um determinado carregamento e l_0 é o comprimento original (sem carga). Curva tensão deformação (Figura 2.7) é dividida em duas regiões distintas: deformação elástica e plástica. A deformação elástica é a temporária, ou seja, é totalmente restituída uma vez que a carga é retirada. A região elástica é a porção linear inicial do gráfico. A deformação plástica é a deformação permanente, não sendo totalmente recuperada quando a carga é removida. A região plástica não é linear e é gerada ao exceder o limite da deformação elástica. A definição de um ponto preciso em que o material deixa de ter um comportamento elástico e começa a ter um comportamento plástico é imprecisa. Para determinar esse valor, o que se faz é traçar uma reta paralela à região elástica, deslocada de

0,2 % no eixo de deformação. Assim, analisa-se graficamente o ponto em que essa curva cruza a curva tensão e nesse ponto define-se o limite de escoamento.

Figura 2.7 – Curva tensão deformação.



Fonte: CALLISTER, 2012.

A inclinação da curva tensão-deformação na região elástica é o módulo de elasticidade, E também conhecida com Módulo de Young. A linearidade desta curva é uma aplicação da lei de Hooke, conforme visto na (Equação 3).

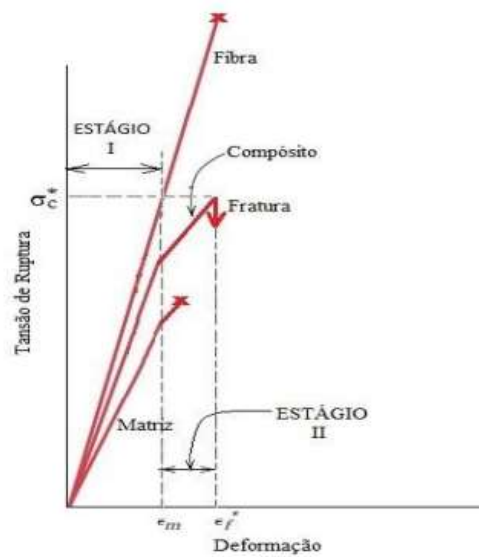
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

onde o módulo de Young é uma informação muito valiosa. Ele representa a rigidez de um material, ou seja, sua resistência a deformação elástica. Com o uso de materiais compósitos reforçados com fibras formados por estes materiais (fibra e matriz) deverá exibir resposta tensão deformação uniaxial representado na Figura 2.7, onde se observa que na região inicial do estágio I, fibra e matriz deformam-se elasticamente, nota-se que essa parte da curva é linear. Para um compósito onde fibras são consideradas mais resistentes e a faze matriz admitindo-se com uma pequena diferença quanto à deformação. A matriz escoam e deforma-se plasticamente, enquanto a fibra continua a se alongar elasticamente, tendo em vista que o limite à tração da fibra é consideravelmente maior do que o limite de escoamento da matriz. Sendo esse o estágio II, próximo à linearidade, mas com uma inclinação reduzida em comparação ao estágio I. Além do que, ao passa do estágio I para o estágio II, aumenta a proporção da carga aplicada suportada pelas fibras.

Somente após a fratura da fibra ocorre a falha do compósito, correspondente a deformação de aproximadamente ε_f podendo ser observado na Figura 2.8. A falha do

compósito não ocorre abruptamente, pois nem todas as fibras rompem-se ao mesmo tempo pois sempre haverá uma variação significativa na resistência dos materiais fibrosos considerados frágeis. Além disso, a matriz ainda preservada, em vista que, $\epsilon_f < \epsilon_m$. Outro fator a ser considerado, é que as fibras curtas que são fraturadas das originais estão envolvidas pela matriz, que conseqüentemente são capazes de suportar uma carga reduzida enquanto ocorre a deformação da matriz (CALLISTER, 2012).

FIGURA 2.8 – Comportamento tensão deformação de compósitos formados por (matriz termofixa).



Fonte: CALLISTER, 2012.

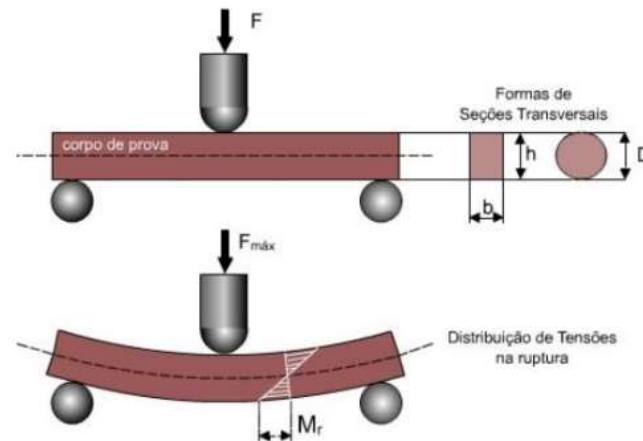
2.6.2 Ensaio de Flexão

O teste de flexão segundo ASTM D790, mede a força requerida para dobrar um material sob a carga de três pontos (Figura 2.9). O dado é usado frequentemente para selecionar quais partes do material irão suportar peso sem flexionar. O módulo de flexão é usado como indicador da rigidez do material quando flexionado.

As principais propriedades obtidas em um ensaio de flexão são: módulo de ruptura na flexão, módulo de elasticidade, módulo de resiliência e módulo de tenacidade.

Existem várias dimensões para o corpo de prova de ensaio de flexão, contudo as mais utilizadas são: 3,2mm x 12,7mm x 125 mm (ASTM) e 10 mm x 4mm x 80mm (Internacional Organization for Standardization - ISO).

Figura 2.9 - Teste de flexão de três pontos.



A tensão de ruptura à flexão pode ser calculada através da Equação (4).

$$\text{TRF} = \frac{3PL}{2bh^2} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

Onde, TRF é a tensão de ruptura à flexão (MPa), P é a carga no instante da ruptura (N), L é a distância entre os apoios do corpo de prova (mm), b é a largura do corpo de prova (mm) e h é a altura do corpo de prova (mm).

2.7 Morfologia e distribuição das fibras na matriz

A distribuição e o comprimento de fibras na matriz é um parâmetro muito importante a ser determinado, pois o comprimento das fibras pode alterar significativamente o desempenho mecânico, bem como outras propriedades do compósito (CALLISTER, 2012). Nos compósitos com fibras descontínuas, o carregamento na fibra é função de seu comprimento, sendo que seus extremos são pontos concentradores de tensão, que induzem tensões cisalhantes na interface. Além disso, alguns dos possíveis danos nos compósitos estão associados à falha da ligação entre fibra e matriz e quebra da fibra. Então para avaliar esses parâmetros a microscopia eletrônica de varredura é a mais adequada.

O princípio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Por um sistema de bobinas de

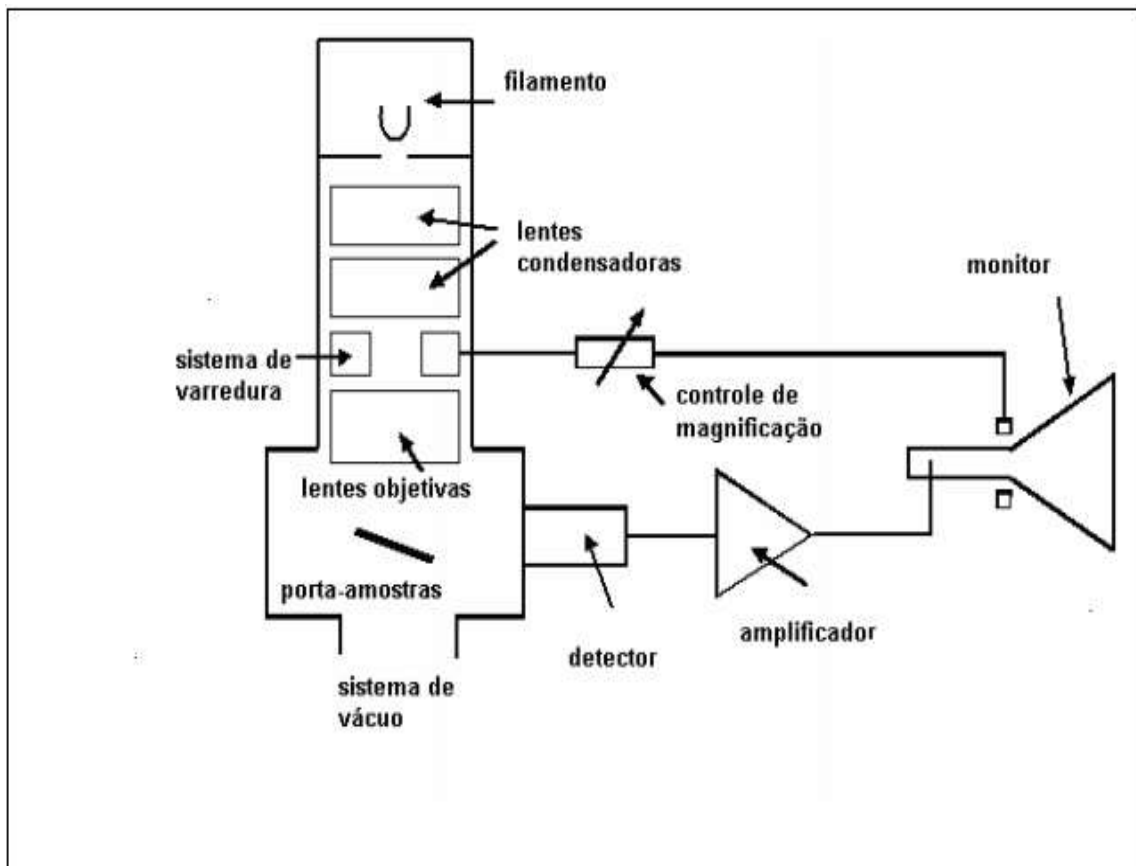
deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal recolhido pelo detector é utilizado para modular o brilho do monitor, permitindo a observação. A maioria dos instrumentos usa como fonte de elétrons um filamento de tungstênio (W) aquecido, operando numa faixa de tensões de aceleração de 1 a 50 kV. O feixe é acelerado pela alta tensão criada entre o filamento e o ânodo. Ele é, em seguida, focalizado sobre a amostra por uma série de três lentes eletromagnéticas com um spot menor que 4 nm. O feixe interagindo com a amostra produz elétrons e fótons que podem ser coletadas por detectores adequados e convertidas em um sinal de vídeo.

O MEV convencional apresenta uma coluna óptico-eletrônica adaptada a uma câmara com porta amostra aterrado, sistema eletrônico, detectores e sistema de vácuo (DEDAVID *et al*, 2007).

A técnica de MEV é usada para avaliar a adesão entre fibra e matriz da superfície fraturada dos compósitos.

A Figura 2.10 apresenta o desenho esquemático dos componentes básicos do MEV.

Figura 2.10 - Desenho esquemático dos componentes básicos do MEV.



Fonte: Adaptado de KESTENBACH, 1994.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

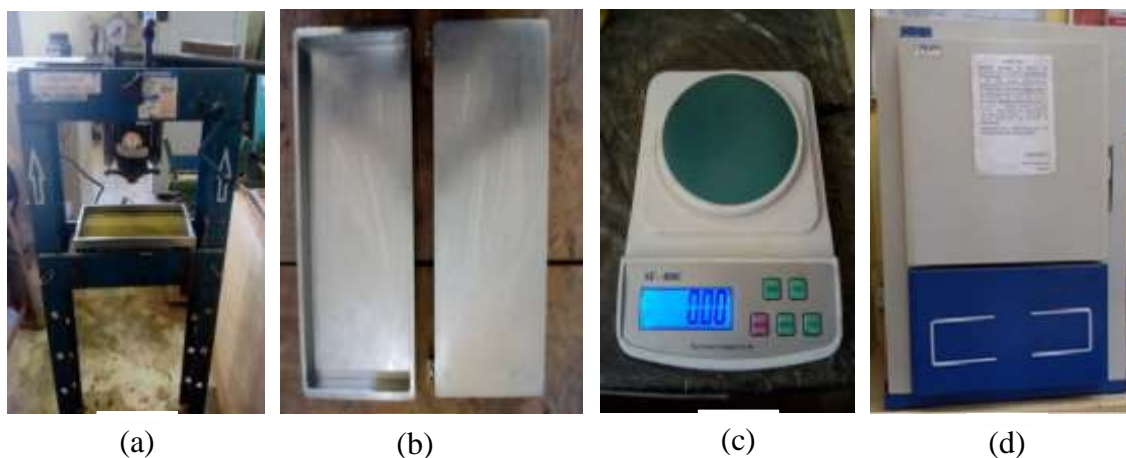
3.1 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados neste trabalho que estão descrito a seguir, foram disponibilizados pela Usina de Materiais (USIMAT) do Laboratório de Engenharia Química.

- **PRENSA HIDRÁULICA**, MARCON, modelo MPH-15, com capacidade de 15 ton;
- **ESTUFA**, DE LEO – Equipamentos Laboratoriais, T 50 °C a 250 ° C;
- **BALANÇA ANALÍTICA**, ELETRONIC COMPACT SCALE, modelo SF 400 C;
- **MOLDE METÁLICO**, Dimensões (320 mm x 172,5 mm x 5 mm);
- **MAQUINA DE CORTE**, EINHELL, modelo BT-TC-9005.

A Figura 3.1 ilustra os principais equipamentos utilizados para a fabricação dos compósitos.

Figura 3.1 – Equipamentos: a) prensa hidráulica; b) molde metálico; c) Balança analítica e d) Estufa.



Fonte: Autoria Própria, 2018.

3.2 Materiais

3.2.1 Matriz polimérica

Para fabricação do compósito utilizou-se para matriz o poliéster isofitálico. A resina utilizada foi a AM 910 AEROJET®, Figura 3.2 (a) possui propriedade de média reatividade, amarelada, não acelerada (ausência de promotor de reticulação), baixa viscosidade, boa resistência química.

Foi utilizado neste trabalho como catalisador o produto comercial BUTANOX M-50 (Peróxido de metil etil cetona [MEK-P]). O acelerador de Cobalto utilizado na fabricação dos compósitos foi o produto comercial denominado CAT MET UMEDECIDO (Solução de Octoato de cobalto 1,5 %), todos os produtos comerciais, resina isoftálica, MEK- P, e CAT MET UMEDECIDO foram adquiridos da empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA.

Figura 3.2 - Resina de poliéster insaturado (a), iniciador peróxido de etil-metil cetona (MEK-P) (b) e acelerador de cobalto (c).



Fonte: Autorial Própria, 2018.

3.2.2 Fibras de Vidro

Foram utilizados tecidos de fibras de vidro disponíveis no mercado local de Belém, sem prévio tratamento químico superficial, com a finalidade de não aumentar o custo do compósito fabricado. Para a fabricação dos compósitos, o tecido foi desmanchado em fios para serem posteriormente cortados (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Fibra de Vidro na forma de tecido.



Fonte: Autorial Própria, 2018.

3.2.3 Fibras de Palha da Costa

Adquiridas também no comércio de Belém (Figura 3.4), as fibras de palha da costa (*Raphia taedigera Mart.*) não passaram por nenhum tratamento superficial, foram acondicionadas em recipientes de plástico e posteriormente desmanchadas em formas de fios para o corte no tamanho necessário para o projeto.

Figura 3.4 - Fibra de Palha da Costa.



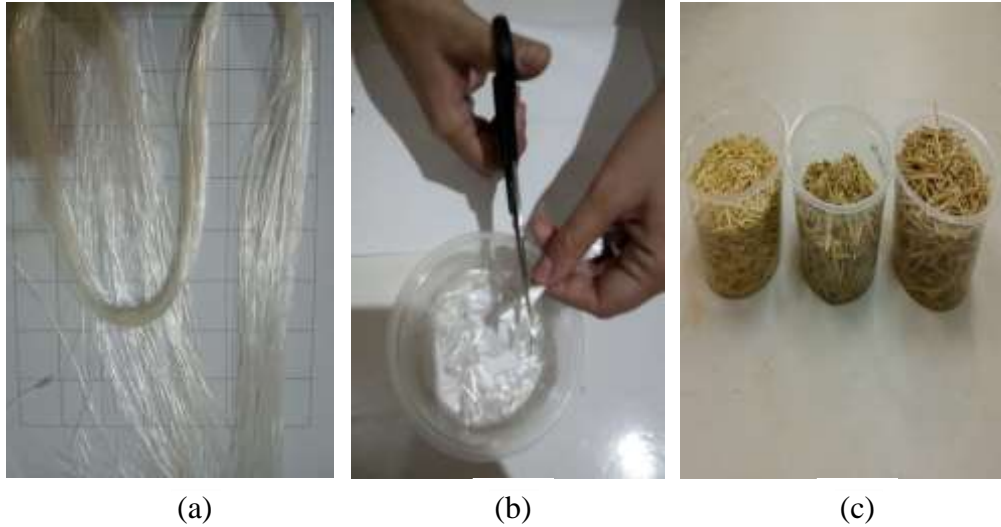
Fonte: Autorial Própria, 2018.

3.3 Procedimentos Experimentais

3.3.1 Cortes das fibras

As fibras de vidro e palha da costa, depois de desmanchadas foram cortadas em tamanho de 15, 30 e 45 mm. O procedimento de corte foi: juntar-se um feixe de fibras e coloca-las sobre uma tira de papel no tamanho desejado e corta-las. A Figura 3.5 mostra o processo de corte das fibras.

Figura 3.5 – (a) Fios de fibra de vidro desmanchados, (b) Corte da fibra de vidro (c) Fibra de palha da costa cortada e acondicionada.



Fonte: Autoria Própria, 2018.

3.3.2 Produção dos Compósitos

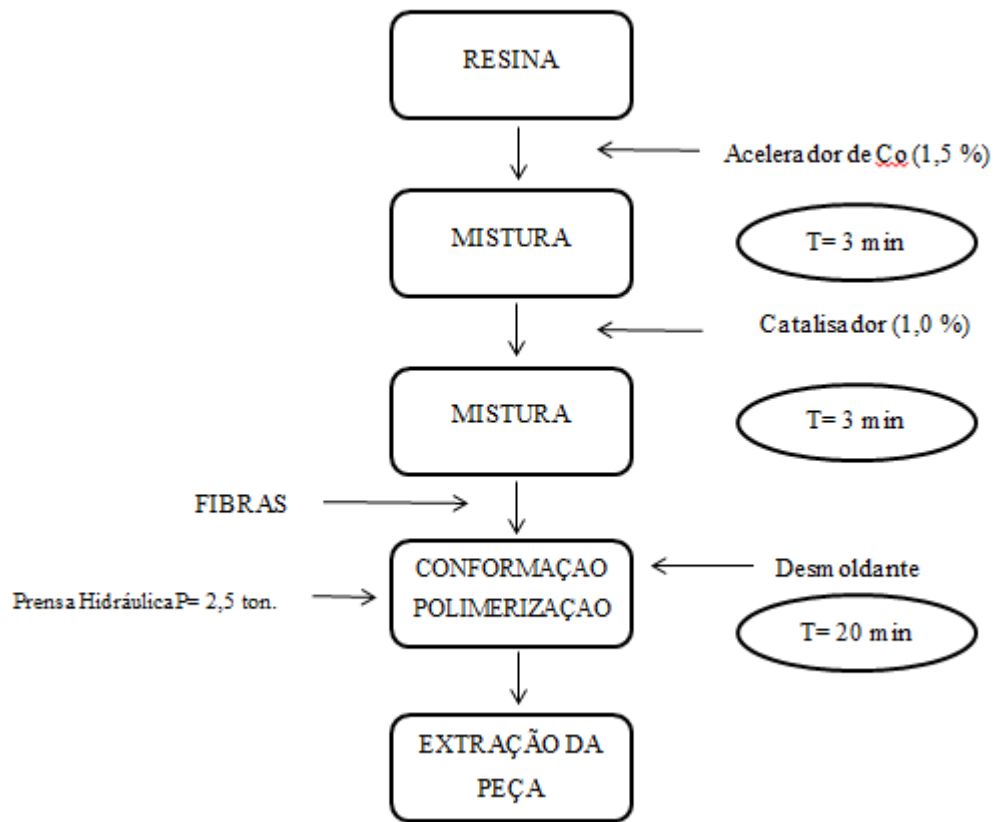
Para a confecção de compósitos de matriz polimérica plena, matriz polimérica com reforço de fibras de vidro e reforço de fibra palha da costa nos comprimentos de 15, 30 e 45 mm, foi utilizada um molde metálico na forma de placa retangular com dimensões: 30 cm x 17 cm x 5 cm. O método aplicado foi o método conhecido como *hand lay-up*.

As placas de compósitos foram produzidas no molde e em seguida prensadas em prensa hidráulica com carga de 2,5 toneladas durante 20 minutos.

3.3.2.1 Etapas da Produção dos compósitos

Para melhor compreensão do processo a Figura 3.6 apresenta um fluxograma para a fabricação dos compósitos.

Figura 3.6- Fluxograma do processo de fabricação dos compósitos.



Fonte: Autoria Própria, 2018.

Primeiramente foram feitos cálculos para se conhecer a massa e o volume da resina poliéster isoftálica, assim como a quantidade de material necessário para a fabricação das placas compósito respectivamente. Esses valores foram tabelados como mostra as Tabelas 2 e 3 a seguir:

Tabela 2 – Valores para confecção de placas de matriz plena.

%	Resina (g)	Co (1,5%) ml	MEK (1%) ml
100	317,14	4,14	2,76

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Tabela 3 – Valores para confecção de placas utilizando fibras.

%	Resina	Fibra	Co (ml)	MEK (ml)
2,5	302,23	7,7625	4,03	2,69
5	295,97	15,525	3,93	2,62

Fonte: Autoria Própria, 2018.

As frações mássicas foram definidas com base na capacidade do molde, em que foram testadas diferentes frações mássicas de fibras e assim determinada a capacidade máxima para a fabricação com boas propriedades.

Com os valores da Tabela 2 e 3 utilizou-se uma balança analítica para determinação de massas e volumes da resina e fibras necessárias para produção de cada placa de compósito de acordo com sua porcentagem. Posteriormente as fibras foram pesadas e levadas para a estufa a uma temperatura de 105° C por 20 minutos, para se retirar a umidade.

Na sequência iniciaram-se a produção das placas, onde primeiro se produziu placas plenas, ou seja, sem fibras, em seguida foram confeccionadas as placas de resina poliéster isoftálica com inserção de fibras de vidro e posteriormente de palha da costa nos comprimentos de 15, 30 e 45 mm, com as seguintes proporções de fibras: 2,5 e 5 %. As fibras foram dispostas aleatoriamente dentro da matriz polimérica. A Figura 3.6 ilustra a sequência de produção dos compósitos.

Com todas as placas produzidas, foram realizados os cortes dessas placas no Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da UFPA, os tamanhos dos corpos de prova seguiram as normas ASTM D3039 para serem realizados os ensaios de tração e ASTM D790 para os ensaios de flexão. A Figura 3.7 mostra a máquina de corte utilizada no trabalho.

Figura 3.7 – Máquina de corte de bancada.



Fonte: Autoria Própria, 2018.

3.3.3 Propriedades Físicas

Após a cura dos compósitos foram realizados ensaios para se determinar as propriedades do produto acabado. As propriedades determinadas foram:

- a) Porosidade Aparente (PA (%));
- b) Absorção de Água (AA (%));
- c) Massa Específica Aparente (MEA (g/cm^3)).

A metodologia adotada para se medir tais propriedades, foi de acordo com a NBR 12766, e seguindo a metodologia adotada por SANTOS (1989).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de análise de materiais do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade federal do Pará. Para a realização dos testes de massa específica aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA) e absorção de água (AA) foram preparadas sete amostras de cada composição das placas retangulares e os testes foram obtidos após a obtenção dos valores de massa seca, massa úmida e massa imersa. Foram fabricados 7 corpos de prova para cada composição, totalizando 91 corpos de prova. As amostras foram deixadas imersas em um recipiente com água por um período de 24 horas, e pesadas para a coleta dos valores de massa úmida e massa imersa. A massa seca foi obtida após as amostra serem secas em estufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas.

A Figura 3.8 ilustra o equipamento utilizado para a pesagem dos corpos de prova e os corpos de prova para os ensaios físicos.

Figura 3.8- (a) Corpos de prova para os ensaios físicos, (b) aparato para pesagem dos corpos de prova.



(a) Fonte: Autoria Própria, 2018.

(b)

Porosidade Aparente

A medida da porosidade aparente foi determinada pela Equação 5:

$$PA (\%) = \frac{(M_u - M_s)}{(M_u - M_i)} \times 100 \quad (5)$$

Onde M_u é a massa úmida em g, M_s é a massa seca em g, M_i em g.

Absorção de Água

A medida de absorção de água foi medida através da seguinte Equação 6.

$$AA (\%) = \frac{(M_u - M_s)}{(M_s)} \times 100 \quad (6)$$

Massa Específica Aparente

A massa específica aparente foi calculada através da Equação 7.

$$MEA \text{ g/cm}^3 = \frac{M_s - \rho L}{M_u - M_i} \quad (7)$$

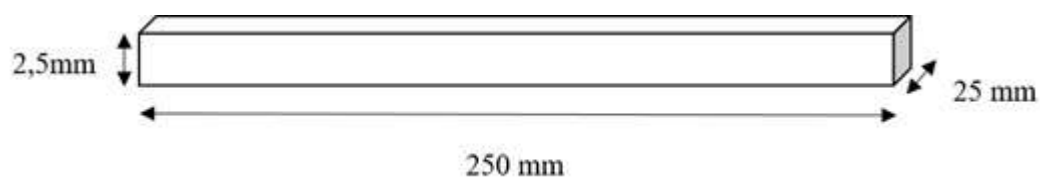
Onde M_i é a massa imersa em g, M_s é a massa seca em g, M_u é massa úmida em g e ρL é a massa específica da água em g/cm^3 .

3.3.4 Propriedades Mecânicas dos Compósitos

3.3.4.1 Ensaio de Tração

Os compósitos reforçados com fibras e matriz plena foram caracterizados mecanicamente por meio de ensaio de tração uniaxial, realizado segundo a norma ASTM D 3039. Os corpos de prova (CP's) para esse ensaio foram fabricados nas dimensões apresentadas na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Dimensões do CP de tração.



Fonte: Adaptado de ASTM D 3039, 2006.

Os corpos de prova foram cortados, a partir dos laminados, em uma bancada adaptada com um disco de corte diamantado. Na Figura 3.10 são mostrados os CP's para a realização do ensaio de tração. Foram confeccionados 7 corpos de prova de tração para cada composição, totalizando 91 corpos de prova.

Figura 3.10 – CP's para ensaio de tração.



Fonte: Aatoria Própria, 2018.

Os ensaios de tração foram realizados em máquina universal fabricada pela KRATOS, modelo KE 2000 MP com carga máxima de 5 kN, a uma velocidade de ensaio de 2 mm/min, foram realizados no laboratório de Ensaios Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Pará, Campus Belém. A máquina utilizada na realização dos ensaios é ilustrada na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Máquina de ensaio de tração.

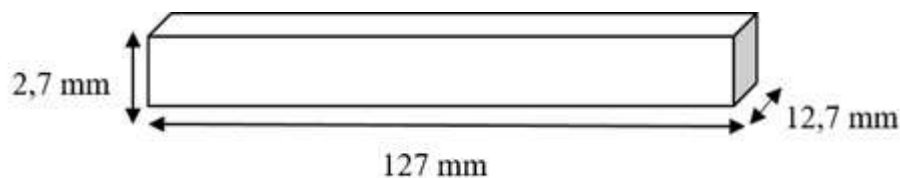


Fonte: Autoria Própria, 2018.

3.3.4.2 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão foi realizado em uma máquina da marca AROTEC, modelo WDW 100e com célula de carga de 5 kN. A velocidade de deslocamento do cabeçote no ensaio foi configurada em 2 mm/min. O ensaio foi realizado no Instituto Federal do Pará (IFPA), no laboratório de resistência dos materiais seguindo a norma ASTM D790. Foram fabricados 7 corpos de prova para cada composição, totalizando 91 corpos de prova. Os corpos de prova (CP's) para esse ensaio de flexão foram fabricados nas dimensões apresentadas na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Dimensões do CP de flexão.



Fonte: Adaptado de ASTM D790, 1998.

Na Figura 3.13 são mostrados os CP's para a realização do ensaio de flexão.

Figura 3.13 – CP's para ensaio de flexão.



Fonte: Aatoria Própria, 2018.

A máquina utilizada na realização dos ensaios de flexão é ilustrada na Figura 3.14

Figura 3.14 – Máquina universal para ensaio de flexão.



Fonte: Aatoria Própria, 2018.

3.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises de microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará no equipamento de bancada da marca HITACHI (modelo TM 3000).

Foram coletadas amostras da região de fratura dos corpos de prova dos ensaios de tração (Figura 3.15) e as imagens foram capturadas por elétrons secundários de um filamento de tungstênio de 5 kV.

Figura 3.15 – Amostra para análise no MEV.



Fonte: Autorial Própria, 2018.

O equipamento para Microscopia Eletrônica de Varredura está ilustrado na Figura 3.16.

Figura 3.16 - Equipamento para MEV de bancada marca HITACHI (modelo TM 3000).



Fonte: Autorial Própria, 2018.

4 RESULTADOS E DISCURSÕES

4.1 Caracterização Física

A Tabela 4 demonstra os resultados de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente, obtidos para o compósito com inserção de fibra de vidro:

Tabela 4 – Resultados dos ensaios físicos para compósitos com fibra de vidro.

Tipo de Amostra	Proporção de Fibra	Absorção de Água (%)	Porosidade Aparente (%)	Massa Específica Aparente (g/cm³)
Matriz Plena	0 %	0,41 (±0,311)	0,41 (±0,206)	0,99 (±0,005)
Fibra de Vidro de 15 mm	2,5 %	0,69 (±0,476)	0,84 (±0,571)	0,89 (±0,027)
	5 %	0,38 (±0,850)	0,48 (±0,159)	1,00 (±0,032)
Fibra de Vidro de 30 mm	2,5 %	0,64 (±0,688)	0,80 (±0,851)	0,92 (±0,041)
	5 %	0,68 (±0,336)	0,84 (±0,412)	0,91 (±0,046)
Fibra de Vidro de 45 mm	2,5 %	0,75 (±0,476)	0,97 (±0,623)	0,99 (±0,025)
	5 %	0,63 (±0,563)	0,75 (±0,685)	0,93 (±0,679)

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Observar-se na Tabela 4, ocorreu um aumento na absorção de água com o aumento da porosidade do material de acordo com o incremento proporcional de fibras. Tal efeito pode ser explicado pelo método de fabricação manual utilizado para a fabricação do material compósito, cuja probabilidade de surgimento de falhas tais como vazios, trincas, poros e bolhas são acentuadas.

Os materiais lignocelulósicos possuem a tendência de absorver umidade, pois estes são constituídos principalmente por celulose, lignina e hemicelulose (DAS, 2008). O que pode ser verificado na Tabela 4. As hemiceluloses são consideradas como as principais responsáveis pela absorção de água, embora celulose não cristalina e lignina também desempenham papel importante neste processo. A umidade intumescer a parede celular da fibra lignocelulósica, até

sua saturação com água. Então, a água passa a ocupar os espaços livres entre os feixes de fibras e mudam as dimensões (DAS, 2008).

A Tabela 5 demonstra os resultados de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente, obtidos para o compósito com inserção de palha da costa.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios físicos para os compósitos com fibras de palha da costa.

Tipo de amostra	Proporção de Fibra	Absorção de Água (%)	Porosidade Aparente (%)	Massa Específica Aparente (g/cm³)
Matriz Plena	0 %	0,41 (±0,311)	0,41 (±0,206)	0,99 (±0,005)
Palha da costa de 15 mm	2,5 %	1,05 (±0,390)	1,25 (±0,450)	0,91 (±0,074)
	5 %	0,57 (±0,173)	0,70 (±0,223)	0,93 (±0,013)
Palha da costa de 30 mm	2,5 %	0,68 (±0,215)	0,86 (±0,296)	0,97 (±0,016)
	5 %	0,48 (±0,135)	0,59 (±0,170)	0,93 (±0,276)
Palha da costa de 45 mm	2,5 %	0,51 (±0,349)	0,64 (±0,424)	0,95 (±0,201)
	5 %	0,83 (±0,548)	1,00 (±0,654)	0,92 (±0,011)

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Analisar a absorção de água nos compósitos com reforço de fibras vegetal é um fator complexo, pois envolve diferentes variáveis a serem analisadas como, por exemplo, densidade da fibra e do compósito e características das fibras, tais como tamanho, teor, composição química e influência de tratamentos químicos nas fibras vegetais.

Conforme a Tabela 5 foi verificada que a resina plena apresentou os valores de PA e AA, inferior aos resultados encontrados para os compósitos utilizando fibra de palha da costa, nota-se que ocorre um aumento da absorção de água com o aumento do teor de fibra na matriz, ratificando que a absorção esta diretamente ligada ao teor de fibra. A água é capaz de percolar a fibra e a matriz em velocidades diferentes; pode também interferir na interface fibra/matriz (onde pode provocar um descolamento da mesma) que tem como justificativa pelo alto grau hidrofílico presente em fibras vegetais, em comparação com a resina plena que tem caráter hidrofóbico. Com a inserção de fibras a massa específica aparente não apresentou aumento em relação à matriz plena.

4.2 Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica dos compósitos foi examinada através de ensaio de tração e flexão, onde foi possível determinar, propriedades como: resistência à tração, módulo de elasticidade, deformação e força máxima.

4.2.1 Ensaio de Resistência à Tração

4.2.1.1 Material Compósito com Reforço de Fibra de Vidro

Os compósitos poliméricos com reforço de fibra de vidro foram avaliados de acordo com sua resistência mecânica por meio do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração de compósitos com fibras de vidro.

Tipo de Amostra	Proporção de Fibra	Resist. Tração (MPa) Desvio Padrão	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Plena	0 %	8,65 (\pm 0,670)	4,17	0,55
Fibra de Vidro de 15 mm	2,5 %	8,61 (\pm 1,014)	4,03	0,36
	5 %	21,25 (\pm 1,897)	5,62	0,68
Fibra de Vidro de 30 mm	2,5 %	6,13 (\pm 0,896)	5,20	0,21
	5 %	12,71 (\pm 2,527)	6,54	0,33
Fibra de Vidro de 45 mm	2,5 %	12,88 (\pm 1,730)	5,05	0,42
	5 %	10,71 (\pm 0,446)	5,79	0,30

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Os resultados mostrados na Tabela 6 demonstram de maneira geral que houve um aumento na resistência mecânica de compósitos com fibra de vidro em relação à matriz plena, exceto com os comprimentos de 30 mm e 2,5 %, que obteve resultado inferior ao da matriz

plena, a fração de 5 % de fibra de vidro e 15 mm de comprimento na matriz polimérica possuiu o maior valor de resistência à tração.

A porosidade aparente esta relacionada à resistência do material, observa-se que a composição de 15 mm e fração mássica de 5 % de fibra de vidro apresentaram a menor porosidade aparente expondo a maior resistência à tração. Os valores percentuais das resistências à tração dos compósitos reforçados com fibra de vidro foram 145,66 % maior em relação à resistência da resina plena.

O módulo de elasticidade indica a rigidez do material, observou-se que as fibras diminuíram a rigidez do material resultante em relação ao da resina plena. Os compósitos com fibra de vidro obtiveram módulos inferiores em relação à matriz. As fibras de vidro atuaram como reforço nos compósitos, aumentando à resistência a tração.

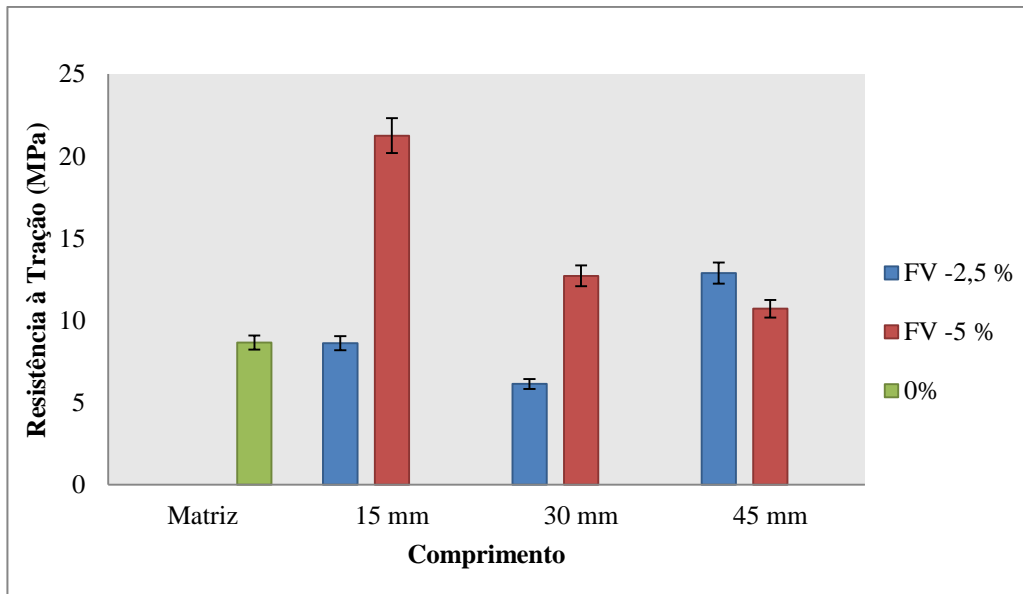
Os compósitos de fibra de vidro obtiveram valores de resistência similares ao comparados com outros pesquisadores (CARVALHO e CAVALCANTI, 2006).

RAGHAVENDRA *et al.*, (1998) produziram por laminação manual seguida de leve compressão compósitos de matriz epóxi reforçados com tecido em estilo plano de juta e comparou as propriedades mecânicas obtidas em tração e flexão com compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro produzidos nas mesmas condições. Os ensaios em tração mostraram que os compósitos reforçados com tecido de juta alcançaram desempenho 130 % superior ao limite de resistência à tração da matriz epóxi; já os compósitos reforçados com tecido de fibras de vidro foram 410 % superiores à matriz. Quando comparado aos compósitos com vidro, os corpos de prova com reforço de juta obtiveram resistência à tração 45 % inferior.

Os resultados encontrados para a matriz polimérica plena e compósitos reforçados com fibras estão superiores aos encontrados por outros pesquisadores (DE e WHITE, 1996; SILVA, 2010).

A Figura 4.1 ilustra o gráfico comparativo, ambas dos compósitos de matriz sem carga e de compósitos com adição de fibras vidro de 15 mm, 30 mm e 45 mm nas frações de 2,5 % e 5 % e matriz plena.

Figura 4.1 – Comportamento de resistência à tração dos materiais compósitos com reforço de fibras de vidro.



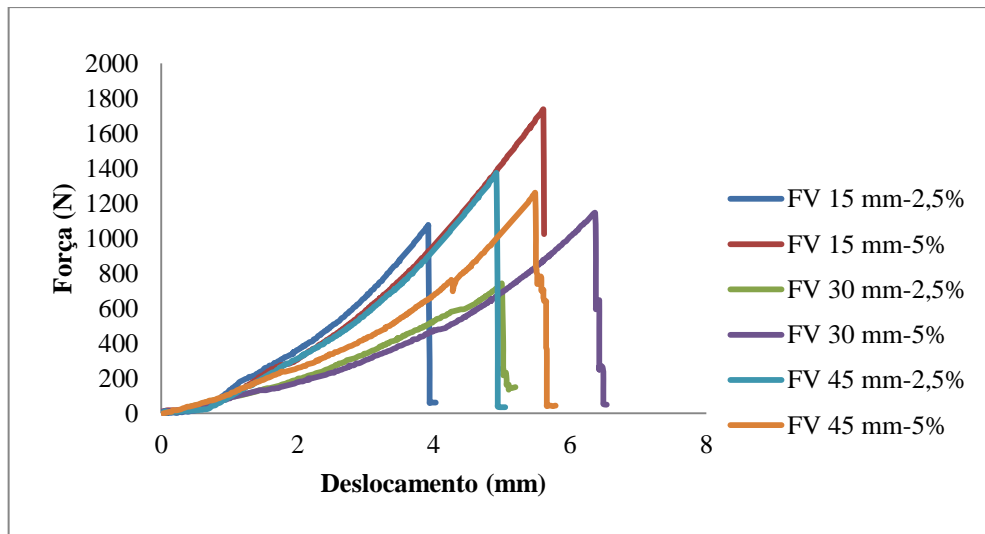
Fonte: Autorial Própria, 2018.

Observa-se que com o aumento do comprimento de fibras nos compósitos com fração mássica de 5 %, a resistência à tração diminui gradativamente.

Segundo Joseph *et al.* (1999), que estudou vários tamanhos de fibras curtas de sisal com tamanhos de 5 até 75 mm, em compósitos reforçados por fibras curtas há um comprimento crítico de fibras necessário para que a resistência máxima seja alcançada, pois a eficiência da transferência de tensões, depende do comprimento das fibras e da magnitude das interações na interface fibra-matriz.

A Figura 4.2 mostra o gráfico que relaciona a força (N) e o deslocamento (mm) dos compósitos poliméricos com reforço de fibra de vidro, onde é possível observar que a composição de 15 mm e 5 % de fibras de vidro, apresentou a maior força até o seu rompimento.

Figura 4.2- Gráfico força x deslocamento.



Fonte: Autoria Própria, 2018.

A Figura 4.2 representa o comportamento padrão para compósitos utilizando fibras de vidro com 2,5 % e 5 % incorporadas. Observa-se que, como esperado, as curvas são lineares, correspondendo ao regime elástico até a ruptura, o que caracteriza um comportamento frágil. Este comportamento indica que ao se atingir o ponto de máxima resistência, a ruptura é súbita e imediata ocorrendo uma queda de praticamente toda a carga aplicada.

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey foram realizadas comparações entre os materiais estudados com o intuito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração dos compósitos utilizando fibra de vidro. Utilizando o software PAST, na função “ANOVA: duplo fator” se obtém a tabela de análise de variância, onde é analisado o teor de fibras, o comprimento e a interação entre os dois fatores (Tabela 7).

Tabela 7- Dados gerados pela ANOVA: dois fatores para ensaio de tração dos compósitos com fibra de vidro.

Fator	P-Valor
% FIBRAS	$3,283 \times 10^{-10}$
COMPRIMENTO	$2,77 \times 10^{-10}$
INTERAÇÃO	$1,586 \times 10^{-7}$

Fonte: Autoria Própria, 2018.

A análise comparativa entre o teor de fibra, comprimento e a interação mostrou-se significativa entre os componentes. A Tabela 8 apresenta a análise comparativa de médias para a determinação das frações estatisticamente diferentes.

Tabela 8 - A análise comparativa de médias para os ensaios de tração de compósitos com fibras de vidro.

Grupos comparativos		P-Valor
2,5-15	2,5-30	0,4581
2,5-15	2,5-45	0,1908
2,5-15	5-15	04,99x10⁻¹⁰
2,5-30	2,5-45	0,002035
2,5-30	5-30	1,376x10⁻⁰⁵
2,5-45	5-45	0,9996
5-15	5-30	2,081x10⁻⁰⁶
5-15	5-45	4,482x10⁻⁰⁸
5-30	5-45	0,3328

Fonte: Autorial Própria, 2018.

De acordo com a Tabela 8, nota-se que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os pares analisados, exceto nos pares: 2,5-15 mm e 5-15 mm, 2,5-30 mm e 2,5-45 mm, 2,5-30 mm e 5-30 mm, 5-15 mm e 5-30 mm, 5-15 mm e 5-15 mm.

O que comprova estatisticamente que a fração mássica e o comprimento das fibras influenciaram na resistência a tração do material.

4.2.1.2 Material Compósito com Reforço de Fibra de Palha da Costa.

Os compósitos poliméricos com reforço de fibra de palha da costa foram avaliados de acordo com sua resistência mecânica por meio do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de tração de compósitos com reforço de fibras de palha da costa.

Tipo de Amostra	Proporção de Fibra	Resist. Tração (MPa) Desvio Padrão	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Plena	0%	8,65 (\pm 0,67)	4,17	0,55
Palha da costa de 15 mm	2,5%	9,20 (\pm 0,7004)	4,59	0,36
	5%	5,43 (\pm 1,1971)	3,94	0,31
Palha da costa de 30 mm	2,5%	6,54 (\pm 0,8274)	3,96	0,34
	5%	8,41 (\pm 1,4433)	5,16	0,28
Palha da costa de 45 mm	2,5%	5,12 (\pm 1,0271)	3,29	0,33
	5%	4,81 (\pm 1,7445)	4,03	0,19

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Na Tabela 9, pode-se observar que apenas a composição de 15 mm e 2,5 % obteve valor de resistência à tração maior quando comparado a matriz plena. Observa-se também que as outras composições obtiveram valores de resistência à tração menor do que o valor de resistência da matriz plena. A proporção de 5 % com 30 mm de comprimento obteve valor semelhante à resistência mecânica da matriz plena.

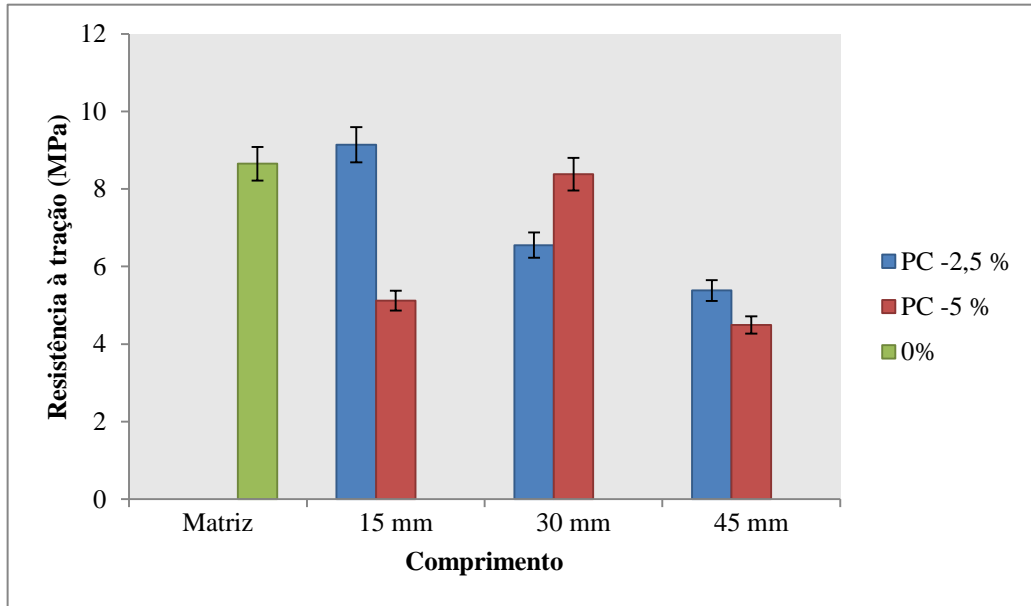
Esta diminuição da resistência mecânica pode ser devida a dificuldade de homogeneização, da compactação ou da fabricação dos compósitos de fibras de palha da costa. Assim tais fibras atuaram de forma geral com a função de carga no material compósito.

Angrizani et al. (2006) estudou a influência da fibra de sisal, que é uma fibra vegetal, na propriedade de compósitos com matriz poliéster e observou que compósitos reforçados com fibras de menor comprimento obtiveram valores de resistência maiores. Tais resultados segundo ele é devido à dificuldade de homogeneização e dispersão das fibras com maiores comprimentos no interior do compósito.

A Figura 4.3 ilustra o gráfico comparativo de resistência à tração, ambas dos compósitos de matriz plena e de compósitos com adição de fibras de palha da costa de 15 mm, 30 mm e 45 mm nas frações de 2,5 % e 5 %.

Observar-se que todas as composições apresentaram limites de resistência à tração inferior ao da matriz plena, exceto a composição de 15 mm e 2,5 %.

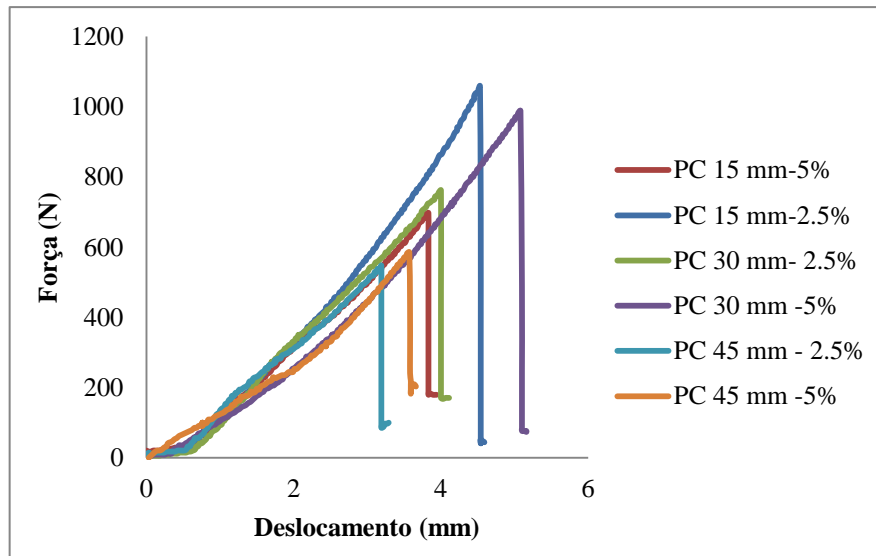
Figura 4.3 – Comportamento de resistência à tração dos materiais compósitos com reforço de fibras de palha da costa.



Fonte: Autoria Própria, 2018.

A Figura 4.4 mostra o gráfico que relaciona a força (N) e o deslocamento (mm) dos compósitos poliméricos com reforço de fibra de palha da costa, onde é possível observar que a composição de 15 mm e 2,5% de fibras de vidro suportou uma força superior às demais, aproximadamente de 1100 N. Observa-se que, como esperado, as curvas são lineares, correspondendo ao regime elástico até a ruptura, o que caracteriza um comportamento frágil. Este comportamento indica que ao se atingir o ponto de máxima resistência, a ruptura é súbita e imediata ocorrendo uma queda de praticamente toda a carga aplicada.

Figura 4.4 – Gráfico força x deslocamento.



Fonte: Autoria Própria, 2018.

Para a avaliação das diferenças entre os compósitos produzidos com palha da costa, foi realizada a ANOVA de dois fatores, conforme representado na Tabela 10, onde é analisado o teor de fibras, o comprimento e a interação entre os dois fatores.

Tabela 10- Dados gerados pela ANOVA: de dois fatores para ensaio de tração dos compósitos com palha da costa.

Fator	P-Valor
% FIBRAS	0,4342
COMPRIMENTO	0,3787
INTERAÇÃO	0,01829

Fonte: Autoria Própria, 2018.

A análise comparativa entre o teor de fibra e o comprimento não se mostrou significativa, apenas a interação entre os componentes. A Tabela 11 apresenta a análise comparativa de médias para a determinação das frações estatisticamente diferentes.

Tabela 11 - A análise comparativa de médias para os ensaios de tração de compósitos com fibras de palha da costa.

Grupos comparativos		P-valor
2,5-15	2,5-30	0,4088
2,5-15	2,5-45	0,1012
2,5-15	5-15	0,2888
2,5-30	2,5-45	0,9187
2,5-30	5-30	0,3498
2,5-45	5-45	0,5598
5-15	5-30	0,2485
5-15	5-45	0,8583
5-30	5-45	0,7797

Fonte: Autoria Própria, 2018.

De acordo com a tabela, nota-se que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os pares analisados.

O que comprova estatisticamente que a fração mássica e o comprimento das fibras não influenciaram na resistência a tração do material.

4.2.2 Ensaio de Flexão

Para uma avaliação das propriedades mecânicas dos compósitos foi realizado o ensaio de flexão, o qual viabilizou quantificar: Resistência a Flexão (MPa), Módulo de Elasticidade (GPa) e Força máxima (N), todos os parâmetros foram obtidos por leitura da máquina a qual os corpos de prova foram ensaiados. Com isso, pode ser observado o quanto as composições, influenciaram nos resultados dos ensaios.

4.2.2.1 Material Compósito com Reforço de Fibra de Vidro

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com fibras de vidro estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de flexão a três pontos de compósitos com reforço de Fibras de vidro

Tipo de Amostra	Proporção de Fibra	Resist. à Flexão (MPa) Desvio Padrão	Força Máxima (N)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Plena	0 %	63,05 (\pm 9,09)	130,1	2,16
Fibra de Vidro de 15 mm	2,5 %	58,04 \pm (0,016)	177,9	1,65
	5 %	75,73 \pm (0,018)	223,0	2,21
Fibra de Vidro de 30 mm	2,5 %	81,72 \pm (0,014)	82,8	0,62
	5 %	24,20 \pm (0,003)	236,8	2,61
Fibra de Vidro de 45 mm	2,5 %	72,58 \pm (0,018)	321,0	2,09
	5 %	85,83 \pm (0,020)	221,5	1,97

Fonte: Autoria Própria, 2018.

De acordo com a Tabela 12 verifica-se que as maiorias das composições tiveram sua resistência à flexão com uma tendência a aumentar a sua resistência em relação matriz plena, nota-se que a composição de 15 e fração mássica de 2,5 % e 30 mm fração mássica de 5 %, apresentaram valores de resistência à flexão inferiores, em comparação a matriz plena.

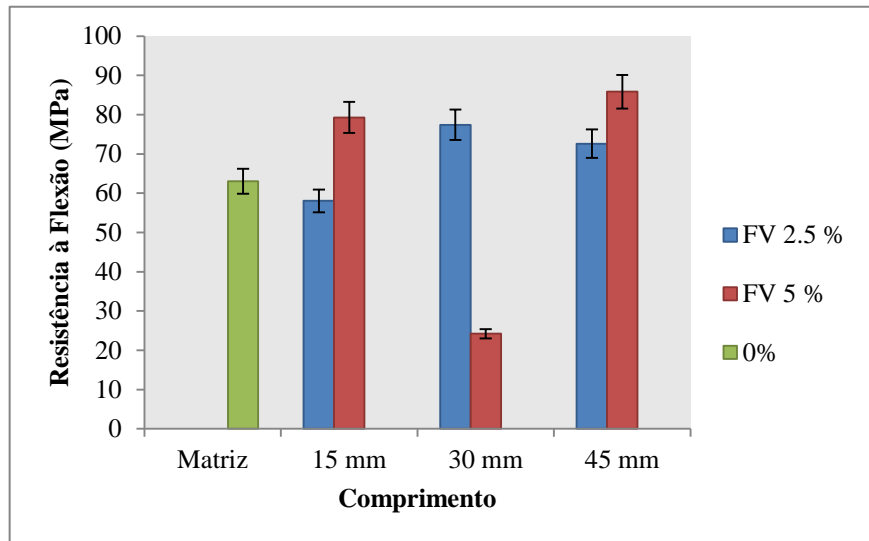
Os valores percentuais das resistências à flexão dos compósitos reforçados com fibra de vidro foram 36,13 % maior em relação à resistência da matriz plena. De forma geral as fibras de vidro, atuaram como reforço no compósito de matriz polimérica, aumentando à resistência a flexão.

RAGHAVENDRA *et al.*, (1998) produziram por laminação manual seguida de leve compressão compósitos de matriz epóxi reforçados com tecido em estilo plano de juta e comparou as propriedades mecânicas obtidas em tração e flexão com compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro produzidos nas mesmas condições. A resistência à flexão dos laminados reforçados com fibras de juta e com fibras de vidro foi 71 % e 330 %, respectivamente, maior do que a da matriz epóxi. A fibra de juta alcançou desempenho em flexão 49 % inferior ao obtido pelos compósitos com reforço de fibra de vidro.

Os compósitos de fibra de vidro obtiveram valores de resistência à flexão similar ao comparados com outros pesquisadores (CARVALHO e CAVALCANTI, 2006).

A Figura 4.5 ilustra o gráfico comparativo de resistência à flexão dos compósitos de matriz plena e de compósitos com adição de fibras de vidro de 15 mm, 30 mm e 45 mm nas frações de 2,5 % e 5 %.

Figura 4.5 – Comportamento de resistência à flexão dos materiais compósitos com reforço de fibras de vidro.



Fonte: Autorial Própria, 2018.

Para a avaliação das diferenças entre os compósitos produzidos com fibra de vidro, foi realizada a ANOVA de dois fatores, conforme representado na Tabela 13, onde é analisado o teor de fibras, o comprimento e a interação entre os dois fatores.

Tabela 13- Dados gerados pela ANOVA: de dois fatores para ensaio de flexão dos compósitos com fibras de vidro.

Fator	P-Valor
% FIBRAS	0,000162
COMPRIMENTO	$5,06 \times 10^{-2}$
INTERAÇÃO	0,0001808

Fonte: Autorial Própria, 2018.

A análise comparativa entre o teor de fibra e o comprimento mostrou-se significativa apenas para todos os componentes. A Tabela 14 apresenta a análise comparativa de médias para a determinação das frações estatisticamente diferentes.

Tabela 14- A análise comparativa de médias para os ensaios de flexão de compósitos com fibras de vidro.

Grupos comparativos		P-valor
2,5-15	2,5-30	0,1277
2,5-15	2,5-45	0,3985
2,5-15	5-15	0,0687
2,5-30	2,5-45	0,9571
2,5-30	5-30	13,127x10⁻⁵
2,5-45	5-45	0,8801
5-15	5-30	0,9564
5-15	5-45	46,361x10⁻⁵
5-30	5-45	1,187x10⁻⁵

Fonte: Autoria Própria, 2018.

De acordo com a tabela, nota-se que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os pares analisados. Exceto nos grupos 2,5-30 mm e 5-30 mm, 5-15 mm e 5-45 mm, 5-30 mm e 5-45 mm. O que comprova estatisticamente que a fração mássica e o comprimento das fibras influenciaram na resistência a flexão do material.

4.2.2.2 Material Compósito com Reforço de Palha da Costa

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão para os corpos de prova de compósito reforçado com fibras de palha da costa estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de flexão a três pontos de compósitos com reforço de fibras de palha da costa.

Tipo de Amostra	Proporção de Fibra	Resist. à Flexão (MPa) Desvio Padrão	Força Máxima (N)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Plena	0%	63,05 ± (9,090)	130,1	2,16
Palha da costa de 15 mm	2,5%	45,65 (±0,010)	150,4	1,19
	5%	19,12 (± 0,002)	60,8	0,58
Palha da costa de 30 mm	2,5%	27,68 (± 0,020)	77,9	0,88
	5%	26,11 (± 0,006)	83,8	0,71
Palha da costa de 45 mm	2,5%	25,71 (± 0,003)	72,1	0,80
	5%	18,92 (± 0,006)	67,0	0,46

Fonte: Autoria Própria, 2018.

De acordo com a Tabela 15 verificamos que a maiorias das composições tiveram sua resistência à flexão com uma tendência a diminuir a sua resistência, em relação matriz plena, atuando com a função de carga.

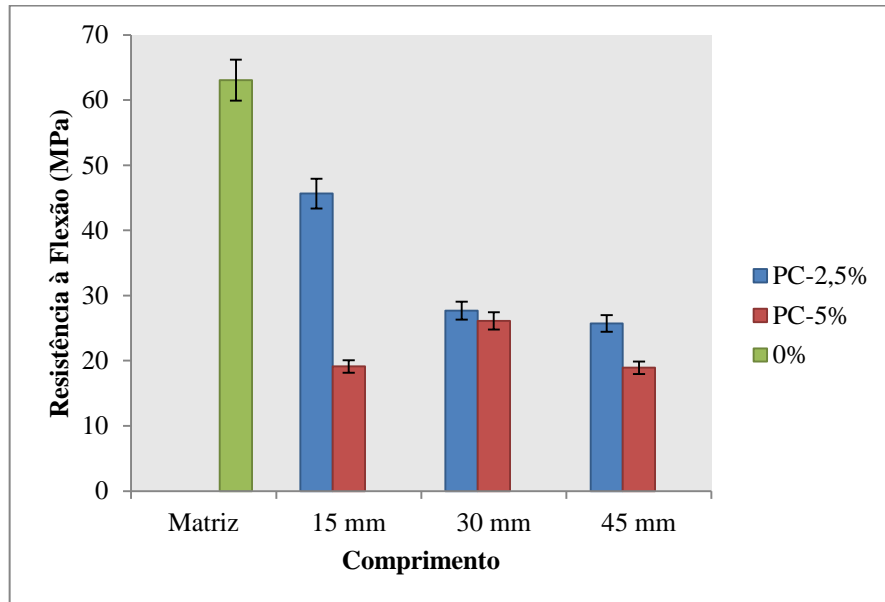
Quando se observa o módulo de elasticidade, nota-se que não houve um aumento nos compósitos quando comparado com a matriz plena, diminuindo a rigidez dos compósitos com incorporação de fibras de palha da costa.

TOLÊDO FILHO *et al.*, (1997), observaram que as fibras de malva impediram a fratura frágil pela provável presença de fibrilas (ramificações superficiais), que aumentam a ancoragem da fibra na matriz, promovendo uma breve manutenção, ou mesmo acréscimo da força aplicada, pelo efeito de reforço das fibras que atravessam a região da microfissura recém-iniciada na matriz. Esse comportamento do compósito resulta da combinação ótima entre fração volumétrica e comprimento das fibras de malva.

A Figura 4.6 ilustra o gráfico comparativo de resistência à flexão, ambas dos compósitos de matriz plena e de compósitos com adição de fibras de palha da costa de 15 mm, 30 mm e 45 mm nas frações de 2,5 % e 5 %. O gráfico ilustra a tendência a diminuição gradativas das composições de 2,5 % com a variação dos comprimentos de fibra de palha da costa. Essa tendência pode ser explicada pela dificuldade de homogeneização de fibras

naturais com tamanhos maiores, assim a resina não consegue impregnar as fibras de forma eficiente.

Figura 4.6 – Comportamento de resistência à flexão dos materiais compósitos com reforço de palha da costa.



Fonte: Autoria Própria, 2018.

Para a avaliação das diferenças entre os compósitos produzidos com fibra de palha da costa, foi realizada a ANOVA de dois fatores, conforme representado na Tabela 16, onde é analisado o teor de fibras, o comprimento e a interação entre os dois fatores.

Tabela 16- Dados gerados pela ANOVA: de dois fatores para ensaio de flexão dos compósitos com fibras de palha da costa.

Fator	P-Valor
% FIBRAS	0,02025
COMPRIMENTO	0,01069
INTERAÇÃO	0,03397

Fonte: Autoria Própria, 2018.

A análise comparativa entre o teor de fibra e o comprimento mostrou-se significativa apenas para todos os componentes. A Tabela 17 apresenta a análise comparativa de médias para a determinação das frações estatisticamente diferentes.

Tabela 17- A análise comparativa de médias para os ensaios de flexão de compósitos com fibras de palha da costa

Grupos comparativos		P-valor
2,5-15	2,5-30	0,06305
2,5-15	2,5-45	0,002539
2,5-15	5-15	0,009776
2,5-30	2,5-45	0,6431
2,5-30	5-30	0,9427
2,5-45	5-45	1
5-15	5-30	1
5-15	5-45	0,9909
5-30	5-45	0,9833

Fonte: Autoria Própria, 2018.

De acordo com a tabela, nota-se que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os pares analisados. Exceto nos grupos 2,5-15 mm e 2,5-45 mm, 2,5-15 mm e 5-15 mm.

O que comprova estatisticamente que a fração mássica e o comprimento das fibras influenciaram na resistência a flexão do material.

4.3 Comparações dos Resultados Obtidos com a Literatura

A Tabela 18 reúne dados de propriedades mecânicas de alguns compósitos de matrizes poliméricas e fibras vegetais encontradas na literatura e dos compósitos estudados neste trabalho. Estes compósitos foram confeccionados sob diferentes condições, teores de fibras e comprimentos, de modo que não é possível uma comparação direta entre os mesmos. Contudo, estes dados foram inseridos neste trabalho para se ter uma ideia da resistência mecânica de tração destes compósitos estudados por outros pesquisadores. Analisando a Tabela 18, pode-se dizer que o compósito de palha da costa/poliéster utilizado neste trabalho apresentou um bom desempenho mecânico, de acordo com a sua aplicação.

Tabela 18 - Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com fibras naturais encontradas na literatura.

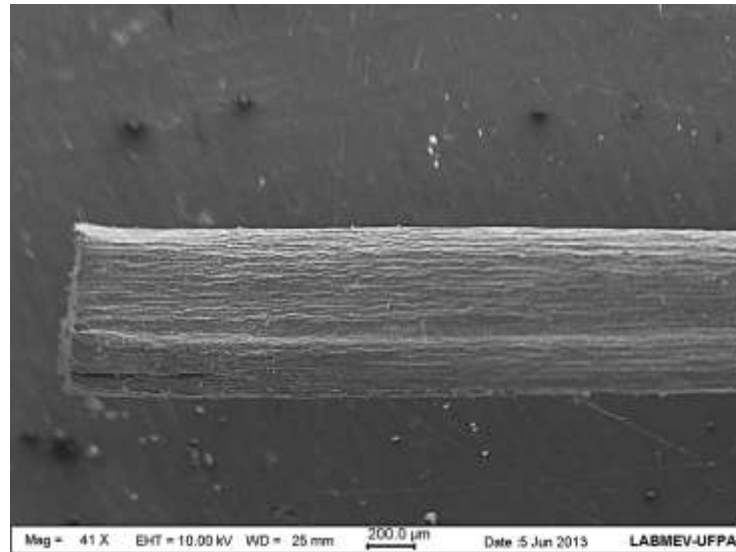
Literatura	Fração Mássica (%)	Resist. Tração (Mpa)	Modulo de Elasticidade (GPa)
Palha da Costa/Poliéster 15 mm (Neste trabalho)	2,5 %	9,20 (\pm 0,70)	0,36
Palha da Costa/Poliéster 30 mm (Neste trabalho)	5 %	8,41 (\pm 1,44)	0,28
Palha da Costa/Poliéster 45 mm (Neste trabalho)	2,5 %	5,12 (\pm 1,02)	0,33
Sisal/Poliuretano (MILANESE, 2008)	17,3 %	17,00 (\pm 2,00)	2,12
Sisal/ Fenólica (MILANESE, 2008)	6,6 %	24,9 (\pm 1,32)	2,85
Palha da Costa/Poliéster (RODRIGUES, 2014)	45 %	23,59 (\pm 5,52)	2,32
Palha da Costa/Poliéster (RODRIGUES, 2014)	40 %	22,97 (\pm 1,58)	1,30
Bambu/Poliéster (SANTOS <i>et al.</i> , 2017)	3 %	20,56 (\pm 1,50)	0,86

Fonte: Adaptado dos autores citados, 2018.

4.3 Caracterização Morfológica

A microscopia eletrônica de varredura foi feita na fibra de palha da costa, como mostra a Figura 4.7, com aumento de 41x.

Figura 4.7- Micrografias obtidas por MEV do compósito com a incorporação de fibras de vidro. (a) Aumento 41x.



Fonte: Aatoria Própria, 2018.

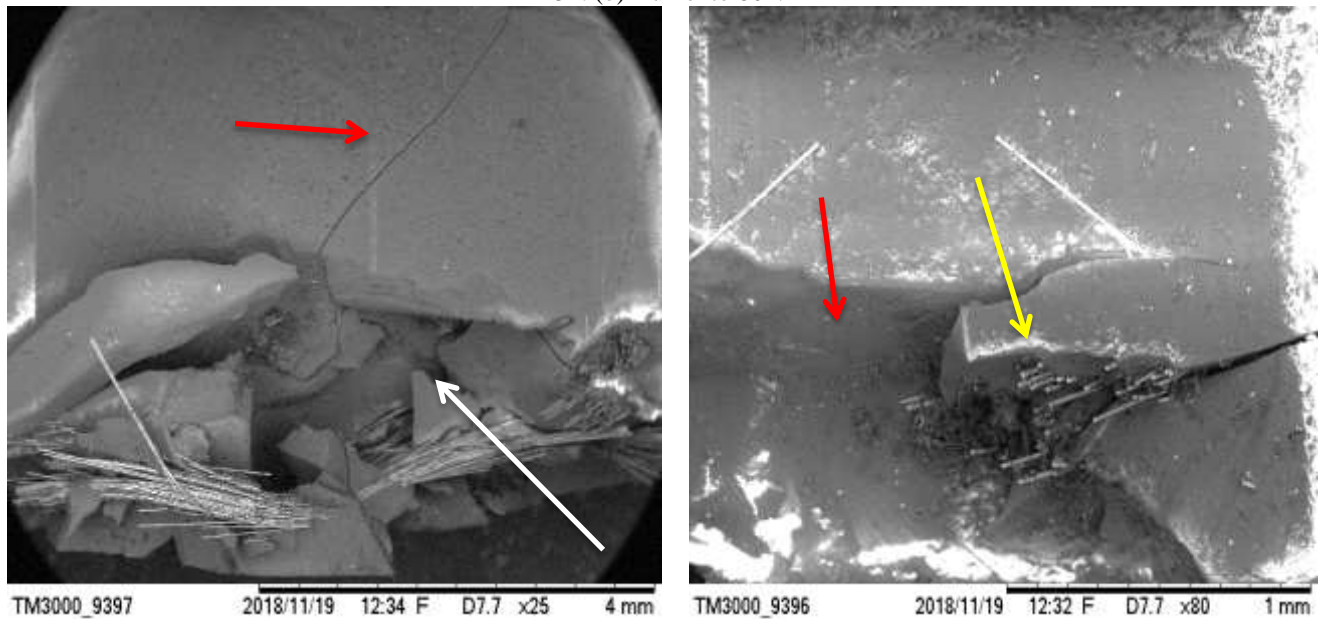
A Figura 4.7 mostra o aspecto da fibra de palha da costa. É importante notar a forma heterogênea que é característica das fibras naturais. As fibras de palha da costa apresentaram uma microestrutura similar em relação às outras fibras vegetais oriundas do caule, isto é ratificado devido ao alto percentual das microfibrilas de celulose presentes em sua composição microestrutural. Por ser uma fibra oriunda do caule da planta apresenta uma superfície lisa que dificulta à ancoragem fibra/matriz, o que pode depreciar sua resistência mecânica a tração dos compósitos.

Segundo Oliveira (2013) o bambu tem um tecido reforço que aumenta a resistência de suas estruturas, o esclerênquima. Essa estrutura é composta por vasos e veios que transportam os nutrientes.

Pode-se notar ainda que as fibras vegetais apresentaram áreas lisas. Santos (2006) diz que as fibras vegetais apresentam em sua composição microestrutural um alto percentual de microfibrilas de celulose.

A microscopia eletrônica de varredura foi feita no compósito com inserção de fibra de vidro, como mostra Figura 4.8, com aumentos de 25x e 80x.

Figura 4.8- Micrografias obtidas por MEV do compósito com a incorporação de fibras de vidro. (a) Aumento 25x. (b) Aumento 80x.



(a)

(b)

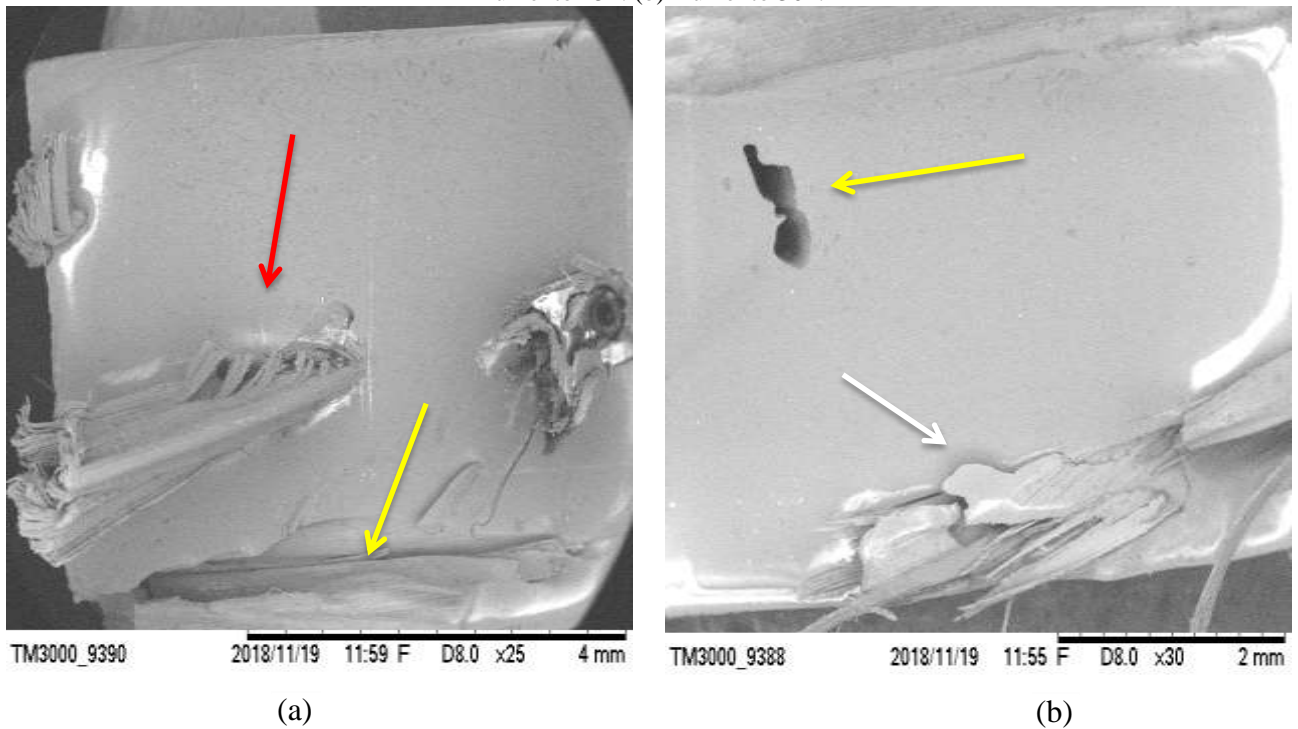
Fonte: Autoria Própria, 2018.

Pela análise das micrografias de fratura do corpo de prova do compósito de 15 mm de comprimento e fração mássica de 5 % de fibra de vidro (Figura 4.8 (a)), é possível observar pouca dispersão de fibras na matriz, ocasionando trinca (seta vermelha) e possível propagação na matriz até a região onde se tem uma maior concentração de fibra de vidro, ocasionando o rompimento do material (seta branca). Pela micrografia pode se observar que não se tem ocorrência de descolamento da fibra na matriz (*pull out*), sendo um forte indicativo de boa adesão entre matriz e fibra.

A micrografia (Figura 4.8 (b)) apresentou rompimento das fibras de vidro (seta amarela) sem apresentar o mecanismo de *pull-out*, exibe rompimento do material de forma frágil (seta vermelha), característico de compósitos de matriz termofixa.

A microscopia eletrônica de varredura foi feita no compósito com inserção de fibra de palha da costa, como mostra figura 4.9, com aumentos de 25x e 30x.

Figura 4.9- Micrografias obtidas por MEV do compósito com a incorporação de fibras de palha costa. (a) Aumento 25x. (b) Aumento 30x.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018.

Na superfície de fratura do corpo de prova de matriz polimérica com inserção de fibras de palha da costa 45 mm e fração mássica de 5 % (Figura 4.9 (a)) foi possível observar além de algumas imperfeições na superfície de fratura, descolamento de fibras (seta amarela) e rompimento da fibra no sentido transversal a força de tração (seta vermelha) favorecendo para a diminuição da resistência a tração.

Na micrografia (Figura 4.9 (b)) apresentaram vazios na superfície (seta amarela), o que é um fato característico de uma baixa adesão entre a interface matriz/fibras, onde as trincas se propagam, diminuindo assim a resistência à tração do material compósito. Apresentaram descolamento de fibras (seta branca) transversalmente ao sentido de carregamento, sendo uma possível causa para a diminuição da resistência do compósito com palha da costa.

5 CONCLUSÕES

Com base nas análises dos resultados, as conclusões deste trabalho são apresentadas a seguir, de acordo com os objetivos específicos definidos inicialmente.

Os desenvolvimentos de compósitos com fibras sintéticas de vidro e palha da costa foram realizados de maneira satisfatória. O processo *hand lay-up* mostrou-se viável para a fabricação desse tipo de material, pois promoveu boas propriedades dos compósitos com um baixo custo e menor necessidade de ferramentas avançadas.

Os ensaios físicos apresentaram que com o aumento de fibra de vidro, a porosidade e a absorção de água tiveram uma tendência a aumentar. Os compósitos com palha da costa apresentaram aumento de porosidade em relação à matriz, favorecendo para a sua resistência mecânica (tração e flexão) inferior a matriz plena.

Com relação ao ensaio de tração, os compósitos com fibra de vidro foram superiores em relação à matriz plena, assim a fibra atuou com reforço para o compósito. Os compósitos com fibras de palha da costa apresentaram em geral resultados inferiores ao da matriz plena, tendo como função de carga de enchimento para o material, exceto na composição de 15 mm e fração mássica de 2,5 % que obteve a maior resistência à tração em relação à matriz plena.

O módulo de elasticidade de compósitos com fibra de vidro e palhas da costa apresentaram uma redução em relação à matriz plena.

Os ensaios de flexão dos compósitos com fibra de vidro apresentaram aumento em relação à matriz plena, e os compósitos com fibras de palha da costa apresentaram valores inferior em relação à matriz plena.

O módulo de elasticidade dos ensaios de flexão de compósitos de fibra de vidro e o de fibra de palha da costa apresentaram resultados inferiores comparados a matriz plena.

Por meio de microscopia eletrônica de varredura foi possível identificar as características da fratura nos dois tipos de compósitos fabricados, não apresentaram ocorrência de mecanismos de *pull-out* das fibras tanto de palha da costa quanto de fibra de vidro, com a visualização de fibras rompidas da matriz. Foi observada também a ocorrência de microfissuras ao longo da matriz (fraturas coesivas), além de poucos vazios em sua estrutura.

Os compósitos produzidos e caracterizados neste trabalho apresentaram-se como possíveis concorrentes a aplicações que não requerem grandes esforços mecânicos, como paredes divisórias e revestimentos internos. Pois, ainda que seus resultados fossem similares ou inferiores a literatura consultada, esse materiais possuem além das propriedades, um apelo

econômico e socioambiental de extrema importância para a disponibilidade e aplicação de novos materiais de engenharia.

5.1 Propostas para Trabalhos Futuros

- Realizar tratamento superficial nas fibras de palha da costa utilizadas como reforço, verificando suas consequências para as propriedades finais dos materiais compósitos.
- Fabricar laminados com camadas de tecido de palha da costa, utilizando uma diferente técnica de hibridização para os compósitos poliméricos.
- Estudar a influência da variação da quantidade de fibras curtas de palha da costa como uma camada entre os tecidos de palha da costa nas propriedades do compósito híbrido.
- Fazer um estudo detalhado da interface fibra-matriz destes tipos de materiais.

REFERÊNCIAS

ABMACO. **Compósitos 1: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências.** [S.l.], 2008.

ABMACO. **Compósitos 2: Tecnologia de Processos.** [s.l.], 2009.

ALBINANTE, S. R., PACHECO, É. B. A. V., VISCONTE, L. L. Y. Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. **Química Nova**, vol. 36, n. 1, p. 114-122. 2013.

ALSINA, O. L. S.; DE CARVALHO, L. H.; RAMOS FILHO, F. G.; D'ALMEIDA, J. R. M. Thermal properties of hybrid lignocellulosic fabric-reinforced polyester matrix composites. **Polymer Testing: ScienceDirect**, vol. 24, 81-85, 2005

ASTM D 3039 - American Society For Testing And Materials. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Philadelphia, 2006.

ASTM D790 - American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 1998.

ANGRIZANI, C.A.B. et al. Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos com poliéster. **In: CBECIMat, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2006.

BARBOSA, D. O. **Características de compósitos de fibras de palha da costa (raphia vinifera) com resina poliéster.** 2013. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

CALLISTER, W. D. RETHWISCH. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução**, Rio de Janeiro, LTC, 2012.

CAMARGO, M. et al. Matapi PET: Uma nova proposta para a exploração sustentável do camarão amazônico *Macrobrachium amazonicum* (Heller, 1862). **UAKARI**, v. 5, n.1, p. 91-96, jun. 2009. Disponível em: <<http://www.uakari.org.br/index.php/UAKARI/article/view/58>>. Acesso em: 05 Dez. 2018.

CARVALHO, L. H; CAVALCANTI, W. S Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro, **Polímeros** vol.16, São Carlos, 2006.

CARVALHO, A. **Fiberglass x Corrosão: Especificação, Instalação e Manutenção de Equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos.** São Paulo: Asplar, 1992.

CHRÉTIEN G. **Matériaux Composites À Matrice Organique.** Paris. Technique et documentation (Lavoisier), 1986.

DAS S, Saha A.K., Choudhury P.H., Basak R.K., Mitra B.C., Todd T., Lang S., Rowell R.M. (2000) **Effect of steam pretreatment of jute fiber on dimensional stability of jute composite.** J.Appl.Polym.Sci.; 76:1652-1661

DAVIAUD R, Filliatre C. **Introduction Aux Matériaux Composites.** 1. Matrices organiques. 2 ed. Bombannes: École d'automne du CNRS – Institute du Pin – Université de Bordeaux, 1983.

DE S K, WHITE J R. **Short Fibre-Polymer Composites,** Woodhead, Publishing Limited England, 1996 pg, 2,3,64,65.

DEDAVID, B; GOMES, C; MACHADO,G. **Microscopia eletrônica de varredura :** aplicações e preparação de amostras : materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. – Porto Alegre : EDIPUCRS, 2007.

FAGURY, R. V. G., 2005, **Avaliação de fibras naturais para a fabricação de compósitos: açai, coco e juta.** Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

FERREIRA, C. A.; BORGES, S. G.; CARNEIRO, P. S.; TRINDADE, R. S.; LEITE, P. A. M. Avaliação da influência de diferentes cargas no tempo de cura e temperatura de cura de resinas poliéster insaturadas por intermédio de curvas exotérmicas. **17o CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais,** pp. 3833-3842, 2006.

GOMES, A.; MATSUO, T.; GODA, K.; OHGI, J. Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites. **Composites Part A - Applied Science and Manufacturing,** 38 (8), pp. 1811-1820, 2007.

HUMPHREYS, F. J.; GOODHEW, P. J. **Electron Microscopy Analysis.** Taylor & Francis, London. 1988.

JARDIM, N. R. T. Nas (reen) tranças da memória da artesanaria marajoara boavistense – primeiras (im)pressões. In: **CONGRESSO PAN-AMAZÔNICO DE HISTÓRIA ORAL,** 1, 2012, Belém. **Anais do 1ºCPAHO.** Belém: Ed. Açai, 2012.

JOSEPH, K.; MEDEIROS, E. S. de; CARVALHO, L. H. de. Compósito de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. In: Congresso Brasileiro de Polímeros, 5, 1999, Águas de Lindóia, SP. **Anais do 5º Congresso Brasileiro de Polímeros,** Águas de Lindóia, SP: Abpol, 1999. CD-ROM.

KELLY, A.; MILEIKO, S. T. **Fabrication of Composites - Handbook of Composites - vol.4 - Nort Holland,** 1983.

KESTEMNBACH H.; BOTA FIILHO W. J. **Microscopia Eletrônica de Transição e Varredura.** São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1994.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia.** São Paulo: Artliber, 2011.

MATTHEWS F L, RAWLINGS R D. **Composite Materials: Engineering And Science** Chapman and Hall, UK, 1994.

MATTHEWS, F.L; RAWLINGS, R.D. **Composite Materiais**: Engineering and Science. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC. 1999.

MILANESE, A. C. **Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras de sisal e de vidro**. 2008. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; FERREIRA, A. S.; NASCIMENTO, D. C. O. Natural-fiber polymer-matrix composites: cheaper, tougher and environmentally friendly. **Polymer-Matrix Composites**, Vol. 61, No. 1, 2009.

NASSEH, Jorge. **Manual de construção de barcos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Advanced Composites, 2011.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais**: ciência e tecnologia. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.

NBR-12766 - Rochas para revestimento - Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente.

OLIVEIRA, J.; POTIGUARA, R. C. V.; LOBATO, L. C. B. **Fibras vegetais utilizadas na pesca artesanal na microrregião do Salgado**, Pará. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências humanas, Belém, v. 1, n. 2, p. 113-127, maio-ago. 2006.

OLIVEIRA, J.; POTIGUARA, R. C. V.; ZOGHBI, M. G. B.; GOMES, J. I.; RODRIGUES, S. T.; ANDRADE, E. H. A. Jupatí (*raphia taedigera* mart.): a sua utilização por comunidades ribeirinhas do estado do pará. In: **CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA**, 54, 2003, Belém. Repositório Alice. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/575004/1/1182.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

OLIVEIRA, Luiz Fernando Andrade de. **Conhecendo bambus e suas potencialidades para uso na construção civil**. 2013. 90 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia**: microestrutura e propriedades. Editora Hemus. 2007.

RAGHAVENDRA, G.; OJHA, S.; ACHARYA, S. K.; PAL, S. K. Jute fiber reinforced epoxy composites and comparison with the glass and neat epoxy. **Composites**. London: Chapman & hall, p. 2-47, 1998.

RODRIGUES, J. S., **Estudo da técnica de infusão de resina aplicada à fabricação de compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras naturais da Amazônia**, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

SANCHEZ, E. M. S.; CAVANI, C. S.; LEAL, C. V.; SANCHEZ, C. G. Compósito de Resina de Poliéster Insaturado com Bagaço de Cana-de-Açúcar: Influência do Tratamento das Fibras nas Propriedades. **Polímeros**, 2010.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. **Composites: ScienceDirect**, Part A, 38, 1694-1709, 2007.

SANTOS, P. S., ciência e tecnologia das argilas. 2 ed. São Paulo – SP: Edgar Blucher Ltda, 1989, V.1.

SANTOS, M. A; **Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia**. Curitiba. Dissertação de Mestre em Engenharia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2006.

SANTOS, A. J. G. dos. et al. **Influência da incorporação de fibras de bambu (*Bambusa vulgaris*) e resíduo de cobre em matrizes poliméricas termofixas**. Anais: XXIV – Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. Rio Grande, 2017.

SILVA, R. V. Tese de Doutorado, **Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais**. USP- São Carlos-SP, 2003.

SILAEX, <http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>, Visitado em 19/09/2018.

SILVA, H. S. P. da, **Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras de Curauá e Híbridos com Fibras de Vidro**. 2010. 86 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

SIMÕES, V.; COSTA, M. Trailer “Artesanato tradicional em fibra de jupatí”. Belém, 2013. Disponível em: <<http://vimeo.com/49053562>>. Acesso em: 20 Jun. 2018.

SZABÓ J S, Czigany T. **Static fracture and failure behaviour of aligned continuous mineral fiber reinforced polypropylene composites**, Elsevier Science, Hungary, 2003.

TARGA, G. N., PIRES, E. N., AL-QURESHI, H. A., BARRA, G. M. O. Produção e caracterização de um compósito de fibra de juta e resina de poliéster insaturado, **In: 10º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2009.

TOLÊDO FILHO, R. D. **Materiais compósitos reforçados com fibras naturais vegetais**. In: TOLÊDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. (coord.). Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande, PB: UFPB/SBEA, cap. 2, p. 49-82, 1997.

TOMCZAK, F.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; SATYANARAYANA, K. G. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil – Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. **Composites: ScienceDirect**, Part A, 38, 1710–1721, 2007.

TRINDADE, W. G.; HOAREAU, W.; MEGIATTO, J. D.; RAZERA, I. A. T.; CASTELLAN, A.; FROLLINI, E. Thermoset phenolic matrices reinforced with unmodified and surface-grafted furfuryl alcohol sugar cane bagasse and curaua fibers: Properties of fibers and composites. **Biomacromolecules**, 6 (5), pp. 2485- 2496, 2005.

VENTURA, A. M. F. M. **Os compósitos e sua aplicação na reabilitação de Estruturas metálicas**. 2009. Instituto Superior Técnico, Universidade técnica de Lisboa, Portugal.

WAMBUA P. IVENS J, VERPOEST I. Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics. **Composites Science and Tecnology**; 63(9). P. 1259-1264. 2003.

WUZELLA, G.; KANDELBAUER, A. Novel Composites Based on Natural Fibres and Thermosets. **JEC Composites Magazine – Biocomposites**, 37 (dec), pp. 36- 38, 2007.

ZAH, R.; HISCHIER, R.; LEÃO, A. L.; BRAUN, I. Curaua fibers in the automobile industry - A sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, 15 (11-12), pp. 1032-1040, 2007.