



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS ANANINDEUA  
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

KARLA SUELLEN LINO BARBOSA

**INCORPORAÇÃO DE FIBRAS CURTAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) E  
RESÍDUO INDUSTRIAL DE CAULIM EM COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIMÉRICA: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E FRACTOGRAFIA**

ANANINDEUA-PA

2018

KARLA SUELLEN LINO BARBOSA

**INCORPORAÇÃO DE FIBRAS CURTAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) E  
RESÍDUO INDUSTRIAL DE CAULIM EM COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIMÉRICA: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E FRACTOGRAFIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pará-UFPA/Campus Ananindeua para obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase em Mecânica.

Orientador: Me. Eng.º Alessandro José Gomes dos Santos

Coorientador: Dr. Eng.º Deibson Silva da Costa

ANANINDEUA-PA

2018

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

---

- B238i     Barbosa, Karla Suellen Lino  
              INCORPORAÇÃO DE FIBRAS CURTAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) E RESÍDUO  
              INDUSTRIAL DE CAULIM EM COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA: RESISTÊNCIA À  
              TRAÇÃO E  
              FRACTOGRAFIA / Karla Suellen Lino Barbosa. - 2018.  
              74 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - 3, , Universidade Federal do Pará,  
              Ananindeua, 2018. Orientação: Prof. Me. Alessandro José Gomes dos Santos  
              Coorientação: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa.
1. Desenvolvimento Sustentável. . 2. Matriz Poliéster.. 3. Fibras Vegetais.. 4. Resíduo  
              de Caulim.. I. Santos, Alessandro José Gomes dos , *orient.* II. Título
- 

CDD 620.1

KARLA SUELLEN LINO BARBOSA

**INCORPORAÇÃO DE FIBRAS CURTAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) E  
RESÍDUO INDUSTRIAL DE CAULIM EM COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIMÉRICA: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E FRACTOGRAFIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Ciência e Tecnologia da  
Universidade Federal do Pará-UFPA/Campus  
Ananindeua para obtenção do grau de  
Bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase  
em Mecânica.

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

Banca examinadora:

---

Prof. Me. Eng.º Alessandro José Gomes dos Santos  
(FACET/CAMPANIN/UFPA – Orientador)

---

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

---

Prof. Me. Franciele Gomes Ferreira  
(FACET/CAMPANIN/UFPA – Examinador Interno)

Dedico este trabalho à minha mãe Cacilma Lino e a meu pai Antonio Barbosa, que sempre se dedicaram e incentivaram seus filhos no caminho da educação. Dedico também este trabalho a memória do meu tio Fernando Pena, o qual foi minha maior inspiração.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à Deus, por tudo que fez e tem feito em minha vida.

A minha família, que sempre me incentivou, me apoiou e acreditou no meu potencial.

Aos meus amigos, que sempre me alegravam nos momentos mais difíceis.

Aos amigos de sala, principalmente as CeT girls, Atamy Tanoue, Miriane Alexandrino e Dayana Rossy que estiveram comigo nos momentos de alegria e aflição, também aos meus amigos Thales Cunha e Lucas da Silveira que sempre acreditaram no meu potencial.

Ao meu amigo Bruno Mendes por ter me ensinado e ajudado no andamento do meu trabalho.

Ao Prof. Me. Eng.º Alessandro José Gomes dos Santos, meu orientador, pela oportunidade e orientação do presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Deibson Silva Costa, meu coorientador, por sua disponibilidade em ajudar e tirar dúvidas.

Aos professores Roberto Fujiyama, Alice e Emerson, pela ajuda e disponibilidade para utilizar seus laboratórios.

A todos que de alguma forma ajudaram no desenvolver deste trabalho.

“A verdadeira motivação vem de realização, desenvolvimento pessoal, satisfação no trabalho e reconhecimento.”

(Frederick Herzberg)

## RESUMO

Atualmente os materiais compósitos tem ganhado destaque na sua fabricação e aplicação industrial. Pesquisadores tem demonstrado interesse nessa área de materiais devido seu desenvolvimento sustentável. Fibras vegetais e resíduos industriais que possuem descarte muitas vezes inadequado têm sido bastante procurados por pesquisadores como cargas para esses materiais compósitos. Neste trabalho foram produzidos materiais compósitos de matriz Poliéster Isoftálica com inserção de fibras vegetais de bambu nos comprimentos de 15 e 30 mm, compósitos com carga de resíduo industrial de caulim flint com granulometria de 100 mesh e compósitos híbridos resíduo/fibra. Os compósitos foram confeccionados de acordo com o método *hand lay-up*. Para cada série foram produzidos 6 (seis) corpos de prova. A matriz polimérica apresentou proporções de: catalisador 1 % e acelerador 1,5 %. As fibras inseridas tiveram valores de fração mássica de 1, 2 e 3 %, o resíduo industrial de caulim flint foram às frações de 10, 20, 30 e 40 % e os compósitos híbridos tiveram valores de: fibra 3 %/Resíduo 10 %, fibra 3 %/Resíduo 20 % e fibra 3 %/Resíduo 30 %. Foram realizados ensaios de tração dos compósitos pela norma ASTM D-3039 e análises da superfície de fratura através da microscopia eletrônica de varredura – MEV. Os resultados mostraram que houve aumento no limite de resistência a tração dos compósitos em relação à matriz plena. Os melhores resultados de limite de resistência foram: 41,89 MPa e 27,06 MPa para fibras de bambu 15 e 30 mm, respectivamente, ambas de proporção de 1 % de fibras; 31,44 MPa para resíduo de caulim flint; 24,47 MPa para compósitos híbridos 20 % de resíduo de caulim flint + 3 % de fibras de bambu 15 mm e 33,75 MPa para compósitos híbridos 20 % de resíduo de caulim flint + 3 % de fibras de bambu 30 mm. As análises morfológicas das superfícies de fraturas foram eficientes para a determinação dos mecanismos de falhas e características presentes nos materiais, onde os fenômenos de fibras dispostas transversalmente na direção do carregamento e fibras rompidas foram os mecanismos mais observados.

**Palavras Chaves:** Desenvolvimento Sustentável. Matriz Poliéster. Fibras Vegetais. Resíduo de Caulim.

## ABSTRACT

Currently the composite materials have gained prominence in their manufacture and industrial application. Researchers have shown interest in this area of materials due to their sustainable development. Plant fibers and industrial wastes that have often inadequate disposal have been widely sought by researchers as cargoes for these composite materials. In this work, composite materials of Iso - polical Polyester matrix with insertion of bamboo plant fibers in the lengths of 15 and 30 mm were produced, composites with industrial residue load of kaolin flint with 100 mesh granulometry and hybrid residues / fiber composites. The composites were made according to the hand lay-up method. For each series, 6 (six) specimens were produced. The polymer matrix showed proportions of: catalyst 1 % and accelerator 1,5 %. The fiber fractions were 10, 20, 30 and 40%, and the hybrid composites had values of: 3% fiber / 10% Residue, fiber 3% / residue 20% and fiber 3% / residue 30%. Traction tests of the composites were performed according to ASTM D-3039 and fracture surface analyzes by scanning electron microscopy (SEM). The results showed that there was an increase in the tensile strength limit of the composites in relation to the full matrix. The best resistance limit results were: 41.89 MPa and 27.06 MPa for 15 and 30 mm bamboo fibers, respectively, both with a 1% fiber content; 31.44 MPa for residue kaolin flint; 24.47 MPa for hybrid composites 20% kaolin residue flint + 3% bamboo fibers 15 mm and 33.75 MPa for hybrid composites 20% kaolin residue flint + 3% bamboo fibers 30 mm. The morphological analyzes of the fracture surfaces were efficient for the determination of the fault mechanisms and characteristics present in the materials, where the phenomena of fibers arranged transversely in the direction of loading and ruptured fibers were the most observed mechanisms.

**Key Words:** Sustainable Development. Polyester Matrix. Plant Fibers. Kaolin Waste.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b>	– Fluxograma da fase dispersa dos compósitos.....	19
<b>Figura 2</b>	– Pedaco de colmo (à esquerda) e vista de corte paralelo (à direita).....	25
<b>Figura 3</b>	– Perfil de seção longitudinal da região do Rio Capim.....	26
<b>Figura 4</b>	– Equipamentos: a) estufa; b) molde metálico; c) prensa hidráulica e d) balança analítica.....	33
<b>Figura 5</b>	– Materiais: a) resina Poliéster Isoftálica, b) acelerador de cobalto, c) Peróxido de metil etil cetona [MEK-P].....	34
<b>Figura 6</b>	– Bambuzal.....	35
<b>Figura 7</b>	– Caulim.....	36
<b>Figura 8</b>	– Processo de extração das fibras.....	36
<b>Figura 9</b>	– Resíduo de Caulim.....	37
<b>Figura 10</b>	– Sequência da produção dos compósitos.....	40
<b>Figura 11</b>	– (a) máquina de corte e (b) corpos de prova.....	41
<b>Figura 12</b>	– Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de tração.....	41
<b>Figura 13</b>	– Máquina Universal de ensaios.....	41
<b>Figura 14</b>	– Amostras para análise.....	42
<b>Figura 15</b>	– (a) Equipamento para pulverização de ouro e evaporação de carbono e (b) Microscópio Eletrônico de Varredura.....	43
<b>Figura 16</b>	– Difratometria do caulim.....	44
<b>Figura 17</b>	– Micrografias obtidas por MEV da fibra de bambu. (a) Aumento 446x. (b) Aumento 427x. (c) Aumento 122x.....	45
<b>Figura 18</b>	– Micrografias obtidas por MEV do resíduo de Caulim Flint. (a) Aumento 73.1 kx. (b) Aumento 75.6 kx. (c) Aumento 62.3 kx.....	46
<b>Figura 19</b>	– Gráfico Força x Deslocamento.....	48
<b>Figura 20</b>	– Comportamento de resistência à tração do material compósito com reforço de fibras de bambu de 15 mm.....	48
<b>Figura 21</b>	– Micrografias obtidas por MEV de compósitos de matriz polimérica e fibras de bambu 15 mm.....	49
<b>Figura 22</b>	– Gráfico Força x Deslocamento.....	51
<b>Figura 23</b>	– Comportamento de resistência à tração do material compósito com reforço de fibras de bambu de 30 mm.....	51

<b>Figura 24</b> –	Micrografias obtidas por MEV de compósitos de matriz polimérica e fibras de bambu 30 mm.....	52
<b>Figura 25</b> –	Gráfico Força x Deslocamento.....	55
<b>Figura 26</b> –	Comportamento de resistência à tração de material compósito em função do resíduo de caulim.....	56
<b>Figura 27</b> –	Micrografias obtidas por MEV de compósitos de matriz polimérica e adição de resíduo de Caulim Flint.....	56
<b>Figura 28</b> –	Gráfico Força x Deslocamento.....	59
<b>Figura 29</b> –	Comportamento de resistência à tração de material compósito híbrido em função da proporção de resíduo/fibra15mm.....	60
<b>Figura 30</b> –	Micrografias obtidas por MEV de compósitos híbridos de matriz polimérica com adição de resíduo e fibras de bambu 15 mm.....	60
<b>Figura 31</b> –	Gráfico Força x Deslocamento.....	62
<b>Figura 32</b> –	Comportamento de resistência à tração de material compósito híbrido em função da proporção de resíduo/fibra30mm.....	63
<b>Figura 33</b> –	Micrografias obtidas por MEV de compósitos híbridos de matriz polimérica com adição de resíduo e fibras de bambu 30 mm.....	63

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	–	Valores para confecção de placas de matriz plena.....	38
<b>Tabela 2</b>	–	Valores para confecção de placas de resíduo de caulim.....	38
<b>Tabela 3</b>	–	Valores para confecção de placas de fibras de bambu.....	39
<b>Tabela 4</b>	–	Valores para confecção de placas híbridas fibra/resíduo.....	39
<b>Tabela 5</b>	–	Resultados do ensaio de tração de compósitos com reforço de Fibras de Bambu de 15 mm.....	47
<b>Tabela 6</b>	–	Resultados do ensaio de tração de compósitos com reforço de Fibras de Bambu de 30 mm.....	50
<b>Tabela 7</b>	–	Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com fibras naturais encontradas na literatura.....	53
<b>Tabela 8</b>	–	Resultados do ensaio de tração de compósitos com inserção de resíduo de caulim flint.....	54
<b>Tabela 9</b>	–	Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com resíduos industriais encontradas na literatura.....	57
<b>Tabela 10</b>	–	Resultados do ensaio de tração de compósitos com Inserção de Resíduo de Caulim e Reforço de Fibras de Bambu de 15 mm.....	58
<b>Tabela 11</b>	–	Resultados do ensaio de tração de compósitos com Inserção de Resíduo de Caulim e Reforço de Fibras de Bambu de 30 mm.....	61
<b>Tabela 12</b>	–	Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com resíduos industriais encontradas na literatura.....	64

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
IRCC	Imerys Rio Capim Caulim
PPSA	Pará Pigmentos S/A
CBE	Companhia Brasileira de Equipamento
CDB	Caulim Duro Branco
CDF	Caulim Duro Ferruginoso
EPMA	Electron Probe Micro Analysis
PIXE	Próton Induced C-ray Emission
XPS	X-Ray Photoelectron Analysis
XRD	X-Ray Diffraction
MEK-P	Peróxido de metil etil cetona
Co	Cobalto
UFPA	Universidade Federal do Pará
ASTM	American Society for Testing and Materials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DRX	Difração de Raio-X
F	Fibra
R	Resíduo
FM	Fração mássica
RC	Resíduo de Caulim

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivo geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	COMPÓSITOS.....	18
2.1.1	Composição e classificação dos compósitos.....	18
2.2	MATRIZES.....	19
2.2.1	Compósitos Poliméricos.....	19
2.2.2	Definição e classificação das matrizes poliméricas.....	20
2.2.2.1	<i>Resina Poliéster Isoftálica</i> .....	20
2.3	COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	21
2.4	FIBRAS.....	22
2.4.1	Bambu ( <i>Bambusa Vulgaris</i> ).....	24
2.5	CARGAS NOS COMPÓSITOS.....	25
2.5.1	Resíduo Industrial: Caulim.....	25
2.6	COMPÓSITOS HÍBRIDOS.....	28
2.7	FRACTOGRAFIA.....	29
2.8	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	30
2.9	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>33</b>
3.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	33
3.2	MATERIAIS.....	33
3.2.1	Matriz polimérica.....	33
3.2.2	Fibra de bambu.....	34
3.2.3	Resíduo Industrial: Caulim flint.....	35
3.3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	36
3.3.1	Aquisição das fibras de Bambu.....	36
3.3.2	Aquisição dos resíduos de caulim flint.....	37
3.3.3	Caracterização do Resíduo de Caulim.....	37

3.3.3.1	<i>Difração de Raio-X</i> .....	37
3.3.4	Produção dos Compósitos.....	38
3.3.4.1	<i>Etapas da Produção dos Corpos de Prova</i> .....	38
3.3.7	Ensaio de Resistência a Tração.....	41
3.3.8	Análise das Superfícies de Fratura.....	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>44</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CAULIM FLINT.....	44
4.1.1	Difração de Raio-X.....	44
4.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	45
4.2.1	Microscopia da fibra de bambu.....	45
4.2.2	Microscopia do resíduo de caulim flint.....	46
4.3	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	46
4.3.1	Material compósito com reforço de bambu 15 mm.....	46
4.3.2	Material compósito com reforço de bambu 30 mm.....	49
4.3.3	Material compósito com reforço de resíduo de caulim flint.....	53
4.3.4	Material compósito híbrido com reforço de resíduo de Caulim e bambu 15 mm.....	58
4.3.5	Material compósito híbrido com reforço de resíduo de Caulim e bambu 30 mm.....	61
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>66</b>
	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem uma grande importância no desenvolvimento de políticas que visam à manutenção e o desenvolvimento sustentável, devido seu território possuir uma das mais ricas biodiversidades do planeta: a Floresta Amazônica. (MARINELLI et al., 2008).

Os compósitos são materiais compostos por duas ou mais fases de diferentes propriedades químicas e físicas, onde a mesma possui uma fase conhecida como matriz, que pode ser: cerâmica, metálica ou polimérica, e outra fase conhecida como reforço, podendo ser de: fibra, partículas ou folhas (CALLISTER, 2013).

Essa fase de matriz polimérica absorve as deformações causadas e confere resistência em compressão, já o reforço tem a finalidade de aumentar a tenacidade do material que se quer produzir. Funciona como uma ponte de transferência de esforços, além de que é este que determina as propriedades de tração e de flexão dos materiais compósitos (CALLISTER, 2013).

É possível verificar um aumento na produção de materiais compósitos em vários domínios tecnológicos modernos, o que desperta um interesse nas pesquisas de materiais reforçados e processos avançados de produção (SANTOS et al., 2017).

Todavia, há poucos estudos sobre os compósitos de fibras naturais de origem vegetal. As fibras de bambu, juta, coco, entre outras, possuem um uso alternativo e renovável como elemento de reforço para compósitos de matrizes frágeis (MARTINS NETO, 2010).

O setor mineral produz grandes quantidades de resíduos de diversos tipos e periculosidades, onde a exploração dos recursos naturais desencadeia um processo de contínua degradação ambiental, frente à produção de resíduos não aproveitados lançados indiscriminadamente ao meio ambiente (ANJOS, 2011).

Segundo Anjos (2011), a extração do caulim gera um percentual de resíduos correspondente a 80 a 90 % do volume total explorado, causando, assim um grande impacto ambiental.

Contudo, a tecnologia e a pesquisa atuam como aliadas na apresentação de soluções que minimizem essa degradação ambiental. Além de que, a utilização desses resíduos poderá minimizar o impacto ambiental, reduzir os custos, gerar empregos e construir materiais de interesse social.

Com isso, muitos pesquisadores começaram a elaborar novos materiais e alternativas para colaborar com esse crescimento sustentável.

Portanto, este trabalho visa estudar a resistência à tração de um material compósito de matriz polimérica reforçado com fibra do bambu (15 e 30 mm de comprimento), compósito com carga de resíduo de caulim flint e dos compósitos híbridos de matriz polimérica com carga fibra/resíduo.

## 1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

Compósitos são obtidos pela combinação de seus constituintes com diferentes características físico-químicas e mecânicas, com isso as pesquisas e desenvolvimento de materiais nesta área são cada vez mais importantes (REZENDE, 2000). Compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais lignocelulósicas já estão sendo utilizados em variados setores, devido o aumento da consciência ecológica da sociedade. Fato esse tem incentivado pesquisadores na fabricação de novos materiais que utilizam fibras tradicionais e fibras que apresentam características promissoras (MONTEIRO et al., 2006; TARGA et al., 2009).

A tecnologia e a pesquisa atuam como aliadas na apresentação de soluções que minimizem essa degradação ambiental. Tendo em vista que, a utilização desses resíduos poderá minimizar o impacto ambiental, reduzir os custos, gerar empregos e construir materiais de interesse social (ANJOS, 2011).

Além disso, o uso dessas fibras vegetais gera emprego, renda com o cultivo, produção e comercialização dessas fibras. Contudo, há poucos estudos sobre os compósitos de fibras naturais de origem vegetal.

Com essas considerações, o presente trabalho reverte-se como uma pesquisa adicional no campo dos materiais compósitos reforçados com fibras vegetais (bambu) e resíduo industrial (Caulim Flint). Visando, assim, conhecer a resistência à tração de um material compósito reforçado com fibra do bambu e resíduo de caulim e dos compósitos híbridos feitos com a junção Bambu/Caulim.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é produzir compósitos de matriz polimérica com reforço de fibras de bambu (15 e 30 mm de comprimento), compósitos com carga de resíduo de caulim flint e compósitos híbridos de matriz polimérica com carga fibra/resíduo.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento mecânico (tração) do compósito de matriz Poliéster Isoftálico com fibras de bambu de 15 e 30 mm de comprimento nas frações de 1 %, 2 % e 3 %;
- Avaliar o comportamento mecânico (tração) do compósito de matriz Poliéster Isoftálico com resíduo de Caulim na granulometria de 100 mesh e nas frações de 10 %, 20 %, 30 % e 40 %;
- Avaliar o comportamento mecânico (tração) do compósito híbrido de matriz Poliéster Isoftálico com fibras de bambu na fração de 3 % e nos comprimentos de 15 mm e 30 mm e resíduos de caulim na granulometria de 100 mesh e nas frações de 10 %, 20 % e 30 %;
- Avaliar imagens microscópicas eletrônicas de varredura (MEV) para cada série de compósitos produzida.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COMPÓSITOS

Os compósitos são materiais multifásicos produzidos artificialmente com combinações desejáveis das melhores propriedades das suas fases constituintes. A fase matriz de um compósito é, geralmente, contínua e envolve a fase dispersa, ou seja, os compósitos são materiais compostos por duas ou mais fases de diferentes propriedades químicas e físicas, onde a mesma possui uma fase conhecida como matriz, que pode ser: cerâmica, metálica ou polimérica, e outra fase conhecida como reforço, podendo ser de: fibra, partículas ou folhas (CALLISTER, 2013; REZENDE, 2000).

Essa fase de matriz polimérica absorve as deformações causadas e confere resistência em compressão, já o reforço tem a finalidade de aumentar a tenacidade do material que se quer produzir. Funciona como uma ponte de transferência de esforços, além de que é este que determina as propriedades de tração e de flexão dos materiais compósitos (CALLISTER, 2013; ASKELAND, 2014).

Materiais compósitos geram combinações incomuns de rigidez, densidade, resistência mecânica e à corrosão, desempenho em altas temperaturas, além de dureza ou condutividade (ASKELAND, 2014).

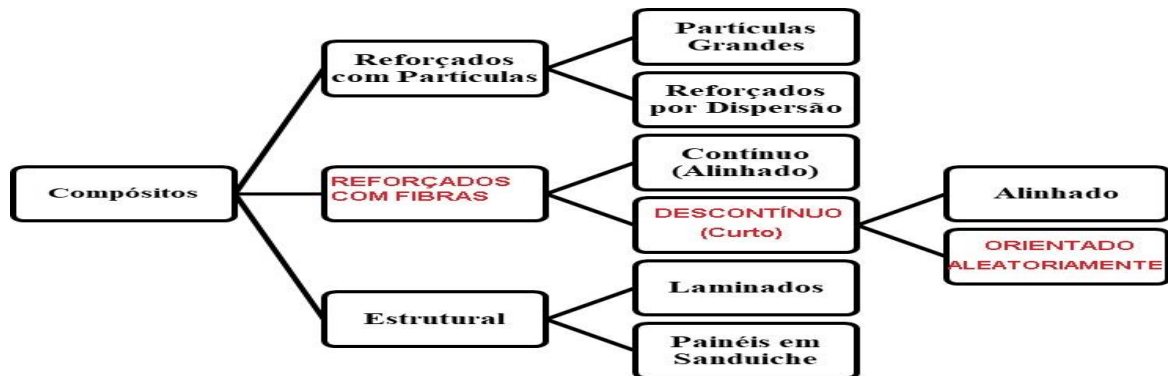
De acordo com Callister (2013), a maioria desses compósitos foram desenvolvidos para melhorar características mecânicas como: tenacidade, rigidez e resistência a temperaturas ambiente e de temperaturas elevadas, quando combinados esses materiais.

#### 2.1.1 Composição e classificação dos compósitos

Em materiais compósitos, a fração volumétrica e as propriedades de cada fase são importantes. A união de fases no compósito (conectividade) também deve ser conhecida. Essa união de fases é muito importante na definição das propriedades (ASKELAND, 2014).

Esses materiais compósitos são geralmente classificados de acordo com sua forma ou natureza da fase dispersa, podendo ser compósitos reforçados por fibras, partículas ou laminas (ASKELAND, 2014). A figura 1 mostra a classificação da fase dispersa dos compósitos.

**Figura 1** – Fluxograma da fase dispersa dos compósitos



**Fonte:** Adaptado de CALLISTER, 2013

Segundo Askeland (2014) compósitos reforçados por fibras podem ser tanto isotrópicos como anisotrópicos, já os compósitos reforçados com partículas terão propriedades somente isotrópicas, enquanto os compósitos laminares somente propriedades anisotrópicas.

## 2.2 MATRIZES

A fase matriz de um material compósito pode ser cerâmica, metálica ou polimérica. Geralmente, quando se busca a ductilidade deste compósito as matrizes empregadas são de metais e polímeros; já com a matriz cerâmica é aplicado o reforço quando se quer uma melhor tenacidade à fratura (CALLISTER, 2013).

Segundo Callister (2013), essa fase matriz exerce três funções:

- Une as fibras e transmite uma carga aplicada externamente às fibras;
- Protege as fibras individuais contra danos superficiais
- Previne a propagação de trincas de fibra para fibra;

### 2.2.1 Compósitos Poliméricos

Os compósitos com matriz polimérica consistem em um plástico reforçado com alto peso molecular, comumente chamado de resina polimérica, como a fase matriz e com fibras como o meio de reforço. Esse tipo de material compósito devido seu baixo custo, facilidade de fabricação e das suas propriedades à temperatura ambiente possui variáveis tipos de aplicações (CALLISTER, 2013).

Parâmetros estruturais dos polímeros, tais como: cristalinidade, presença de grupos polares, massa molar, copolimerização, ligações cruzadas, entre outros. E parâmetros externos, tais como: presença de plastificante, elastômero, monômero residual, reforço com fibras, etc. implicam no desempenho quando submetidos a solicitações mecânicas (CANEVAROLO JR., 2006).

De acordo com Askeland (2014), a matriz une as fibras no material compósito e as mantém na posição adequada, além de transferir as tensões às fibras, protegendo assim o aparecimento de trincas nesses materiais compósitos durante o processo e utilização e, controlando também as propriedades elétricas.

Quando a distribuição de esforços ou tensões em uma matriz polimérica é uniforme em todos os seus pontos, a presença de uma segunda fase dispersa nesta matriz também sentirá a solicitação aplicada no conjunto, ou seja, quando o módulo de elasticidade da segunda fase for maior do que o da matriz, o resultado obtido implicará num aumento nas propriedades mecânicas do material, como: o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento ou ruptura (CANEVAROLO JR., 2006).

Os compósitos poliméricos apresentam alta resistência mecânica devido suas características e a variedade de combinações entre a resina polimérica e a fase dispersa (COSTA, 2012).

## 2.2.2 Definição e classificação das matrizes poliméricas

Os polímeros se caracterizam por formarem cadeias longas, devido sua repetição macromolecular. A palavra polímero vem do grego: poli (muitos) + mero (partes). Os monômeros ou meros estão dispostos em sequência, um após o outro, os que lhe dá a aparência de cordão (GOMES, 2016).

### 2.2.2.1 Resina Poliéster Isoftálica

A matriz de resinas poliéster é um polímero termofixo, ou seja, apresentam cadeias altamente reticuladas que formam uma estrutura de rede tridimensional (ASKELAND, 2014). Este polímero é muito utilizado devido seu baixo custo, resistência química a elevadas temperaturas, facilidade de se moldar em grandes dimensões e por ser estável termicamente e dimensionalmente (SANCHEZ et al., 2010). Devido esse tipo de matriz ser muito estável as variações de temperatura uma vez curadas não se fundem novamente (GOMES, 2016).

Esse processo de transformação de líquido para sólido é conhecido como polimerização. Polimerização é uma reação nas quais moléculas simples reagem entre si formando uma macromolécula de alta massa molar. Existem variáveis importantes que implicam na qualidade de um polímero. Variáveis primárias como: temperatura de reação, pressão, tempo, presença e tipo de iniciador e agitação, e variáveis secundárias como: o tipo de inibidor, de retardador, catalisador, controlador de massa molar, da quantidade de reagentes e demais agentes específicos. Mudanças nas variáveis primárias durante a reação não afetam o tipo de produto final, apenas alteram o rendimento da reação (CANEVAROLO JR., 2006).

Para cura da resina à temperatura ambiente um acelerador e um catalisador são adicionados à resina poliéster para acontecer à reação química que causa o calor interno. A quantidade de catalisador e acelerador controla a velocidade da reação (COSTA, 2012).

Contudo, a baixa resistência à fratura deste polímero termofixo faz-se necessário à utilização de reforços neste material (SANCHEZ et al., 2010).

O reforço por adição de fibras é muito utilizado para melhorar o desempenho mecânico de polímeros e permitir sua utilização em aplicações com grandes riscos de falha. Termoplásticos, como o náilon, o polipropileno, etc., e termofixos como poliéster insaturado e resina epóxi, encontram grande aplicação quando reforçados com fibras (CANEVAROLO JR., 2006).

### 2.3 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

As fibras são reforços importantes devido proporcionarem o aumento da força da matriz, e influenciando e destacando as propriedades pretendidas das duas fases (VENTURA, 2009).

Segundo Askeland (2014), os materiais compósitos reforçados com fibras apresentam maiores limites de resistência à fadiga, módulo de Young e resistência específica ao incorporar fibras.

A fase matriz do compósito transmite as tensões às fibras, que resistem à força aplicada. Além de proteger as fibras, minimizando a difusão de espécies, como oxigênio ou umidade, que causam a degradação de suas propriedades mecânicas (ASKELAND, 2014).

Askeland (2014) ressalta que muitos reforços estão sendo empregados aos materiais compósitos, onde as fibras vegetais como o bambu têm sido utilizadas como reforços de tijolos e barro por séculos.

Vários fatores devem ser levados em conta quando projetamos um material compósito reforçado com fibra. O desempenho do material compósito reforçado com fibras é avaliado pelo comprimento, forma, orientação, e composição das fibras bem como pelas propriedades mecânicas da matriz, além do arranjo das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e a sua distribuição são fatores que influenciam nas propriedades dos compósitos reforçados com fibras (VENTURA, 2009). As fibras podem ser curtas, longas ou mesmo contínuas e suas dimensões são caracterizada pela razão de aspecto. Quando a razão de aspecto é elevada, conseqüentemente, a resistência mecânica do material compósito também aumenta. Geralmente, os compósitos trincam devido às imperfeições na superfície, ou seja, quanto menor o diâmetro das fibras, menor será a área de superfície de cada fibra, portanto haverá menos falhas durante o processo ou quando há submissão de carga (ASKELAND, 2014).

As fibras curtas são facilmente incorporadas na matriz e geralmente estão presentes em compósitos em uma orientação aleatória.

Materiais compósitos reforçados com fibras curtas são frequentemente produzidos misturando-se as fibras com uma matriz líquida ou plástica e, em sequencia é utilizado técnicas convencionais, como moldagem por injeção para compósito de matriz polimérica ou fundição de compósitos de matriz metálica e, também por um método de spray, no qual fibras curtas misturadas com resina polimérica são pulverizadas em um molde e, então, curadas (ASKELAND, 2014).

## 2.4 FIBRAS

A utilização de fibras vegetais era bastante utilizada, principalmente na indústria automobilística, na década de 60, quando vieram a ser substituídas nas décadas de 70 e 80 por fibras sintéticas. Com a crise energética, o alto custo no processamento dessas fibras sintéticas e pelos problemas causados pelo uso desse tipo de fibra ao meio ambiente, as fibras vegetais tem novamente despertado a atenção e o interesse de pesquisadores no mundo para a sua utilização. Contudo, o tratamento e a forma de racionalizar sua utilização sofreram modificações (GUIMARÃES; NOVACK; BOTARO, 2010).

A utilização de fibras na produção de materiais compósitos vem aumentando, devido às fibras terem boas propriedades para tais utilizações.

As fibras atuam como ponte de transferência dos esforços, além impedir à propagação de fissuras (PUPO, 2017).

As fibras são divididas em fibras sintéticas e fibras naturais. Segundo Gomes (2016), as fibras sintéticas ou artificiais são produzidas a partir da celulose, onde o linter de algodão e a polpa da madeira são as matérias-primas que possuem maior utilização em processos de fabricação, onde inicialmente ela surgiu como alternativa de baixo custo para substituição do algodão, porém devido o alto custo de produção ela não teve um crescimento significativo no mercado.

As fibras naturais são derivadas de animais, vegetais e minerais. As fibras naturais são heterogêneas, devido depender do solo, das condições climáticas, do tipo de colheita, dos frutos ou do caule no caso dos vegetais (SILVA, 2014).

De acordo com Targa et al. (2009) as fibras vegetais possuem diversas vantagens quando comparadas com as fibras de vidro, que são muito utilizadas, como: abundância, baixo custo, menor densidade, propriedades específicas adequadas, facilidade de obtenção e manuseio, baixa abrasão nos equipamentos e moldes, retirada de dióxido de carbono do meio-ambiente, biodegradabilidade e são de fontes renováveis.

Marinelli et al. (2008) estudaram o desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais como forma de divulgação desses materiais para novos pesquisadores.

Costa (2012) estudou compósitos de matriz poliéster reforçado por fibras curtas de bambu, sisal, vidro e por sistema híbrido bambu/sisal, bambu/vidro e sisal/vidro dispostas randomicamente nos comprimentos de 5, 10 e 15 mm. E obteve as seguintes resistências à tração em compósitos puros: com vidro (44,21 MPa), com sisal (27,05 MPa) e bambu (24,05 MPa). E para compósitos híbridos o maior valor foi observado pelo sistema híbrido sisal/vidro (35,17 MPa).

Santos et al., (2017) confeccionaram compósitos de matriz polimérica Isoftálica com reforço de fibras de bambu nas frações de 1, 2 e 3 % e no comprimento de 15 mm, compósitos com carga de resíduo industrial de cobre nas frações de 10, 20, 30, 40 e 50 % e compósitos híbridos bambu/cobre nas frações de 3 % de fibra para 10, 20 e 30 %. E obteve como melhores resultados 20,56 MPa para compósitos de fração 3 % de fibras de bambu, 40,25 MPa para 40 % de resíduo de cobre e 37,94 MPa para o compósito híbrido com 10 % de resíduo de cobre e 3 % de fibras de bambu 15 mm.

Angrizani et al. (2006) estudaram a influência da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos de matriz poliéster e observou que compósitos reforçados com fibras vegetais de menor comprimento obtiveram valores de resistência maiores.

Targa et al. (2009) produziram e caracterizaram mecanicamente compósitos de fibras de juta e resina de poliéster insaturado com diferentes métodos de fabricação e concluiu que a técnica de moldagem por compressão exerce alta influência no molhamento entre fibra e matriz, o que segundo ele contribui nas propriedades finais do compósito.

#### 2.4.1 Bambu (*Bambusa vulgaris*)

No mundo existe mais de 1000 espécies de bambu espalhadas pela Ásia, Oceania, África e Américas. No Brasil já foram identificados cerca de 200 espécies nativas de bambu (VASCONCELLOS, 2004). Bambu é o nome dado a todas as plantas da subfamília Bambusoideae, onde está faz parte da família das gramíneas (VASCONCELLOS, 2004).

O nome científico é *Bambusa vulgaris*, onde *Bambusa* é o gênero do bambu e *vulgaris* é a espécie. O bambu possui diversas aplicações onde Rambo (2006) cita que as principais são como planta ornamental e como material estrutural na construção civil.

Guimarães, Novack e Botaro (2010) estudaram as análises anatômicas bem como das relações entre as dimensões da fibra de *Bambusa vulgaris* e concluiu que as fibras possuem potencial para utilização em compósitos de matriz polimérica com ou sem adição de cargas minerais, passando ou não por tratamentos superficiais, concorrendo com fibras usualmente utilizadas como: linho, sisal e curauá, na produção de diversos produtos para as indústrias automotivas, eletroeletrônica, náutica, aeroespacial, embalagens, dentre outras.

A resistência do bambu está ligada a fatores como: à espécie, às características do solo e do clima, ao teor de umidade no interior do bambu e à idade em que os colmos são extraídos (OLIVEIRA, 2013a).

Segundo Vasconcellos (2004) o bambu é composto de:

- **Vasos condutores:** vasos que conduzem a água e a seiva que devem ser distribuídos por todas as partes do bambu;
  - **Fibras:** células mais rígidas que ficam ao redor dos vasos condutores, protegendo-os. São as fibras que dão a resistência ao bambu.
  - **Parênquima:** são as células que preenchem o espaço restante da parede do colmo.
  - **Lignina:** que é uma substância que une todos esses elementos.
- O parênquima e a lignina são os responsáveis pela flexibilidade do colmo de bambu.

O colmo do bambu tem forma tubular cônica e segmentada, pois é geralmente formado por uma série alternada de nós e entrenós, diminuindo assim seu diâmetro da base

até o topo. Portanto, a parede do colmo é mais grossa na base e diminui em direção ao topo. Os colmos se diferem de acordo com a espécie (GHAVAMI; MARINHO, 2005; REIS, 2012.). A seguir a figura 2 mostra a geometria do bambu.

**Figura 2** – Pedaco de colmo (à esquerda) e vista de corte paralelo (à direita)

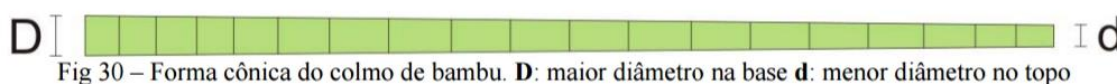
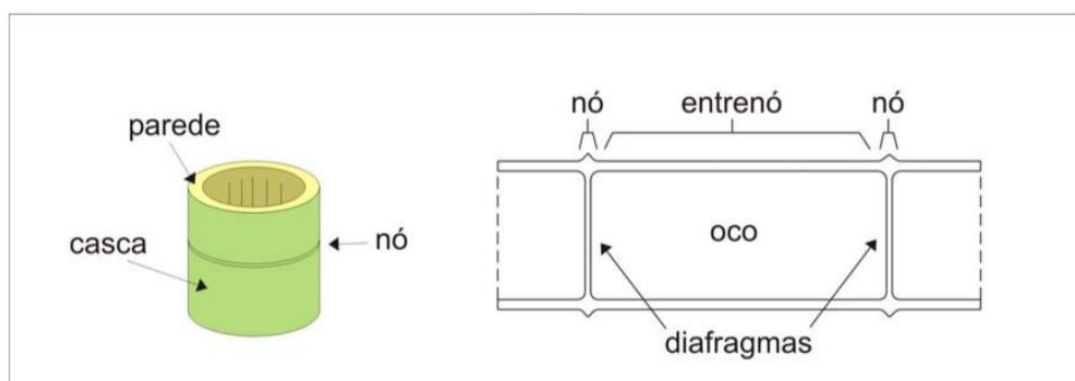


Fig 30 – Forma cônica do colmo de bambu. **D**: maior diâmetro na base **d**: menor diâmetro no topo



Fonte: VASCONCELLOS, 2004

O bambu é uma matéria prima renovável e os colmos do bambu possuem fibras que podem ser incorporadas como reforços em materiais compósitos, substituindo assim fibras sintéticas que possuem um processo de fabricação com custos elevados (REIS, 2012).

## 2.5 CARGAS NOS COMPÓSITOS

### 2.5.1 Resíduo Industrial: Caulim

Caulim é uma rocha formada por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente caulinita e haloisita. O Caulim possui diversas aplicações e novos usos estão sendo muitos pesquisados e desenvolvidos. Contudo, o minério Caulim possui varias substâncias que o deixam impuros: como areia, quartzo, palhetas de mica, grãos de feldspato, óxidos de ferro e titânio, etc. (MÁRTIRES).

O Caulim possui reservas mundiais bem distribuídos, onde segundo Mártires apenas 4 países detêm 95 % de um total estimado de aproximadamente 15 bilhões de toneladas. Sendo os Estados Unidos em primeiro lugar com 53 %, o Brasil em segundo com 28 % e a Ucrânia e Índia ambas com 7 %.

No Estado do Pará estes depósitos são propriedade de três empresas exploradoras de caulim, a Imerys Rio Capim Caulim S/A - IRCC, Pará Pigmentos S/A - PPSA e a Companhia Brasileira de Equipamento – CBE (ROCHA JUNIOR; ANGELICA; NEVES, 2015).

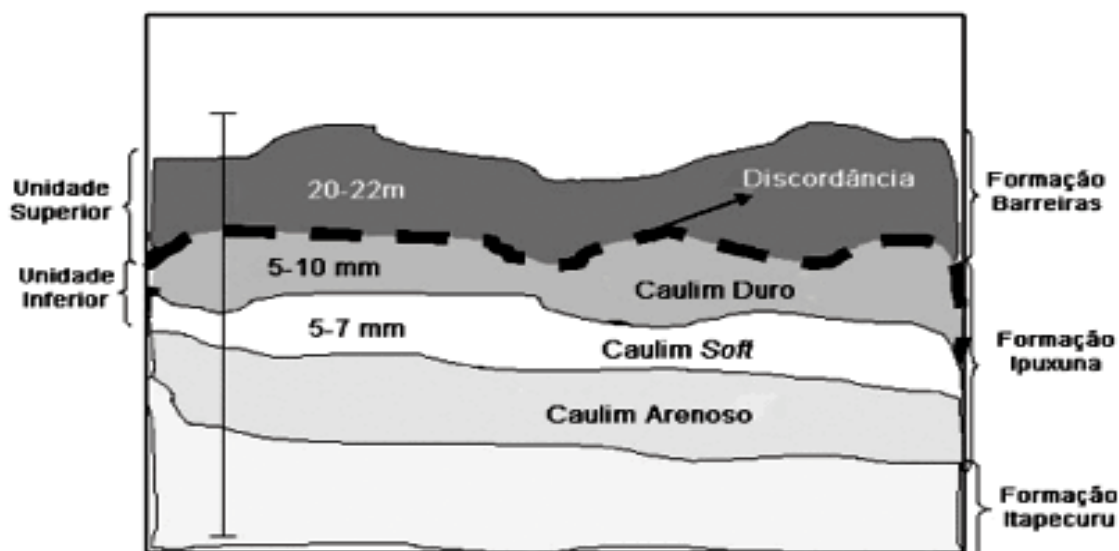
A mina localizada em Ipixuna da empresa exploradora Imerys Rio Capim Caulim S/A - IRCC extrai caulim sedimentar e produz matéria-prima final para a indústria do papel. A variedade de cores do minério é devido à presença de minerais contaminantes como: a hematita, a goethita, o anatásio e o quartzo. A mineralogia contaminante é um indicador importante para o processo de beneficiamento (SABEDOT et al., 2014).

O caulim deve apresentar quantidades de minerais contaminantes possíveis de serem removidos no processo de beneficiamento, de modo a gerar um produto final economicamente viável (SABEDOT et al., 2014).

Estas empresas no processo de beneficiamento do caulim geram um grande impacto ambiental durante a transformação do caulim bruto para um produto comercial (ROCHA JUNIOR; ANGELICA; NEVES, 2015).

O caulim está localizado, em média, a 20 m de profundidade, recoberto por sedimentos argilo-arenosos da Formação Barreiras, e de um nível de caulim duro. O caulim flint ou duro é um resíduo caulínítico, que tem como principal característica baixa alvura e é considerado estéril devido o alto teor de ferro, o que inviabiliza seu uso para cobertura. (ROCHA JUNIOR; ANGELICA; NEVES, 2015; CARNEIRO et al., 2003). Como mostra a figura 3.

**Figura 3** – Perfil de seção longitudinal da região do Rio Capim



Durante o processamento do caulim primário, são gerados dois tipos de resíduos: o resíduo grosso com cerca de 70 % do total produzido, proveniente da separação do quartzo do minério; e o resíduo fino, que surge quando o caulim é purificado. O caulim do tipo ferruginoso possui um aproveitamento de 15 % para ser utilizado na indústria se o mesmo apresentar um teor baixo em ferro. Esse material é guardado a céu aberto, afetando assim a saúde da população e o meio ambiente (ANJOS, 2011; ROCHA JUNIOR; ANGELICA; NEVES, 2015).

A indústria de beneficiamento do caulim, a qual produz resíduos à base de sílica, mica e caulinita geram diversos tipos e níveis de resíduos de caulim correspondente a 80 a 90 % do volume total explorado, ocasionando um grande impacto ambiental (ANJOS, 2011).

Contudo, segundo Anjos (2011), o caulim é uma matéria-prima muito utilizada e possui diversas aplicações importantes na indústria, onde essas aplicações são classificadas em sete categorias:

- 1) Para formação de filmes;
- 2) Como carga ou matéria-prima;
- 3) Na indústria cerâmica e na construção civil;
- 4) Para extensão e reforço de polímeros;
- 5) Para suporte de catalisadores e fibra de vidro;
- 6) Como veículo, adsorvente, diluente;
- 7) Como agente polidor.

Devido o Caulim ser um mineral industrial que possui as seguintes características:

- Quimicamente inerte em uma grande faixa de pH (3 a 9);
- Possui coloração branca ou quase branca, isto é, possui alvura elevada;
- Macio e pouco abrasivo;
- Possui capacidade de cobertura quando usado como pigmento e reforçador para as aplicações de carga;
- Possui fácil dispersão;
- Possui baixa condutividade térmica e elétrica;
- Possui compatibilidade com praticamente todos os adesivos (proteína, caseína), devido à dispersão e inércia química;
- É um produto de preço competitivo em relação aos materiais alternativos.

El banna (2017) estudou a influência do resíduo de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos poliméricos. E obteve com relação aos compósitos de matriz polimérica com adição de resíduo industrial de cobre que para os ensaios mecânicos de tração os compósitos de frações 30 % e 40 % obtiveram resultados próximos ou superiores a matriz plena.

Carneiro et al. (2003) verificou a caracterização mineralógica e geoquímica de dois tipos de caulim duro ou flint da região do Rio Capim no estado do Pará. Os tipos de caulim foram utilizados em função dos teores de ferro: o Caulim Duro Branco (CDB) e o Caulim Duro Ferruginoso (CDF). Onde este último com teor de  $Fe_2O_3$  de 10,36%.

## 2.6 COMPÓSITOS HÍBRIDOS

O emprego de materiais compósitos híbridos possibilita projetar compósitos com as melhores propriedades. O desempenho desses materiais pode ser modificado por hibridação, de tal maneira, a combinação de fibras e reforços na fabricação de compósitos é bem comum. Em virtude, todos os compósitos híbridos possuem propriedades anisotrópicas. Quando esses compósitos híbridos passam por cargas de tração, normalmente a falha não ocorre repentinamente (CALLISTER, 2013; CARVALHO; CAVALCANTI, 2006).

As principais aplicações desses materiais compósitos híbridos encontram-se na fabricação de componentes estruturais de baixo peso para transportes terrestres, aquáticos e aéreos, artigos esportivos e componentes ortopédicos de baixo peso (CALLISTER, 2013).

Carvalho e Cavalcanti (2006) verificou as propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. E obteve de modo geral, que as propriedades em tração aumentaram com o teor e identidade das fibras, sendo mais elevadas para os compósitos reforçados por tecidos com elevado teor de fibras de vidro e testados na direção do vidro.

Costa (2016) estudou a influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais. E observou que as propriedades mecânicas de resistência (tração, flexão e impacto) foram aumentadas em relação à matriz pura na ordem de 15% a 95% para compósitos com fibras, 10 % para compósitos com carga de resíduos industriais e fibras.

Reis (2012) verificou a resistência à tração de compósitos poliméricos híbridos com fibras de bambu e pó do caroço de açaí. E obteve como resultado que a inclusão das fibras de

bambu e pó do caroço de açaí na matriz de resina poliéster diminuiu a resistência mecânica do compósito. Além de observar que o mecanismo de falha predominante foi o (*Pull out*).

Oliveira (2013b) verificou as propriedades mecânicas no efeito de adição de lama vermelha como carga nos compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra natural de curauá. E os resultados mostraram que nas proporções maiores ou iguais a 20 % e fibras 5 % obtiveram um reforço significativo.

## 2.7 FRACTOGRAFIA

Com o aumento na utilização de matérias compósitos avançados em peças ou componentes, torna-se necessário um estudo das possíveis causas de falha do material. A fractografia é uma ferramenta que auxilia na identificação das tensões atuante no momento da falha do material, além da sequência dos eventos ocorridos até a fratura. (REZENDE, 2007).

Geralmente, a fractografia faz o uso de diferentes técnicas para análise como: observação visual, óptica macroscópica, seguida da microscópica óptica, microscopia eletrônica de varredura e, em alguns casos, microscopia eletrônica de transmissão. (REZENDE, 2007). A fractografia estuda a morfologia da superfície do material a ser analisado, onde a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) geralmente é usada para determinar a causa da falha e a relação do modo de falha do material (CÂNDIDO et al., 2014).

Os variados tipos de falhas estão relacionados com o tipo de matriz e fibras e com a relação de adesão e interface existente entre estes elementos. A superfície de fratura é o local mais importante para se determinar a causa da falha. Onde é possível observar de forma detalhada a história dos danos ou de parte dela, contendo as evidências do tipo de carregamento, os efeitos envolvidos e a qualidade do material, além de revelar se a falha foi causada por uma determinada situação de dano ocorrido no local, como impactos. (REZENDE, 2007).

Os compósitos podem falhar no início da vida útil deste material, devido vários tipos de danos. Podendo ser: trinca longitudinal ou “*splitting*”, trinca transversal, ruptura de fibras, dano no núcleo, absorção de água, vazios, porosidades, descolamento e delaminação, originados muitas vezes por erros de projeto ou fabricação ou utilização (REZENDE, 2007).

O tipo de carregamento utilizado em um material compósito gera uma determinada superfície de fratura. Como exemplos: carregamento em tração gera efeitos como o

arrancamento das fibras (*fibre pull-out*), enquanto que o carregamento em cisalhamento interlaminar gera delaminações (REZENDE, 2007).

Cândido et al. (2014) diz que as informações cedidas por essa análise fractográfica permite estabelecer uma analogia entre estrutura, propriedade e processamento, tanto na iniciação quanto na propagação da falha do material.

## 2.8 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

As análises por raios-X podem ser divididas em técnicas que fornecem informações sobre a composição do material, por exemplo: EPMA (Electron Probe Micro Analysis) e PIXE (Próton Induced C-ray Emission), e técnicas que estudam a resposta do material quando excitado por raios-X, por exemplo: XPS (X-Ray Photoelectron Analysis) e XRD (X-Ray Diffraction) (LIMA, 2006).

Segundo Lima (2006) a técnica mais usada por estudantes é a técnica de difração de raios-X (XRD), que permite a caracterização de materiais.

O fenômeno da difração de raios-x estuda materiais a nível atômico, descobrindo e estudando sua estrutura (BLEICHER; SASAKI, 2000).

A difração ou fenômeno de difração é característico do movimento ondulatório e está relacionado ao fenômeno da interferência, onde a radiação precisa ser coerente, onde a onda espalhada tem direção definida, mesma fase e mesma energia em relação à onda incidente (LIMA, 2006; BLEICHER; SASAKI, 2000).

## 2.9 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é vastamente utilizado para determinar as propriedades mecânicas dos materiais, dando assim informações importantes sobre a resistência do material. Esse ensaio permite conhecer o comportamento dos materiais e o seu estado quando o esforço é aplicado continuamente, além da sua zona elástica, seu limite de escoamento e a sua tensão de ruptura (FREDEL; ORTEGA; BASTOS).

As principais associações de normas técnicas ASTM (American Society for Testing and Materials) e ABNT (Associação Brasileira de normas Técnicas) fornecem as normas que descrevem o procedimento do ensaio. Os corpos de prova têm características especificadas de acordo com as normas técnicas, usualmente são utilizados corpos de prova de seção circular ou retangular (DALCIN, 2017; BAYER, 2013).

Com essa padronização para os ensaios de resistência à tração dos materiais é possível obter uma linguagem comum entre fornecedores e usuários do setor industrial. Este tipo de ensaio é comumente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido às vantagens de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais (DALCIN, 2017; BAYER, 2013).

O procedimento do ensaio de tração consiste em aplicar uma tensão de ação uniaxial crescente onde é medido o seu comportamento de modo pontual em um corpo de prova até a sua ruptura (JORGE TEÓFILO). O ensaio de tração permite medir satisfatoriamente a resistência do material e é muito utilizado como teste para o controle de qualidade de matéria prima para diferentes processos (DALCIN, 2017; BAYER, 2013).

A deformação do material ensaiado é medida e definida por uma dimensão qualquer desse corpo que varia por unidade da mesma dimensão quando sofre um esforço qualquer (JORGE TEÓFILO).

O processo de deformação é classificado em deformação elástica e deformação plástica. Quando ocorre uma linearidade entre tensão e a deformação, tornando as proporcionais, esse processo é chamado de deformação elástica, onde o comportamento gráfico se aproxima de uma função do primeiro grau, com a tensão em função da deformação (JORGE TEÓFILO). É dita deformação plástica quando o material é tracionado e não consegue recuperar a sua forma original após serem removidos os esforços submetidos à ele (FREDEL; ORTEGA; BASTOS).

Na engenharia, pode definir tensão nominal ou tensão convencional pela equação 1:

$$\sigma = \frac{f}{a_0} \quad (1)$$

Onde:

f = Força;

$a_0$  = Seção reta da amostra;

E a deformação na engenharia é definida pela a equação 2:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_o}{l_o} \quad (2)$$

Onde:

$\varepsilon$  = Deformação.

$l_o$  = Comprimento original.

$l_i$  = Comprimento instantâneo.

A parti de uma analogia da lei de Hooke é possível criar uma comparação entre as equações 1 e 2 para a tenção e deformação gerando uma equação 3:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{f.l_o}{a_o.(l_i - l_o)} \quad (3)$$

Onde:

E = modulo de elasticidade ou modulo de Young.

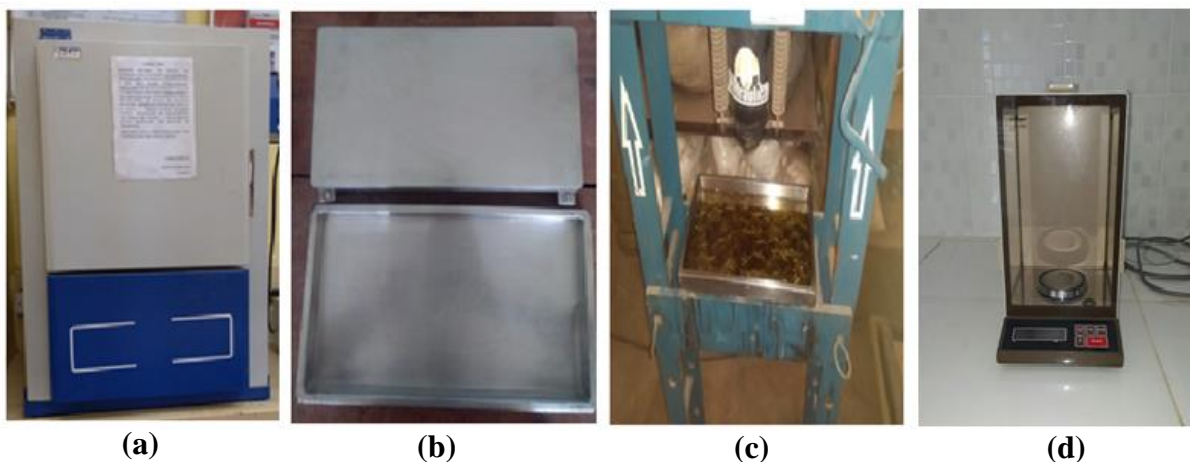
No sistema internacional (SI) E é expresso em pascal.

### 3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- **ESTUFA, DE LEO** – Equipamentos Laboratoriais, T 50 °C a 250 ° C. (Laboratório de Engenharia Química);
- **BALANÇA ANALÍTICA**, CHYO MODELO JK 200, (Laboratório de Engenharia Química);
- **MOLDE METÁLICO**, Dimensões (320 mm x 172,5 mm x 5 mm), (Laboratório de Engenharia Química).
- **PRENSA HIDRÁULICA**, MARCON, modelo MPH-15, com capacidade de 15 ton. (Laboratório de Engenharia Química);

**Figura 4** – Equipamentos: a) estufa; b) molde metálico; c) prensa hidráulica e d) balança analítica



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

#### 3.2 MATERIAIS

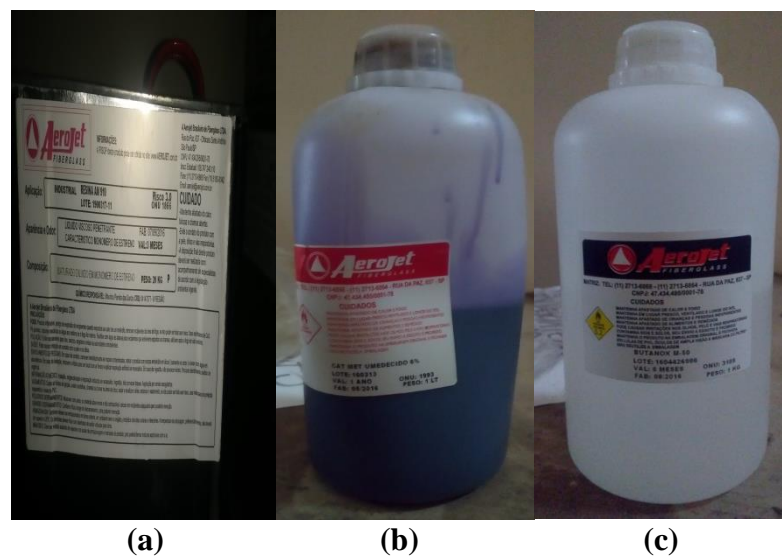
##### 3.2.1 Matriz polimérica

O polímero utilizado no presente trabalho foi a Resina Poliéster Isoftálica (Resina AM 910 AEROJET), de média reatividade, amarelada, não acelerada, com baixa viscosidade, boa resistência química, adquirida da empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA. Foi utilizado neste trabalho como catalisador o produto comercial BUTANOX M-50 marca de

AEROJET (Peróxido de metil etil cetona [MEK-P]), adquirido da empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA. O acelerador de Cobalto utilizado na fabricação dos compósitos foi o produto comercial denominado CAT MET UMEDECIDO (Solução de Octoato de cobalto 1,5 %), adquirido da empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA.

Os produtos utilizados na preparação da matriz do compósito estão ilustrados na figura 5 a seguir:

**Figura 5** – Materiais: a) resina Poliéster Isoftálica, b) acelerador de cobalto, c) Peróxido de metil etil cetona [MEK-P]

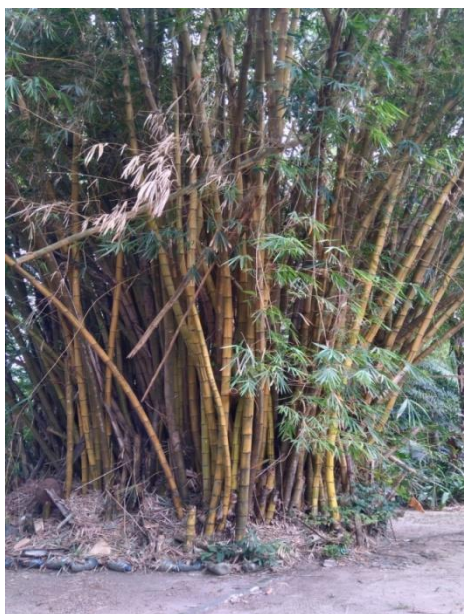


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

### 3.2.2 Fibra de Bambu

As fibras de bambu utilizadas neste trabalho foram extraídas de um colmo de bambu no campus profissional I (um) da Universidade Federal do Pará – UFPA, mostrado na figura 6.

**Figura 6 – Bambuzal**



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

### 3.2.3 Resíduo Industrial: Caulim flint

O resíduo industrial de caulim utilizado para confecção dos compósitos foi fornecido pela empresa Imerys Caulim, localizada no município de Ipixuna do Pará, no interior do estado do Pará.

Nas operações da empresa Imerys Caulim, o minério é extraído de duas minas situadas em Ipixuna do Pará que fica às margens do Rio Capim. O caulim é transportado por minerodutos até Barcarena, onde passa por um processo de beneficiamento (IMERYS CAULIM). O caulim do tipo flint ou caulim duro não passa pelo processo de beneficiamento e tem como principal característica a baixa alvura. A figura 7 mostra o caulim utilizado neste trabalho.

**Figura 7 - Caulim**

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

### 3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.3.1 Aquisição das fibras de Bambu

As fibras de bambu foram obtidas através de um processo totalmente manual. Primeiro cortou-se o colmo de bambu no bosque situado no campus da UFPA – Belém, depois os internos foram cortados e levados para um recipiente com água, por fim foram cortados em tiras para fazer a extração das fibras.

As fibras de bambu depois de extraídas foram cortadas em tamanho de 15 e 30 mm. O processo de corte foi: juntar-se um feixe de fibras e coloca-las sobre uma tira de papel graduada no tamanho desejado e corta-las. A figura 8 mostra o processo de extração das fibras de bambu.

**Figura 8 – Processo de extração das fibras**

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

### 3.3.2 Aquisição dos resíduos de caulim flint

O material foi primeiramente levado ao moinho de bolas por 1 h para que fosse desagregado, posteriormente o caulim passou por uma técnica de granulometria a úmido manual em peneira de granulometria de 325 mesh, logo após o material peneirado foi levado para a estufa por um período de 24 h. Após o tempo na estufa o caulim peneirado foi cominuído com a ajuda do almofariz de porcelana e por fim este material passou pela técnica de granulometria em peneira de malha 100 mesh. A figura 9 mostra o resíduo de caulim sendo cominuído.

**Figura 9** – Resíduo de Caulim



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

### 3.3.3 Caracterização do Resíduo de Caulim

#### 3.3.3.1 *Difração de Raio-X*

Na preparação das amostras primeiramente foi feito o quarteamento, que é um processo de redução da amostra, após esse processo foram feitas a homogeneização e a diminuição dos tamanhos dos grãos do material a ser analisado. O material analisado foi o resíduo de caulim flint. As análises mineralógicas foram realizadas por um equipamento conhecido como Difratorômetro de Raios-X utilizada para identificar as fases cristalinas do material.

### 3.3.4 Produção dos Compósitos

Para a confecção de compósitos de matriz polimérica plena, matriz polimérica com reforço de fibras de bambu nos comprimentos de 15 e 30 mm, compósitos polimérico com inserção de resíduo industrial de caulim e compósitos poliméricos híbridos fibra/resíduo, foi utilizado um molde metálico na forma de placa retangular com dimensões: 320 mm x 172,5 mm x 5 mm. O método aplicado foi o método conhecido como *hand lay-up* ou método manual.

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

#### 3.3.4.1 Etapas da Produção dos Corpos de Prova

1. Primeiramente foram feitos cálculos para se conhecer a massa e o volume de resina Isoftálica, assim como a quantidade de material necessário para a fabricação das placas compósito. Esses valores foram tabelados como mostra as tabelas a seguir:

**Tabela 1** – Valores para confecção de placas de matriz plena

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

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

**Tabela 2** – Valores para confecção de placas de resíduo de caulim

(continua)

<b>%</b>	<b>Resina (g)</b>	<b>Resíduo (g)</b>	<b>Co (1,5 %) (ml)</b>	<b>MEK (1 %) (ml)</b>
<b>10</b>	285,66	31,74	3,726	2,484
<b>20</b>	253,92	63,48	3,312	2,208

**Tabela 2** – Valores para confecção de placas de resíduo de caulim

(continuação)

<b>30</b>	<b>222,18</b>	<b>95,22</b>	<b>2,898</b>	<b>1,932</b>
<b>40</b>	190,44	126,96	2,484	1,656

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

**Tabela 3** – Valores para confecção de placas de fibras de bambu

<b>%</b>	<b>Resina (g)</b>	<b>Fibra (g)</b>	<b>Co (1,5 %) (ml)</b>	<b>MEK (1 %) (ml)</b>
<b>1</b>	314,22	3,17	4,09	2,73
<b>2</b>	311,05	6,34	4,05	2,70
<b>3</b>	307,87	9,52	4,01	2,67

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

**Tabela 4** – Valores para confecção de placas híbridas fibra/resíduo

<b>%</b>	<b>Resina (g)</b>	<b>Fibra 3 % (g)</b>	<b>Resíduo (g)</b>	<b>Co (1,5 %) (ml)</b>	<b>MEK (1 %) (ml)</b>
<b>10</b>	276,13	9,52	31,74	3,60	2,40
<b>20</b>	244,39	9,52	63,48	3,18	2,12
<b>30</b>	212,65	9,52	95,22	2,77	1,84

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

- Com os valores tabelados utilizou-se uma balança analítica para determinação de massas e volumes de todo o material necessário para produção de cada placa de compósito de acordo com sua porcentagem. Tanto as fibras quanto o resíduo de caulim depois de pesados foram levados para a estufa a uma temperatura de 105° C por 10 e 20 minutos, respectivamente, para se retirar a umidade.

3. Na sequência iniciaram-se a produção das placas, onde primeiro se produziu placas plenas, ou seja, sem carga, em seguida foram confeccionadas as placas de resina poliéster Isoftálica com inserção de reforço de fibras de bambu nos comprimentos de 15 e 30 mm, com as seguintes proporções de fibras de bambu: 1, 2 e 3 %. As fibras foram dispostas aleatoriamente dentro da matriz polimérica. Posteriormente foram fabricadas as placas de resina poliéster Isoftálica com adição de carga de resíduo de caulim nas seguintes proporções: 10, 20, 30 e 40 % de resíduo de caulim. Por fim foram feitas as placas de compósitos híbridos fibra/resíduo utilizando a proporção de fibras de 3 % e resíduo industrial de caulim nas proporções 10, 20 e 30 %. A figura 10 ilustra a sequência de produção dos compósitos.

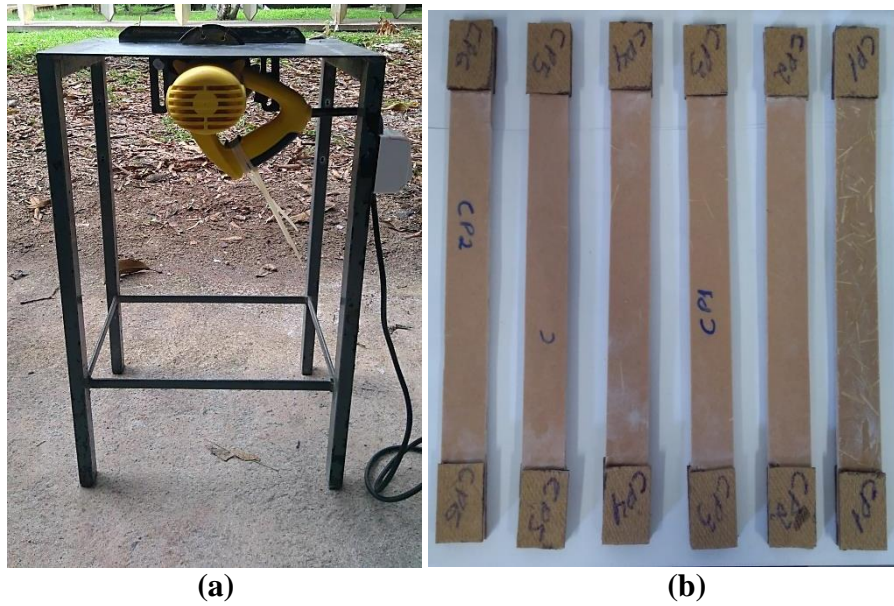
**Figura 10** – Sequência da produção dos compósitos



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

4. Com todas as placas produzidas, foram realizados os cortes dessas placas no laboratório de compósitos na Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA, em tamanhos de corpos de prova seguindo a norma ASTM D3039 para serem realizados os ensaios de tração. A figura 11 mostra a máquina de corte utilizada e os corpos de prova cortados.

**Figura 11** – (a) máquina de corte e (b) corpos de prova



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

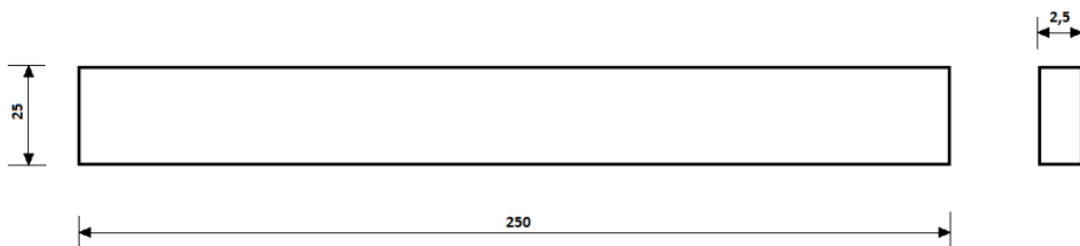
### 3.3.5 Ensaios de Resistência a Tração

Os ensaios mecânicos de tração são feitos de acordo com as normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) ou ASTM (American Society for Testing and Materials).

Esses ensaios são realizados com corpos de prova de formas e dimensões padronizados de acordo com a norma ASTM utilizada, para que os resultados obtidos possam ser reproduzidos ou comparados.

Os ensaios de tração foram realizados seguindo a norma ASTM D3039 e adotaram as seguintes medidas como demonstrado esquematicamente na figura 12 a seguir:

**Figura 12** – Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de tração



Fonte: ASTM D 3039 - 08, 2005

A norma recomenda pelo menos cinco corpos de prova para serem testados. Esses corpos de prova são fixados um de cada vez em uma máquina de ensaios (figura 13) que aplica esforços crescentes na sua direção axial, onde essas deformações são medidas.

**Figura 13** – Máquina Universal de ensaios



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

### 3.3.6 Análise das Superfícies de Fratura

As Análises das Superfícies de Fratura foram feitas no Laboratório de Física do campus básico da Universidade Federal do Pará – UFPA, onde foram primeiramente preparadas às amostras para análise como mostra a figura 14.

**Figura 14** – Amostras para análise



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

Após serem separadas as amostras para as análises, estas foram colocadas no equipamento (Fig. 15 (a)) para pulverização de ouro e evaporação de carbono e em seguida foram feitas as análises no MEV (Fig. 15 (b)).

**Figura 15** – (a) Equipamento para pulverização de ouro e evaporação de carbono e (b) Microscópio Eletrônico de Varredura



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

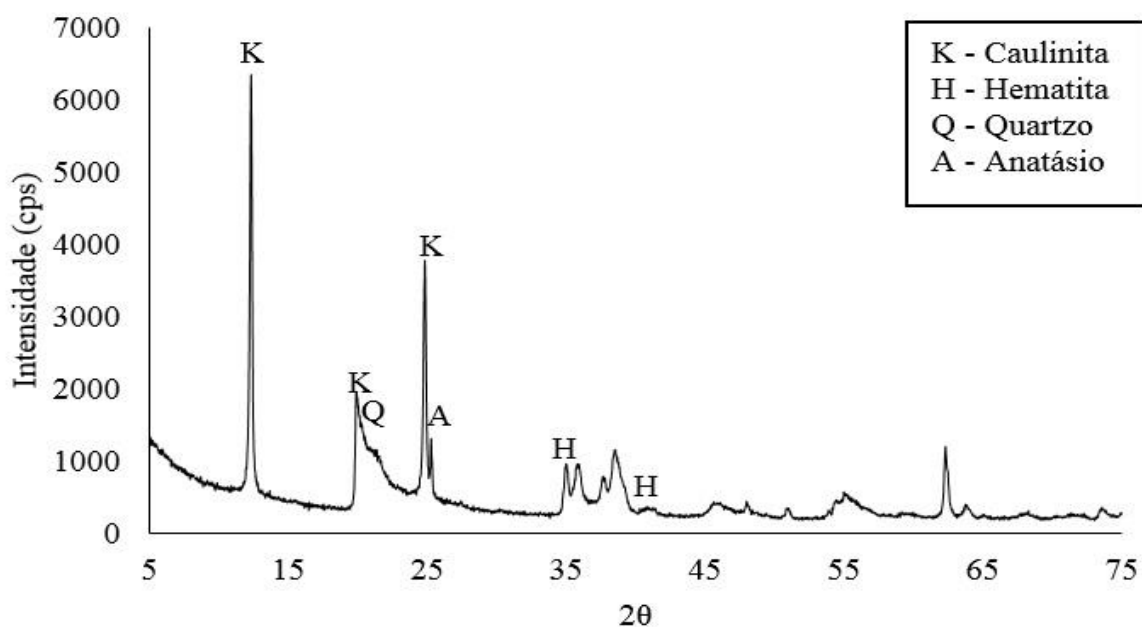
### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CAULIM FLINT

#### 4.1.1 Difração de Raio-X

As composições mineralógicas do resíduo industrial de caulim foram analisadas por meio do DRX (Difração de Raio-X). No difratograma apresentado na figura 16 do resíduo de caulim flint identificam-se os principais componentes mineralógicos do material de acordo com suas fichas PDF, onde a Caulinita (K) é o principal constituinte. Esse material também apresenta componentes de baixa intensidade como: Quartzo (PDF 01-076-0931), Anatásio (A) (PDF 01-078-2486) e Hematita (H) (PDF 01-073-0603). Segundo Rocha Junior, Angélica e Neves (2015) este último componente só é observado no caulim do tipo flint.

Esses resultados estão de acordo com as composições mineralógicas das literaturas pesquisadas (COSTA, 2016; CARNEIRO et al., 2003; ROCHA JUNIOR; ANGELICA; NEVES, 2015).

Figura 16 – Difratometria do caulim



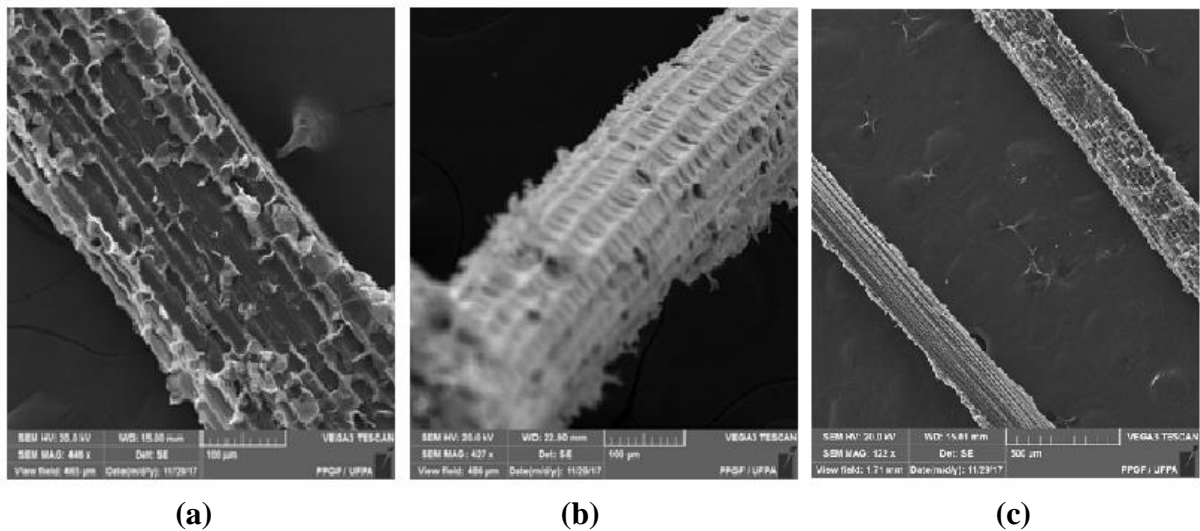
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

## 4.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

### 4.2.1 Microscopia da fibra de bambu

A microscopia eletrônica de varredura foi feita em duas fibras de bambu, como mostra figura 17, com aumentos de 446x, 427x e 122x.

**Figura 17** – Micrografias obtidas por MEV da fibra de bambu. (a) Aumento 446x. (b) Aumento 427x. (c) Aumento 122x



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

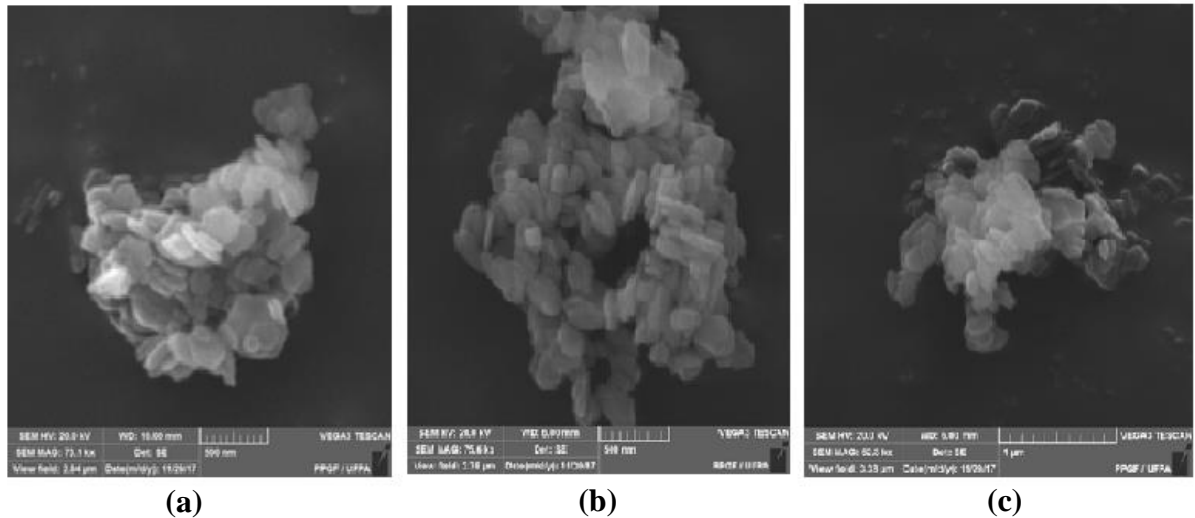
A figura 17 apresenta as micrografias obtidas por MEV de duas fibras de bambu “*in natura*”, ou seja, na forma que é encontrada. As micrografias revelam fibras de bambu longas contínuas e vasos de diferentes formas e tamanhos. Segundo Oliveira (2013a) o bambu tem um tecido reforço que aumenta a resistência de suas estruturas, o esclerênquima. Essa estrutura é composta por vasos e veios que transportam os nutrientes.

Pode-se notar ainda que as fibras de bambu apresentam muitas áreas rugosas com poucas áreas lisas. Costa (2012) diz que as fibras vegetais apresentam em sua composição micro estrutural um alto percentual de microfibrilas de celulose.

#### 4.2.2 Microscopia do resíduo de caulim flint

A microscopia eletrônica de varredura foi feita no resíduo de caulim como mostra a figura 18.

**Figura 18** – Micrografias obtidas por MEV do resíduo de Caulim Flint. (a) Aumento 73.1 kx. (b) Aumento 75.6 kx. (c) Aumento 62.3 kx



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

Pode-se notar que a análise de microscopia feita no resíduo de caulim mostra os grãos de caulinita presente no caulim, fato esse que pode ser observado pelos aglomerados de pseudo hexagonais. Segundo Freire, Bertolino e Luz os grãos de caulinita tem formato de pseudo hexagonais e apresentam-se em aglomerados.

### 4.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

#### 4.3.1 Material compósito com reforço de bambu 15 mm

Os compósitos poliméricos com reforço de fibra de bambu de 15 mm foram avaliados de acordo com sua resistência mecânica por meio do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados como mostra a tabela 5.

**Tabela 5** - Resultados do ensaio de tração de compósitos com reforço de Fibras de Bambu de 15 mm

<b>Tipo de Amostra</b>	<b>Proporção de Fibras (%)</b>	<b>Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)</b>	<b>Alongamento (mm)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
<b>Matriz plena</b>	0	24,24 ( $\pm 2,38$ )	4,08	1,03
<b>Fibras de Bambu de 15 mm</b>	1	41,89 ( $\pm 8,57$ )	5,89	1,33
	2	35,49 ( $\pm 5,53$ )	4,76	1,36
	3	32,57 ( $\pm 6,00$ )	4,74	1,11

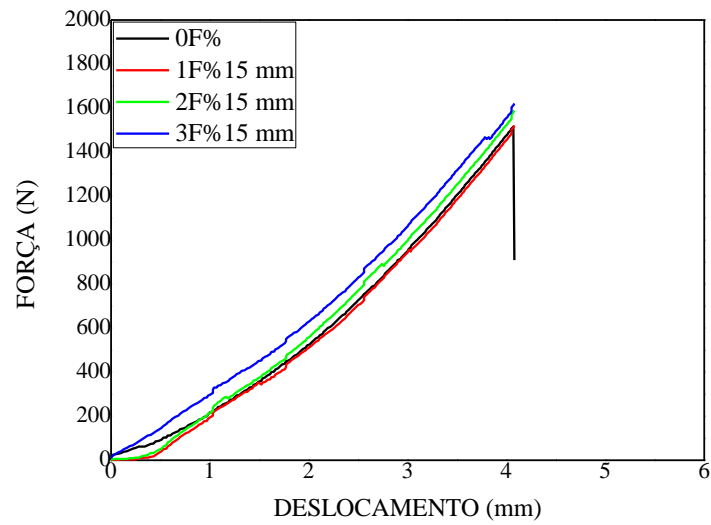
**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

Os resultados mostrados na tabela 5 mostram de maneira geral que houve um aumento na resistência mecânica em relação à matriz plena de todas as proporções de fibras utilizadas como carga na matriz, onde a fração de 1 % de fibra de bambu 15 mm na matriz polimérica possuiu o maior valor de resistência à tração, já nas frações de 2 % e 3% observa-se uma diminuição gradativa da resistência à tração, fato esse pode ser devido uma menor distribuição da resina com a fibra.

Os valores de módulo de elasticidade mostram um aumento em relação à matriz sem carga, que pode ser observado à medida que se adiciona fibras de bambu na matriz. CANEVAROLO JR. (2006) diz que quando o módulo de elasticidade da segunda fase for maior do que o da matriz, o resultado obtido implicará num aumento nas propriedades mecânicas do material.

Os compósitos de bambu no comprimento de 15 mm obtiveram valores de resistência superiores comparados com outros pesquisadores (COSTA, 2012; SANTOS et al., 2017).

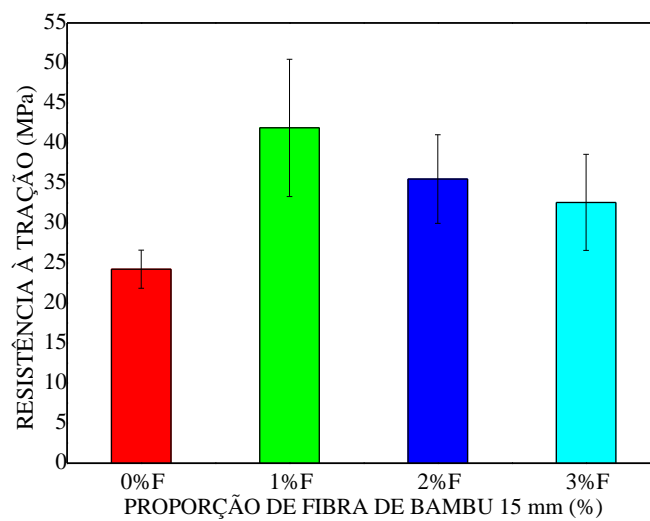
A figura 19 ilustra o gráfico de Força x Deslocamento e a figura 20 ilustra o gráfico de barra comparativo, ambas dos compósitos de matriz sem carga e de compósitos com adição de fibras de bambu 15 mm nas frações de F 1 %, F 2 % e F 3 %.

**Figura 19** – Gráfico Força x Deslocamento

**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A figura 19 mostra o gráfico que relaciona a força (N) e o deslocamento (mm) dos compósitos poliméricos com reforço de fibra de bambu de 15 mm, onde é possível observar que a fração de 3 % de fibras de bambu suportou uma força superior às demais.

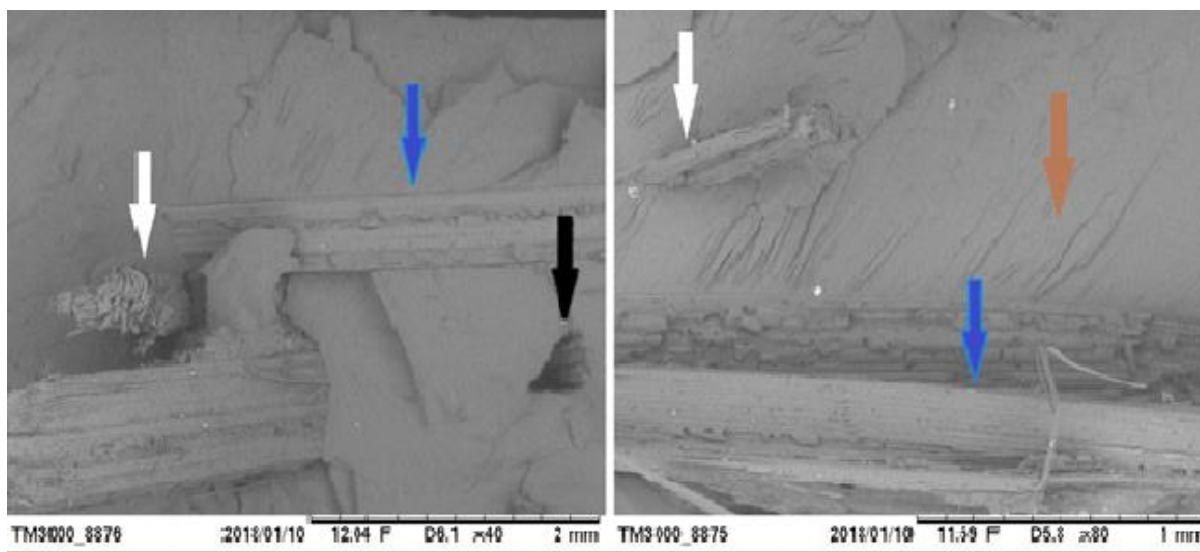
**Figura 20** – Comportamento de resistência à tração do material compósito com reforço de fibras de bambu 15 mm



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A figura 20 ilustra o gráfico que mostra o comportamento de resistência à tração versus proporção de fibra de bambu 15 mm. Nela pode-se observar que os compósitos reforçados com fibras 2 e 3 % obtiveram um decréscimo no desempenho mecânico, no entanto os mesmos obtiveram desempenho significativamente superior quando comparados com a matriz plena.

**Figura 21** – Micrografias obtidas por MEV de compósitos de matriz polimérica e fibras de bambu 15 mm



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

Pelas análises das micrografias da superfície de fratura do corpo de prova de matriz polimérica e fração de 1 % de fibras de bambu 15 mm podem-se notar as “marcas de rio” (seta marrom) indicando fratura frágil. É possível observar a presença de imperfeições na superfície fraturada, vazio (seta preta) decorrente do descolamento da fibra da matriz (*pull out*) o que significa pouca adesão na interface fibra/matriz, porém é possível observar uma predominância de fibras de bambu rompidas (setas brancas) e de fibras dispostas transversalmente (setas azuis) em relação ao carregamento, o que implica em uma boa resistência mecânica de tração do material compósito.

#### 4.3.2 Material compósito com reforço de bambu 30 mm

Os compósitos poliméricos com reforço de fibra de bambu de 30 mm 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 Bambu de 30 mm

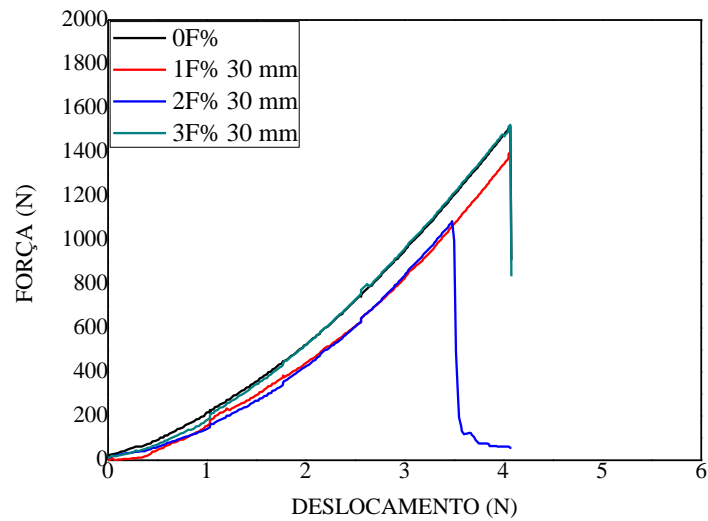
<b>Tipo de Amostra</b>	<b>Proporção de Fibras (%)</b>	<b>Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)</b>	<b>Alongamento (mm)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
<b>Matriz plena</b>	0	24,24 ( $\pm 2,38$ )	4,08	1,03
<b>Fibras de Bambu de 30 mm</b>	1	27,06 ( $\pm 6,24$ )	4,87	1,00
	2	17,36 ( $\pm 2,94$ )	4,66	8,45
	3	24,38 ( $\pm 3,49$ )	4,15	1,11

**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

Na tabela 4.2, pode-se observar que apenas a fração de 1 % obteve valor de resistência à tração maior quando comparado a matriz pura, 27,06 MPa. Observa-se também que a fração de 2 % de fibras na matriz obteve um valor de resistência à tração menor do que o valor de resistência da matriz sem carga. A proporção de 3 % obteve valor semelhante à resistência mecânica da matriz sem carga. É possível observar também que somente a fração de 3 % obteve limite de modulo de elasticidade maior quando comparado a matriz sem carga.

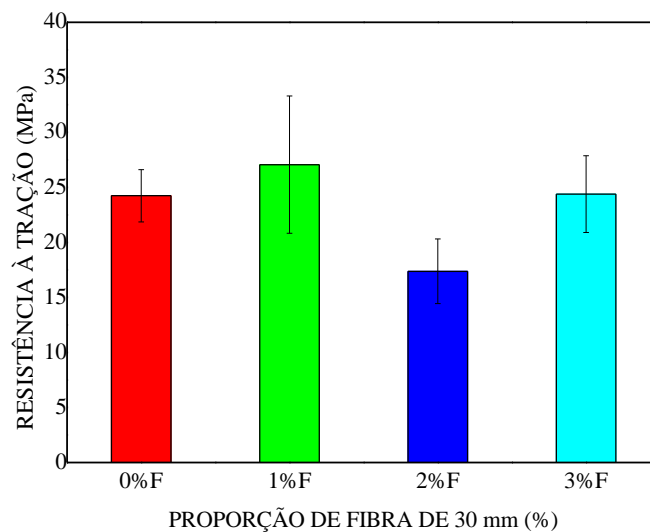
Esta diminuição da resistência mecânica pode ser devida falha na homogeneização, da compactação ou da fabricação dos compósitos de fibras de bambu. Angrizani et al. (2006) estudou a influência da fibra de sisal, que é uma fibra vegetal, na propriedade de compósitos com matriz poliéster e observou que compósitos reforçados com fibras de menor comprimento obtiveram valores de resistência maiores. Tais resultados segundo ele é devido à dificuldade de homogeneização e dispersão das fibras com maiores comprimentos no interior do molde.

A figura 22 ilustra o gráfico de Força x Deslocamento e a figura 23 ilustra o gráfico de barra comparativo, ambas dos compósitos de matriz sem carga e de compósitos com adição de fibras nas frações de 1, 2 e 3 % de bambu no comprimento de 30 mm.

**Figura 22** – Gráfico Força x Deslocamento

**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

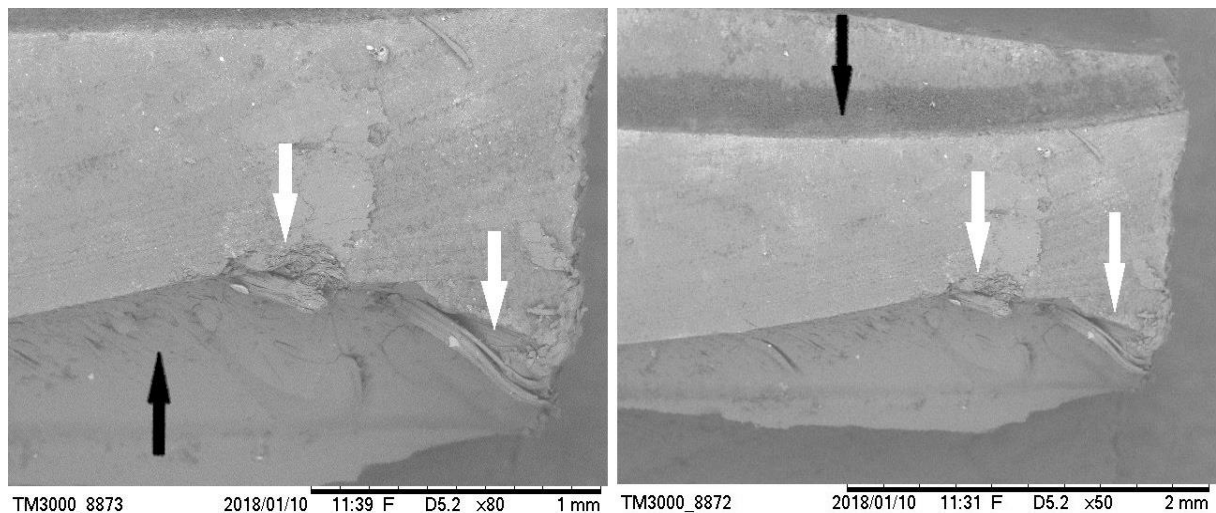
A figura 22 mostra o gráfico que relaciona a força (N) e o deslocamento (mm) dos compósitos poliméricos com reforço de fibra de bambu de 30 mm, onde é possível observar que as frações de 0 % fibra (matriz plena) e de 3 % de fibras de bambu suportaram uma força equivalente e superior às demais.

**Figura 23** – Comportamento de resistência à tração do material compósito com reforço de fibras de bambu 30 mm

**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A figura 23 ilustra o gráfico que mostra o comportamento de resistência à tração versus proporção de fibra de bambu no comprimento de 30 mm. Nela pode-se observar que os compósitos reforçados com fibras na fração de 2 % obteve valor de resistência menor e na proporção de 1 % os compósitos obtiveram o valor de resistência maior.

**Figura 24** – Micrografias obtidas por MEV de compósitos de matriz polimérica e fibras de bambu 30 mm



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

Na superfície de fratura do corpo de prova de matriz polimérica e fibras de bambu 30 mm foi possível observar além de algumas imperfeições na superfície de fratura, descolamento de fibras (setas brancas) e crateras na superfície (setas pretas), o que segundo Costa (2016) é um fato característico de uma baixa adesão entre a interface matriz/fibras, onde as trincas se propagam, diminuindo assim a resistência à tração do material compósito.

A tabela 7 reúne dados de propriedades mecânicas de alguns compósitos de matrizes poliméricas e fibras vegetais encontradas na literatura e dos compósitos estudados neste trabalho. Estes compósitos foram confeccionados sob diferentes condições, teores de fibras e comprimentos, de modo que não é possível uma comparação direta entre os mesmos. Contudo, estes dados foram inseridos neste trabalho para se ter uma ideia da resistência mecânica de tração destes compósitos estudados por outros pesquisadores. Analisando a tabela 7, pode-se dizer que o compósito bambu/poliéster utilizado neste trabalho apresentou um bom desempenho mecânico.

**Tabela 7** - 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. à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
<b>Bambu/Poliéster 15 mm (Neste trabalho)</b>	1 %	41,89 ± 8,57	1,03
<b>Bambu/Poliéster 30 mm (Neste trabalho)</b>	1%	27,06 ± 6,24	1,00
<b>Juta/Poliéster (SILVA, 2014)</b>	20 %	68,80 ± 13,86	0,79 ± 0,08
<b>Juta/Epóxi (SILVA, 2014)</b>	20 %	83,31 ± 12,85	0,04 ± 0,08
<b>Bambu/poliéster (SANTOS et al., 2017)</b>	3 %	20,56 ± 1,50	0,86
<b>Malva/Poliéster (COSTA, 2016)</b>	5 %	57,19 ± 2,88	0,40 ± 0,02
<b>Sisal/Poliéster (COSTA, 2016)</b>	5 %	62,39 ± 2,20	0,41 ± 0,02
<b>Juta/Poliéster (COSTA, 2016)</b>	5 %	55,88 ± 2,05	0,42 ± 0,02
<b>Bananeira/Poliéster (EL BANNA, 2017)</b>	1 %	38,50 ± 4,25	1,94 ± 0,24

**Fonte:** Elaboração própria. Adaptado dos autores citados

#### 4.3.3 Material compósito com carga de resíduo de caulim flint

Os compósitos poliméricos com inserção de resíduo de Caulim Flint foram avaliados de acordo com sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados como mostra a tabela 8.

**Tabela 8** - Resultados do ensaio de tração de compósitos com inserção de resíduo de caulim flint

<b>Tipo de Amostra</b>	<b>Proporção de Carga (%)</b>	<b>Fração Mássica (FM) (g)</b>	<b>Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)</b>	<b>Alongamento Linear (mm)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
<b>Matriz plena</b>	0	317,40	24,24 ( $\pm 2,38$ )	4,08	1,03
<b>Resíduo Industrial de Caulim Flint</b>	RC 10	31,74	27,53 ( $\pm 6,28$ )	4,77	1,06
	RC 20	63,48	30,78 ( $\pm 6,56$ )	4,70	1,24
	RC 30	95,22	31,44 ( $\pm 4,39$ )	5,20	1,13
	RC 40	126,96	27,77 ( $\pm 2,49$ )	5,87	1,19

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

Na tabela 8, observa-se através dos resultados que a resistência à tração dos compósitos poliméricos com carga de resíduo de caulim flint apresentou um aumento na resistência mecânica até a proporção de carga de 30 % de resíduo de caulim, onde o mesmo apresentou resultado de 31,44 MPa. Santos et al. (2017) dizem que os compósitos de matriz polimérica e resíduo de caulim tem uma melhor distribuição dentro do compósito à medida que se aumenta a proporção de caulim na matriz, melhorando assim: a trabalhabilidade, a homogeneização e a compactação.

Contudo, continuando o aumento de proporção de carga acima de 30 % observa-se uma diminuição na resistência à tração do caulim na matriz, como mostra a proporção de carga de 40 %, que obteve o valor de 27,77 MPa, fato este pode ser devido o resíduo de caulim poder estar se comportando como matriz. É possível observar também que o módulo de elasticidade a partir da fração de 20 % foi maior do que o módulo de elasticidade da matriz sem carga.

Os compósitos com carga de resíduo de caulim flint foram confeccionados até a fração de 40 %, pois ao se fabricar compósitos acima desse valor não foi possível a homogeneização e a compactação do material compósito.

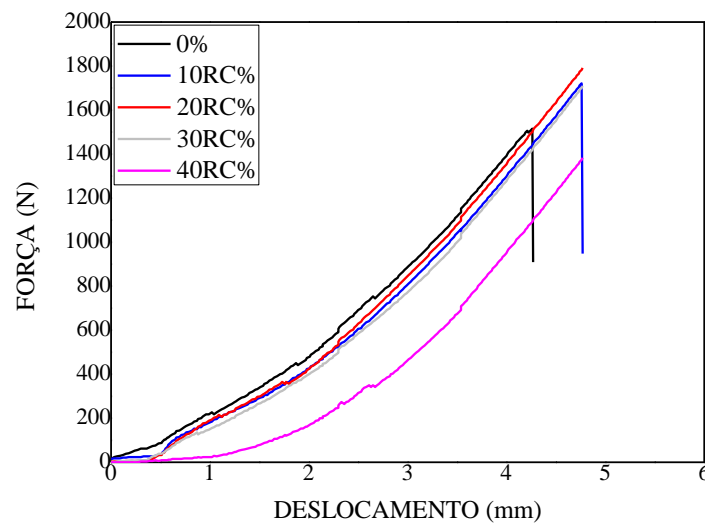
Os resultados de resistência à tração apresentados neste trabalho foram maiores do que os resultados presentes no trabalho de Costa (2016), onde os valores de resistência à tração

foram diminuindo progressivamente de acordo com o aumento na proporção de caulim na matriz.

Os resultados de resistência mecânica mostrados no presente trabalho, com a utilização de compósitos com carga de resíduo industrial de caulim, também foram maiores ou semelhantes aos encontrados na literatura com a utilização de outros resíduos industriais. Onde El banna (2017) estudou compósitos com resíduo industrial de cobre e obteve na fração de 30 % valor de 34,31 MPa; Já Costa (2016) confeccionou compósitos de resíduo industrial de lama vermelha e obteve resistência à tração no valor de 24,85 MPa na fração de 10 %. Sendo os maiores valores apresentados.

A figura 25 ilustra o gráfico de Força x Deslocamento e a figura 26 ilustra o gráfico de barra comparativo, ambas dos compósitos de matriz sem carga e de compósitos com adição de resíduo de caulim nas frações de RC 10%, RC 20%, RC 30 % e RC 40%.

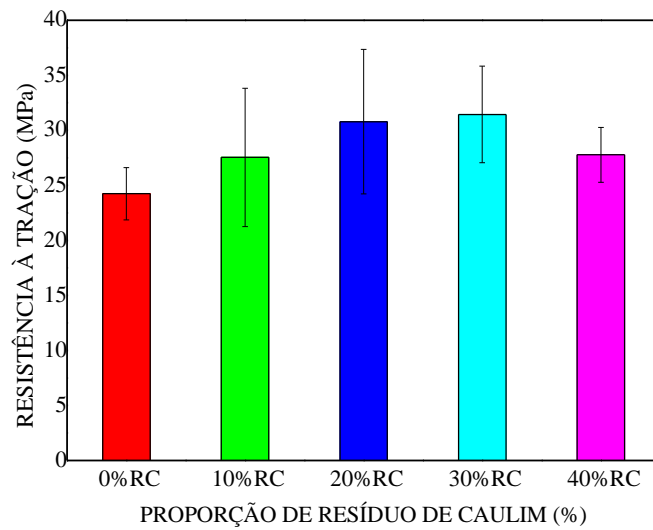
**Figura 25** – Gráfico Força x Deslocamento



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A figura 25 mostra o gráfico que relaciona a força (N) e o deslocamento (mm) dos compósitos poliméricos com carga de resíduo industrial de caulim flint, onde é possível observar que a fração de 20 % de resíduo suportou uma maior força.

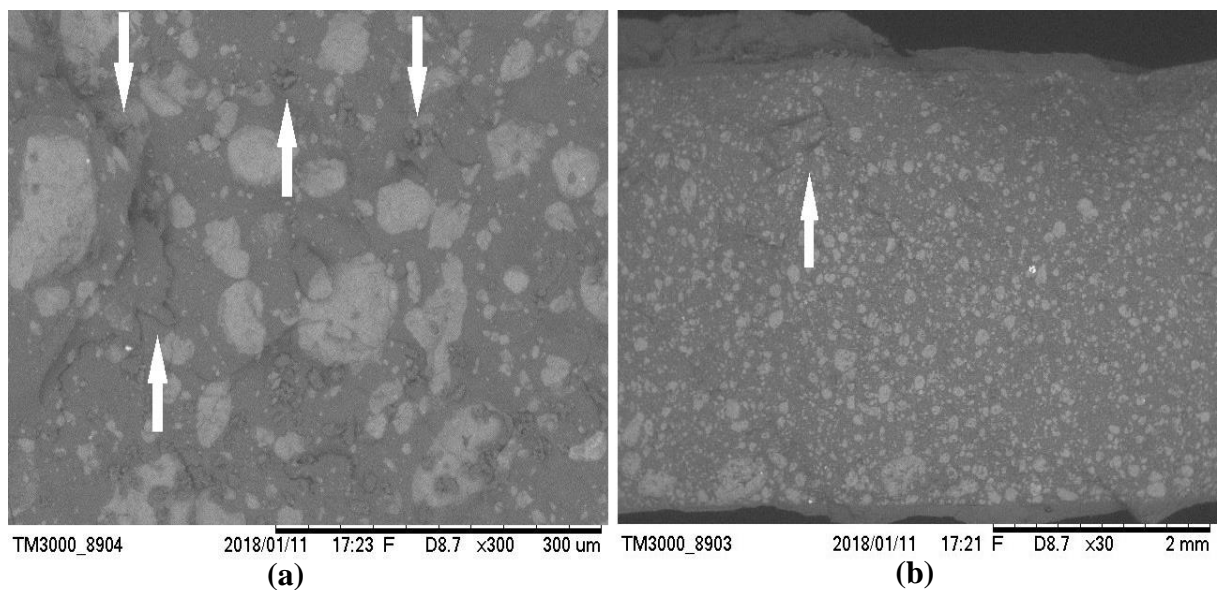
**Figura 26** – Comportamento de resistência à tração de material compósito em função do resíduo de caulim



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A figura 26 mostra o gráfico do comportamento de resistência à tração versus proporção de resíduo de caulim. Nela pode-se observar que os compósitos com carga de resíduo de caulim flint obtiveram um aumento até a proporção de 30 %, além dos desvios padrões de cada proporção.

**Figura 27** – Micrografias obtidas por MEV de compósitos de matriz polimérica e adição de resíduo de Caulim Flint



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A micrografia da figura 27 mostra a superfície de fratura do compósito de matriz polimérica com adição de resíduo de caulim flint. A micrografia da (figura 4.12 (a)) mostra uma superfície de fratura com algumas imperfeições, vazios e aglomerados (setas brancas), o que segundo Costa (2016) contribui para uma baixa resistência à tração do compósito. Na superfície de fratura da (figura 4.12 (b)) mostra uma superfície plana, com poucos vazios, porosidades ou defeitos (seta branca).

Costa (2016) observou através do MEV que o baixo desempenho dos compósitos de matriz polimérica e resíduo de caulim confeccionados por ele foi devido os aglomerados, as imperfeições, as trincas, os vazios, os buracos e as bolhas presentes na superfície de fratura do corpo de prova observado. Fato este pode ter sido gerado pela dificuldade de homogeneização.

A tabela 9 reúne dados dos maiores valores de resistência à tração encontrada de alguns compósitos de matrizes poliméricas e resíduos industriais encontrados na literatura e dos compósitos estudados neste trabalho. Estes compósitos foram confeccionados sob diferentes condições e proporções de fração mássica. Estes dados foram inseridos neste trabalho para se ter uma ideia da resistência mecânica de tração destes compósitos estudados por outros pesquisadores. Analisando a tabela 4.5, pode-se dizer que o compósito de matriz polimérica e carga de caulim flint utilizado neste trabalho apresentou um bom desempenho mecânico.

**Tabela 9** - Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com resíduos industriais encontradas na literatura

(continua)

<b>Literatura</b>	<b>Fração mássica (%)</b>	<b>Resist. à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
<b>Caulim/Poliéster (Neste trabalho)</b>	30 %	31,44 ± 4,39	1,13
<b>Caulim/Poliéster (COSTA, 2016)</b>	10 %	23,83 ± 1,13	0,91 ± 0,02
<b>Cobre/Poliéster (SANTOS et al., 2017)</b>	40 %	40,25 ± 1,88	1,39

**Tabela 9** - Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com resíduos industriais encontradas na literatura

(continua)

<b>Cobre/Poliéster</b> (EL BANNA, 2017)	<b>30 %</b>	<b>34,31 ± 1,86</b>	<b>4,26 ± 0,70</b>
<b>Lama vermelha/Poliéster</b> (COSTA, 2016)	10 %	24,85 ± 1,22	0,96 ± 0,01

**Fonte:** Elaboração própria. Adaptado dos autores citados

#### 4.3.4 Material compósito híbrido com reforço de resíduo de Caulim e bambu 15 mm

Os compósitos poliméricos com inserção de resíduo de caulim e reforço de fibra de bambu de 15 mm foram avaliados de acordo com sua resistência mecânica por meio do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados como mostra a tabela 10.

**Tabela 10** - Resultados do ensaio de tração de compósitos com Inserção de Resíduo de Caulim e Reforço de Fibras de Bambu de 15 mm

<b>Tipo de Amostra</b>	<b>Proporção de Resíduo + Fibras (%)</b>	<b>Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)</b>	<b>Alongamento (mm)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
<b>Matriz plena</b>	0	24,24 (±2,38)	4,08	1,03
<b>Resíduo de Caulim + Fibras de Bambu de 15 mm</b>	RC 10% + F3%	23,06 (±4,81)	5,07	1,07
	RC 20% + F3%	24,47 (±9,89)	4,58	1,13
	RC 30% + F3%	23,53 (±3,14)	3,96	1,09

**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

Na tabela 10, foi possível observar através dos resultados que a resistência à tração dos compósitos poliméricos híbridos com reforço de resíduo de caulim e fibras de bambu 15 mm obteve nas proporções de 10 %RC + 3 %F e 30 %RC+3 %F valores menores que o valor de

resistência mecânica da matriz pura. Foi possível observar também que apenas a proporção de 20 % RC + 3 %F apresentou um valor de resistência mecânica semelhante à matriz pura. Com relação ao módulo de elasticidade houve um aumento comparado com a matriz sem carga para todas as frações.

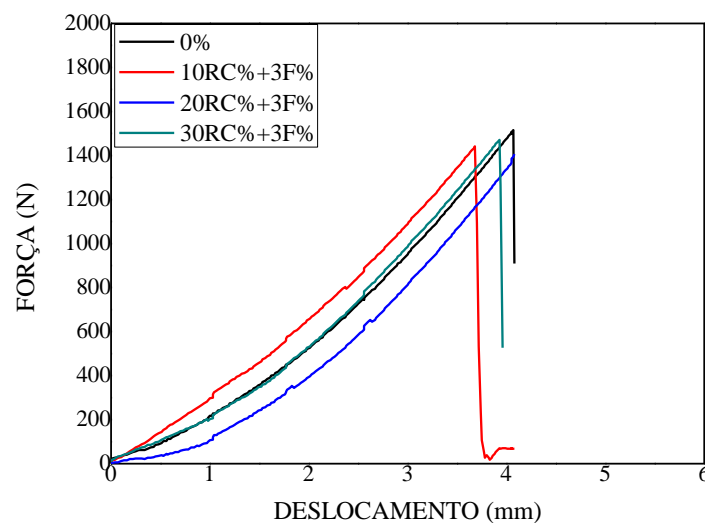
Segundo Costa (2016) as propriedades mecânicas dos compósitos diminuem de acordo com a proporção de carga na matriz, pois quando se aumenta a fração de carga dentro do compósito a resistência à tração desse material diminui, ocasionando porosidades dentro do compósito. Fato que segundo ele é pela dificuldade de impregnação e molhabilidade da interface matriz/fibra/carga.

Reis (2012) observou que a inclusão das fibras de bambu e pó do caroço de açaí na matriz polimérica diminuiu a resistência mecânica do compósito.

Costa (2016) cita também que as fibras extraídas do caule da planta, como é o caso do bambu, se caracterizam por apresentarem microfibrilas expostas, fibras não uniformes, além de fibras com acabamento superficial irregular, fato esse que dificulta a homogeneização dos constituintes dos compósitos, afetando assim suas propriedades.

A figura 28 ilustra o gráfico de Força x Deslocamento e a figura 29 ilustra o gráfico de barra comparativo, ambas dos compósitos de matriz sem carga e de compósitos híbridos com reforço de resíduo de caulim e de fibras de bambu 15 mm nas frações de 10RC % + 3 %F, 20RC % + 3 %F e 30RC % + 3 %F.

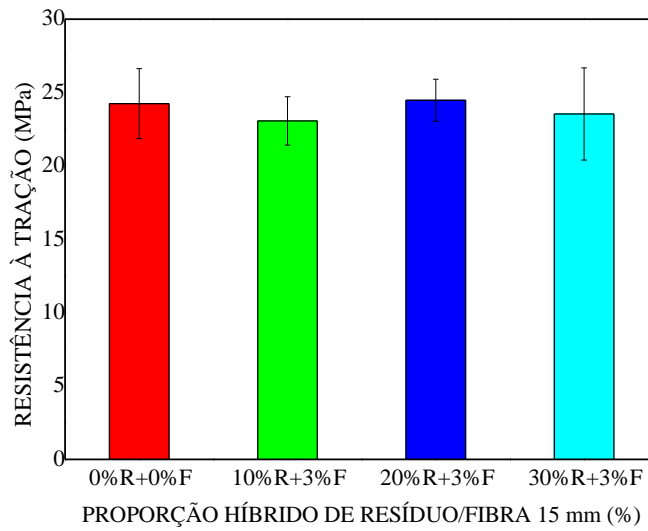
**Figura 28** – Gráfico Força x Deslocamento



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A figura 28 ilustra o gráfico que relaciona a força (N) e o deslocamento (mm) dos compósitos poliméricos híbridos caulim/bambu 15 mm, onde é possível observar que a matriz plena suportou uma força superior às demais.

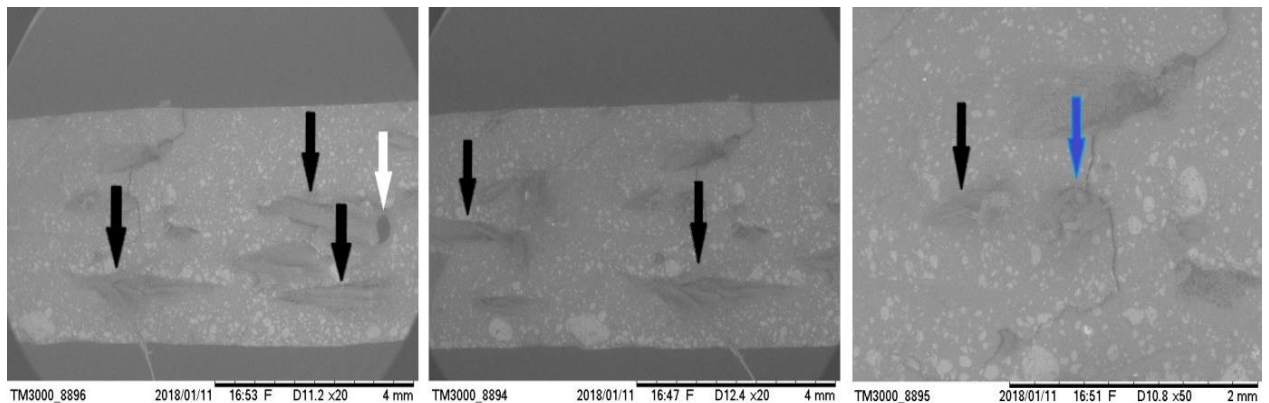
**Figura 29** – Comportamento de resistência à tração de material compósito híbrido em função da proporção de resíduo/fibra 15mm



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A figura 29 ilustra o gráfico do comportamento de resistência à tração (MPa) versus proporção de compósitos híbridos de resíduo/fibra 15 mm. Nela pode-se observar que os compósitos obtiveram uma semelhança nos valores de resistência á tração, além dos desvios padrões de cada proporção.

**Figura 30** – Micrografias obtidas por MEV de compósitos híbridos de matriz polimérica com adição de resíduo e fibras de bambu 15 mm



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

As micrografias da figura 30 mostram as superfícies de fratura do compósito de matriz polimérica com adição de resíduo de caulim flint e fibras de bambu nos comprimentos de 15 mm. É possível observar uma fratura onde percebe-se pouco descolamento de fibras e muitas fibras dispostas no sentido transversal ao carregamento (setas pretas), vazios indicados pela seta branca e aparecimento de trincas (seta azul). O aparecimento de trinca gera uma concentração de tensão dentro do compósito o que contribui para uma menor resistência mecânica.

#### 4.3.5 Material compósito híbrido com reforço de resíduo de Caulim e bambu 30 mm

Os compósitos poliméricos com inserção de resíduo de caulim e reforço de fibra de bambu de 30 mm foram avaliados de acordo com sua resistência mecânica por meio do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados como mostra a tabela 11.

**Tabela 11** - Resultados do ensaio de tração de compósitos com Inserção de Resíduo de Caulim e Reforço de Fibras de Bambu de 30 mm

<b>Tipo de Amostra</b>	<b>Proporção de Resíduo + Fibras (%)</b>	<b>Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)</b>	<b>Alongamento (mm)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
<b>Matriz plena</b>	0	24,24 ( $\pm$ 2,38)	4,08	1,03
<b>Resíduo de Caulim + Fibras de Bambu de 30 mm</b>	RC 10% + F3%	22,73 ( $\pm$ 4,91)	4,62	0,92
	RC 20% + F3%	33,75 ( $\pm$ 9,89)	5,24	1,32
	RC 30% + F3%	22,07 ( $\pm$ 4,73)	4,06	1,01

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2018

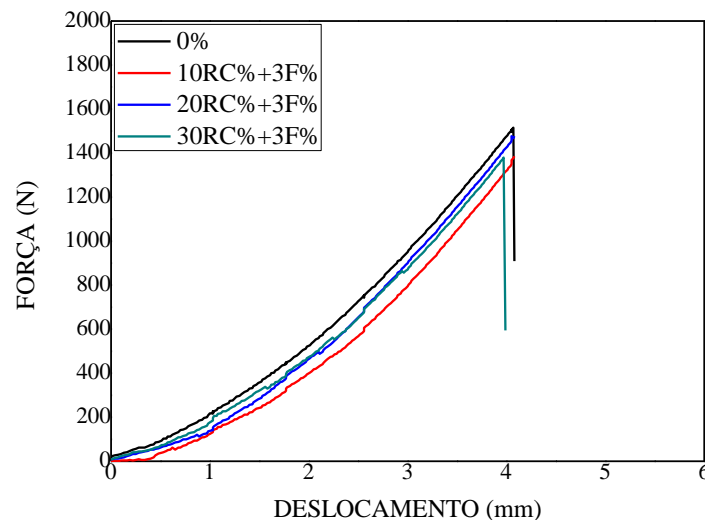
Na tabela 11, na proporção de RC 20 % + F 3 % na matriz polimérica nota-se um aumento na resistência à tração e no módulo de elasticidades em relação à matriz pura somente na fração de RC 20 %+ F 3 %.

Oliveira (2013b) na confecção de seus materiais compósitos de matriz poliéster com carga de resíduo industrial de lama vermelha e fibras de curauá observou que nas proporções maiores ou iguais a 20 % de resíduo e 5 % fibras obtiveram um reforço significativo.

As porcentagens de RC 10 % + F 3 % e RC 30 % + F 3 % foi possível observar um valor menor comparado com a matriz pura.

A figura 31 ilustra o gráfico de Força x Deslocamento e a figura 32 ilustra o gráfico de barra comparativo, ambas dos compósitos de matriz sem carga e de compósitos híbridos com reforço de resíduo de caulim e de fibras de bambu 30 mm nas frações de 10RC %+3 %F, 20RC %+3 %F e 30RC %+3 %F.

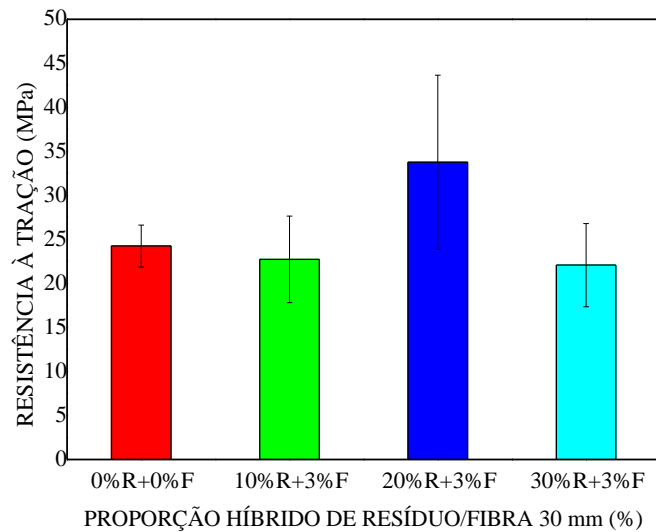
**Figura 31** – Gráfico Força x Deslocamento



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A figura 31 ilustra o gráfico que relaciona a força (N) e o deslocamento (mm) dos compósitos poliméricos híbridos resíduo/fibra 30 mm, onde é possível observar que a matriz pura suportou uma força superior às demais.

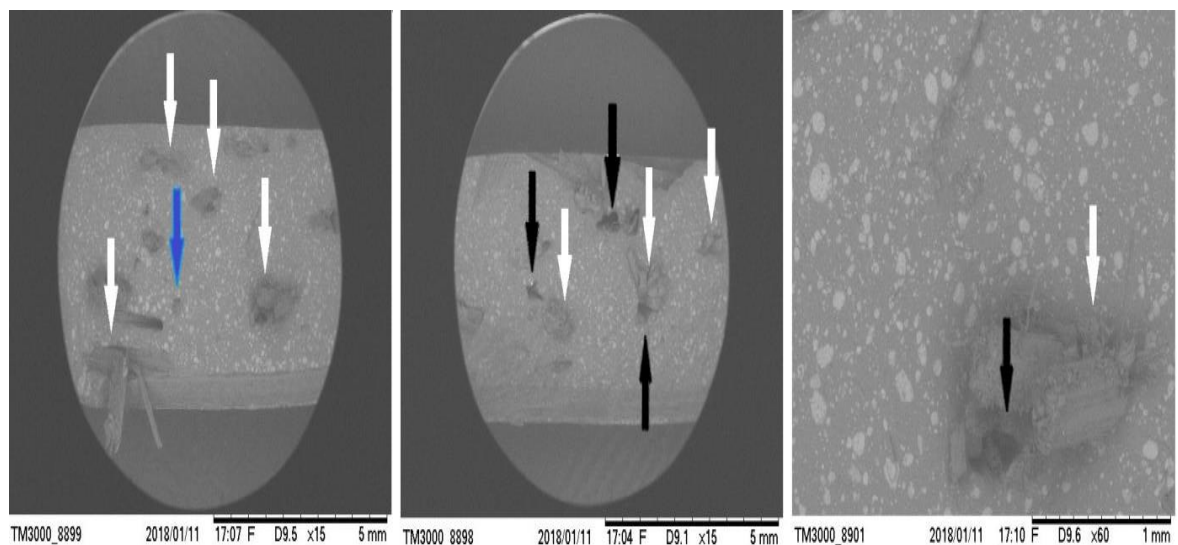
**Figura 32** – Comportamento de resistência à tração de material compósito híbrido em função da proporção de resíduo/fibra30mm



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A figura 32 ilustra o gráfico do comportamento de resistência à tração (MPa) versus proporção de compósitos híbridos de resíduo/fibra 30 mm. Nela pode-se observar que os compósitos de 20 % de resíduo de caulim e 3 % de fibras no comprimento de 30 mm obtiveram um valor de resistência á tração maiores, além dos desvios padrões de cada proporção.

**Figura 33** – Micrografias obtidas por MEV de compósitos híbridos de matriz polimérica com adição de resíduo e fibras de bambu 30 mm



**Fonte:** AUTORIA PRÓPRIA, 2018

A fratura da figura 33 de compósito de matriz polimérica com adição de resíduo de caulim flint e fibras de bambu 30 mm mostra uma superfície de fratura com bastantes fibras rompidas (setas brancas), os fenômenos de descolamento de fibras da matriz (setas pretas), prejudicando a resistência dos compósitos.

A tabela 12 reúne dados dos maiores valores obtidos de resistência à tração de alguns compósitos híbridos de matrizes poliméricas com fibras vegetais e resíduos industriais encontrados na literatura e dos compósitos estudados neste trabalho. Estes compósitos foram confeccionados sob diferentes condições e proporções de fração mássica. Estes dados foram inseridos neste trabalho para se ter uma ideia da resistência mecânica de tração destes compósitos estudados por outros pesquisadores. Analisando a tabela 4.8, pode-se dizer que o compósito Poliéster/Bambu/Caulim utilizado neste trabalho apresentou um razoável desempenho mecânico.

**Tabela 12** - Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com resíduos industriais encontradas na literatura

(continua)

<b>Literatura</b>	<b>Resist. à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
<b>Poliéster/Bambu/Caulim (Neste trabalho)</b>	33,75 ± 9,89	1,32
<b>Poliéster/Cobre/Bambu (SANTOS et al., 2017)</b>	37,94 ± 1,82	1,25
<b>Poliéster/Sisal/Vidro (CARVALHO; CAVALCANTI, 2006)</b>	123,8 ± 13,7	3,83 ± 0,34
<b>Poliéster/Juta/Caulim (COSTA, 2016)</b>	41,05 ± 1,17	0,91 ± 0,03
<b>Poliéster/Malva/Caulim (COSTA, 2016)</b>	40,70 ± 1,05	0,91 ± 0,02
<b>Poliéster/Sisal/Caulim (COSTA, 2016)</b>	42,70 ± 1,70	0,96 ± 0,03

**Tabela 12** - Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com resíduos industriais encontradas na literatura

(continuação)

<b>Poliéster/Bananeira/cobre</b>	<b>32,68 ± 2,96</b>	<b>3,10 ± 0,51</b>
----------------------------------	---------------------	--------------------

(EL BANNA, 2017)

**Fonte:** Elaboração própria. Adaptado dos autores citados

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica utilizada para a fabricação dos materiais compósitos de matriz polimérica sugerida foi satisfatória, já que os compósitos atingiram o processo de polimerização da cadeia na matriz, ou seja, a cura do compósito, condizente para a fabricação dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos de tração.

Com a fabricação dos compósitos com carga pode-se dizer que os mesmos possuíram um limite de resistência maior quando comparados com o compósito de matriz plena.

Os compósitos fabricados com fibras de bambu 15 mm na fração de 1 % apresentaram os maiores valores de resistência mecânica, apresentando o valor de 41,89 MPa. O menor valor de resistência à tração foi o de compósitos fabricados com fibras de bambu 30 mm na fração de 2 % onde apresentou o valor de 17,36 MPa.

Os compósitos fabricados com resíduo de caulim tiveram um aumento na resistência à tração até a porcentagem de 30 %, quando o compósito atingiu um limite de resistência de 31,44 MPa. Sugerindo a utilização até esse valor como reforço na matriz.

Os compósitos híbridos de resíduo de caulim flint e fibras de bambu de 15 mm não apresentaram um valor de resistência significativo.

Referente ao módulo de elasticidade, os compósitos de matriz polimérica e reforço de fibras de bambu 15 mm na fração de 2 % apresentaram o valor de 1,36 GPa, sendo o maior valor. O menor valor registrado foi o de 0,84 GPa que foi o dos compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de bambu 30 mm na fração de 2 %.

O estudo da avaliação da micrografia foi eficiente na determinação dos mecanismos de falhas presente no compósito e dos tipos de fratura presentes na região fraturada, onde os fenômenos de fibras dispostas transversalmente na direção do carregamento e fibras rompidas foram os mecanismos mais observados.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar tratamento químico nas fibras vegetais de bambu com objetivo de melhorar suas propriedades;
- Fabricar e analisar as propriedades físicas das placas compósitos de matriz polimérica com reforço de fibras de bambu e carga de resíduo industrial de caulim flint;
- Fabricar e analisar as propriedades das placas de materiais compósitos com outros tipos de resíduos industriais ou fibras vegetais, variando as proporções dos resíduos ou das fibras vegetais;
- Fabricar e analisar as propriedades das placas de materiais compósitos variando os comprimentos e disposições das fibras vegetais;
- Fabricar e analisar as propriedades das placas de materiais compósitos com resíduo industrial de caulim flint e fibras de bambu em outras normas para ensaio de tração;
- Fabricar e analisar as propriedades das placas de materiais compósitos com outra matriz polimérica.

## REFERÊNCIAS

- ANGRIZANI, C.A.B. et al. Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos com poliéster. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 20, 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: PR, 2006
- ANJOS, Cássia Mendonça dos. **Utilização de resíduo de caulim em tijolos de solo-cal.** 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.
- ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia dos materiais.** Tradução Solange Aparecida Visconti. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- ASTM D 3039 - 08, "**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic (Metric)**". Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, EUA, 2005.
- BAYER, P. S. **Ensaio dos Materiais.** São Paulo. 2017. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~paulosergio/Ensaio%20dos%20Materiais/Apostila%20de%20Ensaio%20dos%20Materiais.pdf>> Acesso em: 5 fev. 2018.
- BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. **Introdução à difração de raios-x em cristais.** Fortaleza, 2000.
- CALLISTER JR, William D.; Rethwisch, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma Introdução.** Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- CÂNDIDO, G. M. et al. Fractografia de Compósito Estrutural Aeronáutico Submetido ao Ensaio de Tenacidade à Fratura Interlaminar em Modo II. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v.24, n.1, p.65-71, 2014.
- CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiro.** São Paulo: Artliber, 2006.
- CARNEIRO, B. S. et al. Caracterização mineralógica e geoquímica e estudo das transformações de fase do caulim duro da região do Rio Capim, Pará. **Cerâmica**, São Paulo, v.49, n.312, p.237-244. 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132003000400008>>. Acesso em: 8 fev. 2018.
- CARVALHO, L. H. de; CAVALCANTI, W. S. Propriedades Mecânicas de Tração de Compósitos Poliéster/Tecidos Híbridos Sisal/Vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 33-37, 2006.
- COSTA, Deibson Silva da. **Caracterização de materiais compósitos de matriz poliéster e fibras de bambu, sisal e vidro e híbridos bambu/sisal, bambu/vidro e sisal/vidro.** 2012. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

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

DALCIN, G. B. **Ensaio dos Materiais**. Santo Ângelo. 2007. Disponível em: <[http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaio\\_mecanicos.pdf](http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaio_mecanicos.pdf)> Acesso em: 5 fev. 2018.

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

FREDEL C. M.; ORTEGA P.; BASTOS E. **Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais**. Florianópolis: CERMAT-UFSC, 2015.

FREIRE, F. R.; BERTOLINO, L. C.; LUZ, A. B. da. **Caracterização Mineralógica e Tecnológica do Caulim da Região de Silvânia - GO, Visando a Sua Utilização Industrial**. Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.cetem.gov.br/component/k2/item/download/565\\_98c3327d3e3f68f547cb1d0cb391e49c](http://www.cetem.gov.br/component/k2/item/download/565_98c3327d3e3f68f547cb1d0cb391e49c)> Acesso em: 5 fev. 2018.

GHAVAMI, K.; MARINHO A.B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n. 1, p. 107-114, 2005.

GUIMARÃES JÚNIOR, M.; NOVACK, K. M.; BOTARO, V. R. Caracterização anatômica da fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, Bilbao, v. 1, n. 7, p. 442-456, 2010. Disponível em: <<http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/DIC10/guimaraes.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2015.

GOMES, Djeones Santana. **Avaliação da resistência ao impacto de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais curtas**. 2016. 46 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

IMERY CAULIM. DNPM. 2017. Disponível em: <[http://www.imerysnopara.com.br/pagina/?id=1&id\\_categoria=21](http://www.imerysnopara.com.br/pagina/?id=1&id_categoria=21)>. Acesso em: 31 jan. 2017.

JORGE TEÓFILO. **Estrutura e Propriedades dos Materiais. Ensaio Mecânicos dos Materiais**. Belém. 2010. Disponível em: <<https://jorgeteofilos.files.wordpress.com/2010/08/epm-apostila-capitulo09-ensaio-mod1.pdf>> Acesso em: 5 fev. 2018.

LIMA, Saulo Cordeiro. **Estudo da técnica de difração de raios x**. 2006. 69 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Física), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2006.

MARINELLI, A. L. et al. Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MÁRTIRES, R. A. C. **Caulim**. DNPM. 2017. Disponível em:  
<[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiRjcuK9aDYAhUHCpAKHWDJDRcQFggqMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.dnpm.gov.br%2Fdnpm%2Fpublicacoes%2Fserie-estatisticas-e-economia-mineral%2Foutras-publicacoes-1%2F6-2-caulim&usq=A0vVaw3\\_1A53oYS2mfKB\\_Izv9z6Y](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiRjcuK9aDYAhUHCpAKHWDJDRcQFggqMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.dnpm.gov.br%2Fdnpm%2Fpublicacoes%2Fserie-estatisticas-e-economia-mineral%2Foutras-publicacoes-1%2F6-2-caulim&usq=A0vVaw3_1A53oYS2mfKB_Izv9z6Y)>. Acesso em: 23 dec. 2017.

MARTINS NETO, Sandoval Ferreira. **Material compósito de matriz frágil reforçado com fibras naturais de sisal e malva: caracterização e correlações das propriedades mecânicas**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

MONTEIRO, S.N. et al. Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de Curauá. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 197–203, 2006.

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

OLIVEIRA, Mauro Junior Aires de. **Efeito da adição de lama vermelha como carga nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster insaturado reforçado com fibra natural de curauá (*Ananas erectifolius*)**. 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013b.

PUPPO, Humberto Fabrizzi de Figueiredo. **Viabilidade técnica da produção de compósitos fibra-polímero à base de resíduos**. 2017. 161 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017.

RAMBO, Carlos Renato. Materiais avançados inspirados na natureza: estruturas celulares, fibras e compósitos. **Exacta**, UNINOVE, v. 4, jan.-jun. 2006. Disponível em:  
<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81040109>>. Acesso em: 31 jan. 2018.

REIS, Everton Farias dos. **Resistência à tração de compósitos poliméricos híbridos com fibras de bambu e pó do caroço de açaí**. 2012. 57 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

REZENDE, M. C. Fractografia de Compósitos Estruturais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 17, n. 3, 2007.

REZENDE, M. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 10, n. 2, 2000.

ROCHA JUNIOR C.A.F.; ANGÉLICA R.S, NEVES R.F. Synthesis of faujasite-type zeolite: comparison between processed and flint kaolin. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, p. 259-268, 2015.

SABEDOT, Sydney et al. Minerais contaminantes do caulim da mina ipixuna, no estado do pará: características e interferências no beneficiamento mineral. **HOLOS**, [S.l.], v. 3, p. 349-357, jul. 2014. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1749>>. Acesso em: 31 jan. 2018.

SANCHEZ. E. M. S. et al. Compósito de Resina de Poliéster Insaturado com Bagaço de Cana-de-Açúcar: Influência do Tratamento das Fibras nas Propriedades. **Polímeros**, São Paulo, v. 20, n. 10, p. 10-20, 2010.

SANTOS, A. J. G. dos. et al. Influência da incorporação de fibras de bambu (*Bambusa vulgaris*) e resíduo de cobre em matrizes poliméricas termofixas. CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 24, 2017, Rio Grande. **Anais...** Rio Grande, 2017.

SILVA, Isabela Leão Amaral da. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

TARGA, Gabriel et al. Produção e caracterização mecânica de um compósito de fibra de juta e resina de poliéster insaturado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 10, 2006, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, 2006.

VASCONCELLOS, R. M. de. **Cartilha de Fabricação de Moveis de Bambu**. Maceió: Instituto do Bambu, 2004.

VENTURA, Ana Mafalda F.M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **C.Tecn. Mat.** Lisboa, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, jul. 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0870-](http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-)>. Acesso em: 31 jan. 2018.