



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

**WYNARA SANDY TEIXEIRA DOS SANTOS**

**AVALIAÇÃO MECÂNICA DE TRAÇÃO E FLEXÃO DOS COMPÓSITOS  
COM FIBRAS CURTAS DE JUTA E VIDRO**

Ananindeua, PA

2018

WYNARA SANDY TEIXEIRA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO MECÂNICA DE TRAÇÃO E FLEXÃO DOS COMPÓSITOS  
COM FIBRAS CURTAS DE JUTA E VIDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado a Faculdade de Engenharia  
de Materiais da Universidade Federal do  
Pará para obtenção do grau de Bacharel  
em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Deibson Silva  
da Costa

Ananindeua, PA

2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com  
ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**

---

S237a Santos, Wynara Sandy Teixeira dos.  
Avaliação mecânica de tração e flexão dos compósitos com fibras  
curtas de juta e vidro / Wynara Sandy Teixeira dos Santos. — 2018.  
66 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de  
Materiais, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do  
Pará, Belém, 2018.

1. Materiais. 2. Fibras. 3. Poliéster. 4. Propriedades Mecânicas. I. Título.

CDD 620.11

---

WYNARA SANDY TEIXEIRA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO MECÂNICA DE TRAÇÃO E FLEXÃO DOS COMPÓSITOS COM  
FIBRAS CURTAS DE JUTA E VIDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
para obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Materiais pela Universidade  
Federal do Pará.

Data de aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

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

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Orientador)

---

Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha  
(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Examinador Interno)

---

Prof. Me. Alessandro José Gomes dos Santos  
(FACET/CAMPANIN/UFPA - Examinador Externo)

Ananindeua, PA

2018

## DEDICATÓRIA

A minha mãe Lucilene Teixeira, meu avô Cícero Barbalho (*in memoriam*) e meus padrinhos Raimunda e Miguel por sempre acreditarem no meu potencial, me enchendo de força e coragem para que eu nunca viesse a desistir.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, por me manter com fé, força e perseverança para chegar até aqui.

A minha família, em especial a minha mãe, Lucilene Teixeira, meu avô Cícero Barbalho (*in memoriam*) e meus padrinhos Raimunda e Miguel que são a razão pela qual levanto e luto todos os dias.

Aos meus amigos, aqueles que se “foram”, mas que deixaram marcas em mim que jamais serão apagadas e, aqueles que estão presentes e me deram forças nos momentos de tristeza e vibraram comigo nos momentos de alegria.

Ao meu orientador, professor, conselheiro e amigo Deibson Costa por toda paciência e compreensão para comigo ao longo desses anos de convívio. E pelos inúmeros conselhos sábios.

Ao Eng. Paulo Cesar e o Eng. Bruno Mendes por toda ajuda, paciência e conhecimentos compartilhados.

A todos os professores do *campus* Ananindeua que contribuíram para o meu conhecimento e crescimento pessoal e profissional.

A Universidade Federal do Pará *campus* Guamá por ceder muitos de seus laboratórios, em especial a Faculdade de Engenharia Química e o LAMPS por disponibilizar seus equipamentos para o desenvolvimento desta tese.

Aos obstáculos, pois estes me fizeram crescer e me tornar mais forte, aprendendo com as experiências e a lidar com os impasses da vida.

Enfim, sou grata a todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização desta tese.

*"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis."*

José de Alencar

## RESUMO

Nos últimos anos, observa-se um aumento de estudos que focam na substituição de fibras sintéticas por naturais em compósitos poliméricos, por conta dos altos custos de fabricação das fibras sintéticas e pelo grande número de rejeitos gerados poluindo o meio ambiente. Este trabalho consiste na substituição parcial da fibra sintética de vidro pela fibra natural de juta, avaliando mecanicamente tração e flexão, fazendo análises físicas e análises das fraturas dos compósitos com fibras naturais de juta e fibras sintéticas de vidro. As fibras foram adquiridas do comércio local de Belém-PA e utilizadas nos comprimentos de 15 mm, 30 mm e 45 mm. O processo de fabricação dos compósitos foi o *hand lay up*. A matriz polimérica foi constituída por resina poliéster isoftálica insaturada em conjunto com catalisador (1 %) e acelerador de cobalto (1,5 %) em v/v. As proporções de fibra de juta e vidro inseridos nos compósitos foram de 2,5 % e 5 % em massa. As caracterizações mecânicas dos compósitos foram avaliadas por ensaios de resistência a tração e a flexão segundo as normas ASTM 3039 e ASTM 790, respectivamente. As propriedades físicas (porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente) seguindo a norma NBR 12766. As fraturas dos compósitos foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados dos compósitos com fibras de juta e fibras de vidro para o ensaio de tração foram superiores em relação a matriz plena. O módulo de elasticidade dos compósitos com fibras de juta e das fibras de vidro comparadas a matriz plena tiveram um aumento. Os ensaios de flexão dos compósitos com fibras de juta e das fibras de vidro tiveram um valor inferior comparado a matriz plenas e o módulo de elasticidade dos compósitos com fibras de juta e o com fibras de vidro apresentaram resultados inferiores comparados a matriz plena. Por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível a identificação e as características das fraturas dos compósitos fabricados.

**Palavras-chaves:** Materiais. Fibras. Poliéster. Propriedades Mecânicas.

## ABSTRACT

In recent years, there has been an increase in studies focusing on the substitution of synthetic fibers for natural materials in polymeric composites, due to the manufacturing costs of synthetic fibers and the large number of wastes generated polluting the environment. This work consists in the partial substitution of the synthetic fiber of glass by the natural jute fiber, mechanically evaluating traction and flexion, making physical analyzes and analysis of the fractures of the composites with natural fibers of jute and synthetic fibers of glass. The fibers were purchased from local trade in Belém-PA and used in lengths of 15 mm, 30 mm and 45 mm. The composite manufacturing process was hand lay up. The polymer matrix was constituted by unsaturated isophthalic polyester resin together with catalyst (1 %) and cobalt accelerator (1.5 %) in v / v. The proportions of jute fiber and glass embedded in the composites were 2.5 % and 5 % by mass. The mechanical characterizations of the composites were evaluated by tests of tensile strength and flexure according to ASTM 3039 and ASTM 790, respectively. The physical properties (apparent porosity, water absorption and apparent specific mass) following the norm NBR 12766. The fractures of the composites were analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM). The results of the composites with jute fibers and glass fibers for the tensile test were higher than the full matrix. The modulus of elasticity of composites with jute fibers and glass fibers compared to the full matrix increased. The bending tests of the composites of jute fibers and glass fibers had a lower value compared to the full matrix and the modulus of elasticity of the composites with jute fibers and that with glass fibers presented inferior results compared to the full matrix. Scanning electron microscopy (SEM) allowed identification and fracture characteristics of composites.

**Keywords:** Materials. Fibers. Polyester. Mechanical properties.

## LISTA DE FIGURA

Figura 1: Compósito reforçado com fibras.....	18
Figura 2: Estágios de ensaio de tração.....	24
Figura 3: Representação do dispositivo usado nos ensaios tensão-deformação de tração. ....	25
Figura 4: Curva carga-deflexão esquemática para compósitos com fibras de baixo módulo. .	27
Figura 5: Aplicação de carga em três pontos.....	28
Figura 6: Materiais utilizados: (a) Resina polimérica; (b) Acelerador de cobalto; (c) Iniciador de Butanox; (d) Balança; (e) Fibra de juta; (f) Fibra de vidro.....	29
Figura 7: Fluxograma básico do processo de confecção de placas compósitos. ....	31
Figura 8: Materiais para a confecção das placas: (a) Desmoldante; (b) Molde fechado; (c) Molde aberto.....	32
Figura 9: Etapas do processo de fabricação: (a) Mistura do butanox com o iniciador; (b) Fibras com o butanox e o iniciador. ....	32
Figura 10: Prensa hidráulica com molde. ....	33
Figura 11: Exemplificação 3D do corpo de prova para ensaios físicos.....	34
Figura 12: Estufa. ....	35
Figura 13: Ensaios físicos: (a) Massa seca; (b) Massa úmida; (c) Massa imersa.....	36
Figura 14: Serra de corte. ....	38
Figura 15: Exemplificação 3D do corpo de prova de resistência a tração. ....	38
Figura 16: Corpos de prova de compósitos com fibras de juta. ....	39
Figura 17: Máquina de ensaio de Tração em operação: (a) Vista total frontal de uma máquina de ensaio de tração; (b) vista frontal da máquina na área de engate do corpo de prova destacada num círculo vermelho em (a).....	39
Figura 18: Exemplificação 3D do corpo de prova de flexão.....	40
Figura 19: Corpos de provas para ensaio de flexão.....	40
Figura 20: Máquina de ensaio de flexão.....	41
Figura 21: Material para ensaio de MEV: (a) Amostra no suporte metálico; (b) Amostra frontal. ....	42
Figura 22: Microscópio eletrônico por varredura.....	42
Figura 23: Gráfico força x deformação da matriz plena e dos compósitos com fibras de juta em tração.....	47
Figura 24: Gráfico comparativo da matriz plena e dos compósitos com fibras de juta e vidro. ....	50

Figura 25: Gráfico força x deformação da matriz plena e dos compósitos com fibras de vidro em tração.....	50
Figura 26: Gráfico força x deformação da matriz plena e dos compósitos com fibras de juta em flexão. ....	53
Figura 27: Gráfico comparativo da matriz plena e dos compósitos com fibras de juta e vidro em flexão. ....	56
Figura 28: Gráfico força x deformação da matriz plena e dos compósitos com fibras de vidro em flexão. ....	57
Figura 29: Micrografias obtidas por MEV do compósito com a incorporação de fibras de Juta: (a) Aumento 25x. (b) Aumento 80x. ....	59
Figura 30: Micrografias obtidas por MEV do compósito com a incorporação de fibras de vidro: (a) Aumento 25x. (b) Aumento 50x.....	60

## LISTA DE TABELA

Tabela 1:	Resultados dos ensaios físicos para compósitos com fibras de juta .....	42
Tabela 2:	Resultados dos ensaios físicos para compósitos com fibras de vidro .....	43
Tabela3:	Resultados do ensaio de tração de compósitos reforçados com fibras de juta.	44
Tabela 4:	Dados gerados pela ANOVA de dois fatores para ensaio de tração dos compósitos com a inserção de fibras de juta .....	46
Tabela 5:	Análise comparativa das frações de fibra de juta para o ensaio de tração .....	46
Tabela 6:	Resultados do ensaio de tração de compósitos com reforço de fibras de vidro.....	47
Tabela 7:	Dados gerados pela ANOVA de dois fatores para ensaio de tração dos compósitos com a inserção de fibras de vidro .....	49
Tabela 8:	Análise comparativa das frações de fibra vidro no ensaio de tração .....	50
Tabela 9:	Resultados do ensaio de flexão de compósitos de fibras de juta .....	51
Tabela 10:	Dados gerados pela ANOVA de dois fatores para ensaio de flexão dos compósitos com a inserção de fibras de juta .....	53
Tabela 11:	Análise comparativa entre as frações de juta no ensaio de flexão .....	53
Tabela 12:	Resultados do ensaio de flexão de compósitos de fibras de juta .....	54
Tabela 13:	Dados gerados pela ANOVA de dois fatores para ensaio de flexão dos compósitos com a inserção de fibras de vidro .....	56
Tabela 14:	Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com fibras naturais encontradas na literatura .....	57

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

AA	Absorção de água
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American society for testing and materials
J	Juta
LAMPS	Laboratório de Materiais Porosos Sintetizados
MEA	Massa Específica Aparente
MEK-P	Peróxido de Metil Etil Cetona
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PA	Porosidade Aparente
PPGEQ	Programa de Pós-Graduação da Engenharia Química
UFPA	Universidade Federal do Pará
V	Vidro

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Considerações iniciais.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>15</b>
1.3.1 Objetivo geral .....	15
1.3.2 Objetivos específicos .....	16
<b>1.4 Composição do trabalho.....</b>	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Materiais compósitos .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Compósitos reforçados com fibras .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3 Matrizes poliméricas .....</b>	<b>19</b>
2.3.1 Polímeros .....	19
2.3.2 Resina poliéster.....	20
2.3.3 Compósitos poliméricos reforçados com fibras .....	20
<b>2.4 Fibras .....</b>	<b>21</b>
2.4.1 Fibras de juta.....	21
2.4.2 Fibras de vidro .....	22
<b>2.5 Ensaio de caracterização mecânica .....</b>	<b>23</b>
2.5.1 Tração .....	23
2.5.2 Flexão .....	25
2.5.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	28
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Materiais utilizados .....</b>	<b>29</b>
3.1.1 Processo de obtenção dos materiais.....	30

3.1.2	Preparação dos compósitos.....	30
3.1.3	Fabricação das placas compósitas .....	31
<b>3.2</b>	<b>Caracterização dos compósitos.....</b>	<b>34</b>
3.2.1	Ensaio físicos .....	34
3.2.2	Tração .....	37
3.2.3	Flexão .....	40
3.2.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	41
3.2.5	Análise estatística .....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Ensaio físicos.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2</b>	<b>Tração .....</b>	<b>45</b>
4.2.1	Compósito reforçado com fibra de juta .....	45
4.2.2	Compósito reforçado com fibra de vidro.....	49
<b>4.3</b>	<b>Flexão .....</b>	<b>52</b>
4.3.1	Compósito reforçado com fibra de juta .....	52
4.3.2	Compósito reforçado com fibras de vidro .....	55
<b>4.4</b>	<b>Comparação dos resultados obtidos com a literatura .....</b>	<b>58</b>
<b>4.5</b>	<b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</b>	<b>59</b>
4.5.1	Microscopia dos compósitos com fibra de juta .....	59
4.5.2	Microscopia dos compósitos com fibra vidro.....	60
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A civilização entrou em uma nova era de materiais. Como está documentado em vários relatórios governamentais e acadêmicos, as sociedades avançadas em todo o mundo rapidamente adquirem habilidades sem precedentes no sentido de criar materiais projetados para satisfazer necessidades humanas (SAPUAN, 2017).

Descobrir novos materiais e métodos ecologicamente seguros e economicamente viáveis é a meta da atualidade, pois sem os novos materiais e sua produção eficiente, não existiria o nosso mundo de equipamentos modernos, máquinas, computadores, automóveis, aeronaves, aparelhos de comunicação e produtos estruturais (KICKELBICK, 2007).

Neste contexto, existe hoje um interesse crescente na utilização de materiais lignocelulósicos (fibras de sisal, coco, banana, curauá e juta), como reforço em compósitos de matrizes termofixas ou termoplásticas. O interesse de utilização das fibras vegetais como agente de reforço está relacionado ao seu baixo custo, densidade menor do que as fibras de vidro, além de serem fontes renováveis, não abrasivas, biodegradáveis e amplamente disponíveis em território nacional (SANTOS, 2013).

A fibra natural lignocelulósica de juta vem sendo extensivamente investigada em várias pesquisas, como compósitos poliméricos reforçados por juta (WAMBUA et al., 2007). Os compósitos reforçados com este tipo de fibra residual podem substituir produtos de madeira, trazendo várias vantagens, e ainda podem ser utilizados em materiais de construção e peças de automóveis (ZAH et al., 2007).

Os compósitos são materiais formados por uma matriz e um reforço com excelente afinidade química entre si, processados sinteticamente para atingir excelentes propriedades mecânicas com a menor massa possível, o que é impossível de ser alcançado com materiais convencionais (CALLISTER JR, 2002).

Os compósitos mais comuns são aqueles que utilizam fibras de vidro. Porém, no processo de fabricação destes compósitos, são geradas grandes quantidades de rejeitos ou sobras, prejudicando o meio ambiente (ORTH et al., 2012).

Neste contexto, o presente trabalho investiga as caracterizações mecânicas, físicas e microestruturais dos compósitos com fibras curtas de juta e vidro, buscando-se um material

com propriedades satisfatórias para possíveis aplicações parciais da fibra sintética de vidro por fibras naturais de juta. A fibra sintética de vidro apresenta um elevado custo no seu processo de fabricação e gera resíduos difíceis reciclagem poluindo o meio ambiente.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Os materiais compósitos, que são resultados da união de materiais de natureza diferente e que juntos proporcionam melhores propriedades ou mais adequadas que suas estruturas originais, assumem cada vez mais uma relevante posição no cenário dos materiais, oferecendo propriedades que muitas vezes não são conseguidas pelos materiais tradicionais.

Essa classe de materiais apresenta baixo peso e estão associadas, em alguns casos, à alta rigidez e resistência mecânica, excelentes resistências térmicas e à corrosão.

A busca de novos compósitos que utilizam fibras naturais ou uma mistura de fibras naturais com fibras sintéticas como reforço visa à diminuição deste impacto sobre o meio ambiente. Outras vantagens que apresentam as fibras naturais em relação às sintéticas pode-se destacar, como por exemplo, o custo, a leveza e a tenacidade. Entretanto, algumas dessas fibras apresentam alguns problemas, referente ao desempenho mecânico, a absorção de água, entre outros, obrigando a busca de novos materiais que correspondam às expectativas estruturais desejadas.

O presente trabalho de investigação pretende realizar, inicialmente, um estudo da caracterização mecânica, física e micro estrutural, bem como, desenvolver um novo compósito envolvendo essas fibras (juta e vidro), com o intuito de uma viável aplicação.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo geral**

Desenvolver e caracterizar mecanicamente (tração e flexão) e analisar morfologicamente a fratura dos compósitos poliméricos de matriz poliéster isoftálica com fibras curtas (15, 30 e 45 mm) de juta e vidro.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Fabricar e caracterizar as placas de matriz poliéster plena;
- Fabricar os compósitos com fibras curtas de juta e vidro nos comprimentos de 15 mm, 30 mm e 45 mm nas proporções de 2,5 e 5 %;
- Caracterizar mecanicamente através de ensaio de tração e flexão, os compósitos fabricados;
- Analisar morfologicamente através de microscopia eletrônica de varredura as superfícies fraturadas dos compósitos, correlacionando com suas propriedades mecânicas;
- Comparar os resultados das propriedades mecânicas dos compósitos entre as séries fabricadas e com a literatura pesquisada.

## 1.4 COMPOSIÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é composto por 6 (seis) seções principais apresentadas brevemente e constituídas da seguinte maneira:

A seção 1 apresenta a introdução, justificativa e os objetivos desse trabalho com a finalidade de desenvolver um novo material para uma possível aplicação.

A partir da seção 2 desenvolve-se a revisão bibliográfica onde se expõe definições dos materiais compósitos e suas propriedades, das fibras vegetais, com a definição sobre as fibras de juta e vidro, além da definição de matrizes poliméricas, da resina poliéster, da fabricação de materiais compósitos e das propriedades dos compósitos.

Logo em seguida durante a seção 3 são apresentados os materiais e métodos experimentais, com os materiais utilizados e os processos de obtenção das fibras, a produção dos corpos de prova, posteriormente a metodologia adotada para caracterização mecânica dos compósitos.

Após esses procedimentos, na seção 4 elaboram-se os resultados e discussões dos dados obtidos após o ensaio dos compósitos reforçados com as fibras de juta e vidro, além de dados gerados e uma análise discreta dos resultados obtidos.

Na seção 5 chega-se à conclusão acerca dos resultados obtidos e respostas aos objetivos do estudo.

Por fim, a seção 6 com sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material compósito é formado pela união de dois ou mais materiais de natureza distintas resultando em um novo material com características superiores ou não a aquela de seus componentes originais (PEREIRA, 2005).

Os compósitos possuem dois ou mais constituintes distintos numa escala microscópica, separados por uma interface, sendo muito importante à especificação destes constituintes. A matriz é o primeiro constituinte contínuo, mas nem sempre presente em maior quantidade. O segundo constituinte, disperso na matriz, é citado como uma fase de reforço, que atua nas propriedades mecânicas da matriz (MATTHEWS, 1994).

A matriz tem o papel de manter a integridade estrutural do compósito através da ligação simultânea com a fase dispersa em virtude de suas características coesivas e adesivas (MANO, 1991). Sua função é também, transferir o carregamento para a fase dispersa e protegê-la contra o ataque ambiental. A escolha da matriz polimérica dependerá das propriedades físicas, mecânicas e térmicas exigidas para uma determinada aplicação, do processo de fabricação escolhido e do custo associado (HULL, 2002).

O reforço, ou componente reforçante, é o responsável por dar ao compósito a capacidade de suportar esforços mecânicos (são materiais de alta rigidez e resistência, normalmente). As propriedades mecânicas do compósito são uma combinação das propriedades do reforço e da matriz, porém, é o reforço que determina a natureza da estrutura interna do compósito. Esses materiais são, geralmente, fibras, tecidos, fios ou partículas (CALLISTER JR, 2002).

Os compósitos podem ser produzidos a partir de matrizes metálicas, cerâmicas ou poliméricas. Existe também, uma variedade de compósitos que ocorrem na natureza, como a madeira, que é formada por fibras de celulose resistentes e flexíveis, que são envolvidas e mantidas unidas por meio de um material menos rígido chamado lignina (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

A grande vantagem dos materiais compósitos é a de que eles são capazes de aliar as melhores qualidades de seus constituintes fazendo uso das seguintes características: baixa densidade, alta resistência, alta rigidez, grande resistência à fadiga, possibilidade de escolha da orientação da fibra, versatilidade de projeto, larga variedade de combinações de fibras e de

matrizes, grande resistência à corrosão, estabilidade dimensional, baixa transmissão de ruídos e vida longa. Obviamente nem todas estas vantagens podem ser exploradas ao mesmo tempo e, geralmente, não há essa necessidade (CAVALCANTI, 2006).

Basicamente, um compósito é considerado como sendo um material multifásico que demonstra uma significativa proporcionalidade de ambas as fases constituintes, gerando assim outra fase de melhor qualidade (PINTO, 2002).

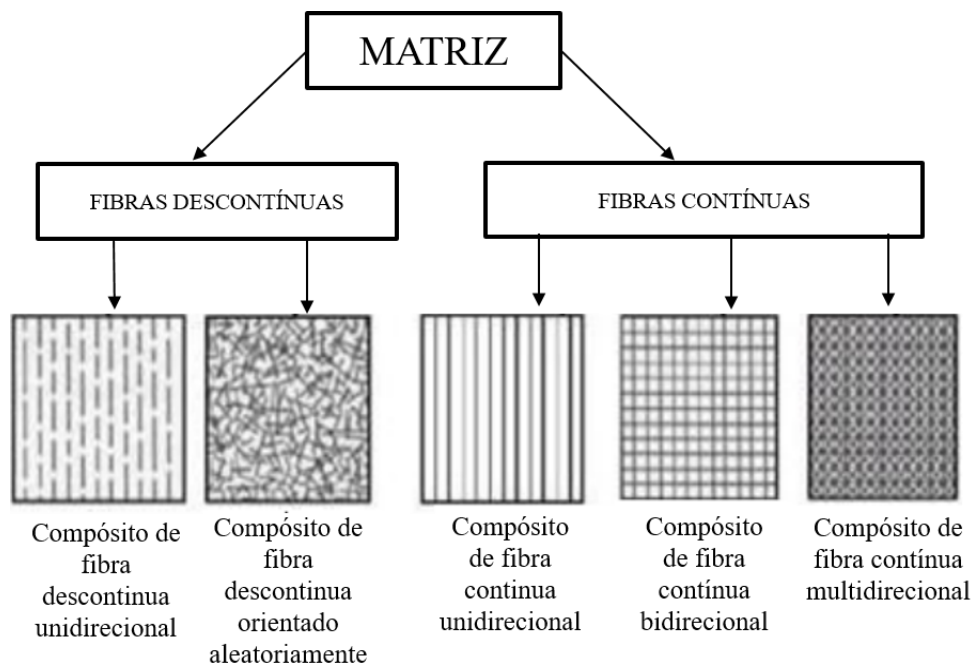
## 2.2 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Para os compósitos reforçados com fibras, a fase dispersa tem geometria com razão do aspecto entre comprimento-diâmetro, conhecida como coeficiente de forma, é tomada para definir com fibras curtas aquelas cujo valor situa-se abaixo de 100 (CALLISTER, 2002).

As fibras utilizadas em compósitos influem nas suas propriedades, basicamente resistência e dureza, em função de: comprimento da fibra (magnitude da ligação interfacial entre a fibra e a matriz); orientação e concentração das fibras quando se apresentam; alinhadas e contínuas; alinhadas e descontínuas e aleatórias e descontínuas (CALLISTER JR, 2012).

As possíveis orientações e concentrações das fibras quando utilizadas como fase dispersa em um compósito são, a seguir, mostradas na Figura 1.

Figura 1: Compósito reforçado com fibras.



Fonte: Adaptado de PANZERA, 2005.

## 2.3 MATRIZES POLIMÉRICAS

Dentre os polímeros, o mais utilizado na produção de peças em compósito de matriz polimérica é o poliéster insaturado. Este é um termofixo e tem sua estrutura química diferente dos poliésteres termoplásticos, pois, além da típica ligação éster, ele possui duplas ligações insaturadas capazes de reagir com monômeros vinílicos. As duplas ligações da resina e do monômero são quebradas pela ação de um catalisador (peróxido orgânico, calor ou radiação), e reagem novamente entre si, dando origem a um polímero tridimensional de características termofixas, e portanto infusíveis e irreversíveis (ANTHONY et al., 2000).

As matrizes poliméricas consistem basicamente de uma resina polimérica como fase matriz. As fibras de vidro são as mais utilizadas para o reforço de plásticos devido a características como: baixo coeficiente de dilatação, resistência ao impacto e baixo custo (ARAÚJO et al., 2003).

### 2.3.1 Polímeros

Polímeros são cadeias de moléculas longas, do grego “poli” (“muitos”) e “meros” (“partes”). Já o termo “plástico”, é usado para uma grande variedade de polímeros com características e aplicações diferentes. Costuma-se usar frequentemente o termo “polímero” como sinônimo para plástico, porém, o termo não se limita apenas a estas moléculas, com isso pode-se afirmar que todos os plásticos são polímeros, mas nem todos os polímeros são plásticos (PINTO, 2002).

Segundo Pinto e Miranda (1999), os polímeros podem ser classificados como:

1. Termoplásticos: polímeros que, quando aquecidos até o ponto de fusão, podem fluir. Possuem cadeia polimérica linear ou ramificada. Esse processo é reversível e pode ser repetido;
2. Termofixos: estes sofrem uma reação química e formam ligações cruzadas, as quais dão origem a uma estrutura tridimensional. A cura deste tipo de resina ocorre a frio ou a quente. Depois que eles foram conformados, estes não podem ser aquecidos e reconformados (PINTO e MIRANDA, 1999).

Segundo Sanchez et al. (2010), polímeros termofixos são muito utilizados como matrizes em compósitos, e isso se dá devido às várias vantagens que esse material proporciona, como por exemplo: baixo custo, estabilidade térmica e dimensional, resistência

química em temperaturas elevadas e facilidade na moldagem de peças com grandes dimensões. Porém, os autores destacam que é importante associar polímeros com materiais de reforço, pois eles possuem baixa resistência a fratura.

### **2.3.2 Resina poliéster**

Poliéster é um polímero obtido a partir da ligação éster, os materiais desse tipo são bastantes diversificados e é a ligação éster quem define a característica comum entre eles. Isso muitas vezes compreende apenas uma pequena parte da molécula (BRYDSON, 1999).

Dependendo de sua formulação, ausência ou presença de duplas ligações entre os átomos de carbono (insaturações) que formam sua cadeia molecular, os mesmos podem ser classificados em saturados e insaturados. Os poliésteres saturados geram polímeros termoplásticos enquanto os insaturados sofrem reações de cura e geram resinas termofixas (RODRIGUES, 2007).

As resinas poliéster possuem uma gama de propriedades, caracterizando-as como a mais polivalente entre todas as resinas termofixas.

O principal tipo de resina poliéster é a ortoftálica, que é a mais comum, usada para aplicações gerais e que não exige alta inércia química (LEÃO, 2008).

### **2.3.3 Compósitos poliméricos reforçados com fibras**

Os compósitos poliméricos reforçados por fibras contínuas constituem a configuração que gera os melhores resultados com relação às propriedades mecânicas específicas, isto é, a razão entre uma característica mecânica do material sobre sua gravidade específica (MOREIRA, 2008). As fibras contínuas podem ser unidirecionais, alinhadas em direções específicas, ou na forma de mantas ou tecidos.

Para carregamentos biaxiais, geralmente são utilizados compósitos laminados, formados pela união de várias lâminas com diferentes orientações preferenciais. O desempenho destes materiais depende do tipo de fibra e matriz, fração volumétrica dos componentes e sequência de empilhamento das lâminas. Os fundamentos da teoria de laminados já estão bem compreendidos e estabelecidos (PAUL, 2003 e VENTURA, 2009).

Diferente dos compósitos reforçados por partículas ou fibras descontínuas, que apresentam um comportamento isotrópico em uma escala macroscópica, compósitos

reforçados com fibras contínuas apresentam propriedades ortotrópicas, ou seja, diferentes comportamentos nas direções ortogonais, que conduzem a mecanismos de falha específicos.

Segundo Freitas e Silva (2006), esses compósitos apresentam alta resistência e rigidez na direção das fibras, porém, um baixo desempenho na direção transversal às mesmas. Neste último caso a resistência e a rigidez são ditadas predominantemente pelas propriedades da matriz.

A interface fibra/matriz é a principal responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço e suas propriedades são específicas para cada sistema (MOURA et al., 2011).

Apesar de não haver normatização, existem métodos experimentais para se determinar a resistência interfacial (ANTHONY, 2000 e SANTIAGO et al., 2007).

Sabe-se que a tenacidade de compósitos reforçados por fibras depende primordialmente do comportamento tensão-deformação da fibra. Fibras resistentes com alta deformação de ruptura elevam o trabalho de fratura dos compósitos. Neste sentido, compósitos reforçados com fibras vegetais se tornam alternativas econômicas e ecológicas para uso como materiais de engenharia (CAMERINI, 2007). Porém, a performance de materiais compósitos ambientalmente amigáveis também depende em grande parte de um desenvolvimento adequado da união interfacial entre as fibras e a matriz (SANTIAGO et al., 2007).

## **2.4 FIBRAS**

### **2.4.1 Fibras de juta**

A juta (*Corchorus Capsularis*) pertence à família das tiliáceas. É uma planta originária da Índia. Atualmente é cultivada principalmente no Paquistão, na Índia e na China. No Brasil foi introduzida no início do século XX (RANGANATHAN, 2000). É intensamente cultivada no estado do Amazonas, porém hoje em dia já é encontrada nos estados da região sul.

É uma planta arbustiva que atinge de três a quatro metros de altura, composta de 64 % de celulose, 12 % de hemicelulose e 12 % de lignina, graxa e outras substâncias. Produz uma fibra densa, fortemente aglomerada e de difícil isolamento em filamentos elementares, com resistência e módulo de elasticidade relativamente elevados, permitindo seu uso como reforço (ALVES, 2008).

É uma fibra totalmente versátil, econômica, forte e durável. Não estraga facilmente sob a exposição de luz solar. Semeia-se a planta de juta em Março ou Abril, e cerca de quatro meses depois, após a queda das flores, sua altura alcança três a quatro metros e seu talo cerca de 2 cm de espessura, inicia-se a colheita (SANTOS, 2013). A planta colhida passa por processo de limpeza, com retirada das folhas e lavagem, os talos resultantes são submersos em água, onde ficam por alguns dias. A fibra útil encontra-se entre a casca e o talo interno e é extraída por processo de maceração (CTC, 2018).

Sua principal utilização é na produção de sacos, barbantes, esteiras, papel de parede, revestimentos de pisos, artesanato etc.

#### **2.4.2 Fibras de vidro**

A produção de fibras de vidro teve início na antiga Síria, Grécia e Egito. A aproximadamente 250 a. C onde os artesãos começaram a produzir as fibras através de uma vara de vidro aquecida para aplicar como relevo sobre a superfície de produto acabados. Comercialmente, a fibra de vidro começou a ser desenvolvida no ano de 1939, no decorrer da 2ª Guerra Mundial, com o intuito de fornecer rigidez e leviandade aos equipamentos bélicos (OTA, 2004).

Este tipo de material é composto por filamentos muito finos de vidro, que se agregam por meio de aplicações de resinas, silicones, fenóis e outros compostos solúveis em solventes orgânicos. Ela também recebe outra substância catalisadora que pode conter óxidos de potássio, ferro, cálcio e alumínio (SOARES et al., 2007).

Existem muitos grupos de vidros, por exemplo, a sílica, o exinitrito e o fosfato, porém, a sílica é a mais importante para uso em compósitos. A fibra do tipo S (S-glass – Strength) ou tipo R na Europa, é baseada no sistema dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) – óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), esta fibra tem uma alta resistência em relação a fibras do tipo E (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994).

De acordo com Matthews e Rawlings (1994), as fibras são facilmente produzidas por aquecimento do vidro e por moldagem com forças 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.

Fibras de vidro possuem geralmente de 5 a 20  $\mu\text{m}$  de diâmetro e suas superfícies não são livres de falhas, além de estarem intrinsecamente ligadas a irritações na pele humana (WAMBUA et al., 2003). Estas fibras são usadas para reforçar matrizes poliméricas, de modo

a se obter compósitos estruturais e componentes moldados. Os compósitos de matriz plástica reforçada com fibras de vidro apresentam as seguintes características favoráveis: elevado quociente entre resistência e peso, boa estabilidade, boa resistência ao calor, à umidade e à corrosão, facilidade de fabricação e custo relativamente baixo. Por esse motivo é de longe o reforço mais utilizado (BARCELLOS, 2009). A fibra de vidro é formada pelo estiramento do vidro fundido em altas temperaturas, tornando possível se obter fibras com rigidez, resistência à tração e resistência à temperatura muito alta. Este tipo de fibra é muito utilizado na maioria dos termoplásticos, com teores variando geralmente entre 5 e 50 %.

Atualmente, as fibras de vidro são aplicadas em mais de 35.000 produtos, sendo que as mais utilizadas são as do tipo E (E-glass). Essas fibras são obtidas a partir de uma mistura de óxidos de Si, Al, B, Ca e Mg e são normalmente usadas como reforços para termoplásticos devido ao seu baixo custo (OTA, 2004).

As fibras de vidro são usadas para reforçar peças plásticas, melhorando suas propriedades mecânicas, podendo promover as seguintes alterações no produto final:

- Diminuição da higroscopia;
- Aumento da estabilidade dimensional;
- Aumento da resistência térmica;
- Aumento da rigidez;
- Aumento da resistência ao desgaste;
- Aumento da resistência ao impacto;
- Aumento da resistência à tração;

## **2.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA**

### **2.5.1 Tração**

O ensaio de tração é um teste destrutivo que alcança o limite da resistência do material, submetendo a um esforço que irá alongá-la até que ocorra a ruptura da mesma. Este ensaio permite a averiguação de algumas propriedades mecânicas dos materiais que são importantes para um projeto, desde a fabricação do material até sua utilização final (GARCIA et al., 2000).

A principal utilização deste ensaio é para determinar a relação entre tensão normal média e a deformação normal média dos materiais. Nos compósitos é possível analisar os efeitos dos reforços de acordo com seus tipos e suas concentrações (SHIGLEY, 1972).

A tensão normal média é calculada a partir da Equação 1:

$$\alpha = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

Onde  $F$  é a força aplicada nas extremidades e  $S_0$  é a área inicial da seção transversal.

A Equação (2) calcula a deformação normal média:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

Onde  $L$  é o comprimento inicial e  $\Delta L$  é a variação de comprimento do corpo de prova.

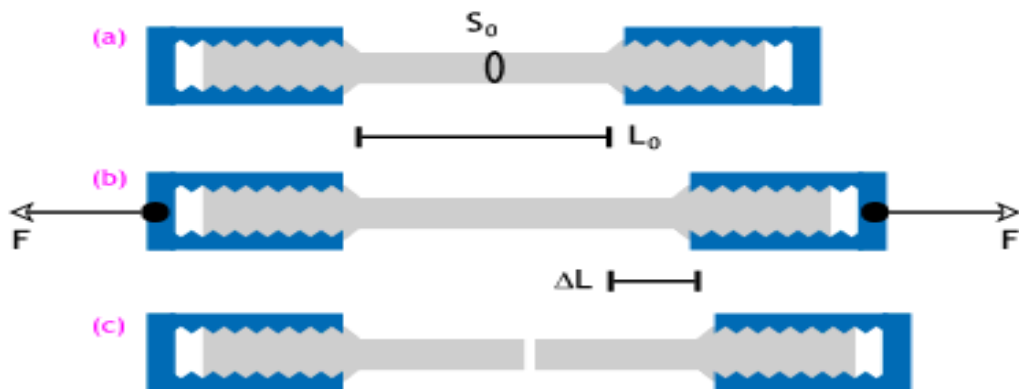
A relação entre as Equações (1) e (2) gera o módulo de elasticidade (Equação (3)), que nada mais é que um parâmetro que calcula a rigidez do material.

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

Existem padrões de dimensões para o corpo de prova de um ensaio de tração que devem ser seguidas de acordo com as exigências das normas.

A Figura 2 ilustra os três estágios de uma amostra em ensaio de tração. Em que  $S_0$  é a largura inicial da amostra,  $L_0$  é o comprimento da amostra medido entre dois pontos arbitrariamente selecionados entre as atracações do corpo de prova no aparelho de ensaio,  $F$  é a força de tração que o aparelho submete a amostra e  $\Delta L$  é a variação de comprimento (o alongamento) do corpo de prova até o momento de ruptura do mesmo (SHIGLEY, 1972).

Figura 2: Estágios de ensaio de tração.

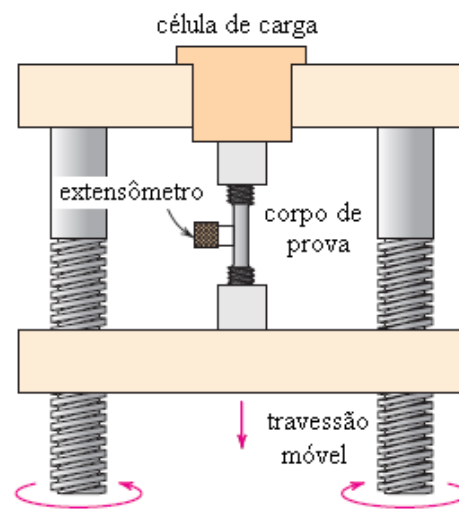


Fonte: CIEMAT, 2015.

Em (a) tem-se o corpo de prova no estágio inicial, antes de submetido a forças, observa-se a marcação do comprimento entre as duas atracações. Em (b) o corpo de prova está sendo submetido lentamente a uma força  $F$ , e começa-se a observar e monitorar o alongamento da amostra  $\Delta L$ . Em (c) observa-se o fim do ensaio, a amostra sofre ruptura.

Vale ressaltar que as laterais do corpo de prova não entram nos valores medidos, pois por estarem atracadas ao aparelho de ensaio sua distribuição de tensão é complexa (BEER e JONHSTON, 1982). A Figura 3 mostra basicamente um aparelho de ensaio de tração.

Figura 3: Representação do dispositivo usado nos ensaios tensão-deformação de tração.



Fonte: CALLISTER JR, 2007.

A máquina de ensaios de tração, demonstrada na Figura 3, é projetada para alongar o corpo-de-prova a uma taxa constante, ao mesmo tempo em que mede continuamente e simultaneamente a carga instantânea que está sendo aplicada (com uma célula de carga) e os alongamentos resultantes (usando um extensômetro) (CALLISTER JR, 2008).

### 2.5.2 Flexão

Para determinar as propriedades mecânicas do material foram feitos ensaios de resistência à flexão em três pontos, normalizado pela norma ASTM D 790. Este ensaio é amplamente aplicado em materiais frágeis ou de elevada dureza, pois esses materiais devido a sua baixa ductilidade, não permitem ou dificultam a utilização de outros tipos de ensaios mecânicos (AGARWAL, 1980).

O teste de flexão em três pontos, bem como o ensaio de flexão em quatro pontos, mensura a força requerida para dobrar um feixe sob circunstância de carregamento. Tais dados são comumente empregados na caracterização dos materiais que devem suportar cargas sem flexionar, materiais rígidos ou semirrígidos. Logo, a resistência à flexão não pode ser determinada em materiais que não falharem ou rompam com deformações superiores a 5,0 % na face tracionada mais externa dos corpos de prova, durante o ensaio de flexão (DIETER, 1981).

De acordo com a norma ASTM D 790, há dois procedimentos (A e B) possíveis para a aplicação do ensaio. A diferença básica entre eles é a taxa de carregamento no tempo que é imposta ao material. O procedimento A é usado em materiais que rompem com pequena taxa de deformação imposta por unidade de tempo, da ordem de 0.01 mm/mm/min. O procedimento B emprega taxa de deformação imposta no tempo de 0.10 mm/mm/min.

Tal ensaio visa medir as propriedades de flexão, particularmente o módulo de flexão, que é considerado uma indicação da rigidez de um material quando flexionado. As propriedades de flexão podem variar com a espessura do corpo de prova, bem como com a temperatura e as condições atmosféricas. Assim às vezes é apropriado testar os espécimes nas condições que simulem o ambiente do pretendido uso. O ensaio de flexão tem como finalidade chegar ao valo da resistência à tração na flexão das amostras sujeita a um carregamento contínuo e gradativo (SOUZA, 2004).

No material compósito de matriz frágil, a avaliação do comportamento mecânico sob flexão é um instrumento fundamental para análise de suas propriedades mecânicas. É de grande importância o conhecimento do comportamento do material quando submetido a este tipo de carregamento (TOLEDO, 1997).

Com base nas curvas carga-deslocamento e conhecendo as dimensões dos corpos de prova é possível determinar a resistência do compósito a flexão ( $\sigma$ ) e o módulo de elasticidade na flexão (E).

$$\sigma = \frac{3PL}{2BW^2} \quad (4)$$

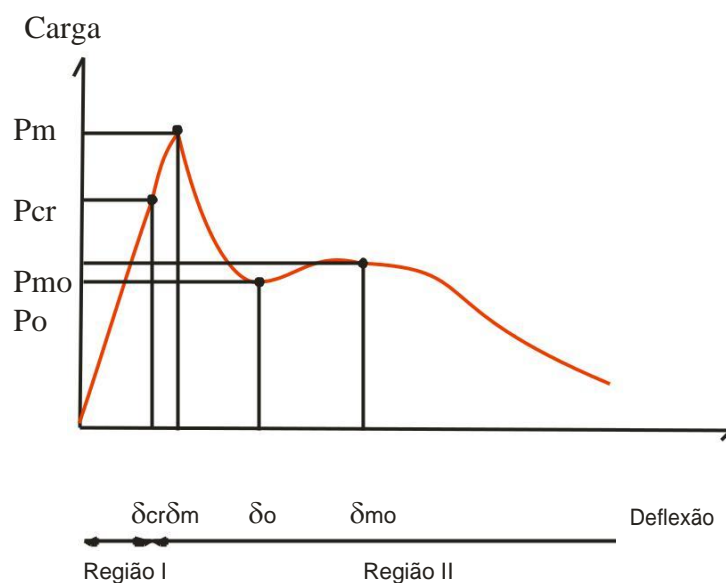
Sendo P a carga máxima atingida, L o vão entre os apoios, B e W a espessura e largura dos corpos de prova, respectivamente.

$$E = \frac{mL^3}{4BW^3} \quad (5)$$

Sendo m a inclinação da curva carga-deflexão.

Para fibras curtas de Juta, ela pode ser esquematizada como mostra a Figura 4, e pode ser dividida em duas partes: região I, que é a zona elástica, antes da fissuração, e região II, que é a zona inelástica até a ruptura (TOLEDO, 2008).

Figura 4: Curva carga-deflexão esquemática para compósitos com fibras de baixo módulo.



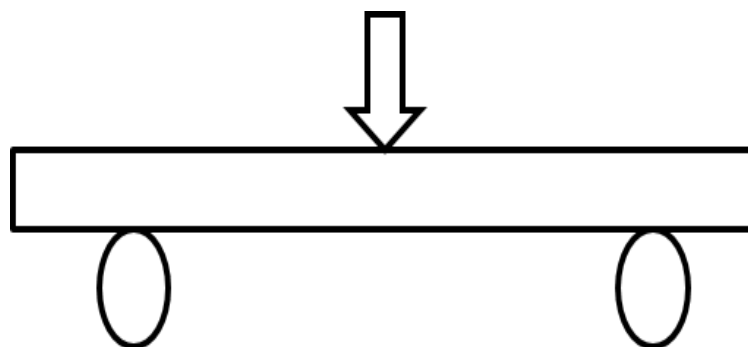
Fonte: FERREIRA, 2009.

Na região II, as fibras comportam quase toda tensão de tração contando com uma pequena contribuição da matriz durante a propagação inicial da fissura. Quando se utiliza fibra curta, o comportamento da região II fica modificada. Após a fissuração há uma redistribuição de tensões e a carga é transmitida da matriz para as fibras, até atingir a deflexão ( $\sigma$ ). Logo após, as cargas passaram a ser resistidas pelas fibras, podendo aumentar um pouco a capacidade de suporte da viga até atingir um valor máximo pós-pico,  $P_{mo}$ . A partir deste ponto, há uma redução suave da capacidade portanto até a ruptura do compósito, que é caracterizada pelo arrancamento das fibras da matriz na região tracionada. A carga máxima atingida pós-pico não supera a carga de pico, ou seja,  $P_{mp} < P_m$  (FERREIRA, 2009).

Para alguns compósitos, o ganho da resistência após a redistribuição de tensões é mais significativo, e a carga máxima resistida é maior que a carga de pico. Esse comportamento, com  $P_{mo} > P_m$  é comum para compósitos reforçados com grande quantidade de fibras, ou com fibras longas e alinhadas, mesmo quando se utiliza fibras de baixo módulo como sisal (TOLEDO, 2008).

A Figura 5 é uma representação esquemática dos esforços e apoios do equipamento sobre o corpo de prova.

Figura 5: Aplicação de carga em três pontos.



Fonte: Autoria própria, 2018.

### 2.5.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A principal função do microscópio é tornar visível ao olho humano estruturas, organismos e superfícies com dimensões microscópicas. Os microscópios podem ser do tipo óptico e eletrônico. Os microscópios ópticos apresentam ampliação máxima de 2.000 vezes e seu princípio de funcionamento se baseia na incidência de luz visível ou ultravioleta sobre a amostra a ser analisada, e quando refletida é projetada em lentes que ampliam estas imagens. Se baseia na incidência de feixes de elétrons em substituição a luz visível ou ultravioleta como nos microscópios ópticos. Os elétrons emitidos quando refletidos são captados por detectores que convertem o sinal em imagem em altíssima resolução, obtendo também ampliações até 300.000 vezes (DUROWAYE, 2014).

O MEV é uma ferramenta importante para o estudo do mecanismo de dano, com esta ferramenta é possível identificar a interação e adesão entre fibra matriz (MARINUCCI, 2011).

Os mecanismos de danos podem ser:

Fissura na matriz – também conhecida como fissura coesiva ou de ligação na matriz. São fendas ou rachaduras que ocorrem apenas na matriz do compósito;

Ruptura da fibra – corresponde a quebra da fibra e também é conhecida como fratura coesiva ou de ligação na fibra;

Desaderência fibra matriz – ocorrida pela falta de aderência entre fibra e matriz, também conhecida como fratura adesiva (GOMES, 2015).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na primeira etapa para a fabricação das placas compósitas estão dispostos a seguir:

- I. Fibras de juta e fibras de vidro.
- II. Balança;
- III. Resina poliéster isoftálica insaturada (AEROJET);
- IV. Acelerador de cobalto na proporção 1,5 % (v/v);
- V. Iniciador MEK-P (Butanox M-50) utilizado na proporção 1 % (v/v);

A Figura 6 mostra os materiais utilizados nas etapas do processo de fabricação.

Figura 6: Materiais utilizados: (a) Resina polimérica; (b) Acelerador de cobalto; (c) Iniciador de Butanox; (d) Balança; (e) Fibra de juta; (f) Fibra de vidro.



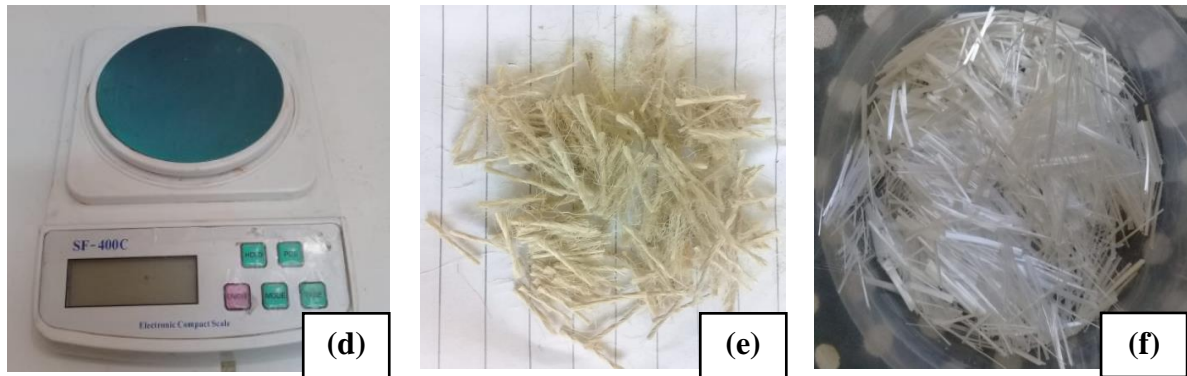
(a)



(b)



(c)



Fonte: Autoria própria, 2018.

### 3.1.1 Processo de obtenção dos materiais

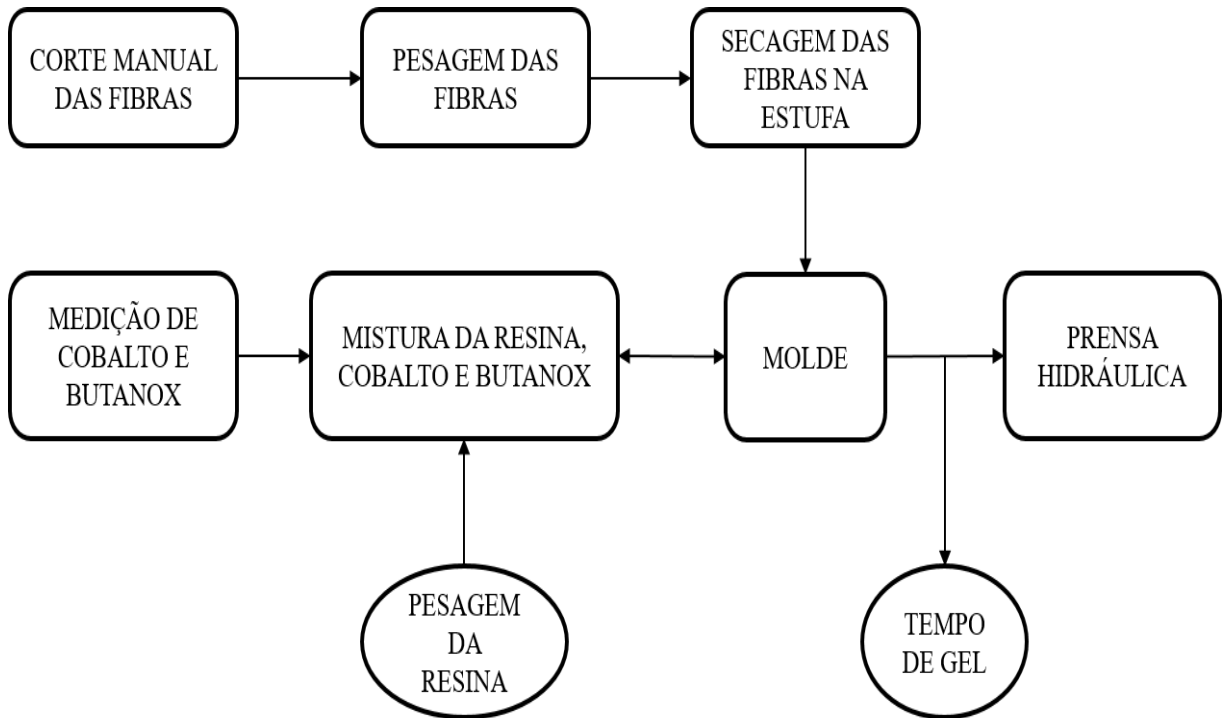
As fibras de juta e vidro foram obtidas no comércio local de Belém-PA. Armazenadas em condições de temperatura e umidade ambiente. Utilizou-se as fibras naturais e sintéticas sem tratamento e cortadas manualmente nos tamanhos de 15, 30 e 45 mm.

A resina, assim como o acelerador de cobalto e o iniciador MEK-P (Butanox M-50), são produzidas pela empresa AEROJET Brasileira de Fiber glass Ltda.

### 3.1.2 Preparação dos compósitos

As fibras de juta e as fibras de vidro foram alinhadas e cortadas manualmente com medidas de 15, 30 e 45 mm e reservadas em local seco, logo após as fibras foram pesadas e seguidas para estufa por 20 min a uma temperatura de 105 °C. A Figura 7 representa o fluxograma onde aparecem as principais etapas da confecção das placas compósitas deste trabalho. Podendo ser com a matriz plena e/ou os compósitos reforçados com fibras de juta ou vidro.

Figura 7: Fluxograma básico do processo de confecção de placas compósitas.



Fonte: Autoria própria, 2018.

### 3.1.3 Fabricação das placas compósitas

Para a segunda etapa do processo de fabricação os materiais utilizados são:

- I. Desmoldante (Desmoljet);
- II. Molde de aço inox;
- III. Máquina de corte EINHELL, modelo BT-TC-9005.

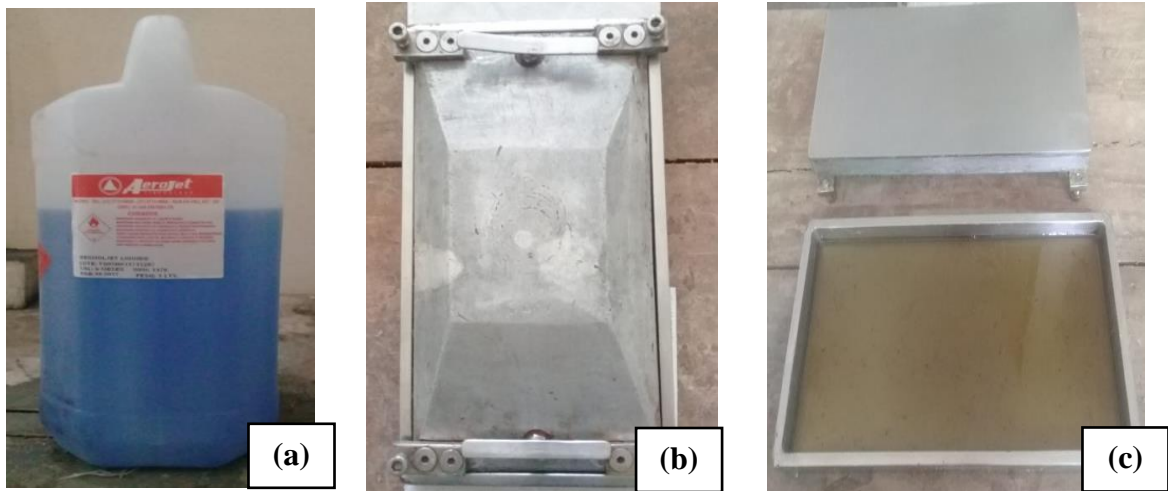
Utilizou-se um molde de aço inox nas dimensões de 30x17x5 cm, e o primeiro passo para a fabricação é a preparação do molde que consiste na limpeza e aplicação de desmoldante para facilitar a desmoldagem da placa.

Calculou-se o volume do molde e estipulou-se as frações mássicas para a pesquisa, que alcançaram o valor padrão de corpos de prova em ensaios de tração e flexão.

Utilizou-se uma resina poliéster isoftálica por apresentar boas características térmicas e químicas, além de uma maior resistência mecânica ao material.

As frações mássicas das fibras de juta e vidro correspondem a 2,5 e 5 %. As porcentagens foram obtidas por meio de experimentos, sendo este último valor o máximo alcançado para acomodação, disposição e impregnação total das fibras randomicamente dentro do compósito. A Figura 8 mostra o desmoldante e o molde que foram utilizados.

Figura 8: Materiais para a confecção das placas: (a) Desmoldante; (b) Molde fechado; (c) Molde aberto.



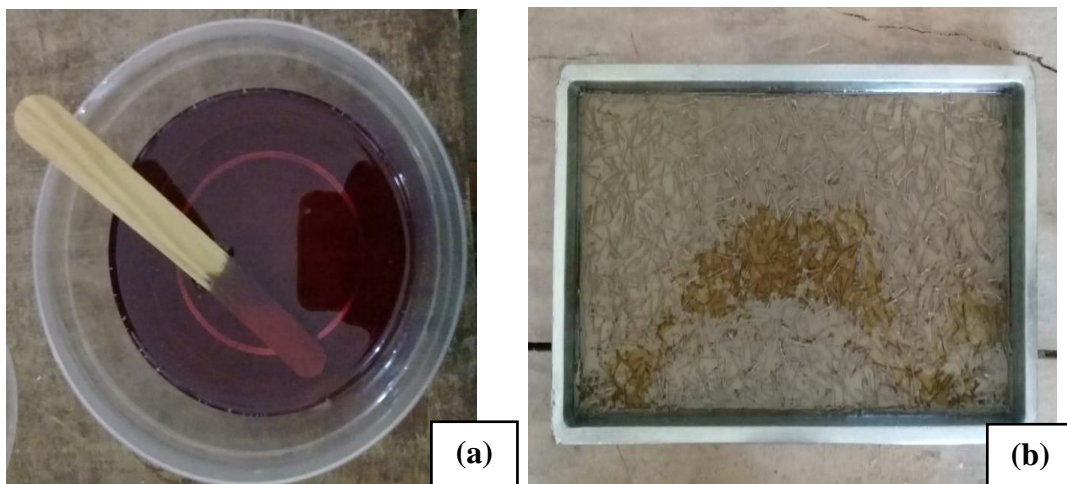
Fonte: Autoria própria, 2018.

Medindo-se o cobalto o volume referente a 1,5 % da massa da resina e de iniciador, o volume referente a 1 % da massa de resina. Homogeneizou-se a resina, o cobalto e o iniciador, nessa ordem.

As fibras são despejadas randomicamente sobre o molde, em seguida é despejado a resina previamente acelerada e catalisada sobre o molde, assentando-se as fibras e removendo-se as bolhas de ar, impregnando-as de acordo com o processo manual *hand lay-up*.

Determinou-se então o tempo de gel e a cura das peças foi realizada em temperatura ambiente. A Figura 9 a seguir mostram as etapas do processo de fabricação das placas compósitas.

Figura 9: Etapas do processo de fabricação: (a) Mistura do butanox com o iniciador; (b) Fibras com o butanox e o iniciador.



Fonte: Autoria própria, 2018.

O tempo de gel dos compósitos variaram entre 8 a 10 minutos. Após o tempo de gel iniciou a prensagem, pelo método de moldagem por compressão. A prensagem teve pressão de 2,5 toneladas, e aguardou-se um tempo de 20 minutos na prensa. A Figura 10 mostra a prensa utilizada.

Figura 10: Prensa hidráulica com molde.



Fonte: Autoria própria, 2018.

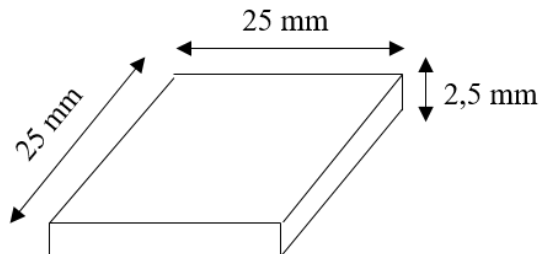
A placa foi retirada do molde, catalogada e colocada sobre uma superfície lisa com um peso padrão sobre a placa para mantê-las linear, ficando estática por 24 h até a finalização da sua cura.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

### 3.2.1 Ensaios físicos

A partir dos corpos de provas de tração foram fabricados os corpos de prova para os ensaios físicos, tais como absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente, seguindo a norma NBR 12766. As medidas de espessura ( $e$ ), largura ( $l$ ) e comprimento ( $c$ ) de cada compósito foram determinadas por um paquímetro. O modelo do corpo de prova é exemplificado na Figura 11.

Figura 11: Exemplificação 3D do corpo de prova para ensaios físicos.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Para realizar o ensaio físico foi necessário deixar os corpos de provas na estufa por 24 h a uma temperatura de 106 °C, para retirar qualquer umidade do material. A estufa utilizada é mostrada na Figura 12.

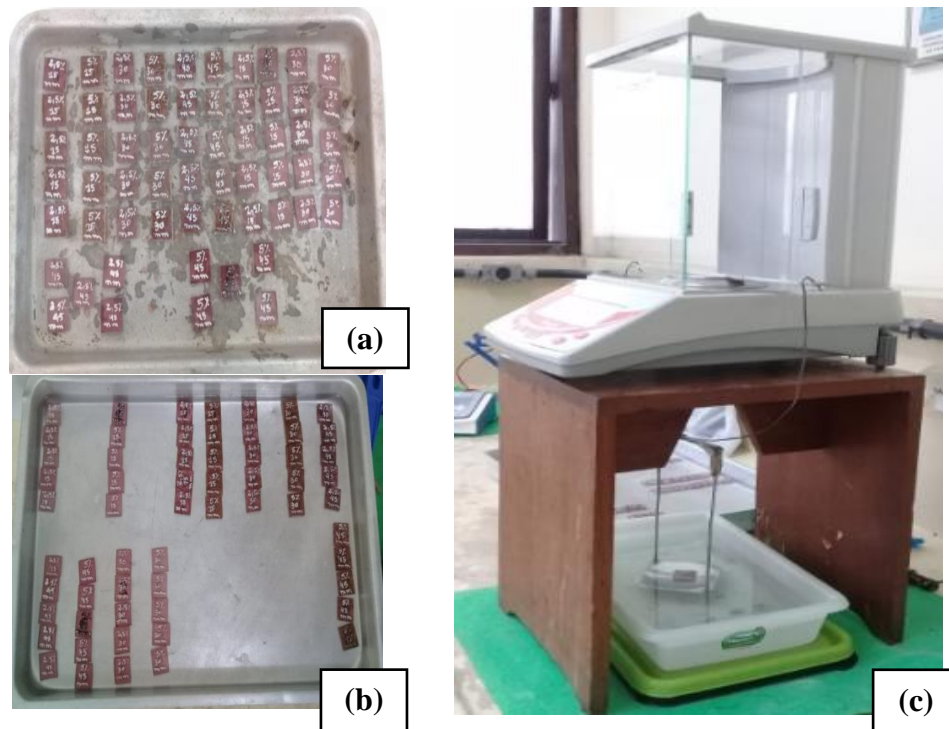
Figura 12: Estufa.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Após as 24 h, levou-se o material para determinar sua massa seca, massa úmida e massa imersa.

Figura 13: Ensaio físico: (a) Massa seca; (b) Massa úmida; (c) Massa imersa.



Fonte: Autoria própria, 2018.

### 3.2.1.1 Massa específica aparente (MEA)

A massa específica aparente (MEA) pode ser determinada por meio do princípio de Arquimedes. Este princípio afirma que um corpo imerso em um fluido sofre um empuxo igual ao peso do volume de fluido deslocado pelo corpo. A massa específica do corpo é igual à razão entre seu peso e o empuxo do fluido sobre ele.

Para a determinação da massa específica foram utilizadas cinco amostras de compósitos de cada composição e tamanhos, adaptadas à norma NBR12766, as quais foram pesadas em balança de precisão e seguidas para ensaio. Desta forma, a massa específica aparente pôde ser calculada a partir da Equação 6.

$$MEA = \frac{m_s}{m_u - m_i} (g/cm^3) \quad (6)$$

Onde,  $m_s$  é a massa seca do corpo de prova,  $m_u$  é a massa úmida do corpo de prova e  $m_i$  é a massa imersa do corpo de prova.

### 3.2.1.2 Absorção de água (AA)

A absorção de água (AA) de um material é dada pelo percentual de água absorvida por um corpo de prova após a imersão, conforme descrito para a determinação da massa específica aparente.

O estudo de absorção de água dos compósitos foi realizado de acordo com a norma NBR 12766. Os corpos de prova foram medidos, pesados e imersos em água destilada, à temperatura ambiente por 24 h. Após esse tempo os compósitos foram pesados em uma balança de precisão. A seguir a Equação 7 que determina esse ensaio.

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

### 3.2.1.3 Porosidade aparente (PA)

A porosidade aparente (PA) é uma relação entre o volume de poros e o volume externo do corpo de prova e é estabelecido pelo princípio de Arquimedes, assim como para a determinação da massa específica aparente.

A Equação 8 estabelece a porosidade aparente em função da medição das massas do corpo de prova seco, úmido e imerso em água.

$$PA = \frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \times 100 (\%) \quad (8)$$

## 3.2.2 Tração

As placas foram marcadas para corte e catalogadas com identificação nas duas extremidades das amostras. A marcação foi feita segundo a norma ASTM 3039, padrão de ensaios de Tração. A Figura 14 mostra a serra utilizada para os cortes da placa compósita.

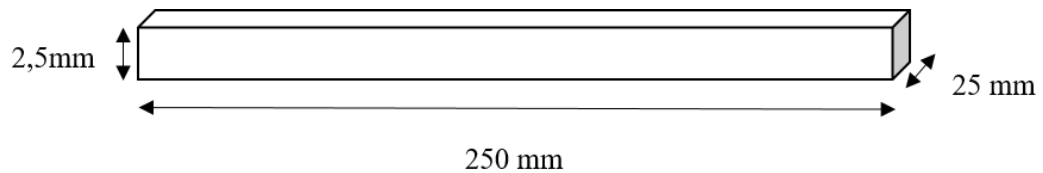
Figura 14: Serra de corte.



Fonte: Autorial própria, 2018.

Os corpos de prova do ensaio de resistência a tração seguiram a norma ASTM D 3039 nos quais foram cortados e preparados para o ensaio. O corpo de prova de tração está exemplificado na Figura 15.

Figura 15: Exemplificação 3D do corpo de prova de resistência a tração.



Fonte: Autorial própria, 2018.

Os ensaios de resistência a tração foram realizados em uma máquina modelo KE 2000 MP da marca KRATOS, sendo utilizada célula de carga de 5 kN e velocidade de ensaio de 2 mm/mim.

A Figura 16 mostra os corpos de prova para ensaio de tração, cortadas segundo a norma ASTM 3039.

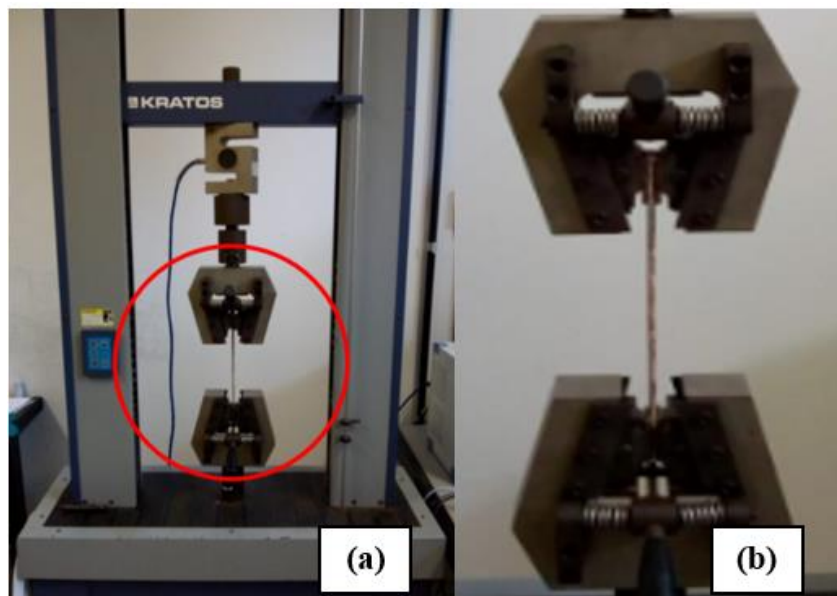
Figura 16: Corpos de prova de compósitos com fibras de juta.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Executou-se os ensaios em máquina de ensaio universal KRATOS, modelo KE 2000 MP, com célula de carga de 5 kN, e velocidade de aplicação de força no ensaio de 2 mm/min, mostrada a Figura 17. Todos os cinco corpos de provas adquiridos em cada placa foram submetidos a ensaio.

Figura 17: Máquina de ensaio de Tração em operação: (a) Vista total frontal de uma máquina de ensaio de tração; (b) vista frontal da máquina na área de engate do corpo de prova destacada num círculo vermelho em (a).

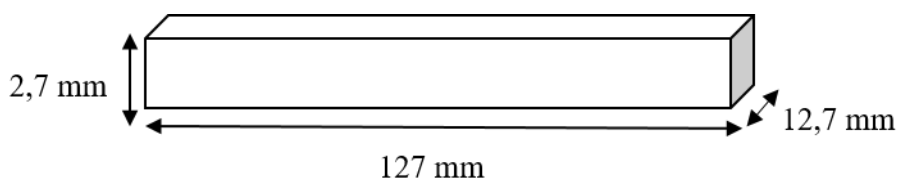


Fonte: Autoria própria, 2018.

### 3.2.3 Flexão

Os corpos de prova para ensaio de flexão seguiram a norma ASTM D 790. Para o corte do material foi utilizado um cortador serra mármore e para o acabamento foi utilizada uma mini retífica de marca Dremell presente na Usina de materiais do Laboratório de Engenharia Química. Os corpos de prova para o ensaio de flexão foram tirados a partir da placa compósita fabricada e suas medidas foram conforme a Figura 18.

Figura 18: Exemplificação 3D do corpo de prova de flexão.



Fonte: Autoria própria, 2018.

O equipamento que foi usado é uma máquina de ensaio universal modelo WDW 100E da AROTEC, pertencente ao Instituto Federal do Pará, IFPA com célula de carga com capacidade de 5 kN. O teste foi conduzido a uma velocidade de deslocamento das garras de 2 mm/min. A Figura 19 mostra os corpos de prova para ensaio de flexão, cortadas segundo a norma ASTM D 790.



Figura 19: Corpos de provas para ensaio de flexão.

Fonte: Autoria própria, 2018.

Este ensaio consistiu na aplicação de uma carga no centro de um corpo de prova específico, onde foi padronizado e apoiado em dois pontos. A carga aplicada aumentou gradativamente até a ruptura do corpo de prova. A Figura 20 mostra a máquina onde foram feitos os ensaios de flexão.

Figura 20: Máquina de ensaio de flexão.



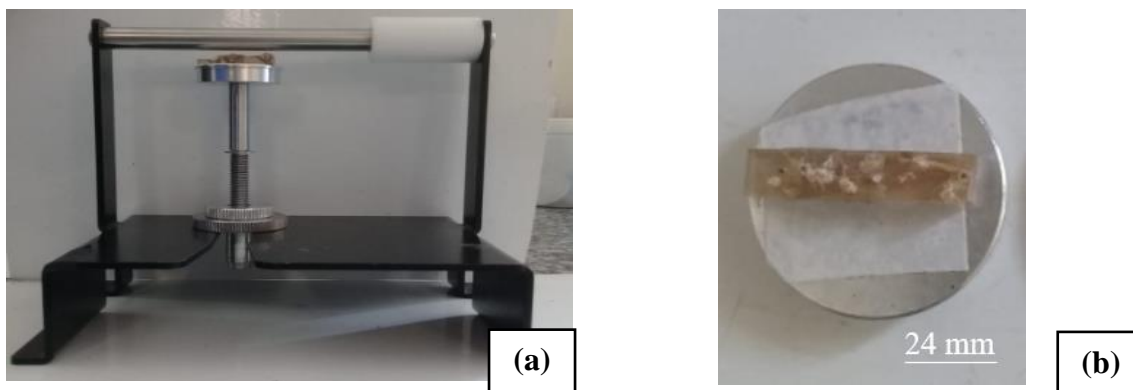
Fonte: Autoria própria, 2018.

O valor da carga aplicada versus o deslocamento do ponto central foi a resposta do ensaio. Os principais resultados do ensaio de flexão foram: módulo de elasticidade, tensão à flexão, deformação e flecha.

### 3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os compósitos foram inicialmente cortados. Logo após, a montagem da amostra foi feita sobre um suporte metálico, com a utilização de fitas dupla-face de carbono. A Figura 21 apresenta os procedimentos utilizados no ensaio de MEV.

Figura 21: Material para ensaio de MEV: (a) Amostra no suporte metálico; (b) Amostra frontal.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A análise microscópica foi realizada na Universidade Federal do Pará no laboratório do programa de pós-graduação em Engenharia Química (PPGEQ), por um Microscópio Eletrônico de Varredura HITACHI TM 3000 utilizando voltagem de aceleração do feixe de elétrons de 5 Kv. Onde foi verificado seu aspecto superficial e seção transversal a partir de amostras ensaiadas em tração e preparadas segundo os procedimentos metalográficos. A Figura 22 mostra o microscópio onde foram feitas as análises do MEV.

Figura 22: Microscópio eletrônico por varredura.



Fonte: Autoria própria, 2018.

### **3.2.5 Análise estatística**

Os resultados da interação entre o teor de fibras e a seu comprimento foram comparados por análise de variância (ANOVA) de fator duplo a 5 % de significância. Quando observada diferença significativa entre os tratamentos foi aplicado o teste de Tukey a 5 % para discriminar as médias que diferiram entre si (ZAR, 1996). A análise dos dados foi realizada utilizando-se o aplicativo estatístico Past3.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios físicos dos compósitos permitiram analisar a incorporação das fibras de juta na matriz, caso tenha influenciado na massa específica, absorção de água e porosidade aparente. A Tabela 1 mostra dados obtidos dos compósitos de juta em relação a matriz plena.

Tabela 1: Resultados dos ensaios físicos para compósitos com fibras de juta.

Composição	Fração Mássica	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	AA (%)	PA (%)
Matriz Plena	0 %	1,00 (±0,005)	0,41 (±0,03)	0,41 (±0,21)
J15	2,5 %	1,20 (±0,003)	0,61 (±0,05)	0,74 (±0,06)
	5 %	1,21 (±0,001)	0,82 (±0,04)	0,99 (±0,82)
J30	2,5 %	1,20 (±0,001)	0,66 (±0,66)	0,79 (±0,78)
	5 %	1,20 (±0,001)	0,89 (±0,06)	1,07 (±0,05)
J45	2,5 %	1,20 (±0,001)	0,58 (±0,58)	0,69 (±0,69)
	5 %	1,20 (±0,001)	0,99 (±0,10)	1,18 (±0,12)

Fonte: Autoria própria, 2018.

Analisando a Tabela 1, os resultados demonstram que na massa específica aparente (MEA), ocorre um aumento efetivo com a inserção das fibras, não alterando de acordo com os comprimentos das fibras. Quando observa-se a absorção de água (AA) pode-se identificar um aumento da absorção de água de acordo com o tamanho e a composição da fibra, já que se tratando de materiais lignocelulósicos, eles possuem uma tendência de absorver umidade, visto que estes são constituídos principalmente por celulose, lignina e hemicelulose (MOHANTY, 2001). Já nos resultados de porosidade aparente (PA) ocorreu um aumento comparado com a matriz plena. O maior teor de vazios pode levar a uma maior absorção de umidade dos compósitos, pois os poros da superfície de corte dos corpos de prova facilitam a entrada da umidade para o interior do compósito, alojando-se nas interfaces fibra/matriz (SAHEB, 1999).

A Tabela 2 mostra os resultados de massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente nos compósitos com inserção de fibra de vidro.

Tabela 2: Resultados dos ensaios físicos para compósitos com fibras de vidro.

<b>Composição</b>	<b>Fração Mássica</b>	<b>MEA (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>AA (%)</b>	<b>PA (%)</b>
Matriz Plena	0 %	1,00 ( $\pm 0,005$ )	0,41 ( $\pm 0,03$ )	0,41 ( $\pm 0,21$ )
V15	2,5 %	1,22 ( $\pm 0,004$ )	0,39 ( $\pm 0,04$ )	0,48 ( $\pm 0,06$ )
	5 %	1,24 ( $\pm 0,011$ )	0,39 ( $\pm 0,17$ )	0,48 ( $\pm 0,21$ )
V30	2,5 %	1,23 ( $\pm 0,010$ )	0,34 ( $\pm 0,14$ )	0,22 ( $\pm 0,01$ )
	5 %	1,24 ( $\pm 0,007$ )	0,35 ( $\pm 0,28$ )	0,43 ( $\pm 0,34$ )
V45	2,5 %	1,22 ( $\pm 0,005$ )	0,32 ( $\pm 0,13$ )	0,39 ( $\pm 0,16$ )
	5 %	1,24 ( $\pm 0,012$ )	0,42 ( $\pm 0,13$ )	0,52 ( $\pm 0,16$ )

Fonte: Autoria própria, 2018.

A Tabela 2 mostrou que os compósitos com fibras de vidro tiveram um resultado inferior se tratando da absorção de água, verificando-se uma redução de defeitos no compósito fabricado, conseqüentemente a porosidade aparente em algumas composições se deu inferior também, como no compósito de 2,5 % de 30 mm e 2,5 % de 45 mm, respectivamente. Isto ocorre pelo fato de ter menos vazios no compósito fabricado. Se tratando da massa específica houve um aumento efetivo, o que pode ser explicado pelo aumento da massa específica das fibras no compósito (BORGES, 2018).

## 4.2 TRAÇÃO

### 4.2.1 Compósito reforçado com fibra de juta

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos nos ensaios de tração de compósitos reforçados com fibras de juta de 15 mm, 30 mm e 45 mm comparando-os com a matriz plena.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de tração de compósitos reforçados com fibras de juta.

Composição	Fração	Resist. Tração (MPa)	Alongamento	Mód. Elast. (GPa)
	Mássica	Desvio Padrão	(mm)	
Matriz Plena	0 %	9,38 ( $\pm 1,51$ )	4,17	0,55
J15	2,5 %	13,52 ( $\pm 1,66$ )	2,35	2,62
	5 %	11,00 ( $\pm 0,81$ )	2,20	2,62
J30	2,5 %	9,70 ( $\pm 3,83$ )	2,08	1,62
	5 %	13,36 ( $\pm 1,98$ )	2,33	2,46
J45	2,5 %	11,68 ( $\pm 1,20$ )	2,28	2,89
	5 %	9,55 ( $\pm 0,88$ )	2,12	1,63

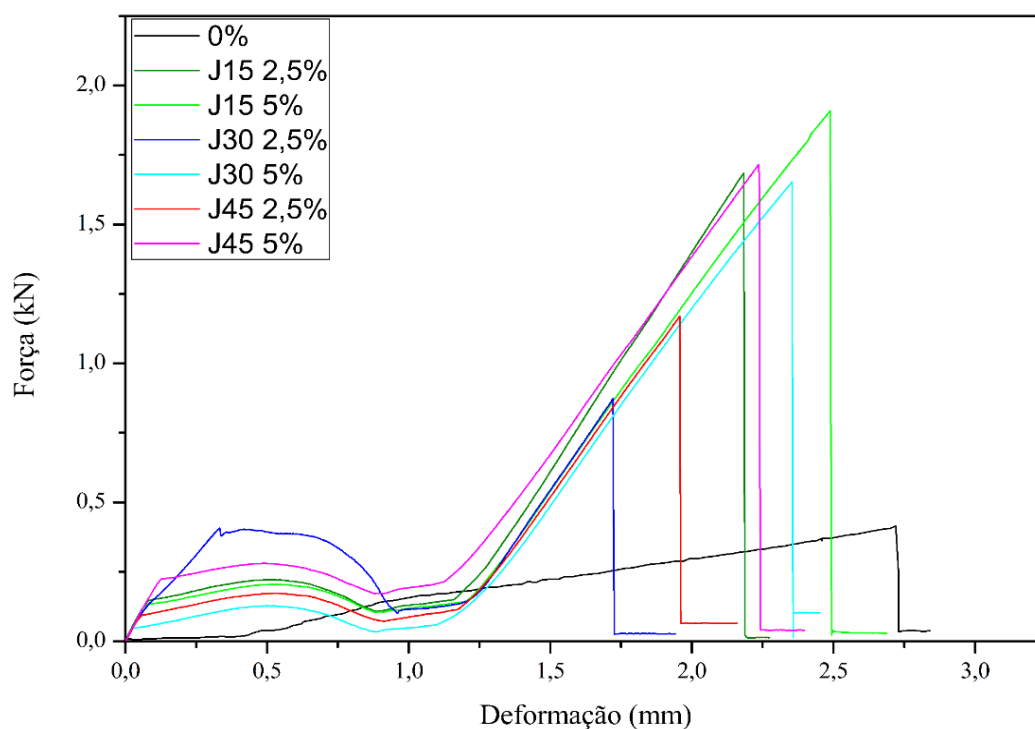
Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Tabela 3, pode-se observar que todas as composições de fibra de juta obtiveram valor de resistência à tração maior quando comparado a matriz plena. A proporção de 2,5 % de 15 mm obteve um aumento de 44,14 % e a proporção de 5 % com 30 mm obteve um aumento 42,43 %. Resultado significativo na resistência a tração dos compósitos reforçados com fibras de juta.

O módulo de elasticidade indica um aumento da rigidez do material, observou-se então que as fibras de juta aumentaram 425,45 % sua rigidez em relação a matriz plena, fazendo deste material uma carga de reforço ou agente de reforço (LOPES, 2011).

A Figura 23 mostrará o gráfico representativo de tração da força x deformação dos compósitos com fibra de juta comparando-a com a matriz plena.

Figura 23: Gráfico força x deformação da matriz plena e dos compósitos com fibras de juta em tração.



Fonte: Autoria própria, 2018.

De acordo com a Figura 23 observou-se que após a resistência máxima dos compósitos com fibra de juta, houve uma ruptura brusca, o que caracteriza um comportamento frágil (LOPES, 2011).

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) foi realizado comparações entre o material com o intuito de evidenciar diferenças significativas na resistência do ensaio de tração com a inserção de fibra de juta.

A Tabela 4 analisou os resultados de resistência a tração, onde indica um aumento na resistência dos compósitos com a incorporação das fibras de juta.

Para a avaliação das diferenças entre os compósitos produzidos com fibra de juta, foi realizada a ANOVA de dois fatores, conforme representado na tabela 4, onde é analisada o teor de fibras, o comprimento e a interação entre os dois fatores.

Tabela 4: Dados gerados pela ANOVA de dois fatores para ensaio de tração dos compósitos com a inserção de fibras de Juta.

<b>Fator</b>	<b>P-Valor</b>
% FIBRAS	0,5725
COMPRIMENTO	0,069
<b>INTERAÇÃO</b>	<b>0,0009</b>

Fonte: Autoria própria, 2018.

A análise comparativa entre o teor de fibra e o comprimento mostrou-se significativa apenas para a interação entre os componentes.

A Tabela 5 apresenta a análise comparativa de médias para a determinação das frações estatisticamente diferentes.

Tabela 5: Análise comparativa das frações de fibra de juta para o ensaio de tração.

<b>Grupos comparativos</b>		<b>P</b>
2,5-15	2,5-30	0,06971
2,5-15	2,5-45	0,7291
2,5-15	5-15	0,2898
2,5-30	2,5-45	0,5423
2,5-30	5-30	0,06971
2,5-45	5-45	0,4503
5-15	5-30	0,2898
5-15	5-45	0,8826
5-30	5-45	0,05028

Fonte: Autoria própria, 2018.

De acordo com a Tabela 5, nota-se que não houveram diferenças estatisticamente significativas entre os pares analisados.

#### 4.2.2 Compósito reforçado com 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 do ensaio de tração de compósitos com reforço de fibras de vidro.

Composição	Fração	Resist. Tração (MPa)	Alongamento	Mód. Elast. (GPa)
	Mássica	Desvio Padrão	(mm)	
Matriz Plena	0 %	9,38 ( $\pm 1,51$ )	4,17	0,55
V15	2,5 %	11,88 ( $\pm 0,88$ )	2,37	0,85
	5 %	12,97 ( $\pm 2,04$ )	2,17	0,75
V30	2,5 %	8,65 ( $\pm 1,74$ )	2,15	1,47
	5 %	12,13 ( $\pm 2,34$ )	2,44	1,70
V45	2,5 %	13,59 ( $\pm 2,03$ )	2,32	1,36
	5 %	10,12 ( $\pm 1,80$ )	2,46	1,85

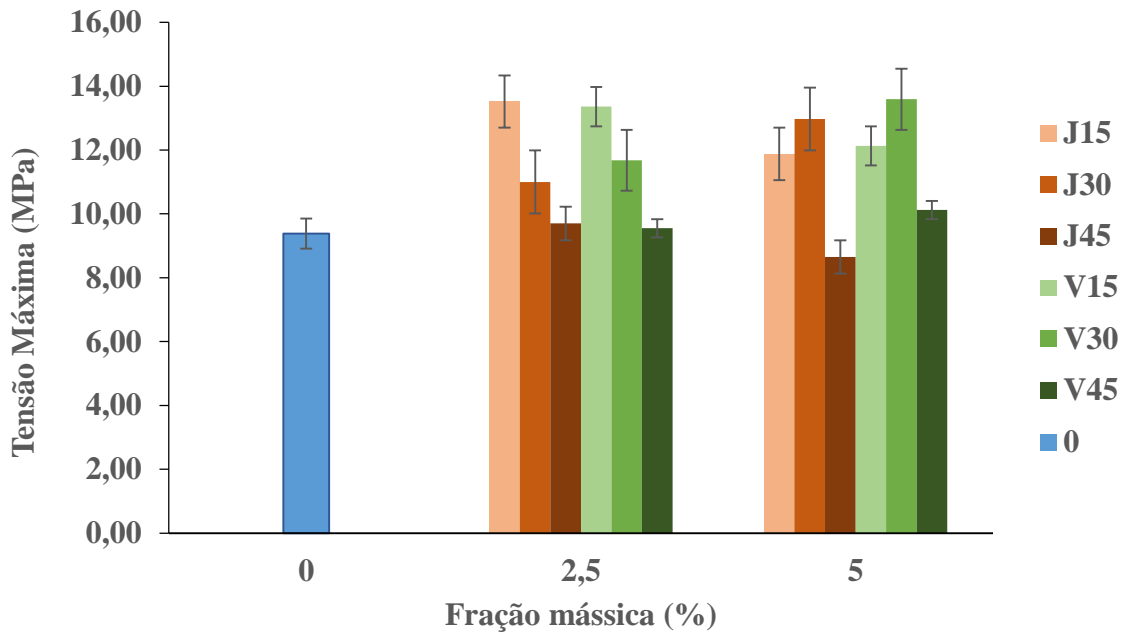
Fonte: Autoria própria, 2018.

Observar-se que as composições de fibra de vidro obtiveram valor de resistência à tração maior quando comparado a matriz plena, chegando a 44,88 % o seu maior valor com a composição de 2,5 % de 45 mm, exceto pela composição de 2,5 % de 30 mm que teve seu resultado 7,78 % inferior ao da matriz plena. Esse resultado pode estar relacionado a algum defeito na fabricação do compósito.

O módulo de elasticidade indica que houve um aumento da rigidez do material de 236,36 % comparado a matriz plena, fazendo deste material uma carga de reforço.

A Figura 24 ilustra o gráfico de barra comparativo de ambos compósitos de matriz plena e de compósitos com adição de fibras de juta e fibras de vidro nas proporções de 15 mm, 30 mm e 45 mm nas frações de 2,5 % e 5 %.

Figura 24: Gráfico comparativo da matriz plena e dos compósitos com fibras de juta e vidro.

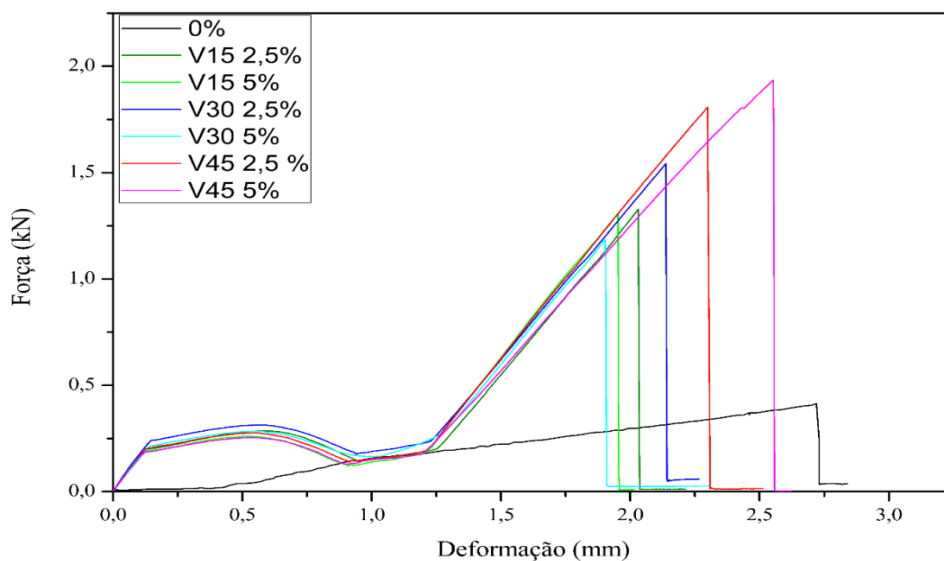


Fonte: Autoria própria, 2018.

Observa-se que de acordo com o gráfico os compósitos com as fibras de juta e os compósitos com as fibras de vidro nos comprimentos de 45 mm de ambas composições tiveram uma tensão inferior a matriz plena.

A Figura 25 aborda o gráfico representativo de força x deformação das fibras de vidro comparando-o com a matriz plena.

Figura 25: Gráfico força x deformação da matriz plena e dos compósitos com fibras de vidro em tração.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Observa-se que tanto o gráfico representativo de força x deformação dos compósitos com fibra de juta, quanto os compósitos com fibras de vidro correspondem a um comportamento frágil, onde a curva de flexão é linear e o regime é elástico (FERREIRA, 2009). O compósito ao atingir o ponto máximo de resistência se rompe e imediatamente ocorre uma queda de quase toda a carga aplicada.

Para a avaliação das diferenças entre os compósitos produzidos com fibra de vidro, foi realizada a ANOVA de dois fatores, conforme representado na Tabela 7, onde é analisada o teor de fibras, o comprimento e a interação entre os dois fatores.

Tabela 7: Dados gerados pela ANOVA de dois fatores para ensaio de tração dos compósitos com a inserção de fibras de vidro.

<b>Fator</b>	<b>P-Valor</b>
% FIBRAS	0,8473
COMPRIMENTO	0,05305
INTERAÇÃO	<b>0,002371</b>

Fonte: Autoria própria, 2018.

A análise comparativa entre o teor de fibra e o comprimento mostrou-se significativa apenas para a interação entre os componentes.

A Tabela 8 apresenta a análise comparativa de médias para a determinação das frações estatisticamente diferentes.

Tabela 8: Análise comparativa das frações de fibra vidro no ensaio de tração.

<b>Grupos comparativos</b>		<b>P</b>
2,5-15	2,5-30	0,0592
2,5-15	2,5-45	0,7622
2,5-15	5-15	0,986
2,5-30	2,5-45	<b>0,003887</b>
2,5-30	5-30	0,08391
2,5-45	5-45	0,0592
5-15	5-30	0,9601
5-15	5-45	0,2166
5-30	5-45	0,5615

Fonte: Autoria própria, 2018.

De acordo com a Tabela 8, nota-se que houve diferença estatisticamente significativa entre os pares analisados na fração 2,5 % de 30 mm e 2,5 % de 45 mm.

### 4.3 FLEXÃO

#### 4.3.1 Compósito reforçado com fibra de juta

O estudo da resistência à flexão dos compósitos permitiu avaliar o comportamento do material de resistir à força de dobramento aplicada perpendicularmente ao seu eixo longitudinal.

Analisando-se as propriedades mecânicas em flexão a Tabela 9 observa-se os compósitos contendo fibra de juta.

Tabela 9: Resultados do ensaio de flexão de compósitos de fibras de juta.

Composição	Fração	Resist. Flexão (MPa)	Força de	
	Mássica	Desvio Padrão	Ruptura (N)	Mód. Elast. (GPa)
Matriz Plena	0 %	63,05 ( $\pm 9,06$ )	130,11	2,16
J15	2,5 %	52,51 ( $\pm 0,01$ )	538,82	1,65
	5 %	35,91 ( $\pm 0,01$ )	416,01	0,97
J30	2,5 %	53,77 ( $\pm 0,01$ )	616,33	1,27
	5 %	37,16 ( $\pm 0,02$ )	393,04	1,08
J45	2,5 %	52,91 ( $\pm 0,02$ )	603,02	1,42
	5 %	38,27 ( $\pm 0,01$ )	391,34	1,03

Fonte: Autoria própria, 2018.

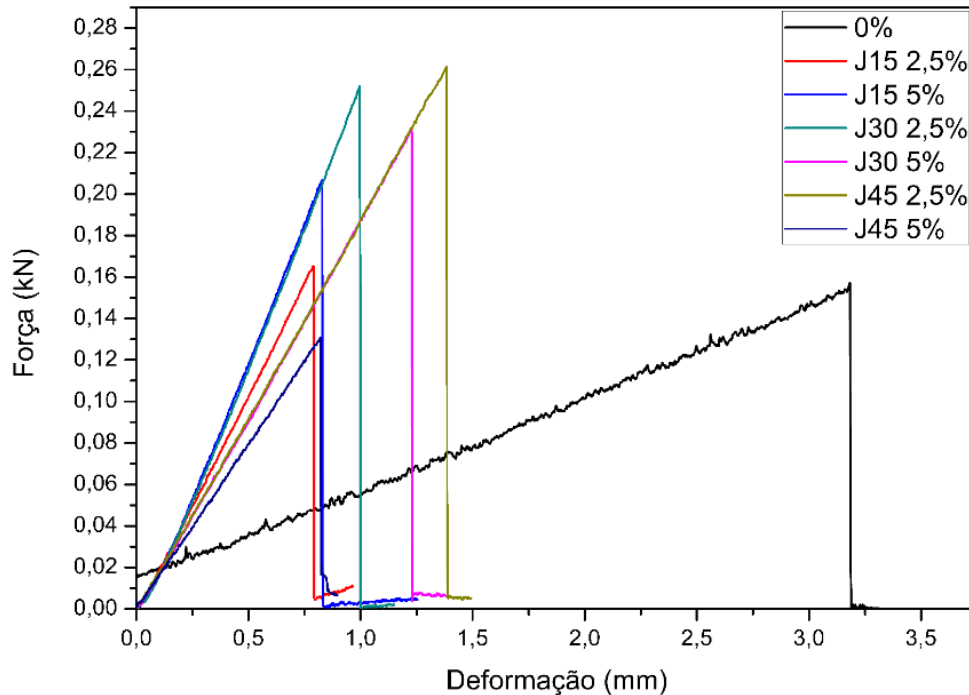
De acordo com a Tabela 9 pode-se observar que todas as composições contendo fibras de juta tiveram sua resistência à flexão inferior a matriz plena, chegando a 43,05 % o valor de 5 % de 15 mm. É importante mencionar que os valores obtidos podem estar relacionados a uma baixa adesão das fibras à resina.

O módulo de elasticidade se mostrou inferior ao da matriz plena. O comportamento do módulo de elasticidade ocorre, em razão de essas frações de volume de fibras são difíceis de

serem processadas para garantir uma estrutura composta sem poros e falhas (AGARWAL e BROUNTMAN, 1990), tornando este material como carga de enchimento.

A Figura 26 mostra o gráfico representativo do ensaio de flexão da força x deformação do compósito com fibra de juta comparando-a com a matriz plena.

Figura 26: Gráfico força x deformação da matriz plena e dos compósitos com fibras de juta em flexão.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Observa-se que os compósitos com fibra de juta tiveram uma ruptura brusca e com uma deformação inferior comparada a da matriz plena, que teve um deslocamento maior e uma menor força de ruptura, isso é comum em materiais frágeis (LOPES, 2011).

A Tabela 10 apresenta o resultado do ensaio de flexão para a matriz plena e os compósitos com incorporação de fibra de juta em diferentes percentuais e comprimentos.

A ANOVA de dois fatores realizada para a avaliação das diferenças produzidas com fibras de juta, está representada na Tabela 10, onde é analisada 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 flexão dos compósitos com a inserção de fibras de juta.

<b>Fator</b>	<b>P-Valor</b>
% FIBRAS	0,107
COMPRIMENTO	0,3153
<b>INTERAÇÃO</b>	<b>0,0001232</b>

Fonte: Autoria própria, 2018.

A análise comparativa entre o teor de fibra e o comprimento mostrou-se estatisticamente significativa apenas para a interação entre os componentes.

A Tabela 11 apresenta a análise comparativa de médias para a determinação das frações estatisticamente diferentes.

Tabela 11: Análise comparativa entre as frações de juta no ensaio de flexão.

<b>Grupos comparativos</b>		<b>P</b>
2,5-15	2,5-30	0,118
2,5-15	2,5-45	0,3385
2,5-15	5-15	0,8738
2,5-30	2,5-45	0,9714
2,5-30	5-30	<b>0,0003874</b>
2,5-45	5-45	0,05289
5-15	5-30	0,978
5-15	5-45	1
5-30	5-45	0,9851

Fonte: Autoria própria, 2018.

A Tabela 11 mostra que houve diferença estatisticamente significativa entre os pares analisados na composição 2,5 % de 30 mm e 5 % de 30 mm.

### 4.3.2 Compósito reforçado com fibras de vidro

A Tabela 12 analisa as propriedades mecânicas de flexão dos compósitos com as diferentes fibras de vidro e matriz plena.

Tabela 12: Resultados do ensaio de flexão de compósitos de fibras de juta.

<b>Composição</b>	<b>Fração Mássica</b>	<b>Resist. Flexão (MPa) Desvio Padrão</b>	<b>Força de Ruptura (N)</b>	<b>Mód. Elast. (GPa)</b>
<b>Matriz Plena</b>	0 %	63,05 ( $\pm 9,06$ )	130,11	2,16
<b>V15</b>	2,5 %	59,82 ( $\pm 0,03$ )	603,13	1,42
	5 %	44,17 ( $\pm 0,02$ )	441,71	0,97
<b>V30</b>	2,5 %	51,95 ( $\pm 0,03$ )	434,42	1,90
	5 %	69,46 ( $\pm 0,02$ )	601,40	1,46
<b>V45</b>	2,5 %	56,89 ( $\pm 0,02$ )	494,13	1,08
	5 %	60,63 ( $\pm 0,02$ )	556,91	1,91

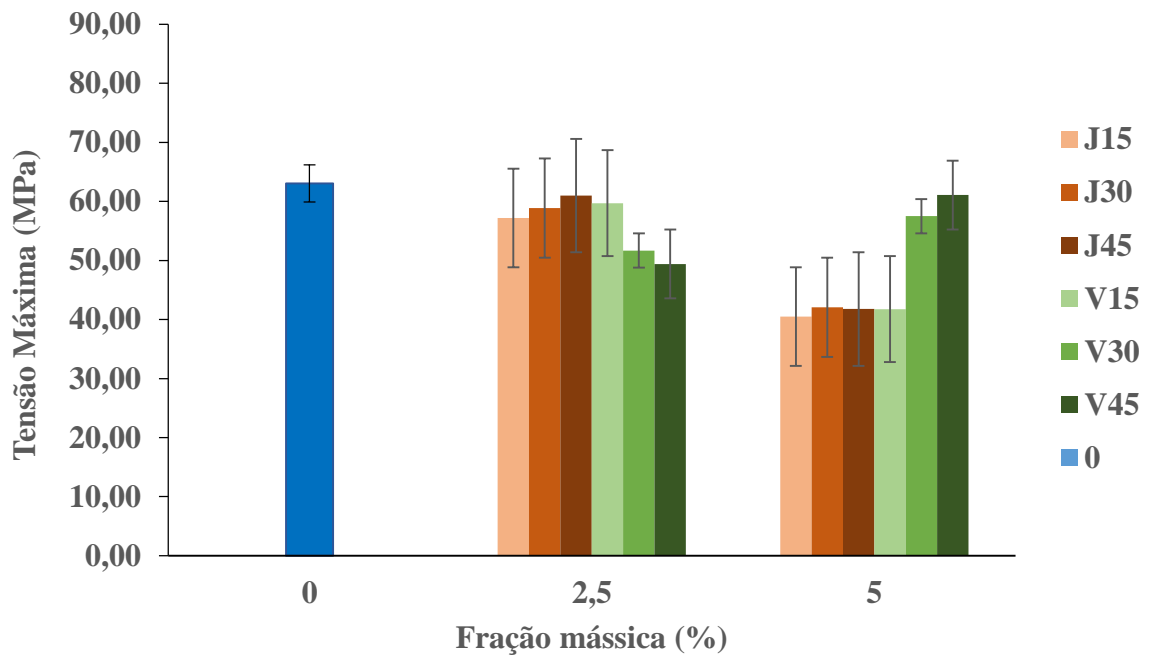
Fonte: Autoria própria, 2018.

Observa-se que a maioria dos compósitos de fibra de vidro estão com seus resultados inferiores ao da matriz plena, exceto o compósito de 5 % de 30 mm, pois este possui um resultado superior à 10,16 % ao da matriz plena.

Os módulos de elasticidade de todas as composições de fibra de vidro tiveram valores inferiores comparados com o da matriz plena, segundo Agarwal e Broutman (1990) essa característica ocorre pois as frações de volume das fibras são difíceis de serem processadas para garantir uma estrutura sem defeitos.

A Figura 27 representa o gráfico de barra comparativo de ambos compósitos de matriz plena e de compósitos com adição de fibras de juta e fibras de vidro nas proporções de 15 mm, 30 mm e 45 mm nas frações de 2,5 % e 5 %.

Figura 27: Gráfico comparativo da matriz plena e dos compósitos com fibras de juta e vidro em flexão.

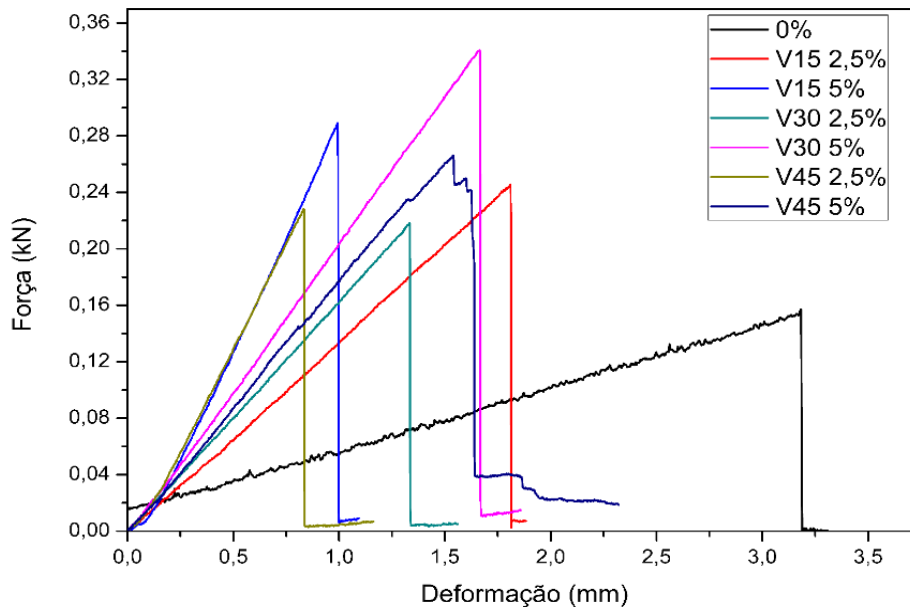


Fonte: Autoria própria, 2018.

Observa-se que de acordo com o gráfico comparativo dos compósitos com fibras de juta e os compósitos com fibras de vidro, tiveram seus comprimentos de tensão de flexão inferior comparados ao da matriz plena.

A Figura 28 aborda o gráfico representativo de força x deformação na flexão das fibras de vidro comparando com a matriz plena.

Figura 28: Gráfico força x deformação da matriz plena e dos compósitos com fibras de vidro em flexão.



Fonte: Autorial própria, 2018.

Observa-se que em todas as composições, exceto nos compósitos com 5 % de 45 mm de fibra de vidro ao se atingir o máximo não ocorre uma fratura súbita e a carga oscila no seu lento decréscimo. Isto se deve à efetiva resistência que o maior número de fibras oferece à propagação de trincas através da frágil matriz plena.

Para a avaliação da ANOVA de dois fatores, foi analisado o teor, o comprimento e a interação das fibras de vidro no ensaio de flexão, onde estão representados na Tabela 13.

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

<b>Fator</b>	<b>P-Valor</b>
% FIBRAS	0,1196
COMPRIMENTO	0,7872
INTERAÇÃO	0,9735

Fonte: Autorial própria, 2018.

A análise comparativa entre o teor de fibra e o comprimento mostrou-se não significativa.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A LITERATURA

A Tabela 14 engloba dados de propriedades mecânicas de alguns compósitos de matrizes poliméricas e fibras naturais encontradas na literatura e dos compósitos estudados neste trabalho. Estes compósitos foram confeccionados em diferentes condições, comprimentos e teores de fibras, de modo que não é possível uma paridade direta entre os mesmos. Entretanto, estes dados foram introduzidos neste trabalho para se ter uma concepção da resistência mecânica de tração destes compósitos estudados por outros pesquisadores. Analisando a Tabela 14, pode-se dizer que o compósito com fibras de juta utilizado neste trabalho apresentou um bom desempenho mecânico.

Tabela 14: Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com fibras naturais encontradas na literatura.

<b>Literatura</b>	<b>Fração Mássica (%)</b>	<b>Resist. á Tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elast. (GPa)</b>
Juta/Poliéster 15 mm	2,5 %	13,52 ( $\pm 1,66$ )	2,62
(Neste trabalho)	5 %	11,00 ( $\pm 0,81$ )	2,62
Juta/Poliéster 30 mm	2,5 %	9,70 ( $\pm 3,83$ )	1,62
(Neste trabalho)	5 %	13,36 ( $\pm 1,98$ )	2,46
Juta/Poliéster 45 mm	2,5 %	11,68 ( $\pm 1,20$ )	2,89
(Neste trabalho)	5 %	9,55 ( $\pm 0,88$ )	1,63
Bananeira/Poliéster (EL BANNA, 2017)	1 %	38,50 ( $\pm 4,25$ )	1,94
Bambu/Poliéster (SANTOS et al., 2017)	3 %	20,56 ( $\pm 1,50$ )	0,86
Juta/Epóxi (SILVA, 2014)	20 %	83,31 ( $\pm 12,85$ )	0,04
Juta/Poliéster (SILVA, 2014)	20 %	68,80 ( $\pm 13,86$ )	0,79

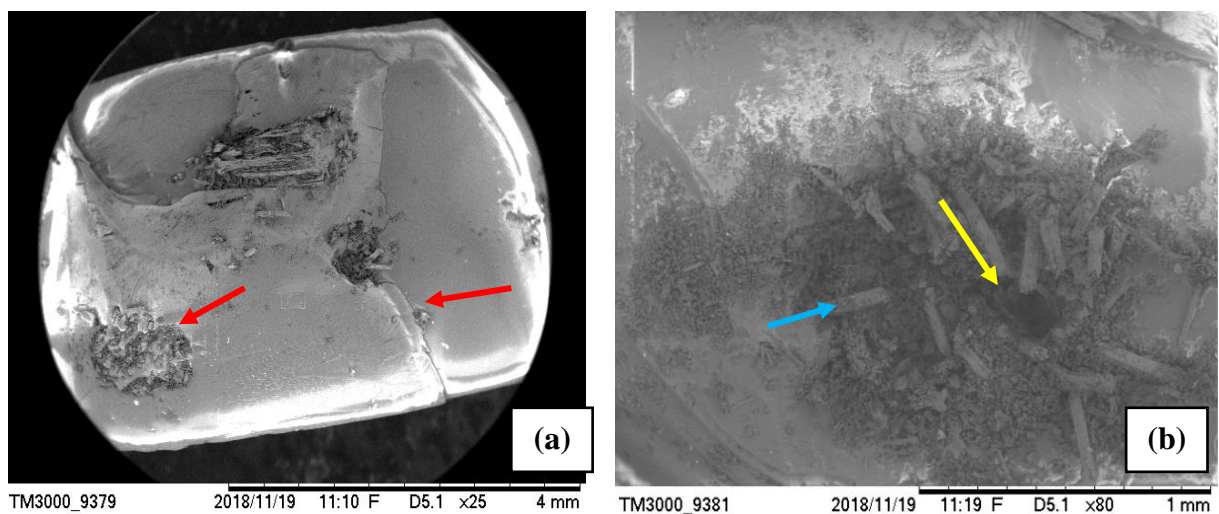
Fonte: Adaptado dos autores citados, 2018.

## 4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

### 4.5.1 Microscopia dos compósitos com fibra de juta

A microscopia eletrônica de varredura foi feita no compósito com inserção de fibra de juta, como mostra a Figura 29, com aumentos de 25x e 80x.

Figura 29: Micrografias obtidas por MEV do compósito com a incorporação de fibras de Juta: (a) Aumento 25x. (b) Aumento 80x.



Fonte: Autoria própria, 2018.

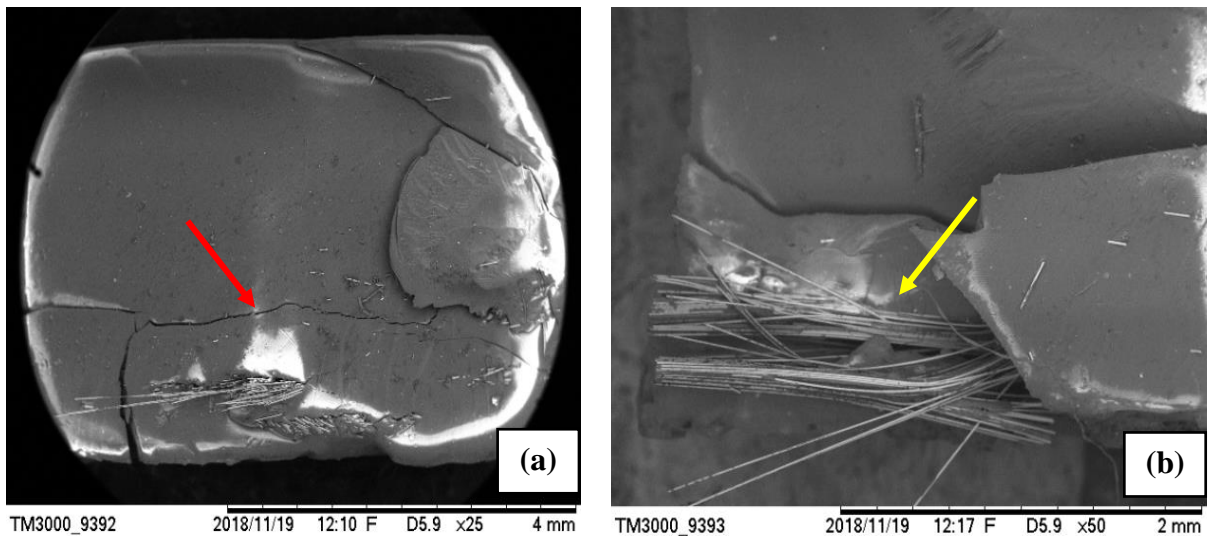
Na superfície da fratura do corpo de prova de matriz polimérica com inserção de fibras de juta de 2,5 % de 15 mm (Figura 29 (a)) foi possível observar que a micrografia mostra uma eficaz adesão obtida entre as fibras e a matriz de poliéster, onde rachaduras propagam preferencialmente (seta vermelha) o sentido da fratura.

Na micrografia (Figura 29 (b)) a vazios na superfície (seta amarela), um fato característico de uma má adesão entre a interface matriz/fibras, onde as trincas se propagam, podendo diminuir a resistência à tração do material compósito (BLEDZKI et al., 1999). Na (seta azul) pode-se observar feixes de fibras de juta.

#### 4.5.2 Microscopia dos compósitos com fibra vidro

A microscopia eletrônica de varredura foi feita no compósito com inserção de fibra de vidro, como mostra a Figura 30, com aumentos de 25x e 50x.

Figura 30: Micrografias obtidas por MEV do compósito com a incorporação de fibras de vidro: (a) Aumento 25x. (b) Aumento 50x.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Pela análise das micrografias de fratura do corpo de prova do compósito de fibra de vidro de 2,5 % 30 mm (Figura 30 (a)), é possível observar pouca dispersão de fibras na matriz, ocasionando uma trinca (seta vermelha) e uma possível propagação na matriz até a região onde se tem uma maior concentração de fibra de vidro, ocasionando o rompimento do material (seta vermelha). Pela micrografia pode se observar que não se tem ocorrência de descolamento da fibra na matriz, sendo um forte indicativo de boa adesão entre matriz e fibra.

A micrografia (Figura 30 (b)) apresenta micro fissuras na matriz, na (seta amarela) apresenta o mecanismo de *Pull-out*.

## 5 CONCLUSÃO

As conclusões apresentadas a seguir têm-se por base responder os objetivos específicos definidos inicialmente.

- Os materiais obtidos apresentaram bom acabamento, poucos defeitos de fabricação, onde se viabiliza a técnica de fabricação.

- Com relação ao ensaio de tração, os compósitos com fibras de juta e fibras de vidro foram superiores em relação a matriz plena. O módulo de elasticidade do compósito com fibras de juta e com fibras de vidro comparados a matriz plena tiveram um aumento, caracterizando ambos materiais como carga de reforço.

- Os ensaios de flexão dos compósitos com fibras de juta e das fibras de vidro tiveram um valor inferior comparado a matriz plena. O módulo de elasticidade da fibra de juta e o da fibra de vidro apresentaram resultados inferiores comparados a matriz plena, caracterizando ambos materiais como carga de enchimento.

- Por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram possíveis a identificação e as características das fraturas nos dois tipos de compósitos fabricados, como a visualização de fibras rompidas em direção a fratura. Observou-se também a ocorrência de microfissuras ao longo da matriz (fraturas coesivas), além de poucos vazios na sua estrutura e mecanismo de *Pull-out* no compósito com fibras de vidro.

- Os materiais estudados neste trabalho se mostraram promissores. Onde os compósitos produzidos e caracterizados apresentaram resultados similares a literatura pesquisada, além da vertente ambiental e econômica serem de cruciais importâncias no paradigma atual para novos materiais.

## **6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar outros tipos de ensaios mecânicos como impacto em compósitos de juta e vidro variando as proporções.
- Fazer tratamento químico superficial nas fibras de juta e vidro.
- Adicionar resíduo industrial a essas fibras como lama vermelha ou cobre.
- Fabricar, utilizando estas fibras de forma ordenadas e analisar o comportamento mecânico dos compósitos.

## REFERÊNCIAS

- AGARWAL, B. D. **Analysis and Performance of Fiber Composites**. New York, 1980.
- AGARWAL, B. D.; BROUNTMAN, L.J. **Analysis and Performance of Fiber Composites**, Nova York: John Wiley & Sons, 1990.
- ALVES, R. T. **Embrapa Cerrados celebra centenário da imigração japonesa**. Cerrados Informa. Planaltina, v. 9, n. 88, p. 2, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 790**. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 3039**. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 1995.
- ANTHONY, K.; ZWEBEN C. (Editors-in-chief); Ramesh Talreja, Jan-Anders E. Månson (Volume Editors) – **Polymer Matrix Composites**, 1ª ed., Elsevier Science Ltd., the Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX51GB, UK, 2000.
- ANTHONY, K.; ZWEBEN, C. (Editors-in-chief); Tsu-Wei Chou (Volume Editor) – **Fiber Reinforcements and General Theory of Composites**, 2ª ed., Elsevier Science Ltd., the Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX51GB, UK, 2000.
- ARAÚJO, E. M. et al. **Aproveitamento de resíduos de fibra de vidro provenientes de indústrias da Paraíba na produção de compósitos**. Universidade Federal da Paraíba, RN, 2003. Disponível em: < [http://www.prac.ufpb.br/anais/Icebeus\\_anais/anais/tecnologia/aproveitamento.pdf](http://www.prac.ufpb.br/anais/Icebeus_anais/anais/tecnologia/aproveitamento.pdf) > Acesso em: 1 de novembro de 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12766: Rochas para revestimento - determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente**. Rio de Janeiro, 1992.
- BARCELLOS, I. O.; SOUZA, A. C.; SELKE, A. E.; **Incorporação de Lodo Industrial em Compósitos de Resina Poliéster**. Departamento de Química, Universidade Regional de Blumenau, SC, 2009. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/po/v19n2/v19n2a14.pdf> > Acesso em: 6 de novembro de 2017.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. Vol. 5. McGraw-Hill, 1982.
- BLEDZKI, A. K., GASSAN, J. **Composites Reinforced With Cellulose-Based Fibers**. Prog. Polym. Sci, v. 4, p. 221-274, 1999.

BORGES, D. R. **Influência do uso de fibras de bambu (*bambusa vulgaris*) tratadas quimicamente em compósitos de polímero termofixo carregadas com resíduo da indústria do beneficiamento de minério de cobre.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (PPGEQ), Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

BRYDSON, J. A. **Plastics Materials**. 7a ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1999.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução.** Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 5ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., 2002.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., 2012.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução;** 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., 2008.

CAMERINI, A. L.; TERRONES, L. A. H.; MONTEIRO, S. N.; **Tenacidade ao impacto de compósitos de tecido de juta reforçando matriz de polietileno reciclado,** Revista matéria, 13ª ed., n. 1, p. 180-185. Caracterização Experimental. Rio de Janeiro: PUC, 1997. p. 472. Tese Doutorado, 2007.

CAVALCANTI, W. S. **Compósitos poliéster/tecidos tramados vegetal- vidro: caracterização mecânica e simulação da sorção de água.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande – Centro de Ciências e Tecnologia. Campina Grande, 2006.

CIEMAT. **Ensaio de Materiais.** 2015. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/ensaio110.shtml>> Acesso em: Agosto de 2018.

COSTA, T. A. V. **Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Reforçados por fibras de Malva e Juta e híbridos de Malva/Juta.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará. Belém, 2014.

CTC. **Companhia Têxtil de Castanhal.** Disponível em: <<http://www.castanhal.com.br/>> Acesso em: Setembro de 2018.

DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica** 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

DUROWAYE, S. I.; LAWAL, G. I.; OLAGBAJU, O. I. **Microstructure and mechanical properties of sisal particles reinforced polypropylene composite.** *International Journal of Composite Material*, 4ª ed. n° 4, p. 190-195, 2014. Disponível em: [http://www.academia.edu/10859628/Microstructure\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Sisal\\_Particles\\_Reinforced\\_Polypropylene\\_Composite](http://www.academia.edu/10859628/Microstructure_and_Mechanical_Properties_of_Sisal_Particles_Reinforced_Polypropylene_Composite)> acesso em: 14 de Janeiro de 2018.

EL BANNA, W. R. **Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (*Musa Sapientum*, Musaceae)** p. 229. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

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

FERREIRA, A. DA S. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras longas de curauá**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) Campos - RJ. Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, p. 190, 2009.

FREITAS, M.; SILVA, A. **Materiais Compósitos**, Apresentação IST. 2006.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2000.

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

HULL, D. **Composites materials**. Cambridge University Press, p. 37-42, New York, 2002.

KICKELBICK, G. **Introduction to hybrid materials**. In: Kichelbick G, editor. Hybrid mater synthcharactappl. John Wiley e Sons; 2007.

LEÃO, M. A. **Fibras de licuri: Um reforço alternativo de compósitos poliméricos**. 2008.

LEVY NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia**. Editora Edgard Blucher Ltda, 2006.

LOPES, F. P. D. **Estudos adicionais dos compósitos poliméricos reforçados por fibras de curauá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, p. 92, 2011.

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

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos**. 1ª Ed. São Paulo; Artiliber Editora Ltda, p. 333, 2011.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R.D. **Composite materials: engenering and Science**, Great Britain, Chapman & Hall, p. 470, 1994.

MOHANTY J. **Educational Technology**, Publish by Rajouri garden New Delhi, 2001.

MOREIRA, A. M. **Materiais de Construção I**, Apontamentos Instituto Politécnico de Tomar. 2008.

MOURA, M. F. S. F DE; MORAIS, A. B. DE; MAGALHÃES, A. G. DE. **Materiais compósitos – Materiais, fabrico e comportamento mecânico**, Publindústria, Produção de comunicação Lda. 2011.

ORTH, C. M.; BALDIN, N.; ZANOTELLI, C. T. **Implicações do processo de fabricação do compósito plástico reforçado com fibra de vidro sobre o meio ambiente e a saúde do trabalhador: o caso da indústria automobilística.** Revista Produção Online, Florianópolis, SC, v.12, n. 2, p. 537-556, 2012. Disponível < <http://www.producaoonline.org.br/rpo/article/download/943/918> > acesso em: 18 de Novembro de 2017.

OTA, W. N.; **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional.** Dissertação (Pós-graduação em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, PR, 2004. Disponível em: < <http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/058.pdf> > Acesso em: 9 de novembro de 2017.

PANZERA, T. H.; RUBIO, J. C. C. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Compósitos Particulado de Matriz Polimérica.** 2005. Disponível em: < <http://www.demec.ufmg/Grupos/Usinagem/composito.html> > Acesso em Junho de 2018.

PAUL WAMBUA, JAN IVENS, I. V. **Natural fibres: Canthey replace glass fiber reinforced plastics,** Composites science technology 63 p. 1259-1264, Elsevier Publishing Company, 2003.

PEREIRA, J. C. **Curso de projetos estruturais com materiais compósitos.** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina: UFSC, Florianópolis, 2005.

PINTO, K. N. C; MIRANDA, L. F. **Processos de fabricação de plástico reforçado: poliéster reforçado com fibras de vidro.** Monografia - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 1999.

PINTO, N. C. K.; **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro.** Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Universidade de São Paulo, SP, 2002. Disponível em: < [http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Kelly%20Nanci%20Carneiro%20Pinto\\_M.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Kelly%20Nanci%20Carneiro%20Pinto_M.pdf) > Acesso em: 8 de novembro de 2017.

RANGANATHAN, S. R.; QUAYYUM. Z. **New horizons for jute.** Stute – Art Keport 5. National Information, 2000.

RODRIGUES, J. S. **Comportamento mecânico de material compósito de matriz poliéster reforçado por sistema híbrido fibras naturais e resíduos da indústria madeireira.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2008.

RODRIGUES, L. P. S. **Efeito do envelhecimento ambiental acelerado em compósitos poliméricos.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade do Rio Grande do Norte. Natal-RN, 2007.

SAHEB, D. N.; JOG, J. P. **Natural Fiber Polymer Composites: A Review.** *Advances in polymer Technology.* John Wiley e Sons, 18ª ed., nº 4, p.351-363, 1999.

SANCHEZ, E. M. S.; CAVANI, C. S.; LEAL, Claudinete V.; SANCHEZ, C. G. **Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades**. Polímeros, 20<sup>a</sup> ed. n° 3, p. 194-200, 2010.

SANTIAGO, R. C.; BRAGA, R. M.; FELIPE, R. C. T. S.; FELIPE, R. N. B. **Comportamento mecânico do compósito de resina ortoftálica reforçado com fibra de juta e tratado quimicamente com hidróxido de sódio**, Departamento Acadêmico de Tecnologia Industrial – CEFET-RN, 2007.

SANTOS, A. J. G. **Materiais compósitos de poliéster reforçados por fibras curtas de timbó-açú (*Derrisguianensis*): avaliação mecânica**. Trabalho de conclusão de curso – Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

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

SAPUAN, S. M. **Composites Materials: Concurrent Engineering Approach**. Editora: Butterworth-Heinemann, 2017.

SHIGLEY, J. E.; **Mechanical engineering design**. 1972.

SILVA, A. L., SILVA, E. O. **Conhecendo os materiais poliméricos**, p. 5-6, PIBIC – Universidade Federal do Mato Grosso, 2003.

SILVA, I. L. A.. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. P. 110. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos teóricos e práticos**. 5<sup>o</sup>. Edição, 2004.

TOLEDO FILHO, R.D. **Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Naturais**: Universidade do Rio Grande do Norte. Natal-RN, 2008.

VENTURA, A. M. F. M. **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**, Ciência & Tecnologia dos Materiais, 21<sup>o</sup> ed., n° ¾, 2009.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. **Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?** Elsevier Science, Belgium, 2003.

WAMBUA, P.; VANGRIMDE, B.; LOMOV, S.; VERPOEST, I. **The Response of Natural Fiber Composites to Ballistic Impact by Fragment Simulating Projectiles**. Composite Structures, v. 77, p. 232-240, 2007.

ZAH, R.; HISCHIER, R.; LEÃO, A.L.; BROWN, I. **Curauá fibers in automobile industry – A sustainability assessment**. J. Cleaner Production, v.15, p.1032- 1040, 2007.

ZAR, J. H. **Biostatistical analysis**. 3<sup>a</sup> ed. Prentice-Hall, Englewood Clives, J. 662p. 1996.

