



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PPGEI**

**MÁRCIO PAULO DE ARAÚJO MAFRA**

**CARACTERIZAÇÃO EM TRAÇÃO E IMPACTO DE COMPÓSITOS DE  
FIBRAS DE PENTE DE MACACO (*APEIBA TIBOURBOU* AUBL.),  
MUTAMBA (*GUAZUMA ULMIFOLIA*) E PINDAÍBA (*GUATTERIA  
POEPPIGIANA*) CONFECIONADOS EM MATRIZ POLIÉSTER.**

**Marabá - Pará**

**2018**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**(Biblioteca Campus II, Marabá-PA)**

---

M187c Mafra, Marcio Paulo de Araújo  
Caracterização em tração e impacto de compósitos de fibras de  
Pente de Macaco (*Apeiba Tibourbou* Aubl) Mutamba (*Guazuma*  
*Ulmifolia*) e Pindaíba (*Guatteria Poeppigiana*) confeccionados em matriz  
poliéster. / Márcio Paulo de Araújo Mafra. – 2018.  
128 f.; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama  
Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Industrial, da Universidade Federal do Pará.

Inclui referências

1. Compósitos poliméricos. 2. Fibras. 3. Compósito - Caracterização  
Mecânica. I. Título.

CDD - 22 ed.: 633.5

---

**MÁRCIO PAULO DE ARAÚJO MAFRA**

**CARACTERIZAÇÃO EM TRAÇÃO E IMPACTO DE COMPÓSITOS DE FIBRAS DE PENTE DE MACACO (*APEIBA TIBOURBOU* AUBL.), MUTAMBA (*GUAZUMA ULMIFOLIA*) E PINDAÍBA (*GUATTERIA POEPPIGIANA*) CONFECCIONADOS EM MATRIZ POLIÉSTER.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de Materiais e Processos de Fabricação, da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientador: **Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama**

Marabá - Pará

2018

**MÁRCIO PAULO DE ARAÚJO MAFRA**

**CARACTERIZAÇÃO EM TRAÇÃO E IMPACTO DE COMPÓSITOS DE  
FIBRAS DE PENTE DE MACACO (*APEIBA TIBOURBOU* AUBL.),  
MUTAMBA (*GUAZUMA ULMIFOLIA*) E PINDAÍBA (*GUATTERIA  
POEPPIGIANA*) CONFECCIONADOS EM MATRIZ POLIÉSTER.**

Marabá - Pará

2018


MÁRCIO PAULO DE ARAÚJO MAFRA

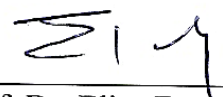
**CARACTERIZAÇÃO EM TRAÇÃO E IMPACTO DE COMPÓSITOS DE FIBRAS DE PENTE DE MACACO (*APEIBA TIBOURBOU AUBL*), MUTAMBA (*GUAZUMA ULMIFOLIA*) E PINDAÍBA (*GUATTERIA POEPPIGIANA*) CONFECCIONADOS EM MATRIZ POLIÉSTER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial na Área de Processos de fabricação.

Data de aprovação: 09 de março de 2018

Banca examinadora:

  
Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama – Orientador  
PPGEI/ITEC/UFPA

  
Prof. Dr. Elias Fagury Neto – Co-orientador  
PPGEI/ITEC/UFPA

  
Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo – Membro Interno  
PPGEI/ITEC/UFPA

  
Prof. Dr. Tarciso Silva de Andrade Filho – Membro Externo  
PPGQ/UNIFESSPA

Dedico este Trabalho:

Aos meus pais: Raimundo Paulo e Maria Amélia.

Aos meus irmãos: Andreza e Marcelo.

Aos meus avôs: Arlindo Trindade, Maria Jesus,  
Manoel Mafra e Maria Campos (*In Memoriam*).

À minha Esposa: Aline Barros.

## AGRADECIMENTOS

- ✦ A **Deus**, inteligência suprema, causa primária de todas as coisas, que me deu vida e oportunidade de exercitar a razão primeira para encontrá-lo depois em meu coração.
- ✦ Aos meus pais **Raimundo Paulo Mafra** e **Maria Amélia de Araújo Mafra**, que souberam educar-me, despertando em mim o gosto pelo estudo acompanhando-me com muita dedicação em todas as etapas de minha vida.
- ✦ Aos meus irmãos **Andreza Maria** e **Marcelo de Jesus**, meus avôs **Arlindo Trindade**, **Maria Jesus**, **Manoel Mafra** (*In Memoriam*) e **Maria Campos** (*In Memoriam*) e a todos os meus tios, por seus carinhos, estímulos e compreensão pelo tempo que “roubei” de nosso convívio.
- ✦ À minha esposa **Aline Barros de Loureiro Mafra**, que sempre esteve ao meu lado mesmo nas horas mais difíceis e que nunca me deixou parar de seguir o caminho que tracei para alcançar meus objetivos.
- ✦ À **Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - UNIFESSPA**, que me possibilitou minha qualificação profissional.
- ✦ Ao **Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama**, pela orientação, amizade e confiança em mim depositada, bem como por ter acreditado neste trabalho.
- ✦ Aos meus amigos e colegas de trabalho **Elias Fagury Neto**, **Renata Lilian Ribeiro Portugal Fagury**, **Denilson da Silva Costa**, **Evaldiney Ribeiro Monteiro**, **Adriano Alves Rabelo**, **José de Arimatéia Costa de Almeida**, **Luiz Fernando Nazaré Marques**, **Dennin Tomas Quispe Arapa** (*In Memoriam*), pela amizade e confiança em mim depositada, bem como por ter contribuído bastante para o meu crescimento profissional, através de suas vastas experiências.
- ✦ A **FEMAT** a qual tenho orgulho de fazer parte, pelo auxílio e contribuição prestados para a realização deste trabalho.
- ✦ A **FEMMA** pelo espaço cedido para auxílio e contribuição da realização deste trabalho.
- ✦ Aos meus amigos Engenheiros de Materiais: **Hilbenária Mercedes Santos**, **Wilker Costa de Oliveira**, pela grande contribuição prestada para o desenvolvimento deste trabalho.

- ✦ Aos Integrantes do "**Grupo de Pesquisa em Materiais Compósitos**", **Carlos Gurgel**, **Tássia Abreu**, por não só terem contribuído diretamente ou indiretamente, mas por serem elementos fundamentais para a concretização deste trabalho.
- ✦ A **Técnica Tatiani Silva** e aos demais técnicos do IGE pelo auxílio e contribuição prestados ao projeto.
- ✦ A **Família Marabá**, pelo carinho e apoio e por não só terem contribuído diretamente ou indiretamente, mas por serem elementos fundamentais para a concretização deste trabalho.
- ✦ À todas as pessoas, que infelizmente não escrevi aqui seus nomes, mas que de uma forma ou de outra, contribuíram para o sucesso deste trabalho.
- ✦ À todos meu **RECONHECIMENTO** e **PROFUNDA GRATIDÃO** por todos os momentos vividos durante esta jornada.



**“Não corrigir nossas falhas é o mesmo que cometer novos erros.”**

**(Confúcio)**

**“Escolha sempre o caminho que pareça o melhor, mesmo que seja o mais difícil; o hábito brevemente o tornará fácil e agradável.”**

**(Pitágoras)**

**“Quanto mais nos elevamos, menores parecemos aos olhos daqueles que não sabem voar.”**

**(Friedrich Nietzsche)**

**“Não existe nada de completamente errado no mundo, mesmo um relógio parado, consegue estar certo duas vezes por dia.”**

**(Paulo Coelho)**

## RESUMO

Estudos têm comprovado que fibras celulósicas apresentam características vantajosas na sua aplicação, como por exemplo: baixo custo, baixa densidade, biodegradabilidade, são atóxicas e não abrasivas. O presente trabalho tem por objetivo caracterizar mecanicamente em tração e impacto os compósitos reforçados com fibras de pente de macaco (*Apeiba tibourbou* Aubl.), mutamba (*Guazuma ulmifolia*) e pindaíba (*Guatteria Poeppigiana*) em matriz poliéster. Foram realizados o estudo das propriedades mecânicas das fibras e dos compósitos para o ensaio de tração, segundo as normas ASTM D 3822, ASTM D3039M-00, ASTM D638-10 e para o ensaio de impacto, segundo a norma ASTM D 5942-96, também foi realizado análises morfológicas e de falhas na fibra e nos compósitos. Todos os compósitos foram confeccionados em matriz de resina poliéster isoftálica insaturada. Os resultados dos ensaios mecânicos de tração e impacto dos compósitos para as fibras estudadas se mostraram satisfatórios quando comparados com resultados obtidos na literatura para outros tipos de fibras. A fibra de pente de macaco teve destaque, pois apresentou excelente desempenho tanto no ensaio de tração como no ensaio de impacto; as demais fibras também apresentaram bons resultados tanto em tração como em impacto.

**Palavras-chave:** Fibras, Tração, Impacto, Compósito e Caracterização Mecânica.

## ABSTRACT

Studies have shown that cellulosic fibers has some advantages in their application as the low cost, low density, biodegradable, non-toxic and non-abrasive. The present work had the objective to characterize mechanically in traction and impact the composites reinforced with fibers of pente de macaco (*Apeiba tibourbou* Aubl.), mutamba (*Guazuma ulmifolia*) e pindaíba (*Guatteria Poeppigiana*) in polyester matrix. The mechanical properties of the fibers and the composites were studied by means of test specimens for the tensile test according to the norms ASTM D3039M-00, ASTM D638-10. For the impact tests, according to ASTM D 5942-96, morphological and fault analysis on fiber and composites were also performed. All composites were made of an unsaturated isophthalic polyester resin matrix. The results of the composites' mechanical tensile tests and the impact for the studied fibers in many cases are satisfactory when compared with results obtained in the literature for other types of fiber. Fiber known as Pente de Macaco fiber was outstanding, as it presented excellent performance for either tensile test or impact test. The other fibers studied also showed good results in traction and impact.

**Keywords:** Fibers, Traction, Impact, Composite and Mechanical Characterization.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Fluxograma dos tipos de compósitos .....	19
<b>Figura 2:</b> Macromolécula de uma resina poliéster .....	22
<b>Figura 3:</b> Constituição de uma fibra vegetal elementar.....	24
<b>Figura 4:</b> Estrutura da celulose .....	25
<b>Figura 5:</b> Características da árvore e do fruto do Pente de Macaco ( <i>Apeiba Tibourbou</i> Aubl.) .....	27
<b>Figura 6:</b> Características da Árvore e do Tronco da Mutamba ( <i>Guazuma ulmifolia</i> ).....	29
<b>Figura 7:</b> Árvore e folhas da <i>Guatteria Poepiggiana</i> , conhecida como Pindaíba. ....	30
<b>Figura 8:</b> Modelo de corpo de prova segundo a norma D3039 .....	33
<b>Figura 9:</b> Gráfico para o cálculo da tensão em tração da matriz para o alongamento da fibra. .....	34
<b>Figura 10:</b> Dimensões dos corpos de prova de tração segundo a norma ASTM D638M. ....	37
<b>Figura 11:</b> Mecanismos de falhas em materiais compósitos. 1) Arrancamento de fibras; 2) Ponte de fibras; 3) Descolamento fibra/matriz; 4) Ruptura das fibras. ....	39
<b>Figura 12:</b> Fractografia por MEV da piaçava: (a) X 35, (b) X 50 e (c) X 200. Fractografia por MEV das pontas rompidas de fibras de piaçava: (a) mais grossa, d= 2,00mm – 2,45mm. .....	41
<b>Figura 13:</b> Ilustração através de imagem de MEV dos três tipos de processo de fratura que pode ocorrer na fibra de sisal, <b>(a)</b> fratura que ocorre na célula da fibra, <b>(b)</b> tipo evidencia uma fratura ocorrendo por delaminação no interior da célula da fibra entre as células da fibra e o <b>(c)</b> é caracterizado por uma delaminação entre as células da fibra. ....	42
<b>Figura 14:</b> Catalisador MEK - D45 e Resina Poliéster Isoftálica. ....	43
<b>Figura 15:</b> Fibras de: a) Pente de Macaco; b) Mutamba e c) Pindaíba.....	44
<b>Figura 16:</b> FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	45
<b>Figura 17:</b> Fibras de Pente de Macaco, Mutamba e Pindaíba Submersas em água. ....	46
<b>Figura 18:</b> Fibras de Mutamba após a Normalização .....	46
<b>Figura 19:</b> Fibra de Pindaíba sendo normalizada pelo processo de raspagem. ....	47
<b>Figura 20:</b> (a), (b), (c), (d) e (e). Imagens do emprego do Tear. ....	48
<b>Figura 21:</b> Pré- pregs de: (a) Pente de Macaco, (b) Mutamba e (c) Pindaíba confeccionadas no Tear.....	48
<b>Figura 22:</b> (a) Fibra de Mutamba sendo picotada no tamanho de 5 mm, (b) Fibra de Pente de Macaco picotada, no tamanho de 10 mm. ....	49
<b>Figura 23:</b> Conjunto de bancada MEV / EDS.....	50
<b>Figura 24:</b> (a) e (b). Os TABs de papel KRAFT (200 g/m <sup>2</sup> ) com as dimensões de 25 mm x 65 mm e (c) Cola utilizada.....	51
<b>Figura 25:</b> (a), (b) e (c). Máquina universal de ensaios e corpo de prova para realização de ensaio de resistência a tração das fibras .....	51
<b>Figura 26:</b> (a), (b), (c), (d), (e) e (f). Procedimento de ajuste e pesagem das pré-pregs de fibras. ....	53
<b>Figura 27:</b> (a) Marcação da região útil da transparência; (b) e (c) Delimitação da Região útil da transparência para confecção das placas; (d) Pesagem da Resina e do Catalisador e (e) Mistura da Resina e do Catalisador. ....	54
<b>Figura 28:</b> Esquema de montagem das placas com mantas de fibras naturais.....	55
<b>Figura 29:</b> (a), (b), (c), (d) e (e). Resina e Transparência .....	56
<b>Figura 30:</b> (a), (b), (c) e (d). Molhamento das mantas pela mistura de resina e catalisador .57	
<b>Figura 31:</b> (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g). Procedimento de fabricação das pré-pregs de fibras .....	58
<b>Figura 32:</b> Placas prontas após 7 dias de cura.....	59
<b>Figura 33:</b> (a), (b), (c) e (d). Usinagem e os corpos de prova de tração e impacto confeccionados. ....	60

<b>Figura 34:</b> (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) e (h). Passo a Passo para preparação das fibras para a produção dos corpos de prova .....	62
<b>Figura 35:</b> (a), (b), (c), (d), (e) e (f). Preparação e confecção dos corpos de prova segundo as normas ASTM D638 e ASTM D5942. ....	63
<b>Figura 36:</b> (a), (b), (c), (d), (e) e (f). Preenchimento dos moldes, bem como os moldes preenchidos e dispostos em superfícies niveladas para evitar deformações nos corpos de prova. ....	64
<b>Figura 37:</b> (a), (b), (c) e (d). Corpos de provas, as lixadeiras, os paquímetros utilizados no acabamento final dos corpos de prova.....	65
<b>Figura 38:</b> (a), (b), (c), (d), (e) e (f) Processo de usinagem ou lixamento dos corpos de prova .....	66
<b>Figura 39:</b> Máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL - 10.000. ....	67
<b>Figura 40:</b> Ilustração esquemática das dimensões do corpo de prova segundo a norma ASTM D 3039. ....	68
<b>Figura 41:</b> (a) Corpos de prova de Pente de Macaco e (b) Corpos de prova de Mutamba...	69
<b>Figura 42:</b> Montagem para realização do ensaio na máquina universal de ensaios da marca EMIC DL 10000. ....	69
<b>Figura 43:</b> As medidas para fabricação dos corpos de prova .....	70
<b>Figura 44:</b> (a), Realização do ensaio na máquina universal de ensaios, (b) Corpo de prova após a realização do ensaio e (c) Corpos de prova de mutamba. ....	71
<b>Figura 45:</b> Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto .....	72
<b>Figura 46:</b> (a) Máquina de ensaio de impacto Charpy, (b) Corpos de prova em conformidade com a norma ASTM D5942 e (c) Montagem do corpo de prova no dispositivo de ensaio. ....	73
<b>Figura 47:</b> Fibra de Pente de Macaco após a normalização. ....	76
<b>Figura 48:</b> Curvas força versus deslocamento dos corpos de prova característicos das fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba. ....	77
<b>Figura 49:</b> Comparativo da força máxima pelo tipo das fibras – NORMA ASTM D3822-96 .	78
<b>Figura 50:</b> (a), (c) e (e) Apresentam o aspecto superficial das fibras de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba, respectivamente, (b), (d) e (f). Mostram a região de fratura das fibras ensaiadas em tração para Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba, respectivamente. ....	79
<b>Figura 51:</b> (a) Placas de compósitos de Pindaíba, Pente de Macaco e Mutamba (b) Corpos de prova de Mutamba da Norma ASTM D3039, (c) Corpos de prova de Pindaíba da norma ASTM D638 e (d) Corpos de prova de Pente de Macaco da Norma ASTM D5942. ....	82
<b>Figura 52:</b> Curvas tensão versus deformação do corpo de prova da resina pura.....	83
<b>Figura 53:</b> Curva tensão/deformação dos corpos de prova das fibras longas e alinhadas...	84
<b>Figura 54:</b> Comparativo entre as tensões máximas obtidas no ensaio de tração segundo a norma ASTM D3039.....	85
<b>Figura 55:</b> (a) e (b) fibra de mutamba topo e topo cortado, (c) e (d) fibra de pente de macaco topo e topo cortado, (e) e (f) fibra de pindaíba topo e topo cortado. ....	87
<b>Figura 56:</b> Curvas tensão versus deformação dos corpos de prova característicos de compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 5 mm. ....	89
<b>Figura 57:</b> Superfície de fratura dos compósitos reforçados com fibras de: (a) mutamba de 5 mm; (b) pente de macaco de 5 mm; (c) pindaíba de 5 mm. ....	90
<b>Figura 58:</b> Curvas tensão versus deformação dos corpos de prova característicos de compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 10 mm. ....	91
<b>Figura 59:</b> Superfície de fratura dos compósitos reforçados com fibras de: (a) mutamba de 10 mm; (b) pente de macaco de 10 mm; (c) pindaíba de 10 mm. ....	92

<b>Figura 60:</b> Curvas tensão versus deformação dos corpos de prova característicos de compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 15 mm. ....	94
<b>Figura 61:</b> Superfície de fratura dos compósitos reforçados com fibras de: (a) mutamba de 15 mm; (b) pente de macaco de 15 mm; (c) pindaíba de 15 mm. ....	95
<b>Figura 62:</b> Comparativo da tensão máxima pelo tamanho das fibras – NORMA ASTM D638 .....	96
<b>Figura 63:</b> Comparativo da máxima resistência a tração dos compósitos confeccionados segundo as Normas ASTM D638 / D3039. ....	97
<b>Figura 64:</b> Superfície de fratura do corpo de prova de resina pura do ensaio de impacto. (a) ilustra micrografia do lado esquerdo, (b) o lado direito do corpo de prova. ....	98
<b>Figura 65:</b> Resistência ao Impacto para as fibras alinhadas. ....	99
<b>Figura 66:</b> Micrografia eletrônica dos corpos de prova de impacto de fibras longas e alinhadas. (a), (c) e (e). Ilustra micrografia do lado esquerdo para a mutamba, pente de macaco e pindaíba, (b), (d) e (f) o lado direito do corpo de prova para a mutamba, pente de macaco e pindaíba. ....	101
<b>Figura 67:</b> Resistência ao Impacto para as fibras curtas 5 mm. ....	103
<b>Figura 68:</b> Micrografia eletrônica dos corpos de prova de impacto de 5 mm. (a), (c) e (e). Ilustra micrografia do lado esquerdo para a mutamba, pente de macaco e pindaíba, (b), (d) e (f) o lado direito do corpo de prova para a mutamba, pente de macaco e pindaíba. ....	104
<b>Figura 69:</b> Resistência ao Impacto para as fibras curtas 10 mm. ....	106
<b>Figura 70:</b> Micrografia eletrônica dos corpos de prova de impacto de 10 mm. (a), (c) e (e). Ilustra micrografia do lado esquerdo para a mutamba, pente de macaco e pindaíba, (b), (d) e (f) o lado direito do corpo de prova para a mutamba, pente de macaco e pindaíba. ....	107
<b>Figura 71:</b> Resistência ao Impacto para as fibras curtas 15 mm. ....	109
<b>Figura 72:</b> Micrografia eletrônica dos corpos de prova de impacto de 15 mm. (a), (c) e (e). Ilustra micrografia do lado esquerdo para a mutamba, pente de macaco e pindaíba, (b), (d) e (f) o lado direito do corpo de prova para a mutamba, pente de macaco e pindaíba. ....	110
<b>Figura 73:</b> Comparativo da resistência ao impacto pelo tamanho das fibras – NORMA ASTM D5942. ....	111
<b>Figura 74:</b> Comparativo da resistência ao impacto pelo tamanho e orientação das fibras. ....	112

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Diferentes tipos de resinas Poliéster .....	23
<b>Tabela 2:</b> Comparação de diferentes processos de fabricação de compósitos .....	32
<b>Tabela 3:</b> Caracterização das Fibras de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.....	76
<b>Tabela 4:</b> Resultados de ensaio de tração de corpo de prova da resina pura .....	82
<b>Tabela 5:</b> Resultado de tração para os corpos de prova confeccionados com as fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba alinhadas.....	84
<b>Tabela 6:</b> Resultado dos ensaios de tração dos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 5 mm de comprimento.....	88
<b>Tabela 7:</b> Resultado dos ensaios de tração dos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 10 mm de comprimento.....	91
<b>Tabela 8:</b> Resultado dos ensaios de tração dos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 15 mm de comprimento.....	93
<b>Tabela 9:</b> Resultados da caracterização mecânica (impacto) da matriz polimérica pura. ....	98
<b>Tabela 10:</b> Resultados da caracterização mecânica (impacto) dos compósitos reforçados por fibras longas e alinhadas.....	99
<b>Tabela 11:</b> Resultados da caracterização mecânica (impacto) dos compósitos reforçados por fibras curtas de 5 mm de comprimento. ....	102
<b>Tabela 12:</b> Resultados da caracterização mecânica (impacto) dos compósitos reforçados por fibras curtas de 10 mm de comprimento. ....	105
<b>Tabela 13:</b> Resultados da caracterização mecânica (impacto) dos compósitos reforçados por fibras curtas de 15 mm de comprimento. ....	108

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xv
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1. GERAL.....	16
2.2. ESPECÍFICOS.....	16
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
3.1. MATERIAIS COMPÓSITOS.....	17
3.2 MATRIZ POLIMÉRICA.....	19
<b>3.2.1 Poliéster</b> .....	<b>21</b>
3.3 FIBRAS NATURAIS.....	23
<b>3.3.1 Fibra de pente de macaco</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3.2 Fibra de Mutamba</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3.3 Fibras de Pindaíba</b> .....	<b>29</b>
3.4 FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS.....	30
3.5 ENSAIO DE TRAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS.....	32
<b>3.5.1 Compósito com Fibras Longas e Alinhadas</b> .....	<b>32</b>
<b>3.5.2 Compósito com Fibras Curtas</b> .....	<b>36</b>
3.6 ENSAIO DE IMPACTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS.....	37
3.7 MECANISMO DE FALHA E ASPECTO FRACTOGRÁFICO DE MATERIAIS COMPÓSITOS.....	38
3.8 MECANISMO DE FALHA E ASPECTO FRACTOGRÁFICO DE FIBRAS NATURAIS.....	40
<b>4. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>43</b>
4.1. MATERIAIS.....	43
<b>4.1.1. Resina Poliéster</b> .....	<b>43</b>
<b>4.1.2 Fibras vegetais de Pente de Macaco, Mutamba e Pindaíba</b> .....	<b>43</b>
4.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	44
<b>4.2.1 Extração de Fibras Vegetais de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba</b> .....	<b>45</b>
<b>4.2.2 Preparação das Fibras Alinhadas</b> .....	<b>46</b>
<b>4.2.3 Preparação das Fibras Curtas</b> .....	<b>48</b>
<b>4.2.4 Caracterização Superficial das Fibras</b> .....	<b>49</b>
<b>4.2.5 Ensaio de Tração nas Fibras</b> .....	<b>50</b>
<b>4.2.6: Fabricação dos Materiais Compósitos</b> .....	<b>51</b>
<i>4.2.6.1 Materiais Compósitos com Fibras Longas e Alinhadas</i> .....	<i>52</i>
<i>4.2.6.2 Materiais Compósitos com Fibras Curtas</i> .....	<i>60</i>
<b>4.2.7 Ensaio de Tração dos Materiais Compósitos</b> .....	<b>66</b>



	xvii
4.2.7.1- <i>Compósitos com Fibras Contínuas e Alinhadas</i> .....	67
4.2.7.2 <i>Compósitos com Fibras Curta</i> .....	69
<b>4.2.8 Ensaio de Impacto dos Materiais Compósitos</b> .....	<b>71</b>
<b>4.2.9 Análise do Aspecto Fractográfico</b> .....	<b>73</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>74</b>
5.1 AVALIAÇÃO DA EXTRAÇÃO E PREPARAÇÃO DAS FIBRAS .....	74
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS .....	76
5.3 AVALIAÇÃO DA FABRICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS.....	80
5.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO E ASPECTO DA FRATURA .....	82
<b>5.4.1 Resistência a tração dos corpos de prova de Matriz Pura</b> .....	<b>82</b>
<b>5.4.2- Fibras Longas e Alinhadas</b> .....	<b>84</b>
<b>5.4.3 Fibras Curtas</b> .....	<b>88</b>
5.4.3.1- <i>Compósitos reforçados com fibras de 5 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.</i> .....	88
5.4.3.2 <i>Compósitos reforçados com fibras de 10 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.</i> .....	90
5.4.3.3- <i>Compósitos reforçados com fibras de 15 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.</i> .....	93
5.5 RESULTADO DO ENSAIO DE IMPACTO E ASPECTO DA FRATURA .....	98
<b>5.5.1 Ensaio de impacto da resina pura</b> .....	<b>98</b>
<b>5.5.2 Fibras Contínuas e Alinhadas</b> .....	<b>99</b>
<b>5.5.3- Fibras Curtas</b> .....	<b>102</b>
5.5.3.1 <i>Compósitos reforçados com fibras de 5 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.</i> .....	102
5.5.3.2 <i>Compósitos reforçados com fibras de 10 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.</i> .....	105
5.5.3.3 <i>Compósitos reforçados com fibras de 15 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.</i> .....	108
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>113</b>
6.1. CONCLUSÕES .....	113
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	117
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>118</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização das fibras vegetais em substituição de diversos reforços sintéticos em compósitos poliméricos tem apresentado um grande potencial de aplicação tecnológica. Visando atender às novas necessidades do mercado e o desenvolvimento de novos materiais, têm sido objeto de pesquisa a formulação e caracterização de materiais compósitos. E a utilização de compósitos reforçados com fibras naturais é o reflexo das preocupações com as questões ambientais e de recursos renováveis.

Segundo Nóbrega, (2007) o uso de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos, com o objetivo de substituir total ou parcialmente as fibras sintéticas, tem recebido muita atenção dos pesquisadores. Isto porque as fibras vegetais apresentam vantagens como: baixo custo, baixa densidade, resistência, baixa abrasividade aos equipamentos de processo; são biodegradáveis, não são tóxicas ou poluentes diminuindo assim problemas ambientais, além de serem originárias de fontes renováveis e serem disponíveis em todo o mundo.

Em países tropicais, produtos e resíduos gerados pela agroindústria e indústria mineral podem constituir importante fonte de matéria-prima para a produção de componentes construtivos, científicos, tecnológicos, sociais e econômicos, permitindo o aproveitamento das fibras vegetais e dos resíduos minerais.

Potenciais apresentados pelo Brasil, como ser um dos países com maior biomassa do mundo e maior extensão territorial cultivável, devem ser levados em consideração devido à grande possibilidade de descobertas de novas fibras com propriedades atraentes (MARINELLI et al., 2008). Estudos na área de materiais compósitos na região amazônica ainda são escassos se comparados às outras regiões do país, mesmo apresentando grande potencial no cultivo de fibras naturais.

Boas propriedades mecânicas combinadas com baixa densidade tornam as fibras naturais um bom componente para a aplicação em compósitos e desenvolvimentos de materiais de baixo custo, tais como divisórias, cestos, luminárias, etc. Além de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais, a substituição de polímeros com fibras naturais, diminui o custo do produto e a utilização de fontes não renováveis, a exemplo temos a resina poliéster usada neste trabalho, o que industrialmente se torna um dos principais motivos das crescentes e relevantes novas pesquisas na área de compósitos poliméricos. Também deve ser mencionado

que a natureza oca, de fibras vegetais, pode conceder o isolamento acústico ou dependendo do tipo de matriz, promover determinadas propriedades de amortecimento (GUIMARÃES FILHO, 2011).

Dentre as matrizes poliméricas utilizadas para a produção de compósitos, a matriz de poliéster tem se destacado devido as suas propriedades mecânicas, baixa viscosidade, alta molhabilidade e baixo custo. Poliésteres insaturados são extremamente versáteis em suas propriedades e aplicações e tem sido um termofixo popular usado como matriz polimérica em compósitos. O poliéster é amplamente produzido industrialmente e possui muitas vantagens comparadas às outras resinas termofixas, incluindo capacidade de cura a temperatura ambiente, boas propriedades mecânicas e transparência (AZIZ et al., 2005).

Estudos têm comprovado que fibras celulósicas apresentam características vantajosas na sua aplicação. COSTA (2012) utilizou em sua pesquisa materiais compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de bambu, sisal, vidro e por sistema híbrido bambu / sisal, bambu / vidro e sisal / vidro, dispostas aleatoriamente, RODRIGUES (2014) produziu em sua pesquisa compósitos de matriz de poliéster insaturado reforçados por fibras de Curauá, juta e palha da costa, dispostas na forma de tecido em estilo plano e fibras alinhadas fabricados pelo processo de infusão de resina.

As fibras utilizadas neste trabalho não foram exploradas ainda no que se diz respeito a este tipo de aplicação.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. GERAL

Caracterizar mecanicamente em tração e impacto os compósitos reforçados com fibras de pente de macaco (*Apeiba tibourbou* Aubl.), mutamba (*Guazuma ulmifolia*) e pindaíba (*Guatteria Poeppigiana*) em matriz poliéster.

### 2.2. ESPECÍFICOS

- Aplicar metodologia de extração e preparação das fibras de pente de macaco (*Apeiba tibourbou* Aubl.), mutamba (*Guazuma ulmifolia*) e pindaíba (*Guatteria Poeppigiana*).
- Realizar o ensaio de tração nas fibras segundo norma ASTM D3822-96
- Fabricar os compósitos com fibras alinhadas e curtas
- Preparar os corpos de prova de tração e impacto segundo normas ASTM D3039, ASTM D638 e ASTM D5942
- Realizar os ensaios mecânicos de tração e Impacto nos compósitos
- Caracterizar microestruturalmente os compósitos e as fibras
- Correlacionar as propriedades mecânicas dos compósitos com o aspecto fractográfico;
- Comparar o desempenho experimental em tração e impacto dos corpos de prova com o desempenho previsto por resultados tradicionalmente utilizados na literatura de materiais compósitos;

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos são definidos como materiais constituídos por uma mistura de fases macrocomponentes compostas por materiais que, geralmente, são diferentes sob os pontos de vista de composição química e forma. O aglomerante do material é chamado de matriz, que tem por função envolver os componentes, ou seja, compõe a forma do material. A matriz atua ainda como uma base que confere ductilidade e mantém a estrutura coesa e que, em resumo, contribui para que o conjunto se caracterize por boas condições de fabricação e a necessária flexibilidade. (COSTA, 2016)

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a sua natureza, com a estrutura de seus componentes (matriz e reforço), e também de acordo com a geometria ou forma das fases presentes. De acordo com a fase dispersa, são classificados em (HULL, 1989):

- Fibrosos: as fibras podem ser contínuas ou curtas com orientação definida ou aleatória;
- Particulados: partículas (esféricas, planas, elipsoidais, irregulares) dispersas na matriz;
- Híbridos: misturas de dois ou mais componentes em forma de fibras ou partículas, ou os dois ao mesmo tempo.

A classe de materiais compósitos é bastante ampla e abrangente, compreendendo desde os polímeros reforçados com fibras, os materiais híbridos metal/composito e os concretos estruturais, e outros compósitos que incorporam matriz metálica ou matriz cerâmica. Portanto, a característica básica dos compósitos é combinar, a nível macroscópico, pelo menos duas fases distintas denominadas matriz e reforço (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

As propriedades dos compósitos reforçados por fibras estão diretamente associadas às propriedades dos elementos constituintes dos materiais, tais como propriedades da fibra e da matriz, concentração ou frações volumétricas, interface e adesão fibra/matriz, disposição das camadas e orientação, bem como pela geometria do filamento, como forma e tamanho. Os compósitos podem ser formados por elementos de reforço particulados ou fibrosos. Os reforços particulados podem ser

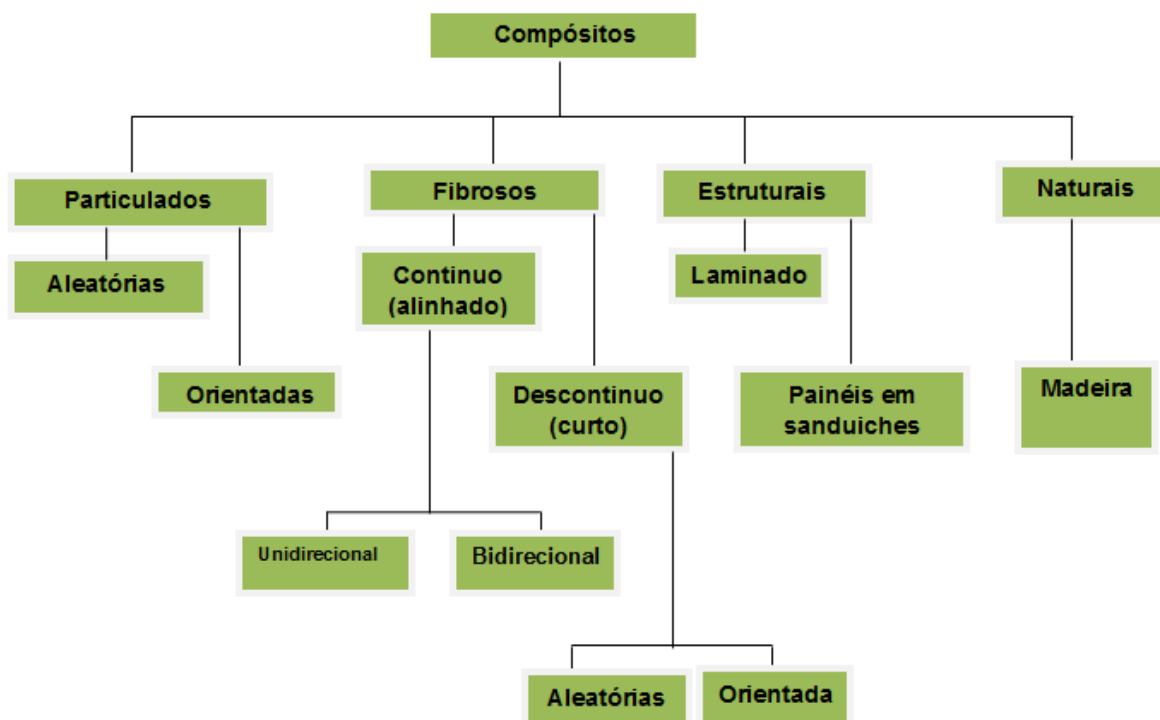
esféricos, cúbicos, tetragonais ou de qualquer outra forma regular ou irregular, mas quase sempre equiaxiais. Já os reforços fibrosos têm a fibra como elemento de reforço, a qual apresenta como característica o fato de possuir um comprimento muito maior que as dimensões da seção transversal (MARINUCCI, 2011).

O interesse dos materiais compósitos está ligado a dois fatores: econômico e desempenho. O fator econômico vem do fato do material compósito ser muito mais leve que os materiais metálicos, o que implica numa economia de combustível e conseqüentemente, num aumento da carga útil (aeronáutica e aeroespacial). A redução na massa total do produto pode chegar a 30 % ou mais, em função da aplicação dada ao material compósito. O custo de fabricação de algumas peças em material compósito pode ser também sensivelmente menor se comparado com os materiais metálicos. (PEREIRA, 2000)

O desempenho está ligado à procura por um melhor desempenho de componentes estruturais, sobretudo no que diz respeito às características mecânicas (resistência a ruptura, resistência à ambientes agressivos, etc.). O caráter anisotrópico dos materiais compósitos é um fator primordial para obtenção das propriedades mecânicas requeridas pelo componente. A leveza juntamente com as excelentes características mecânicas faz com que os materiais compósitos sejam cada vez mais utilizados dentro de atividades esportivas (PEREIRA, 2000).

A natureza também apresenta seus próprios compósitos, a madeira apresenta suas células envoltas em lignina, que confere propriedades como elevada resistência ao impacto, à compressão e à dobra, fazendo com que a sua utilização pelo homem seja plena. Sendo um material multifásico, um compósito exhibe além das propriedades inerentes de cada constituinte, propriedades intermediárias decorrentes da formação de uma região interfacial. O compósito se divide em duas fases, matriz (pode ser de cerâmica, polimérica ou metálica) e a fase dispersa (pode ser fibras ou partículas que servem como carga). (SILVA, 2014)

**Figura 1:** Fluxograma dos tipos de compósitos



**Fonte:** SANTOS, (2016).

### 3.2 MATRIZ POLIMÉRICA

Os compósitos poliméricos podem ser termoplásticos ou termorrígidos. A principal diferença entre estes dois tipos está no comportamento característico quando aquecidos, isto é, os termoplásticos são polímeros capazes de serem moldados várias vezes devido às suas características de se tornarem fluidos sob ação da temperatura e depois se solidificarem quando a temperatura diminui. Já os termorrígidos não têm o comportamento de fluidos devido à presença de ligações cruzadas entre as cadeias macromoleculares. (SILVA, 2014)

Os polímeros termorrígidos são mais utilizados para uso estrutural em materiais compósitos por apresentarem algumas vantagens em relação aos termoplásticos, tais como alta rigidez, elevada estabilidade térmica, alta estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento elétrico e térmico, resistência à fluência e relaxação. As resinas termorrígidas mais usadas e mais baratas são as poliésteres, poliuretanos, vinil-éster e resinas fenólicas; as quais são usadas principalmente para compor compósitos reforçados com fibras de vidro. As resinas epóxi são mais caras

e além das aplicações estruturais, também são muito utilizadas em aplicações aeroespaciais por possuírem melhores propriedades mecânicas e melhores resistências à umidade do que os poliésteres, poliuretanos e as resinas vinílicas. (SILVA, 2014)

As matrizes poliméricas termoplásticas embora reduzam enormemente o custo de fabricação do compósito, não tem sido usada em compósitos avançados, pois têm como limite, a temperatura de uso. A grande ênfase dos estudos atuais com relação às matrizes termoplásticas é desenvolver resinas termoplásticas com resistência térmica elevada. As matrizes elastoméricas são muito importantes na fabricação em sistemas compósitos resistentes ao impacto (HULL E CLYNE, 1996).

Os polímeros termoplásticos constituem a maior parte dos polímeros comerciais, tendo como principal característica a capacidade de ser fundido diversas vezes. Dependendo do tipo do plástico, também podem dissolver-se em vários solventes. Logo, sua reciclagem é possível, uma característica bastante desejável atualmente. São polímeros de alta massa molar, constituídos de cadeias lineares e, em alguns casos, apresentam alguma ramificação. O emaranhamento das cadeias confere integridade física ao material, sendo passíveis, entretanto, de deformação plástica quando submetidos a tensões mecânicas. (RODRIGUES, 2013)

Os termoplásticos (polietileno, poliestireno, polipropileno, etc.) são também utilizados como matrizes em compósitos, devido à maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto, maior tolerância a danos em relação aos termorrígidos, além da capacidade de reciclagem desses materiais. (RODRIGUES, 2013)

Elastômero (borracha) é uma classe de polímeros intermediária aos termoplásticos e termorrígidos. Não são fundíveis, mas apresentam alta elasticidade, não sendo rígidos como os termorrígidos. Sua reciclagem é também complicada de forma análoga aos termorrígidos, devido à incapacidade de fusão. A estrutura molecular é similar à do termorrígido, mas neste caso, há menor número de ligações entre as cadeias. Exemplos: vedações, mangueiras de borracha. (RODRIGUES, 2013)

A escolha da matriz depende da aplicabilidade do compósito e das propriedades desejadas. Industrialmente, as matrizes de termoplásticos são mais viáveis, pelo número de peças que podem ser produzidas em curto espaço de tempo, com um número reduzido de mão de obra qualificada. Os polímeros termoplásticos, macromoléculas de cadeia linear ou ramificada, normalmente são fundidos durante o



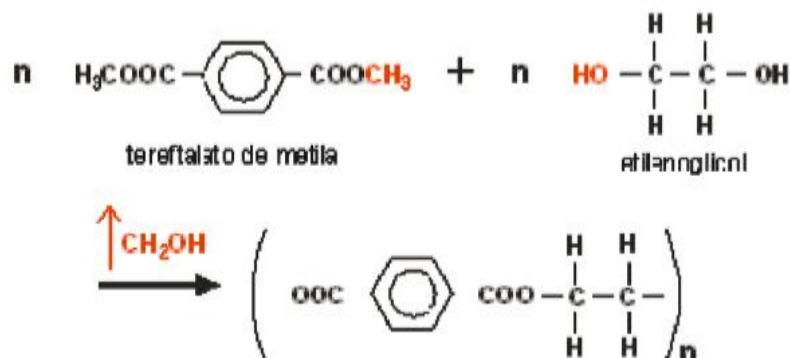
processamento e podem ser reciclados, pois fundem e retornam ao seu estado anterior sem degradação do material. Os termoplásticos, e por consequência os compósitos de termoplásticos, podem ser moldados por injeção, extrusão ou por outras técnicas de moldagem por aquecimento. As maiores restrições de peças de termoplásticos são as dimensões e o custo de equipamentos de processo, quanto maior a peça, maior susceptibilidade ao empenamento e mais caro o equipamento de processo (ALBINANTE *et al.*; 2013).

### **3.2.1 Poliéster**

Entre as resinas poliméricas, as resinas termorrígidas são as mais utilizadas no processamento de compósitos poliméricos. Isto acontece por possuírem um fácil processamento, uma boa molhabilidade dos reforços, e apresentarem boas propriedades, além de estarem disponíveis em uma ampla variedade de grades a um custo relativamente baixo. Os poliésteres estão entre os mais versáteis polímeros sintéticos conhecidos, pois podem ser encontrados comercialmente como fibras, plásticos, filmes e resinas (GARAY, 2010).

As resinas de poliéster são uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos (anidrido maleico ou ftálico) e glicóis que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. O tipo de ácido influencia as propriedades finais da resina e, com isso, poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas podem ser produzidos. Se um ou ambos constituintes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla reativa entre átomos de carbono, a resina resultante é insaturada (SILVA, 2010).

**Figura 2:** Macromolécula de uma resina poliéster



**Fonte:** ALESSANDRO, 2003 *apud* SILVA, (2014).

As resinas de poliéster são utilizadas na fabricação de peças moldadas, com ou sem fibra de vidro, tais como: piscinas, barcos, banheiras, tanques, telhas, botões, bijuterias, assentos sanitários, móveis para jardim, mármore sintético, etc. Elas fazem parte de uma família de resinas sintéticas, que são obtidas com uma grande variedade de matérias primas como base. O processo de cura da resina poliéster é iniciado pela adição de uma pequena porção de catalisador, como um peróxido orgânico ou um composto alifático. A cura pode se dar tanto em temperatura ambiente, quanto em temperatura elevada e com ou sem aplicação de pressão (OLIVEIRA, 2012).

A formulação de uma matriz polimérica contendo resina poliéster é feita pela adição à resina de iniciadores e promotores de cura. Os iniciadores de cura, genericamente chamados de peróxidos orgânicos, podem ser hidroperóxidos, como o hidroperóxido de cumenon (CHP); e peróxidos, como o peróxido de metil etil cetona (MEKP), o peróxido de benzoila (BPO) e o acetil acetona (AAP). Para sistemas formulados para cura a frio, os peróxidos mais indicados são o MEKP, o BPO, o AAP e o CHP. Para sistemas de cura a quente, são sugeridos o BPO, o peroxoato de tércio butila (TBPO) e o perbenzoato de tércio butila (TBPB). A ativação dos iniciadores de cura é feita por promotores de cura (aceleradores), que têm como os mais usuais as aminas terciárias ou os sais de cobalto, vanádio, cobre ou manganês, sendo os dois primeiros os mais empregados. (MARINUCCI, 2011).

No cotidiano, os iniciadores de cura são normalmente chamados de catalisadores. Esse termo não é tecnicamente correto para expressar o fenômeno que

ocorre na cura. Catalisador é uma substância que aumenta a velocidade de uma reação química sem ser efetivamente consumido no processo, fato que não acontece na cura de matrizes poliméricas onde o iniciador de cura é consumido na reação.

**Tabela 1:** Diferentes tipos de resinas Poliéster

Tipos	Comentários
Ortoftálica	Resina mais comum, de menor custo, para uso básico, grande potencial de se adequar às variadas situações onde não é necessária uma grande resistência a umidade.
Tereftálica	Possui resistência física um pouco superior à ortoftálica, porém baixa resistência à UV.
Isoftálica	Oferece altas características mecânicas, químicas e térmicas.
Isoftálica c/ NPG	O NPG melhora a resistência à hidrólise.
Bisfenólica	Possui as melhores características químicas e térmicas.

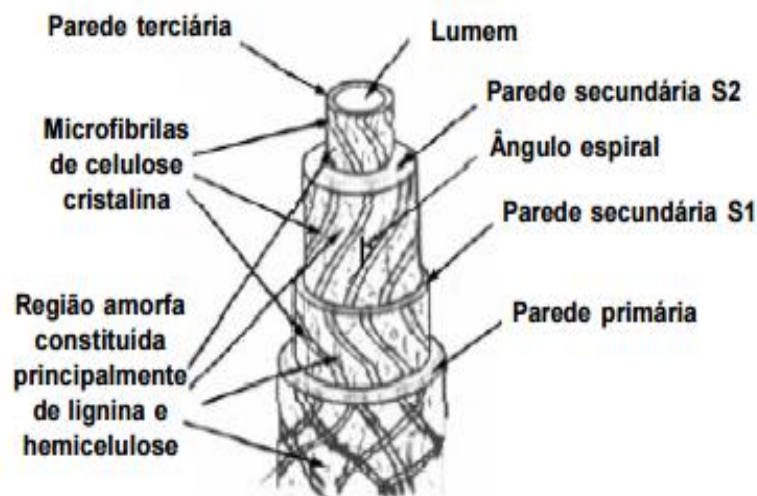
**Fonte:** MARINUCCI, (2011).

### 3.3 FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais são aquelas encontradas na natureza e usadas *in natura* ou mesmo após certo grau de beneficiamento. Elas podem ser de origens minerais, vegetais ou animal. Dentre estas fibras, as vegetais têm conseguido ampliar, de forma significativa, suas aplicações nos mais diversos setores da indústria (MORASSI, 1994 E SANTOS CRUZ, 2002 *apud* DE PAULA, 2011)

Podendo ainda ser bem definida pelo conjunto de filamentos individuais, formados por fibrilas e unidas por espécies químicas orgânicas não cristalinas (lignina e hemicelulose). As fibrilas são compostas por moléculas de celulose e estão orientadas em ângulos distintos formando as diversas camadas que compõe a macrofibra. Assim, de forma simplificada a denominação de macrofibra é dada ao conjunto de filamentos compostos preferencialmente por moléculas de celulose unidas por lignina e hemicelulose. (ESMERALDO, 2006). A figura 3 mostra a constituição por partes de uma fibra vegetal elementar.

**Figura 3:** Constituição de uma fibra vegetal elementar



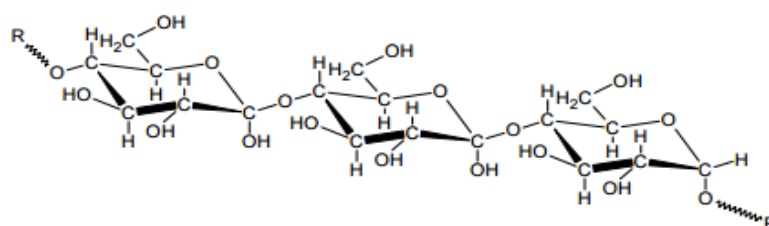
**Fonte:** SILVA, (2011).

Quando todas as impurezas forem removidas, o principal constituinte da fibra que sobra é a celulose (GONÇALVES *et al*; 2003). A celulose, que é o principal componente das fibras vegetais e principal responsável pela estabilidade e resistência mecânica, é um polissacarídeo linear de alta massa molar constituído por uma cadeia molecular formada pela união de unidades de anidro-D-glicose, ou simplesmente glicose-D. (LIMA JÚNIOR, 2007; SILVA, 2003 *apud* SILVA, 2011). A celulose tem uma fórmula empírica de  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . A celulose pura é uma substância branca com uma gravidade específica de 1,5. Queima espontaneamente no ar, com uma chama luminosa sem fumaça. É higroscópica e foi sugerida que a celulose pode formar três hidratos:  $C_6H_{10}O_5 \cdot 1/3$  ou  $1/2 \cdot H_2O$  e  $C_6H_{10}O_5 \cdot 1 \ 1/3 \cdot H_2O$ , mas existem dúvidas sobre essas fórmulas por causa de sua variabilidade. (GONÇALVES *et al*; 2003)

A celulose é o componente essencial de todas as plantas e o polímero natural existente em maior abundância, possui fortes ligações de hidrogênio, sendo altamente hidrofílica (AGRAWAL *et al.* 2000 *apud* BARBOSA, 2011). A unidade elementar da macromolécula da celulose é a anidro-d-glicose, que contém três radicais hidroxilas (-OH). Estas hidroxilas formam ligações de hidrogênio dentro das moléculas (intra-moleculares) e é um dos principais constituintes das paredes celulares das plantas (cerca de 33% do peso da planta), em combinação com a lignina, com hemicelulose e pectina. (BLEDZKI E GASSAN, 1999 *apud* BARBOSA, 2011).

Em função do seu maior grau de cristalinidade e seu alto grau de polimerização, a celulose costuma apresentar maior estabilidade aos efeitos da degradação, seja ela mecânica, química ou térmica, quando comparada aos componentes não celulósicos co-formadores das fibras. (AGRAWAL *et al.*; 2000 *apud* BARBOSA, 2011).

**Figura 4:** Estrutura da celulose



**Fonte:** BATHISTA, (2003).

O termo hemicelulose é utilizado coletivamente para denominar grupos distintos de polissacarídeos constituídos por vários açúcares incluindo glicose, xilose, galactose, arabinose e manose. A hemicelulose é diferente da celulose em três importantes aspectos. Em primeiro lugar, ela contém várias unidades de açúcares já a celulose tem apenas as unidades 1,4-BD-glucopiranosose. Em segundo lugar, apresenta um considerável grau de ramificação de cadeias poliméricas, enquanto a celulose é um polímero estritamente linear. Em terceiro lugar, o grau de polimerização é cerca de um décimo a um centésimo daquele encontrado para a celulose. (AGRAWAL *et al.*; 2000 *apud* BARBOSA, 2011).

Normalmente a hemicelulose atua como um elemento de ligação entre a celulose e a lignina, não estando diretamente correlacionada à resistência e dureza das fibras. Ao contrário da celulose, os constituintes da hemicelulose diferem de planta para planta. (AGRAWAL *et al.*; 2000 *apud* BARBOSA, 2011).

A lignina pode ser definida com um polímero derivado de unidades fenilpropanóides denominadas C<sub>6</sub>C<sub>3</sub> ou, simplesmente, unidades C<sub>9</sub>, repetidas de forma irregular, que tem sua origem na polimerização desidrogenativa do álcool coniferílico (SILVEIRA *et al.*; 2009). As moléculas de lignina são formadas completamente diferente dos polissacarídeos, pois são constituídas por um sistema aromático composto de unidades de fenilpropano. (KLOCK & ANDRADE, 2003)

Sua concentração nas fibras influencia a estrutura, as propriedades, a morfologia, a flexibilidade e a taxa de hidrólise. Fibras com alto teor de lignina são de excelente qualidade e bastante flexíveis (AKERS 1989; AGARWAL 2000 *apud* ESMERALDO, 2006). Do ponto de vista morfológico a lignina é uma substância amorfa localizada na lamela média composta, bem como na parede secundária. Durante o desenvolvimento das células, a lignina é incorporada como o último componente na parede, interpenetrando as fibrilas e assim fortalecendo, enrijecendo as paredes celulares. (KLOCK & ANDRADE, 2003)

O teor de umidade das fibras é determinado por diferença de massa entre as fibras in natura e as fibras secas (FONTELES 2013). O cálculo do teor de umidade é realizado de acordo com a equação:

$$\%umidade = \frac{Mu - Ms}{Mu} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Mu = massa da amostra úmida, (g).

Ms = massa da amostra seca, (g)

### 3.3.1 Fibra de Pente de Macaco

A espécie *Apeiba tibourbou* Aubl. (*Tiliaceae*), conhecida como pau-de-jangada ou pente-de-macaco, é empregada popularmente como antirreumática, antiespasmódica e expectorante, embora seja desconhecida quanto aos seus efeitos tóxicos. É uma árvore que atinge cerca de 10- 15 m de altura, utilizada na arborização e ornamentação de praças e avenidas, principalmente devido à beleza de suas folhas (MATOS, 2008 *et al.*; *apud*. LORENZI, 1998) e também pela exuberância de seus frutos. Esta espécie possui copa ampla, com grandes folhas simples, alternas e estipuladas. Seu período de floração é extenso, sendo comum encontrar na mesma árvore desde botões florais até frutos maduros (GIRNOS, 1993).

A madeira de pente de macaco, por ser muito leve e de baixa resistência mecânica é indicada para embalagens leves, caixotaria em geral, confecção de brinquedos e maquetes, sendo também utilizada para fabricação de jangadas e embarcações leves. Segundo descrição macroscópica da madeira existem camadas

de crescimento distintas demarcadas pelo achatamento das fibras, ela possui raios visíveis sob lente de 10x, e seus vasos também são visíveis a olho nu. A sua descrição microscópica mostra vasos solitários e múltiplos de até 10, possui distribuição difusa, e fibras libriformes de parede delgada, lume espesso e pontoações simples (JUNIOR *et al*, 2013).

A distribuição geográfica da planta é encontrada nas seguintes regiões: Norte (Roraima, Amapá, Pará, Amazonas, Tocantins, Acre, Rondônia), Nordeste (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Bahia, Alagoas, Sergipe), Centro-Oeste (Mato Grosso, Goiás, Distrito Federal, Mato Grosso do Sul), Sudeste (Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Rio de Janeiro), Sul (Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul) (LOHMANN, 2010).

As fibras desta árvore são bastante utilizadas por comunidades da zona rural, que usam a mesma para construção de casas de barro. A fibra faz com que a armação seja bastante firme conferido boa resistência mecânica e sendo utilizado de maneira frequente para armação de casas de pau a pique que é baseada na técnica construtiva antiga que consiste no entrelaçamento de madeiras verticais fixadas no solo, com vigas horizontais, geralmente de bambu, amarrado entre si por cipós.

**Figura 5:** Características da árvore e do fruto do Pente de Macaco (*Apeiba Tibourbou* Aubl.)



**Fonte:** Autor, (2018).

### 3.3.2 Fibra de Mutamba

Forma biológica: arvoreta a árvore perenifólia (as folhas caem depois de uma seca prolongada). As árvores maiores atingem dimensões próximas de 30 m de altura e 60 cm de DAP (diâmetro à altura do peito, medido a 1,30 m do solo), na idade adulta. (CARVALHO, 2007)

Tronco: reto a levemente tortuoso, curto, frequentemente ramificado a baixa altura. Fuste com até 12 m de comprimento.

Ramificação: é dicotômica. A copa é densa e larga, tipicamente umbeliforme; com galhos horizontais e ligeiramente pendentes, com as folhas agrupadas em duas fileiras ao longo dos ramos. (CARVALHO, 2007)

Casca: com espessura de até 12 mm. A superfície da casca externa é grisácea a café-escuro, acanalada, áspera, agrietada longitudinalmente, se desprende facilmente em placas retangulares ou em tiras. A casca interna é fibrosa, rosada, com estrias brancas. (CARVALHO, 2007)

Folhas: são de filotaxia alterna, simples, ovalada ou lanceolada, com 5 cm a 18 cm de comprimento e 2 cm a 6 cm de largura, membranácea, mais ou menos aguda no ápice, com a margem levemente denteada ou crenada, a face dorsal pilosa, tomentosa com pêlos estrelados em ambas as faces, especialmente sobre nervura principal e com três ou às vezes cinco nervuras que saem desde a base, glabra e luzidia quando velha. (CARVALHO, 2007)

As folhas e as raízes da mutamba são empregadas na medicina caseira em todas as regiões onde está planta é encontrada, com base na tradição popular, mas sua eficácia e segurança não foram, ainda, comprovadas cientificamente. Contudo, é amplo o emprego desta planta nas práticas caseiras da medicina popular e como fornecedora de mucilagem de modo artesanal (CARVALHO, 2007).



**Figura 6:** Características da Árvore e do Tronco da Mutamba (*Guazuma ulmifolia*).



**Fonte:** Autor, (2018).

### 3.3.3 Fibras de Pindaíba

A pindaíba é uma árvore notavelmente ornamental, que pode chegar a 30 metros de altura é pertencente da família *Annonaceae* da espécie *Guatteria Poeppigiana*. Ela é encontrada com maior frequência nas planícies litorâneas, em solos rasos e de rápida drenagem, e com menor frequência em solos arenosos e profundos. Seu tronco é reto e bem cilíndrico, com casca externa lisa e de coloração avermelhada a cinzento-escura. As folhas são simples, delicadas e aromáticas (CARVALHO, 2006).

A distribuição das anonáceas é quase totalmente restrita às regiões tropicais: quase 900 espécies são neotropicais, 450 são afrotropicais e o restante das espécies são indomalayas (uma ecozona que cobre a Ásia Sul, a Ásia Oriental e o Sudeste Asiático). Comercialmente, a importância está atrelada à plantação, ao cultivo e ao comércio dos frutos comestíveis desta família.

**Figura 7:** Árvore e folhas da *Guatteria Poepiggiana*, conhecida como Pindaíba.



**Fonte:** Autor, (2018).

As flores são róseas e os frutos são usados como condimento substituto da pimenta. Sua madeira é apropriada para caixotaria, construção civil, marcenaria e cabos de ferramentas. Alguns usos específicos: produtos madeireiros (cabo de ferramentas, caixotaria, tamancos, caibros, tabuados, vigas, construção naval, carpintaria e marcenaria), produtos não madeireiros (alimentação humana, cordas, recurso para fauna, ornamental) (DIAS, 1988).

### 3.4 FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

As propriedades finais dos materiais não são determinantes apenas em função das suas características individuais, mas também do modo como os materiais são produzidos e da forma como são inseridos nesse compósito. Em todos os processos de fabricação de compósitos existentes, desde os que incorporam tecnologias mais simples às mais avançadas existe um conjunto de limitações, nomeadamente, no que diz respeito à capacidade de produção das peças, tamanho, forma geométrica, qualidade estrutural, homogeneidade na produção, possibilidade de automatização e custo adicional (LOPES, 2009).

Pode-se classificar o processamento de compósitos de duas maneiras: pelo tipo de matriz a ser utilizada (poliméricas, cerâmicas ou metálicas), ou pelo tipo de processo utilizado para obtenção do compósito, ou seja, processamento via fase líquida, via fase gasosa ou via fase de partícula sólida. A seleção do processo de

manufatura para produção de um componente em compósito deve considerar principalmente o tamanho e geometria da peça, a microestrutura desejada, incluindo o tipo de reforço e matriz, o desempenho e a avaliação mercadológica (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

Outra forma de se classificar os processos de fabricação de compósitos é em função do ferramental (molde) utilizado. Conceitualmente, os processos de fabricação de peças, componentes e estruturas de material compósito podem ser divididos em processos de molde aberto e processos de molde fechado. A distinção está na qualidade do acabamento que se consegue na superfície do elemento fabricado e na qualidade dos moldes necessários para a conformação da peça. (MARINUCCI, 2011)

Segundo Costa (2016), processos em molde aberto utilizam, em geral, baixa tecnologia e baixa escala de produção. São eles:

- Laminação manual (Hand Lay Up): Feltros de fibras enrolados, mechas trancadas, mantas e outros tecidos de fibras são colocados sobre o molde e impregna-se com resina utilizando-se um pincel. Para melhorar o processo de impregnação, são usados rolos como objetivo de eliminar bolhas. O processo continua com a colocação das camadas até a obtenção da espessura (ou configuração) desejada para a peça. O moldado é curado sem calor nem pressão;

- Laminação à pistola (Spray Up): Fios cortados e resina são projetados simultaneamente em um molde preparado e um rolo é passado para melhorar o processo de impregnação (diminuindo a presença de bolhas) e antes que a resina endureça.

- Centrifugação: Misturas de fibras e resina são introduzidas em um molde rotatório e curadas "*in situ*".

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

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

- Moldagem por compressão: Processo utilizando o pré-impregnado (preg-preg - SMC, BMC, HMC, etc.), ou seja, semi produtos acabados, onde as fibras já se

encontram previamente impregnadas pela resina ao serem colocadas no molde aquecido;

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

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

**Tabela 2:** Comparação de diferentes processos de fabricação de compósitos

Processo	Habilidade Necessária	Produtividade	$V_f$	Custo	Arranjo Reforço	Forma
Hand lay-up	Baixa	Baixa	Média	Baixo	2D	Simple a complexa
Autoclave	Alta	Média	Alta	Médio a alto	2D	Simple a complexa
RTM/VARTM	Média	Alta	Média a alta	Baixo	2D, 3D	Simple a complexa

**Fonte:** NAIK *et al.*; 2013 *apud* RODRIGUES (2014)

### 3.5 ENSAIO DE TRAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

#### 3.5.1 Compósito com Fibras Longas e Alinhadas

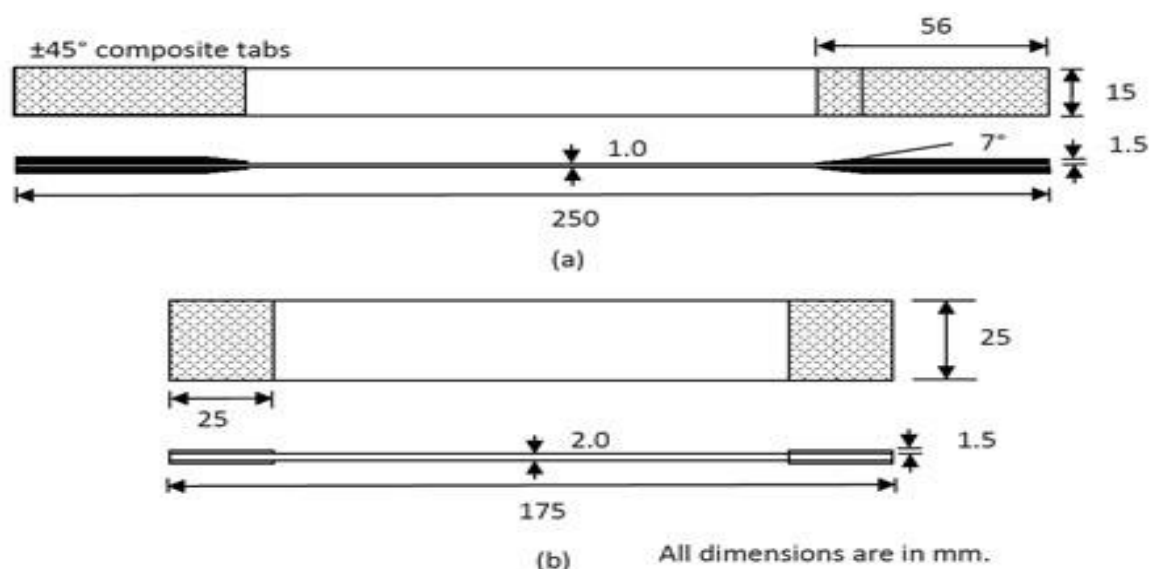
O ensaio de tração caracteriza-se por ter um corpo de prova submetido a um esforço que tende a alongá-lo no sentido axial até a ruptura. O ensaio é realizado em um corpo de prova de forma e dimensões padronizadas para que os resultados obtidos sejam comparados ou reproduzidos. O corpo de prova é fixado em garras mecânicas da máquina de ensaio que aplica gradativamente esforços na sua direção axial, obtendo medidas na deformação correspondente. A carga aplicada no ensaio é mensurada na própria máquina, e, normalmente o ensaio ocorre até a ruptura. (NETO, 2016).

O teste da norma D 3039 – 76 funciona bem para corpos de prova ‘*orthotropic*’ (que possuem diferentes propriedades em diferentes direções ortogonais), pois eles produzem tensões uniformes na peça. (ASTM D 3039)

A ASTM D 3039/ D 3039 M-00 determina que os corpos de prova tenham uma espessura entre 0,508 a 2,54mm, uma largura de 12,7mm e um vão de no mínimo 12,7 mm para os ensaios de tração longitudinal, ou seja, com as fibras na direção longitudinal. Para os ensaios de tração transversal, ou seja, com as fibras na direção transversal, uma largura de 25,4mm e comprimento útil mínimo de 38,1mm. (ASTM D 3039)

Os tabs são pregados com adesivos nos extremos dos corpos para que as tensões sejam transmitidas das garras da máquina sem danificar os corpos de prova. Os tabs para fixação na máquina de ensaio são de fibra de vidro medindo 60 x 12,75 x 7,4mm para a tração longitudinal e 60x 25,4 x 7,4mm para à tração transversal, sendo colados nas extremidades dos corpos de prova. (ASTM D 3039). Como mostra a Figura 8.

**Figura 8:** Modelo de corpo de prova segundo a norma D3039



Fonte: ASTM D3039, (2000)

Os tabs são colocados com filme adesivo para reduzir a concentração de tensões na interface de colagem, e distribuir homogeneamente as forças de agarramento na fixação do corpo de prova na máquina de ensaio e proteger a superfície do laminado contra danos. Os tabs são obtidos a partir de laminados de

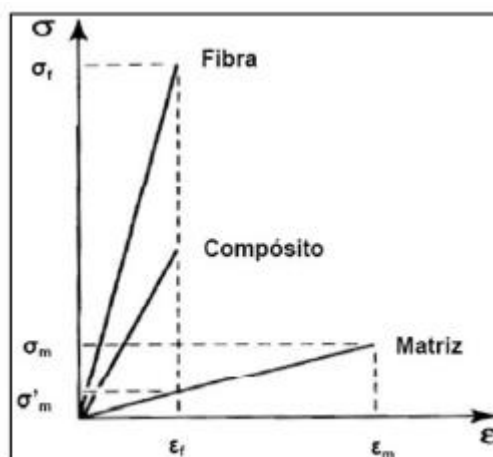
vidro/epóxi, que devido ao baixo módulo de elasticidade do compósito, deformam-se elasticamente distribuindo tensões por uma grande área e absorvendo energia. (ASTM D 3039)

O valor de resistência à tração ( $\sigma_c$ ) de um compósito reforçado com fibras curtas pode ser determinado pela equação a seguir, obtida da “Regra das Misturas”

$$\sigma_c = \sigma_s \phi_f \left[ 1 - \frac{l_c}{2l_f} \right] k + \sigma'_m \quad (1)$$

Onde  $\sigma_s$  é o valor da resistência à tração da fibra. Conforme equação da “Regra das Misturas” (AGARWAL *apud* ESMERALDO et al.; (2006)), a resistência do compósito ( $\sigma_c$ ) sofre influência direta de  $\sigma_s$ ;  $l_f$  é o comprimento médio do reforço presente no compósito.  $\sigma_m$  é a tensão em tração da matriz para o alongamento na ruptura da fibra. Pode ser calculado graficamente, conforme figura 9.

**Figura 9:** Gráfico para o cálculo da tensão em tração da matriz para o alongamento da fibra.



**Fonte:** AGARWAL *apud* ESMERALDO et al.; (2006)

O comprimento crítico da fibra,  $l_c$ , onde a tensão transferida é suficientemente grande para quebrar a fibra, é dado por:

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot D}{2 \cdot \tau} \left[ 1 - \frac{D_i^2}{D^2} \right] \quad (2)$$

Onde:

$\sigma_f$  = tensão de ruptura da fibra

$\tau$  = máxima tensão transferida à fibra pela matriz (tensão de transferência)

$D$  = diâmetro externo da fibra

$D_i$  = diâmetro interno da fibra

Através da fórmula do comprimento crítico da fibra, pode-se concluir que fibras curtas transferem cargas menos eficientemente do que fibras longas. Isso foi utilizado como premissa e demonstrado que para fibras alinhadas (COLEMAN *et al.*, 2006) o módulo do compósito é dado por:

$$E_C = (\eta_1 \cdot E_f - E_m) \cdot V_f + E_m \quad (3)$$

Onde:

$\eta_1$  = o fator de eficiência do comprimento

$$\eta_1 = 1 - \frac{\text{Tanh}(a \cdot l/D)}{a \cdot l/D} \quad (4)$$

$$a = \sqrt{\frac{-3 \cdot E_m}{2 \cdot E_f \cdot \ln V_f}} \quad (5)$$

O fator de eficiência do comprimento aproxima-se de 1 para  $l / D > 10$ . Em muitas situações as fibras não devem estar alinhadas. Para fibras não alinhadas, fibras curtas, o módulo do compósito é dado por:

$$E_c = (\eta_0 \eta_1 \cdot E_f - E_m) \cdot V_f + E_m \quad (6)$$

Onde:

$\eta_0$  é o fator de eficiência de orientação

$\eta_0 = 1$ , para fibras alinhadas

$\eta_0 = 3/8$ , para fibras alinhadas no plano

$\eta_0 = 1/5$ , para fibras randomicamente orientadas

### 3.5.2 Compósito com Fibras Curtas

O método de ensaio é realizado através da norma ASTM D638 que abrange a determinação das Propriedades em tração de polímeros com ou sem reforço sob a forma de corpos de prova para teste padrão em forma de halteres ou gravata, quando testado em condições estabelecidas de pré-tratamento, temperatura, umidade e velocidade da máquina de testes. Este método de teste pode ser usado para materiais de teste de espessuras de até 14 mm (0,55 pol.). Os dados de teste obtidos por este método de ensaio são de grande relevância para o uso no projeto de engenharia. Os valores são expressos em unidades do SI que são considerados como valores padrão (ASTM, 2010).

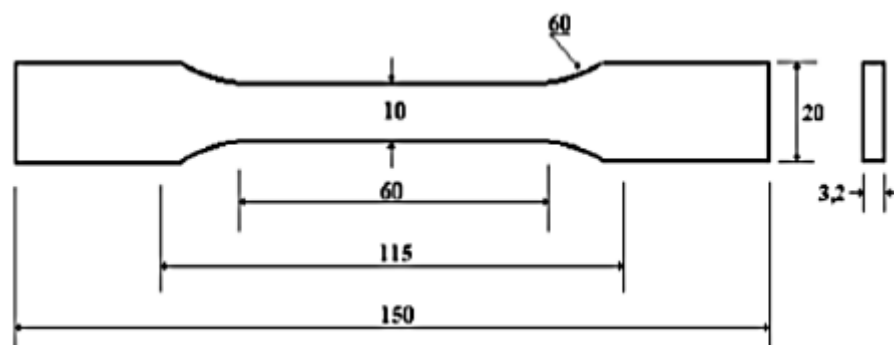
O método aplicado para o teste é projetado para analisar propriedades de tração dados para o controle e especificação de materiais plásticos. Estes dados também são úteis para a caracterização qualitativa e para pesquisa e desenvolvimento. Para muitos materiais, pode ser uma especificação que requer o uso do presente método de ensaio, mas com algumas modificações processuais que têm precedência quando aderindo à especificação (ASTM, 2010).

As propriedades de tensão podem variar de acordo com a preparação de amostras e com velocidade e ambiente de testes. Conseqüentemente, onde os resultados comparativos precisos são desejados, esses fatores devem ser cuidadosamente controlados (ASTM, 2010).



Esse método de ensaio foi utilizado para a realização dos ensaios dos compósitos de fibras descontinuas e aleatórias do presente trabalho.

**Figura 10:** Dimensões dos corpos de prova de tração segundo a norma ASTM D638M.



Fonte: RODRIGUES, (2008).

O método é aplicado para o teste que é projetado para analisar propriedades de tração dados para o controle e especificação de materiais plásticos. Estes dados também são úteis para a caracterização qualitativa e para pesquisa e desenvolvimento. Para muitos materiais, pode ser uma especificação que requer o uso do presente método de ensaio, mas com algumas modificações processuais que têm precedência quando aderindo à especificação (ASTM, 2010).

As propriedades de tensão podem variar de acordo com a preparação de amostras e com velocidade e ambiente de testes. Conseqüentemente, onde os resultados comparativos precisos são desejados, esses fatores devem ser cuidadosamente controlados (ASTM, 2010).

### 3.6 ENSAIO DE IMPACTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

No ensaio de impacto a carga é aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), sendo o impacto obtido por meio da queda de um martelo ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a examinar. O resultado é obtido com base na energia que o corpo de prova absorve para se deformar e romper (FREEMAN *et al.*; 2005; GARCIA *et al.*; 2000 *apud* COSTA, 2016). O aparelho dispõe de uma escala em joules para registro de energia requerida para fratura do corpo de prova.

O teste consiste em posicionar um corpo de prova em uma máquina que possui um pêndulo com uma espécie de “martelo” em sua extremidade externa, enquanto na extremidade interna é fixo em um eixo. Este pêndulo é solto de uma altura determinada, gira em torno do eixo da máquina e atinge o corpo de prova que está preso em uma pequena morsa (garras). No caso de equipamentos analógicos, existem dois ponteiros: O primeiro acompanha o movimento do pêndulo enquanto o segundo ponteiro é empurrado pelo primeiro. Quando o corpo de prova é atingido, o segundo ponteiro aponta para um valor que deverá ser usado para calcular o resultado final do teste.

Os ensaios de impacto Charpy sem entalhe são realizados conforme os procedimentos da norma e com as dimensões de acordo com o demonstrado esquematicamente nas comparações da norma. O seu cálculo é determinado por:

$$a_{cU} = \frac{W}{h \times b} \times 10^3 \quad (7)$$

Onde:

**W** = energia absorvida ao quebrar os corpos de prova em J.

**h** = espessura do corpo de prova, mm.

**b** = largura do corpo de prova, mm.

### 3.7 MECANISMO DE FALHA E ASPECTO FRACTOGRÁFICO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

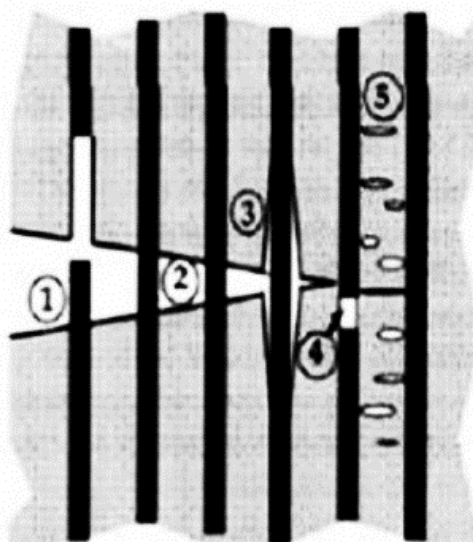
A caracterização das propriedades dos materiais compósitos não é uma tarefa simples. A primeira questão que surge é como aplicar os métodos padrões, desenvolvidos para materiais homogêneos, aos materiais compósitos. Este é especialmente o caso das propriedades locais, como os parâmetros de resistência ao impacto e tenacidade à fratura (SILVA, 2003).

Os mecanismos de falha que podem ocorrer durante a fratura de um compósito fibrado são: a ruptura das fibras, a deformação e o trincamento da matriz, o descolamento das fibras, o deslizamento interfacial seguido da ruptura das fibras (*pull out*) e ainda o efeito denominado de pontes de fibras (*fiber bridging*), onde as superfícies de uma trinca são interligadas por fibras. Vários destes mecanismos

podem atuar simultaneamente durante o processo de fratura de um compósito. (RODRIGUES, 2008).

A figura 11 mostra os vários mecanismos de falha que podem ocorrer em compósitos reforçados por fibras. A fratura raramente ocorre de modo catastrófico, mas tende a ser progressiva, com falhas subcríticas dispersas através do material, o que constitui uma vantagem.

**Figura 11:** Mecanismos de falhas em materiais compósitos. 1) Arrancamento de fibras; 2) Ponte de fibras; 3) Descolamento fibra/matriz; 4) Ruptura das fibras.



Fonte: ANDERSON, (1995)

A fractografia é a chave para se determinar a sequência dos eventos ocorridos durante o processo de fratura e identificar o estado de tensões atuantes no momento da falha. Outros fatores como condições ambientais e defeitos do material podem contribuir para o início e crescimento da fratura e também podem ser avaliados por esta técnica. O método de observação utilizado na investigação fractográfica, visual, por microscopia estereoscópica, óptica ou eletrônica, deve atentar não só para a identificação e documentação da morfologia da falha, mas também para informações que ajudem a determinar as causas da falha. Assim três operações básicas devem ser seguidas: (1) classificação do tipo de falha, (2) mapeamento da trinca e (3) análise química da superfície de fratura (FRANCO, 2003).

A primeira classificação, envolvendo o tipo de falha, conduz a duas definições: falhas interlaminares e translaminares. Esta classificação ajuda muito, pois orienta na utilização de diferentes métodos para melhor estudar cada um dos diferentes tipos de fratura. Fraturas interlaminares ou delaminações são melhor analisadas pela direção

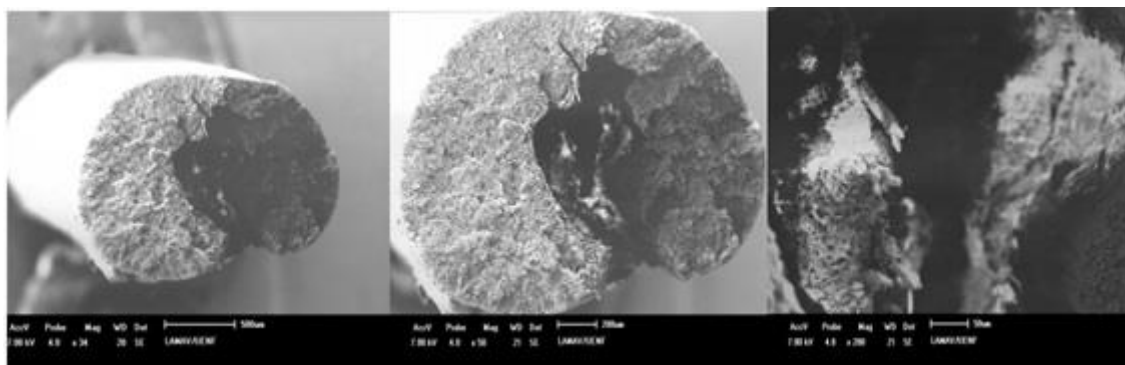
de propagação da trinca utilizando-se microscopia óptica estereoscópica, enquanto que as fraturas translaminares, onde ocorre o rompimento das fibras, são melhores analisadas por microscopia eletrônica de varredura (FRANCO, 2003).

Com uma peça fraturada em serviço, a responsabilidade inicial do investigador é documentar a fratura, tanto com fotos dos aspectos gerais quanto aos detalhes. Neste estágio, informações críticas importantes podem ser asseguradas localizando-se todos os tipos de fratura ocorridos, dando ao investigador um sentimento de quais foram as cargas primárias no evento, qual a sequência de acontecimentos, e que fatos poderiam ter influenciado o início ou durante a falha. Após a definição do tipo de falha ocorrida, vem a etapa mais trabalhosa do processo, que é o exame detalhado da fratura por meio de análises macro e microscópicas. Essas análises requerem que o investigador use técnicas fractográficas específicas para determinar a direção da fratura, o modo como ocorreu e as condições ambientais em que a fratura se processou. Para fraturas translaminares, a ênfase é dada na fratura das fibras, enquanto que na fratura interlaminar a resina recebe mais atenção (FRANCO, 2003).

### 3.8 MECANISMO DE FALHA E ASPECTO FRACTOGRÁFICO DE FIBRAS NATURAIS

NASCIMENTO, (2009) pesquisou sobre as propriedades de compósitos de fibras de piaçava e em matriz de resina epóxi. Realizando ensaio de tração na fibra de piaçava e posteriormente foi feita a análise fractográfica com o uso do MEV. Os valores de tensão média encontrados para as fibras de piaçava foram de 1737 MPa, 514,8 MPa, 176 MPa, 176,8 MPa, 111,9 MPa, 81, 59 MPa, 47, 66 MPa, 62,86 MPa, 39,1 MPa para os intervalos de diâmetro de 0,2-0,45, 0,45-0,70, 0,70-0,95, 0,95-1,20, 1,20-1,45, 1,45-1,70, 1,7-1,95, 1,95-2,20, 2,2-2,45. Utilizou-se a variação com o diâmetro para investigação da sua influência sobre as propriedades das fibras de piaçava através do sentido físico.

**Figura 12:** Fractografia por MEV da piaçava: (a) X 35, (b) X 50 e (c) X 200. Fractografia por MEV das pontas rompidas de fibras de piaçava: (a) mais grossa,  $d= 2,00\text{mm} - 2,45\text{mm}$ .



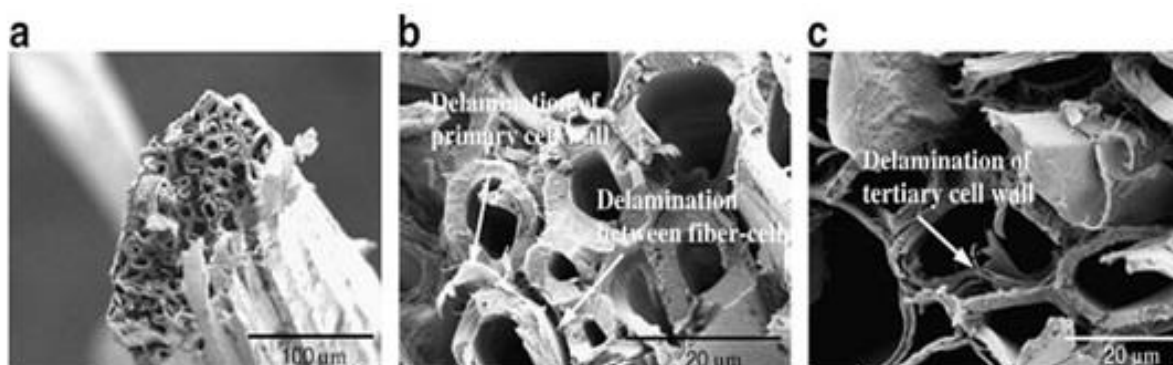
**Fonte:** NASCIMENTO, (2009).

Na figura 11 são apresentadas as fractografias referentes à análise da fibra após os ensaios de tração. Estas observações por MEV das pontas rompidas em tração das fibras de piaçava mostram a fratura de fibras de piaçava com maiores diâmetros. A fibra com maior diâmetro tem fratura menos uniforme associada a partes distintas e envolvendo maior número de filamentos. Sob o ponto de vista estatístico, se a fibra deve romper todos os filamentos para sua total fratura, aquela que possuir maior número, por ser mais grossa, terá maior chance de iniciar a ruptura de um dos seus filamentos à tensão menor do que a fibra mais fina com poucos filamentos na sua área da seção reta. Ou seja, com menor número de filamentos há mais chances de a fibra mais fina resistir até tensões comparativamente mais altas.

SILVA *et al.*, 2008, efetuou a caracterização de fibras de sisal através de ensaio de tração, considerando que essas fibras apresentam alta performance. Para melhor caracterização das fibras elas foram ensaiadas em tração usando os comprimentos de 10, 20, 30 e 40 mm. A caracterização microestrutural foi feita por microscopia eletrônica de varredura. Com o uso do MEV também foi feita a investigação do mecanismo e modo de fratura da fibra. As fibras imediatamente após o ensaio de tração foram seccionadas para obtenção de imagem do MEV para medição da seção transversal para os cálculos de tensão das fibras. Os resultados das tensões foram  $391 \pm 89 \text{ MPa}$ ,  $392 \pm 105 \text{ MPa}$ ,  $385 \pm 99 \text{ MPa}$  e  $400 \pm 126 \text{ MPa}$  para os comprimentos úteis de 10 mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm, respectivamente, que foram comparados com valores da literatura e que revelaram serem superiores.

Observações sobre o modo de fratura revelaram que as fibras falham sob três tipos de diferentes de processo. O primeiro processo é a fratura que ocorre na célula da fibra, segundo tipo evidencia uma fratura ocorrendo por delaminação no interior da célula da fibra e o terceiro é caracterizado por uma delaminação entre as células da fibra. Na figura 12 mostram-se os três tipos de processo de falha que pode ocorrer na fibra de sisal.

**Figura 13:** Ilustração através de imagem de MEV dos três tipos de processo de fratura que pode ocorrer na fibra de sisal, **(a)** fratura que ocorre na célula da fibra, **(b)** tipo evidencia uma fratura ocorrendo por delaminação no interior da célula da fibra entre as células da fibra e o **(c)** é caracterizado por uma delaminação entre as células da fibra.



**Fonte:** SILVA *et al.* (2008)

## 4. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 4.1. MATERIAIS

#### 4.1.1. Resina Poliéster

O polímero utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi a resina poliéster isoftálica insaturada, com catalisador Metil-Etil-Cetona (MEK – D45). Fabricados e comercializados pela empresa CENTERGLASS Resinas e Fibras de Vidro LTDA. O catalisador MEK-D45 foi utilizado na proporção 0,33 % (v/v), segundo a realização do trabalho por COSTA (2016), o mesmo conferiu um tempo eficiente para uma boa trabalhabilidade e conseqüentemente apresentou também boas propriedades aos compósitos fabricados.

**Figura 14:** Catalisador MEK - D45 e Resina Poliéster Isoftálica.



**Fonte:** Autor, (2018)

#### 4.1.2 Fibras vegetais de Pente de Macaco, Mutamba e Pindaíba.

As fibras foram extraídas na região de Marabá e adjacências. A casca do caule do Pente de Macaco foi extraída de uma região próxima às margens do rio Itacaiunas na cidade de Marabá. Já a Mutamba e a Pindaíba a extração da casca do caule dessas árvores foi realizada as margens da rodovia Transamazônica, sendo a pindaíba proveniente da Vila Monte Castelo, Km 54, e a Mutamba provenientes do km 64 desta mesma rodovia. As aplicações e resistência aparente das fibras foram fatores determinantes na escolha destas para o desenvolvimento do presente trabalho, que

faz com que a população da zona rural utilize em grande parte essas fibras, principalmente como cordas para amarrações de “casas de Taipa”. A figura 15 mostra as fibras estudadas.

**Figura 15:** Fibras de: a) Pente de Macaco; b) Mutamba e c) Pindaíba

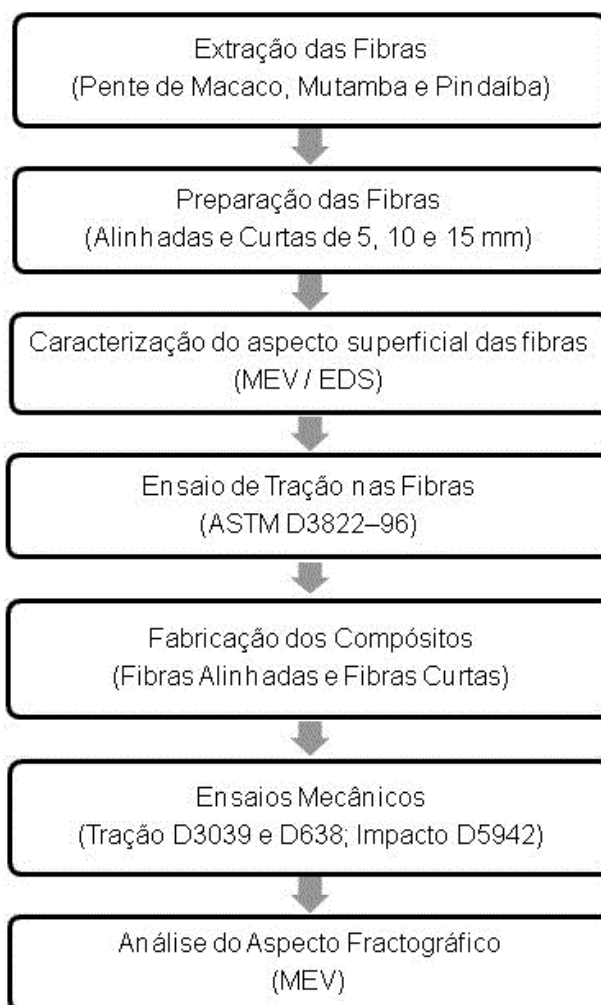


**Fonte:** Autor, (2018)

## 4.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O fluxograma da Figura 16 descreve de forma sucinta as etapas da metodologia experimental utilizada para obtenção corpos de prova dos compósitos estudados e caracterização dos mesmos.



**Figura 16: FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Fonte: Autor, (2018)

#### 4.2.1 Extração de Fibras Vegetais de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.

Obtidas as cascas das árvores, as mesmas foram mantidas submersas em água, sendo que o Pente de Macaco e a Mutamba ficaram submersas em água por 12 dias, já a Pindaíba ficou submersa apenas por 5 dias. Esse procedimento de imersão em água foi necessário para melhorar manuseio na extração das fibras. Passados os dias as cascas já estavam prontas para então serem extraídas as fibras que subsequentemente passaram por um processo de normalização como mostra a Figura 17. As fibras foram extraídas manualmente, foi aplicada neste trabalho a metodologia de fabricação de compósitos conhecida como *Hand Lay-Up*.

**Figura 17:** Fibras de Pente de Macaco, Mutamba e Pindaíba Submersas em água.



Fonte: SANTOS, (2018)

#### 4.2.2 Preparação das Fibras Longas e Alinhadas

Após a extração das fibras, foi necessária a realização de um processo de normalização das fibras, ou seja, preparação das fibras para uso adequado na confecção dos compósitos. Tal normalização foi feita manualmente e trata da relação entre tamanho e espessura da fibra, sendo o tamanho adequado para o uso no Tear (Instrumento utilizado para fabricação de pré-pregs de fibra) é de 35 cm de comprimento e uma espessura média de 5mm, tais dimensões são utilizadas também para utilização da fibra picotada. As fibras de mutamba após a normalização são mostradas na Figura 18.

**Figura 18:** Fibras de Mutamba após a Normalização



Fonte: Autor, (2018)

É importante enfatizar que a pindaíba, por apresentar um caráter mais áspera foi necessário realizar uma raspagem (Figura 19). Outro ponto observado é que a normalização dessa fibra obteve melhores resultados com as fibras umedecidas, também foi necessário que as mesmas passassem por um processo de secagem.

**Figura 19:** Fibra de Pindaíba sendo normalizada pelo processo de raspagem.



**Fonte:** Autor, (2018)

Depois de normalizadas e secas as fibras estão prontas para serem empregadas no tear para confecção das pré-pregs. Este processo foi totalmente manual. O tear é comumente conhecido como artefato ou máquina destinada ao fabrico de tecidos, malhas, tapetes, etc. No presente trabalho o tear foi utilizado para a fabricação dos pré-pregs de fibras, ou seja, a utilização do mesmo teve como objetivo o alinhamento das fibras normalizadas, justificando seu uso neste trabalho para um posterior emprego dessas pré-pregs na fabricação dos corpos de prova segundo a norma D3039. Foram fabricados na universidade alguns teares para melhor rendimento do trabalho (Figura 20). E a partir da utilização desses teares fabricaram-se as pré-pregs das fibras naturais.

Neste dispositivo as fibras são alinhadas com auxílio de outra fibra conhecida como Sisal e colocadas uma ao lado da outra, sendo que a fibra e a linha de amarração (Sisal) formam um ângulo reto. É importante ressaltar que a linha de amarração necessita ser colocada de forma correta no tear, sendo que o espaçamento entre elas foi de 4 cm, uma linha será fixa e a outra será móvel. Ao final da montagem do tear; observa-se que a primeira e última linha amarradas são fixas. A Figura 20 mostra o processo de montagem do tear bem como a linha de amarração.

**Figura 20:** (a), (b), (c), (d) e (e). Imagens do emprego do Tear.



**Fonte:** Autor, (2018)

Esclarecidos do procedimento a ser adotado e após a montagem correta do tear, foram então fabricadas as pré-pregs de Pente de Macaco, Mutamba e Pindaíba, a Figura 21 mostra as pré-pregs de Pente de Macaco, Mutamba e Pindaíba prontas após sua fabricação no tear.

**Figura 21:** Pré- pregs de: (a) Pente de Macaco, (b) Mutamba e (c) Pindaíba confeccionadas no Tear



**Fonte:** Autor, (2018)

#### 4.2.3 Preparação das Fibras Curtas

Nesse processo de preparação, as fibras já se encontram normalizadas, para então serem “picotadas”, cortadas com auxílio de tesoura em tamanhos pré-

determinados, que no caso deste trabalhos os tamanhos estabelecidos foram de 5, 10 e 15 mm. As fibras foram cortadas com o auxílio de um papel milimetrado que é posicionado ao longo do comprimento da fibra, sendo o mesmo cortado junto com a fibra para depois ser realizado um processo de separação entre o papel e a fibra, como pode ser observado na Figura 22 (a), as fibras picotadas são então separadas e acondicionadas em recipientes plásticos, como ilustrado na Figura 22 (b), para posteriormente serem utilizadas na confecção dos corpos de provas segundo as normas ASTM D638M para o ensaio de tração e a norma ASTM D5942 para o ensaio de impacto Charpy.

**Figura 22:** (a) Fibra de Mutamba sendo picotada no tamanho de 5 mm, (b) Fibra de Pente de Macaco picotada, no tamanho de 10 mm.



Fonte: Autor, (2018)

#### 4.2.4 Caracterização Superficial das Fibras

A caracterização microestrutural das fibras foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde foi verificado seu aspecto superficial e a seção transversal. As imagens obtidas foram capturadas por elétrons retroespalhados de um filamento de tungstênio de 15 kV. As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização Microestrutural do Instituto de Geociências e Engenharia da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará no equipamento de bancada da marca HITACHI (modelo TM 3000). A Figura 23 mostra o conjunto de bancada MEV / EDS, utilizado na caracterização superficial das fibras.

**Figura 23:** Conjunto de bancada MEV / EDS



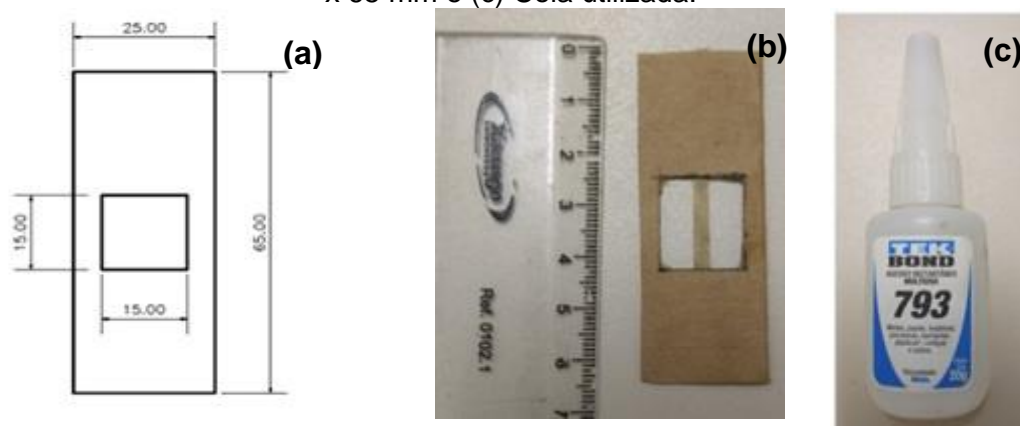
**Fonte:** Autor, (2018)

#### **4.2.5 Ensaio de Tração nas Fibras**

Os ensaios de resistência à tração das fibras foram realizados em máquina universal marca EMIC modelo DL 10000, com sistema de aquisição de dados e célula de carga 5 kN, a uma velocidade de 0,5 mm/min e comprimento útil para medição entre garras de 15 mm. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Destrutivos da Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.

Foram ensaiadas 25 (vinte e cinco) amostras de cada fibra de forma a dar confiabilidade nos resultados. As amostras das fibras foram preparadas com suportes de papel KRAFT chamados na literatura de TAB. Os TABs são usados para distribuir uniformemente a carga aplicada na fibra que está sendo ensaiada e também para proteger as fibras de danos por ocasião do posicionamento das garras na máquina de ensaios. Os TABs de papel KRAFT (gramatura de 200 g/m<sup>2</sup>) com as dimensões de 25 mm x 65 mm foram colados com cianoacrilato (TEK BOND 793) nas extremidades do comprimento útil das fibras, conforme recomendação da norma ASTM D3822–96.

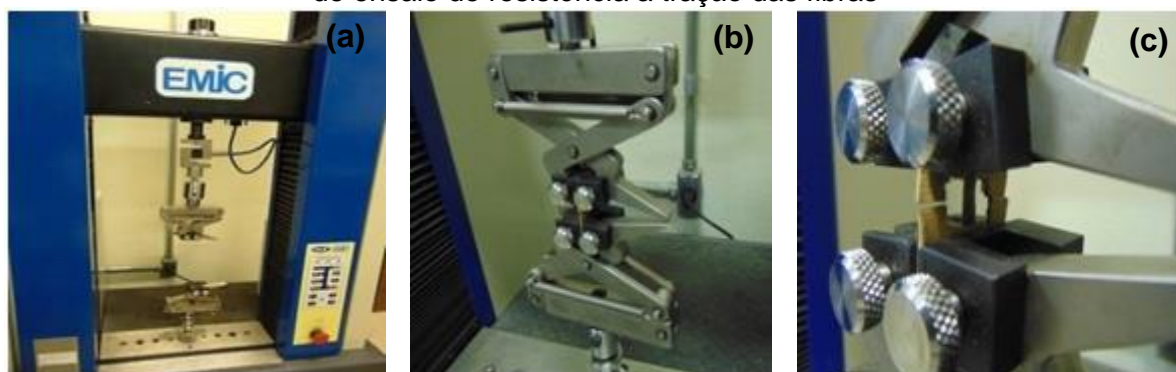
**Figura 24:** (a) e (b). Os TABs de papel KRAFT (200 g/m<sup>2</sup>) com as dimensões de 25 mm x 65 mm e (c) Cola utilizada.



**Fonte:** COSTA, (2012) e Autor, (2018)

A Figura 25 a), b) e c) ilustra a máquina universal de ensaios e o corpo de prova montado para realização do ensaio de resistência a tração das fibras.

**Figura 25:** (a), (b) e (c). Máquina universal de ensaios e corpo de prova para realização de ensaio de resistência a tração das fibras



**Fonte:** Autor, (2018)

#### 4.2.6: Fabricação dos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos confeccionados para este trabalho seguiram as normas ASTM D3039 para o ensaio de tração dos compósitos com as fibras alinhadas, ASTM D638 para o ensaio de tração dos compósitos com as fibras curtas e aleatórias e ASTM D5942 para o ensaio de impacto Charpy com fibras curtas e alinhadas. A seguir serão apresentados a metodologia de fabricação dos compósitos com fibras curtas e alinhadas, bem como também, a metodologia de confecção dos corpos de provas para os ensaios mecânicos realizados neste trabalho.

#### *4.2.6.1 Materiais Compósitos com Fibras Longas e Alinhadas*

Nesse item será apresentado o passo a passo da metodologia aplicada na confecção dos compósitos com fibras alinhadas utilizadas na confecção dos corpos de prova dos ensaios mecânicos. A metodologia adotada será apresentada por etapas:

ETAPA 1: Ajuste do tamanho e pesagem das pré-pregs.

Nessa etapa as pré-pregs são ajustadas ao tamanho dos laminados de madeira que auxiliaram na prensagem dos compósitos, para logo em seguida as mesmas passarem por uma pesagem, com o seu peso aferido a mesma vai para a secagem em uma estufa por um período de 10 minutos, isso para que haja a total retirada de umidade presente nas fibras. Em seguida faz-se novamente a pesagem, temos então assim o peso inicial e final da pré-preg das fibras. As figuras abaixo ilustram como são conduzidos os procedimentos de ajuste e pesagem das pré-pregs, que irão ser empregadas na confecção das placas de compósitos. Figura 26 a) Pré-preg de fibra de mutamba b) Marcação para o corte c) Corte da pré-preg d) Pré-preg ajustada ao tamanho do laminado de madeira e) Pesagem da pré-preg f) Secagem da pré-preg.



**Figura 26:** (a), (b), (c), (d), (e) e (f). Procedimento de ajuste e pesagem das pré-pregs de fibras.



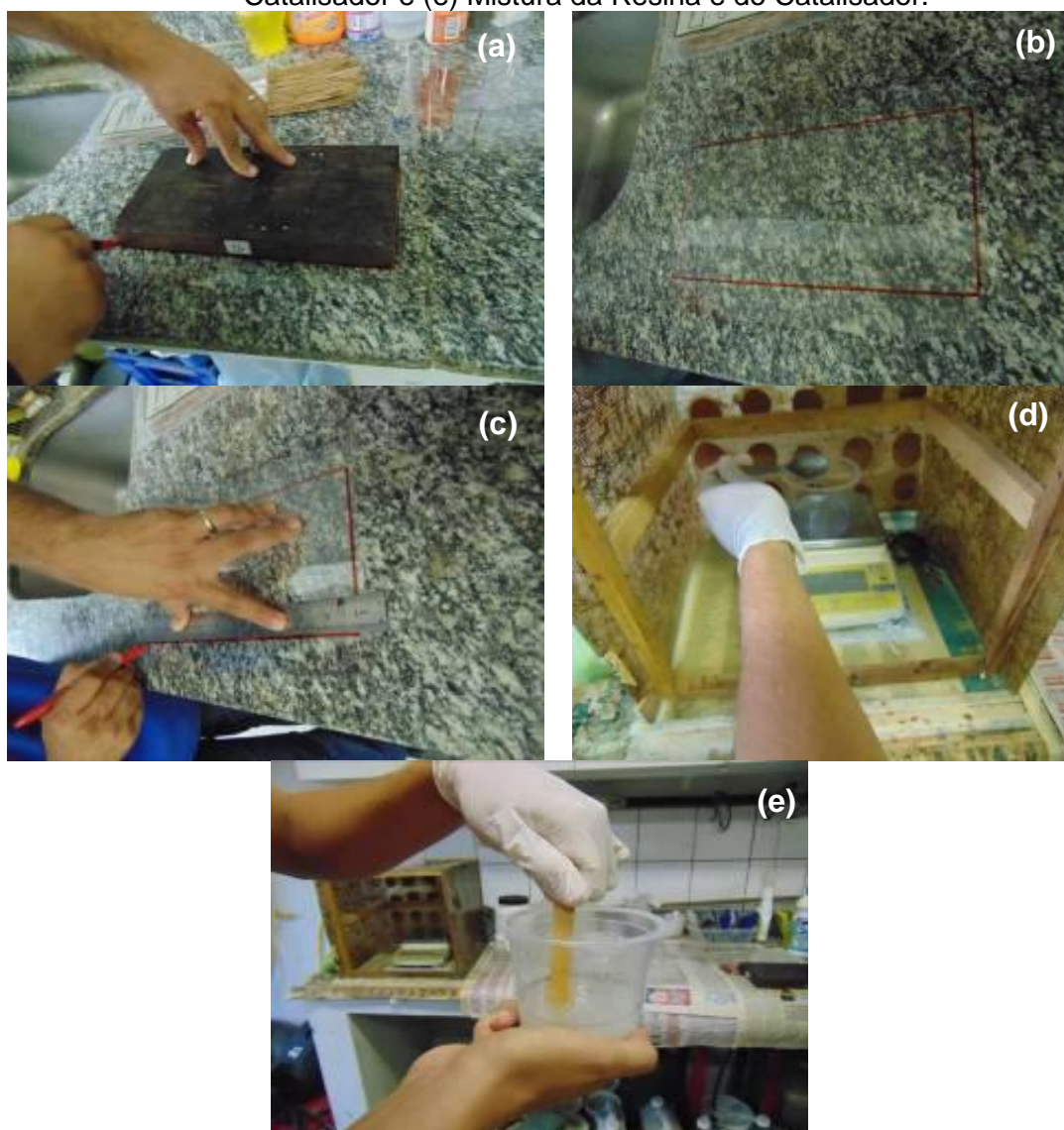
**Fonte:** Autor, (2018)

## ETAPA 2: Preparação para confecção das Placas de Compósitos

Nessa etapa de preparação, as pré-pregs já se encontram pesadas, secas e ajustadas, sendo o próximo passo a preparação de uma lâmina de transparência que receberá a resina e auxiliará no desmolde da placa de compósito, nesta etapa também são pesados a resina e o catalisador que serão utilizados na confecção das placas. A quantidade de resina utilizada nas pré-pregs para a preparação das placas é de exatamente 123 gramas e quantidade exata de catalisador é 0,90 gramas. Uma

mistura entre catalisador e resina foi feita, sendo este um processo preciso e rápido. Sendo realizado tal processo de mistura entre catalisador e resina, a mesma encontra-se pronta para ser utilizada na fabricação das placas. A Figura 27 ilustra cada fase da etapa de preparação para confecção das placas.

**Figura 27:** (a) Marcação da região útil da transparência; (b) e (c) Delimitação da Região útil da transparência para confecção das placas; (d) Pesagem da Resina e do Catalisador e (e) Mistura da Resina e do Catalisador.

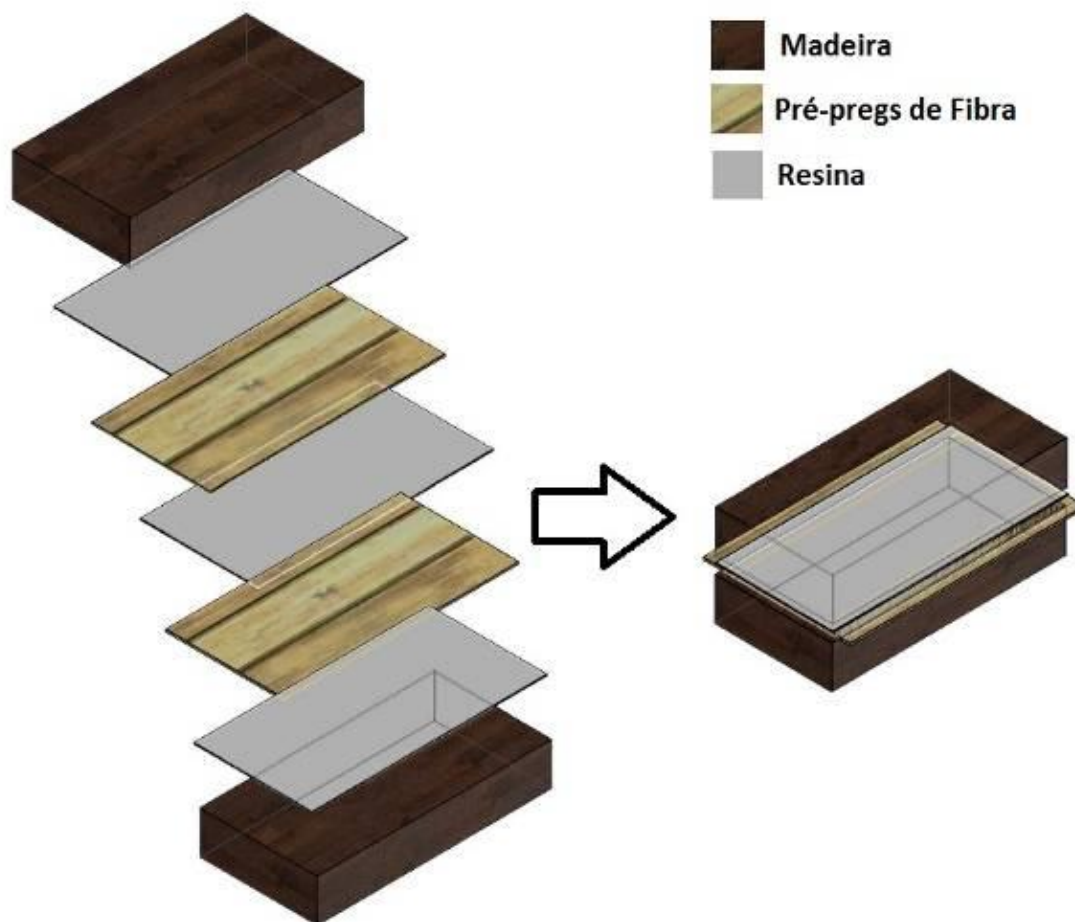


Fonte: Autor, (2018)

### ETAPA 3: Fabricação das Placas de Compósitos a partir de pré-pregs de fibras.

Nesta etapa são montadas as placas de compósitos com as pré-pregs de fibras. O esquema mostrado na Figura 28 explica a montagem de fabricação das placas de compósitos a partir das pré-pregs das fibras.

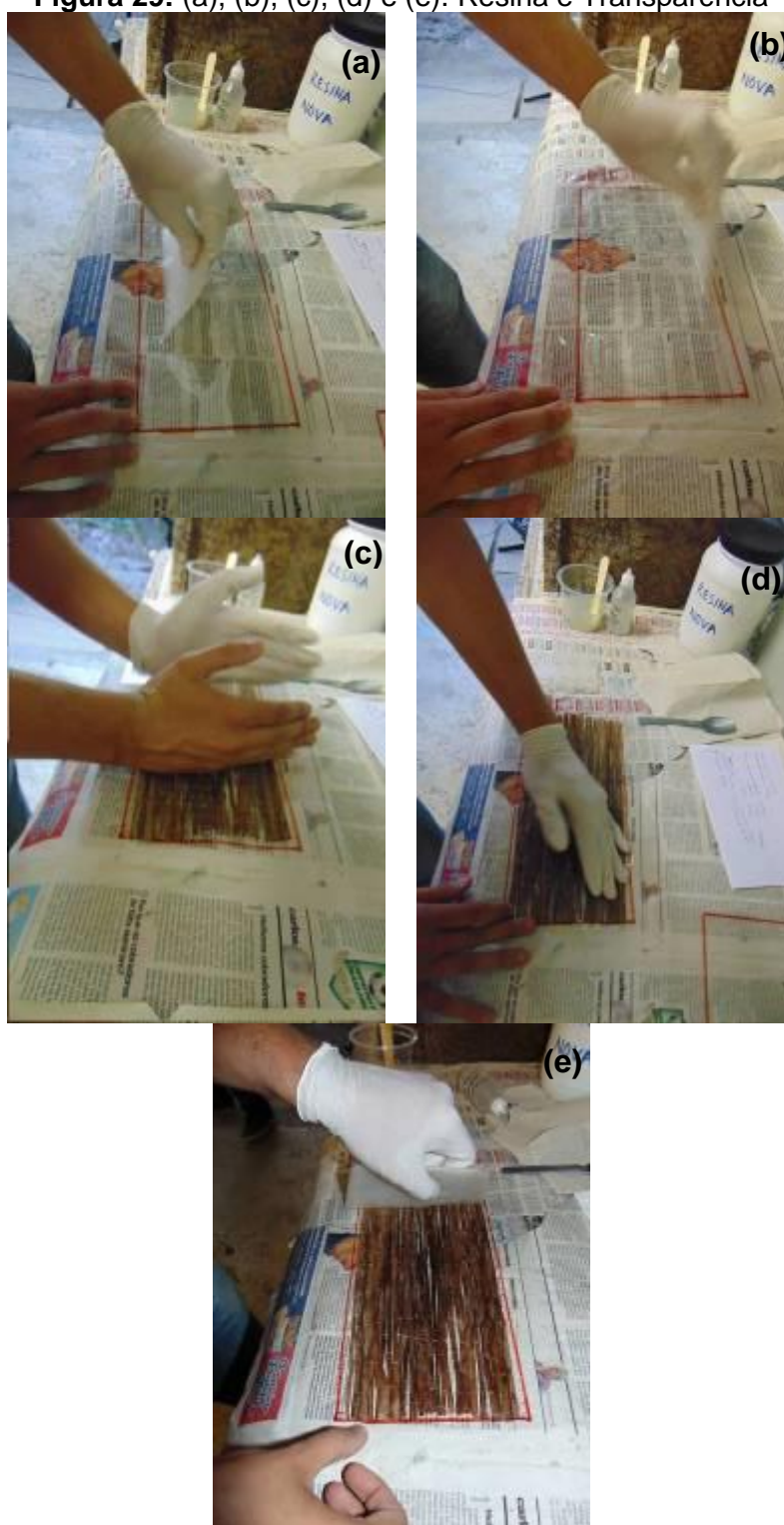
**Figura 28:** Esquema de montagem das placas com mantas de fibras naturais



**Fonte:** Autor, (2018)

A montagem começou com a pesagem e aplicação da primeira camada de resina na superfície da transparência, a resina está espalhada por toda superfície demarcada da transparência, para em seguida ser colocada a primeira pré-preg de fibra que é molhada pela resina a partir de uma pequena pressão exercida com auxílio de uma espátula, conforme mostrado na Figura 29 a), b), c), d) e e).

**Figura 29:** (a), (b), (c), (d) e (e). Resina e Transparência



**Fonte:** Autor, (2018)

O próximo passo é a aplicação da segunda camada de resina e colocação da segunda pré-preg de fibra, seguindo o mesmo procedimento anteriormente apresentado, conforme pode ser visualizado nas Figuras 30 a), b), c) e d).

**Figura 30:** (a), (b), (c) e (d). Molhamento das mantas pela mistura de resina e catalisador



**Fonte:** Autor, (2018)

A seguir a última camada de resina é espalhada na área demarcada da segunda transparência para então ser inserida no dispositivo de montagem do compósito que será fechado com uma placa de madeira maciça para que então possa ser aplicada a pressão no compósito que é de 0,5 MPa. A Figura 31 a), b), c), d), e), f) e g) apresenta o procedimento de fabricação das pré-pregs de fibras.

**Figura 31:** (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g). Procedimento de fabricação das pré-pregs de fibras



**Fonte:** Autor, (2018)

Após 1 (uma) hora de aplicação da pressão a placa de compósito é retirada da prensa para então passar por uma cura a temperatura ambiente por um período de 7(sete) dias, As Figuras 32 apresenta as placas de compósitos de Pindaíba, Pente de macaco e Mutamba.

**Figura 32:** Placas prontas após 7 dias de cura



**Fonte:** Autor, (2018)

ETAPA 4: Usinagem das placas de compósitos e Confecção dos corpos de prova segundo as normas ASTM D3039 e D5942.

Nesta etapa ocorre a usinagem das placas de compósito depois das mesmas passarem pelo processo de cura de 7 (sete) dias, as placas são cortadas nas dimensões estabelecidas pelas normas ASTM D3039 para tração e ASTM D5942 para impacto, foram confeccionados 7 (sete) corpos de provas segundo a norma ASTM D3039 e 12 (doze) corpos de prova segundo a norma ASTM D5942. A Figura 33 a), b), c) e d) mostra a usinagem e os corpos de prova de tração e impacto confeccionados.

**Figura 33:** (a), (b), (c) e (d). Usinagem e os corpos de prova de tração e impacto confeccionados.



Fonte: Autor, (2018)

#### 4.2.6.2 Materiais Compósitos com Fibras Curtas

Nessa metodologia de fabricação, é necessário que as fibras já tenham passados pelo processo de normalização/preparação. Os tamanhos adotados para as fibras neste trabalho foram de 5 mm, 10 mm e 15 mm, para o processo de fabricação dos corpos de prova de tração e impacto, logo as mesmas precisaram ser cortadas nestes tamanhos para confecção dos mesmos. Estes corpos de prova são fabricados em molde de silicone.

##### ETAPA 1: Preparação e pesagem das fibras curtas.

A primeira etapa da metodologia de preparação dos compósitos com fibras curtas, que visa atender as normas ASTM D638 e ASTM D5942, onde se inicia com a normalização e corte das fibras nos tamanhos estabelecidos para realização deste trabalho, após os cortes as fibras são separadas para realização do “teste de volume” que consiste em determinar a quantidade exata de fibra a se usar na fabricação de tais corpos de prova. A fibra é medida no próprio molde, onde pega-se uma quantidade



de fibra e com esta preenche-se o molde até se atingido a quantidade necessária de fibra para a fabricação do corpo de prova, sempre tendo atenção para que haja o preenchimento total do molde para não haver a falhas na hora da fabricação.

Logo após o “teste de volume” as fibras são pesadas e secas em uma estufa e novamente pesada para de obter o peso seco das mesmas, para em seguida serem utilizadas na confecção dos corpos de provas em molde de silicone. As Figuras 34 a), b), c), d), e), f), g) e h) mostram o passo a passo adotado na preparação das fibras para produção dos corpos de prova.

**Figura 34:** (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) e (h). Passo a Passo para preparação das fibras para a produção dos corpos de prova



**Fonte:** Autor, (2018)

ETAPA 2: Preparação e confecção dos corpos de prova segundo as normas ASTM D638 e ASTM D5942.

Esta etapa inicia com a pesagem e mistura da resina com catalisador, em seguida é realizada a adição da fibra já seca pela estufa, então é feita uma homogeneização manual entre resina, catalisador e fibra conforme mostrado na Figura 35 a), b), c), d), e) e f).

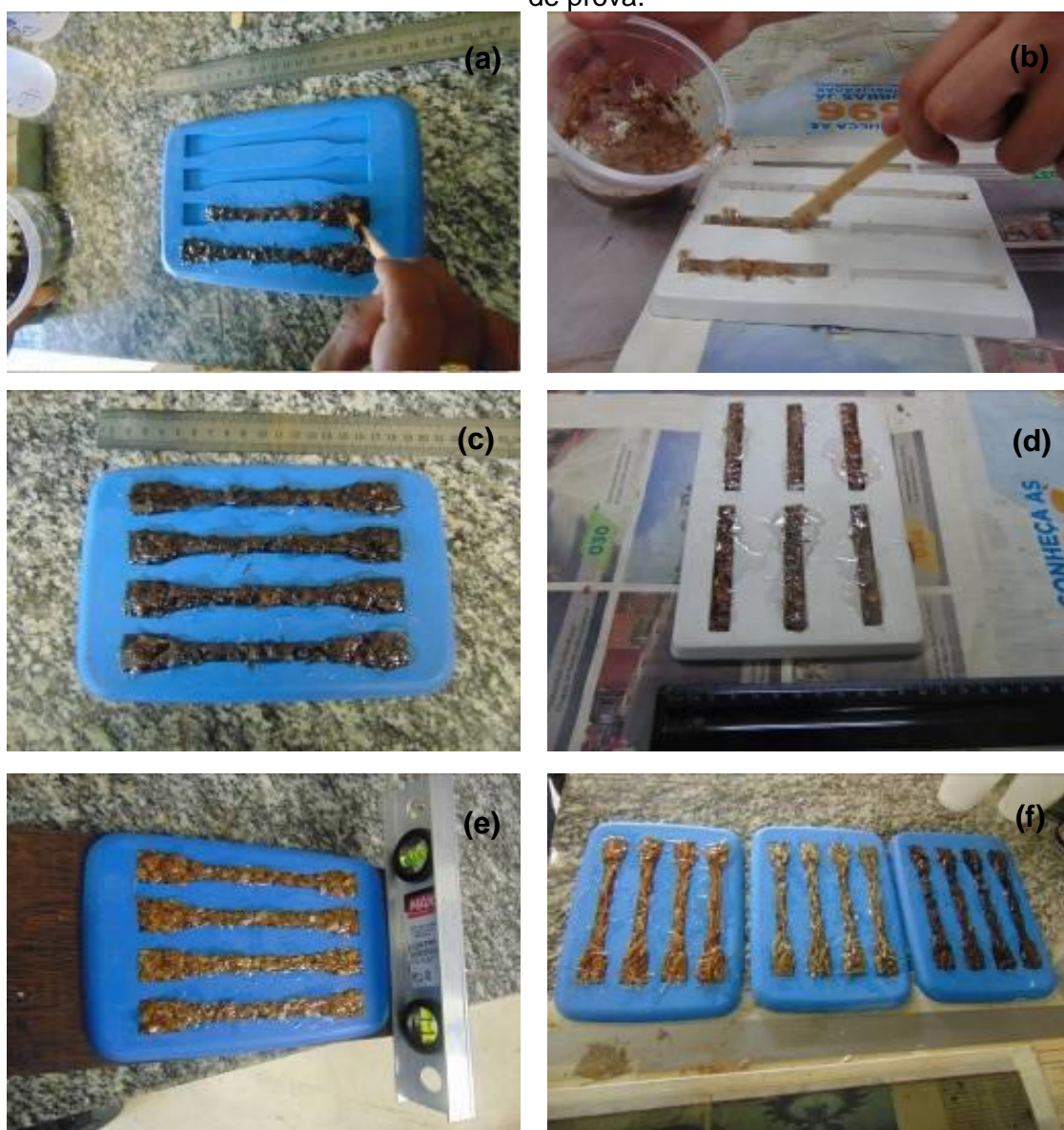
**Figura 35:** (a), (b), (c), (d), (e) e (f). Preparação e confecção dos corpos de prova segundo as normas ASTM D638 e ASTM D5942.



Fonte: Autor, (2018)

Com a mistura pronta é realizado o preenchimento da mistura nos moldes de silicone, sempre tomando cuidado para que a mistura ocupe todo o volume do molde. É aplicada uma leve agitação na mistura para que não haja formação de bolhas internas. A Figura 36 a), b), c), d), e) e f) apresentam a forma do preenchimento dos moldes, bem como os moldes preenchidos e dispostos em superfícies niveladas para evitar deformações nos corpos de prova.

**Figura 36:** (a), (b), (c), (d), (e) e (f). Preenchimento dos moldes, bem como os moldes preenchidos e dispostos em superfícies niveladas para evitar deformações nos corpos de prova.



Fonte: Autor, (2018)

ETAPA 3: Usinagem e preparação final dos corpos de prova segundo as normas ASTM D638 e ASTM D5942.

Esta etapa consiste em usinar e dar acabamento final nos corpos de prova após término do tempo de cura que é de 7 (sete) dias, nesta etapa os corpos de prova são lixados e medidos até que atinjam as dimensões exigidas pelas normas, a Figura 37 a), b), c) e d), ilustram os corpos de provas, as lixadeiras, os paquímetros utilizados no acabamento final dos corpos de prova.

**Figura 37:** (a), (b), (c) e (d). Corpos de provas, as lixadeiras, os paquímetros utilizados no acabamento final dos corpos de prova.



**Fonte:** Autor, (2018)

A Figura 38 a), b), c), d), e) e f) mostram o processo de usinagem ou lixamento dos corpos de prova, bem como os mesmos já com seu acabamento final e prontos para serem ensaiados.

**Figura 38:** (a), (b), (c), (d), (e) e (f) Processo de usinagem ou lixamento dos corpos de prova



**Fonte:** Autor, (2018)

#### **4.2.7 Ensaio de Tração dos Materiais Compósitos**

Os ensaios de tração dos compósitos foram realizados de acordo com as normas ASTM D 3039:2000 e D 638:2010. Os ensaios foram realizados na máquina de ensaio universal EMIC DL 10000, com célula de carga de 5 kN, que pertence ao Laboratório de Ensaio Destrutivos da Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, conforme mostrado na Figura 39.

**Figura 39:** Máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL - 10.000.

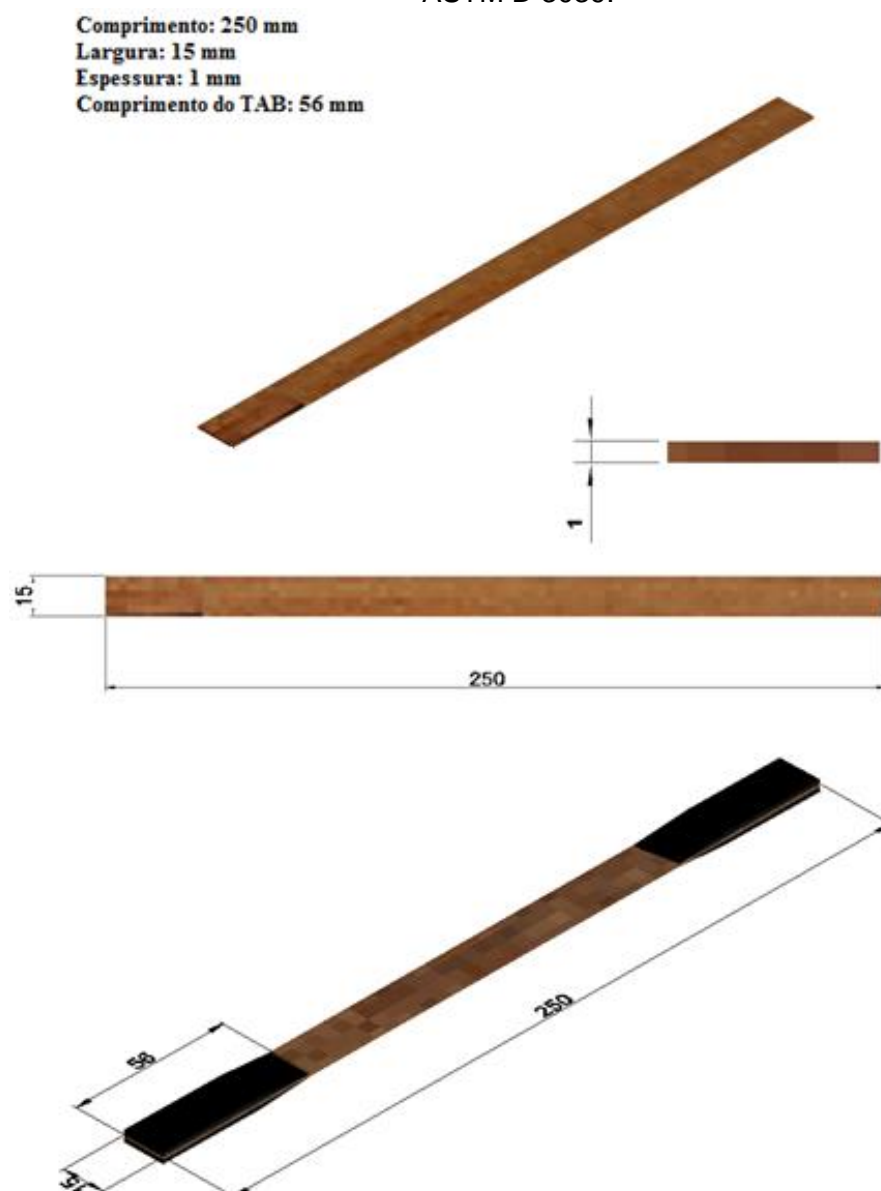


**Fonte:** Autor, (2018)

#### *4.2.7.1- Compósitos com Fibras Contínuas e Alinhadas*

O ensaio de tração com fibras contínuas e alinhadas seguiram a norma ASTM D 3039:2000, a uma velocidade de ensaio de 2 mm/min e os corpos de prova seguiram as dimensões como demonstrado esquematicamente na Figura 40.

**Figura 40:** Ilustração esquemática das dimensões do corpo de prova segundo a norma ASTM D 3039.

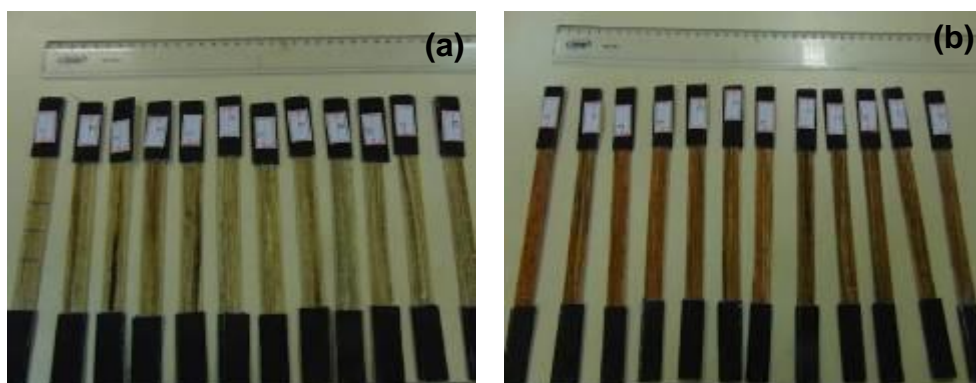


**Fonte:** Autor, (2018)

Para este ensaio foram confeccionados 12 corpos de prova de cada fibra estudada, conforme pode ser observado abaixo na Figura 41 a) Corpos de prova de Pente de Macaco e Figura 41 b) Corpos de prova de Mutamba, em seguida pode ser visualizada na Figura 42 a montagem para realização do ensaio na máquina universal de ensaios da marca EMIC DL 10000.



**Figura 41:** (a) Corpos de prova de Pente de Macaco e (b) Corpos de prova de Mutamba.



**Fonte:** Autor, (2018)

**Figura 42:** Montagem para realização do ensaio na máquina universal de ensaios da marca EMIC DL 10000.

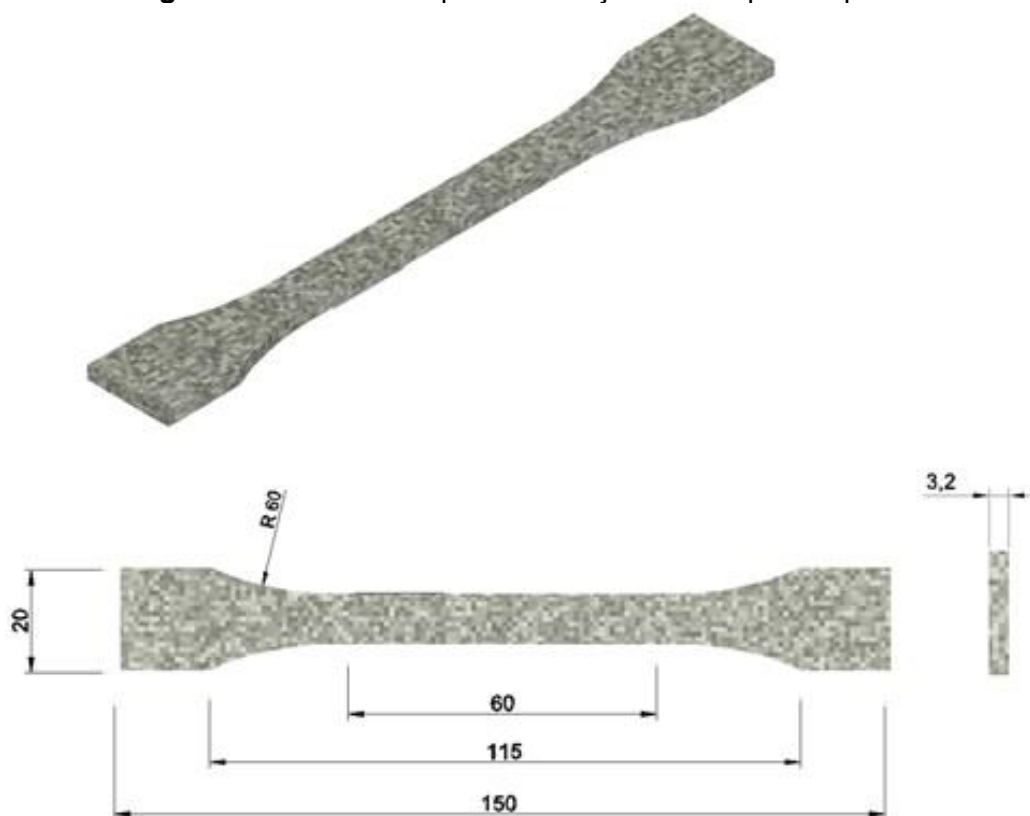


**Fonte:** Autor, (2018)

#### *4.2.7.2 Compósitos com Fibras Curta*

O ensaio de tração com fibras curtas foi realizado segundo a norma ASTM D638M e os tamanhos de fibras adotados para realização deste ensaio foram de 5, 10 e 15 mm, as medidas de para fabricação dos corpos de prova são demonstradas na Figura 43.

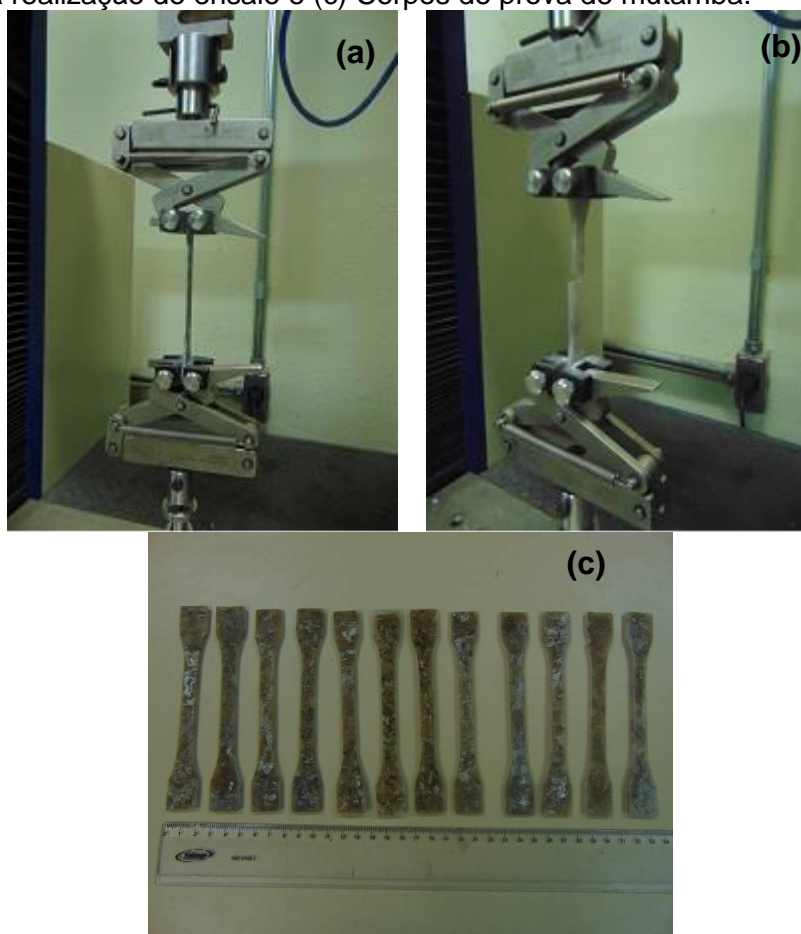
**Figura 43:** As medidas para fabricação dos corpos de prova



**Fonte:** Autor, (2018)

Os corpos de prova foram fabricados a partir de moldes de silicone em uma quantidade de 12 (doze) para cada tamanho de fibra adotado neste trabalho, os ensaios com matriz reforçada com fibras curtas de Pente de Macaco, Mutamba e Pindaíba. Os ensaios de tração dos compósitos foram realizados em máquina universal marca EMIC modelo DL – 10.000 com sistema de aquisição de dados através de software, com célula de carga de 5 kN, utilizando uma velocidade de 5 mm/min e comprimento útil para medição entre garras de 60 mm. A Figura 44 a), b) e c) mostra a montagem para realização do ensaio na máquina universal de ensaios e um corpo de prova de após a realização do ensaio, assim como, corpos de prova de pente de macaco segundo a norma ASTM D638.

**Figura 44:** (a), Realização do ensaio na máquina universal de ensaios, (b) Corpo de prova após a realização do ensaio e (c) Corpos de prova de mutamba.

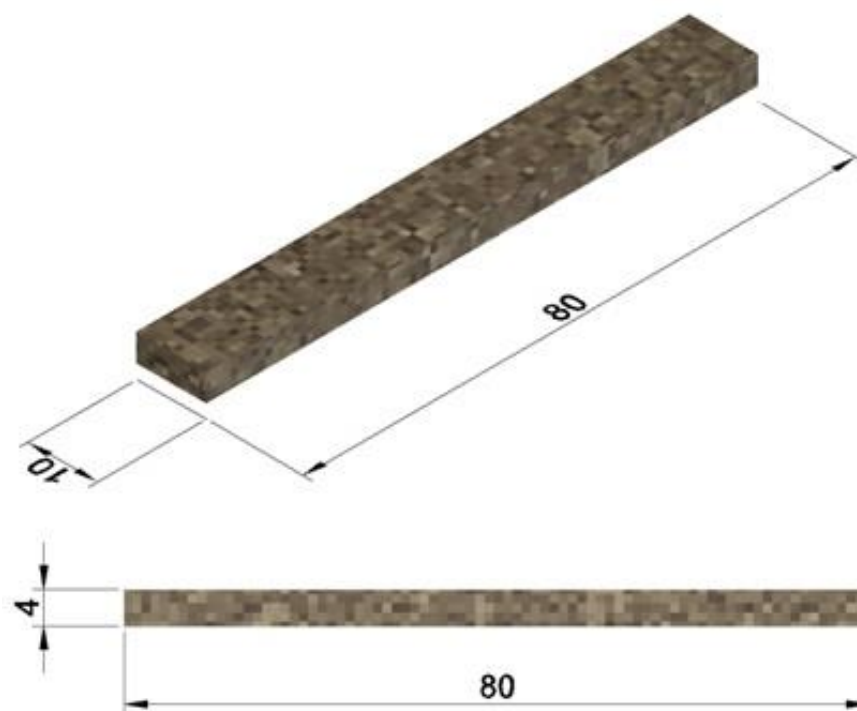


**Fonte:** Autor, (2018).

#### **4.2.8 Ensaio de Impacto dos Materiais Compósitos**

O ensaio de impacto Charpy foi realizado segundo a norma ASTM D5942, e os tamanhos de fibras adotados para realização deste ensaio foram de 5, 10 e 15 mm, com as dimensões dos corpos de prova mostradas esquematicamente na Figura 45.

**Figura 45:** Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto



**Fonte:** Autor, (2018)

Para este ensaio foram confeccionados 18 (dezoito) corpos de prova para cada fibra e tamanho estudado a partir de moldes de silicone, os ensaios com matriz reforçada com fibras curtas de 5, 10 e 15 mm de Pente de Macaco, Mutamba e Pindaíba. No ensaio de impacto a carga é aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), sendo o impacto obtido por meio da queda de um martelo ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a ensaiar. O resultado é obtido com base na energia que o corpo de prova absorve para se deformar ou romper. O aparelho dispõe de uma escala em joules para registro de energia requerida para deformação ou fratura do corpo de prova. A Figura 46 a) apresenta a máquina de ensaio de impacto Charpy, modelo JB – 300B com resolução de escala de 1 J do Laboratório de Ensaios Destrutivos da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. A Figura 46 b) mostra os 18 (dezoito) corpos de prova em conformidade com a norma ASTM D5942 de Pente de Macaco, Mutamba e Pindaíba e a Figura 46 c) ilustra a montagem do corpo de prova no dispositivo de ensaio.

**Figura 46:** (a) Máquina de ensaio de impacto Charpy, (b) Corpos de prova em conformidade com a norma ASTM D5942 e (c) Montagem do corpo de prova no dispositivo de ensaio.



Fonte: Autor, (2018)

#### 4.2.9 Análise do Aspecto Fractográfico

A análise do aspecto fractográfico foi realizada após os ensaios mecânicos. As superfícies fraturadas dos corpos de provas foram analisadas de maneira a se estudar os mecanismos de falha de cada composição de séries obtidas. A morfologia da superfície de fratura foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização Microestrutural do Instituto de Geociências e Engenharia da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará no equipamento de bancada da marca HITACHI (modelo TM 3000).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 AVALIAÇÃO DA EXTRAÇÃO E PREPARAÇÃO DAS FIBRAS

Com relação à extração das fibras foi possível levantar algumas diferenças entre as fibras estudadas, sendo possível apontar alguns pontos positivos e negativos em relação a extração das mesmas.

Quanto ao acesso às fibras utilizadas, uma vez que, observou-se que o pente de macaco é mais acessível que a pindaíba e a mutamba, pois pode ser encontrado em regiões próximas aos rios mesmo dentro de centros urbanos e é de fácil reconhecimento, tendo em vista seu vasto conhecimento populacional e sua grande aplicação em cordoaria. Já a pindaíba e a mutamba seu conhecimento populacional é mais restrito e o acesso à essas árvores se dá em regiões de matas densas e fechadas.

O pente de macaco e a mutamba apresentam uma fácil extração manual, já a pindaíba apresentou dificuldades na sua extração em relação as outras fibras, devido a mesma antes de ser extraída ter que passar por um processo de raspagem manual, para então poder ser melhor trabalhada.

O tempo de imersão em água para extração das fibras foi um fator preponderante na trabalhabilidade das mesmas no processo de extração e normalização, sendo observado que para o pente de macaco e a mutamba após 12 (doze) dias de imersão, as fibras começavam a se soltar facilmente da casca, não precisando de grandes esforços para sua extração. Já a pindaíba, que apresenta um caráter mais rígido em relação as outras fibras, ficou imersa em água apenas 5 (cinco) dias, pois a mesma não apresentou mudanças significativas com relação ao seu aspecto inicial. Sendo isso observado, partiu-se para uma raspagem manual para retirada de uma casca que recobria a fibra, afim de facilitar sua extração, ou seja, a pindaíba ficou imersa menos tempo que as outras fibras, mas sua extração apresentou uma dificuldade maior com relação ao pente de macaco e a mutamba.

Outro ponto observado na extração das fibras foi a presença de odores característicos de cada fibra. O pente de macaco e a mutamba apresentaram forte odor, já a pindaíba quase não apresentou odor característico; isto pode ser devido ao teor de lignina nas fibras: o pente de macaco e a mutamba apresentam grandes teores de lignina diferentemente da pindaíba que apresenta uma quantidade menor deste componente em sua estrutura.

Com relação à preparação, o pente de macaco foi a fibra que apresentou o melhor desempenho, ou seja, não se teve grandes dificuldades na sua normalização, uma vez que, tanto seca como úmida esta fibra se mostrou bastante fácil de se trabalhar. Foi possível normaliza-la em várias dimensões com grande facilidade, otimizando o seu emprego no tear.

Na preparação das fibras de mutamba quando comparada ao pente de macaco esta apresentou uma maior dificuldade para ser normalizada, uma vez que, depois de seca a fibra não apresenta uma boa trabalhabilidade, ou seja, para ser normalizada a fibra precisa ser umedecida e bem armazenada para evitar grandes distorções na mesma, para então ser manuseada de forma mais fácil.

A pindaíba, por mostrar um caráter mais rígido, também apresentou uma grande dificuldade de ser normalizada, sendo que sua normalização teve que se dar com a fibra ainda úmida e também foi necessário o uso de ferramentas para raspagem e corte da mesma. Para se obter as medidas estabelecidas para fabricação das pré-pregs, bem como os corpos de prova da norma ASTM D638 foi necessário um cuidado maior na sua normalização, pois diferentemente do pente de macaco que apresentou uma grande facilidade na sua normalização, a pindaíba precisou de acessórios para corte manual para sua adequação dimensional mínima estabelecida para seu uso na fabricação dos compósitos.

De um modo geral, a normalização das três fibras ocorreu de forma satisfatória, sendo o pente de macaco a que apresentou uma melhor trabalhabilidade; já a pindaíba foi o que apresentou uma maior dificuldade em sua extração e conseqüentemente na sua normalização, mas nada que comprometesse o seu uso na fabricação dos materiais compósitos. A Figura 47 mostra a fibra de melhor desempenho tanto na extração como na normalização: o pente de macaco após a normalização.

**Figura 47:** Fibra de Pente de Macaco após a normalização.

**Fonte:** Autor, (2018)

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS

As fibras de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba foram caracterizadas quanto à sua força máxima, deslocamento máximo, massa específica, umidade, aspecto superficial e a sua morfologia. Os resultados estão demonstrados na Tabela 3. As fibras foram caracterizadas e utilizadas na produção dos compósitos da forma como foram recebidas, sem tratamento superficial.

**Tabela 3:** Caracterização das Fibras de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.

Fibra	Força Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)
<b>Mutamba</b>	149,17 ± 32,24	0,085 ± 0,008	0,88 ± 0,08	10,23%±1,62
<b>Pente de Macaco</b>	66,87 ± 18,53	0,057 ± 0,014	0,54 ± 0,02	10,91% ± 1,25
<b>Pindaíba</b>	175,34 ± 46,37	0,064 ± 0,021	1,19 ± 0,13	9,77%±0,70

**Fonte:** Autor, (2018)

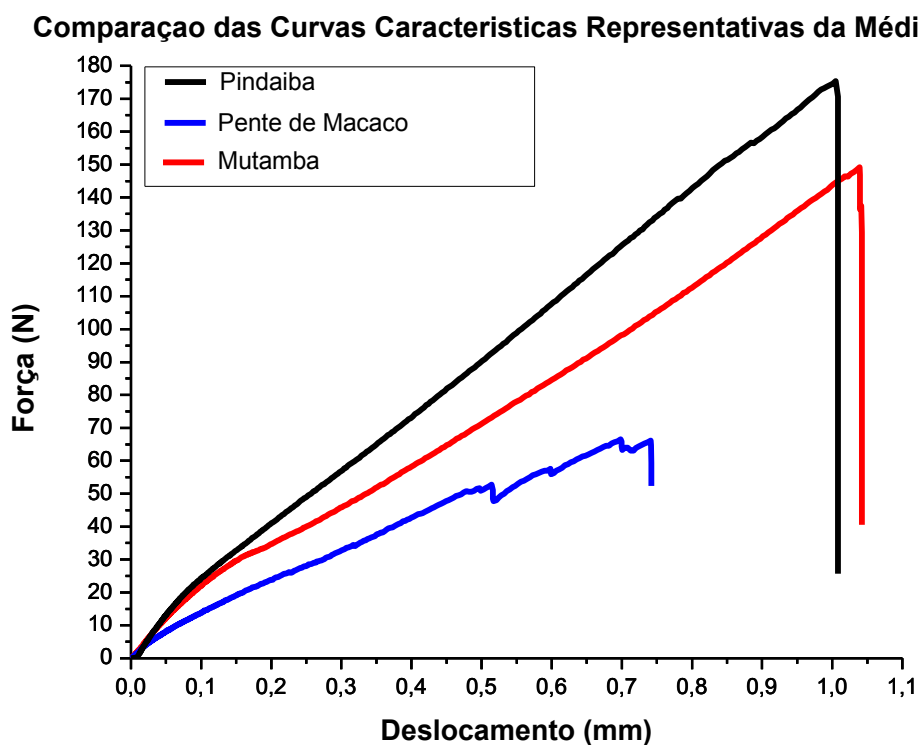
A fibra de Pente de Macaco apresentou massa específica 39% inferior à fibra de Mutamba e 55% inferior à de Pindaíba, o que se mostra como uma vantagem para a fabricação de compósitos, dada a possibilidade de se fabricar materiais de menor massa específica e conseqüentemente mais leves. Já os resultados de umidade mostraram um teor relativamente baixo e uniforme para todas as fibras estudadas.



Os resultados de teor de umidade para as fibras de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba apresentaram valores próximos aos encontrados por RODRIGUES (2008) para as fibras de Curauá, Juta e Palha da Costa. Bem como, os resultados de massa específica encontrado para as fibras de Mutamba e Pindaíba foram próximos da média dos valores encontrados por RODRIGUES (2008), para a fibra de Palha da Costa.

A Figura 48 ilustra o comportamento típico da força versus deslocamento dos corpos de prova das fibras de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba. Nela pode-se observar que as fibras de Mutamba e Pindaíba apresentaram valores de força bem superiores ao Pente de Macaco.

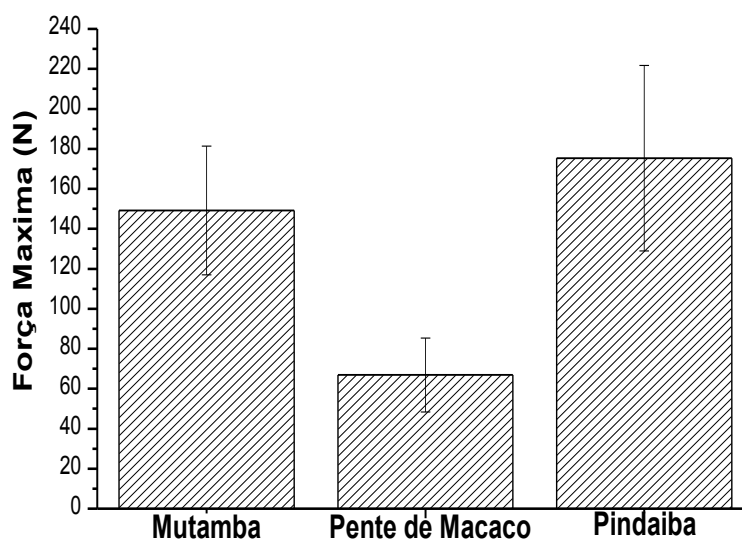
**Figura 48:** Curvas força versus deslocamento dos corpos de prova característicos das fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba.



Fonte: Autor, (2018)

A Figura 49 apresenta um comparativo entre a força máxima suportada por cada uma das fibras estudadas e seus respectivos desvios padrões.

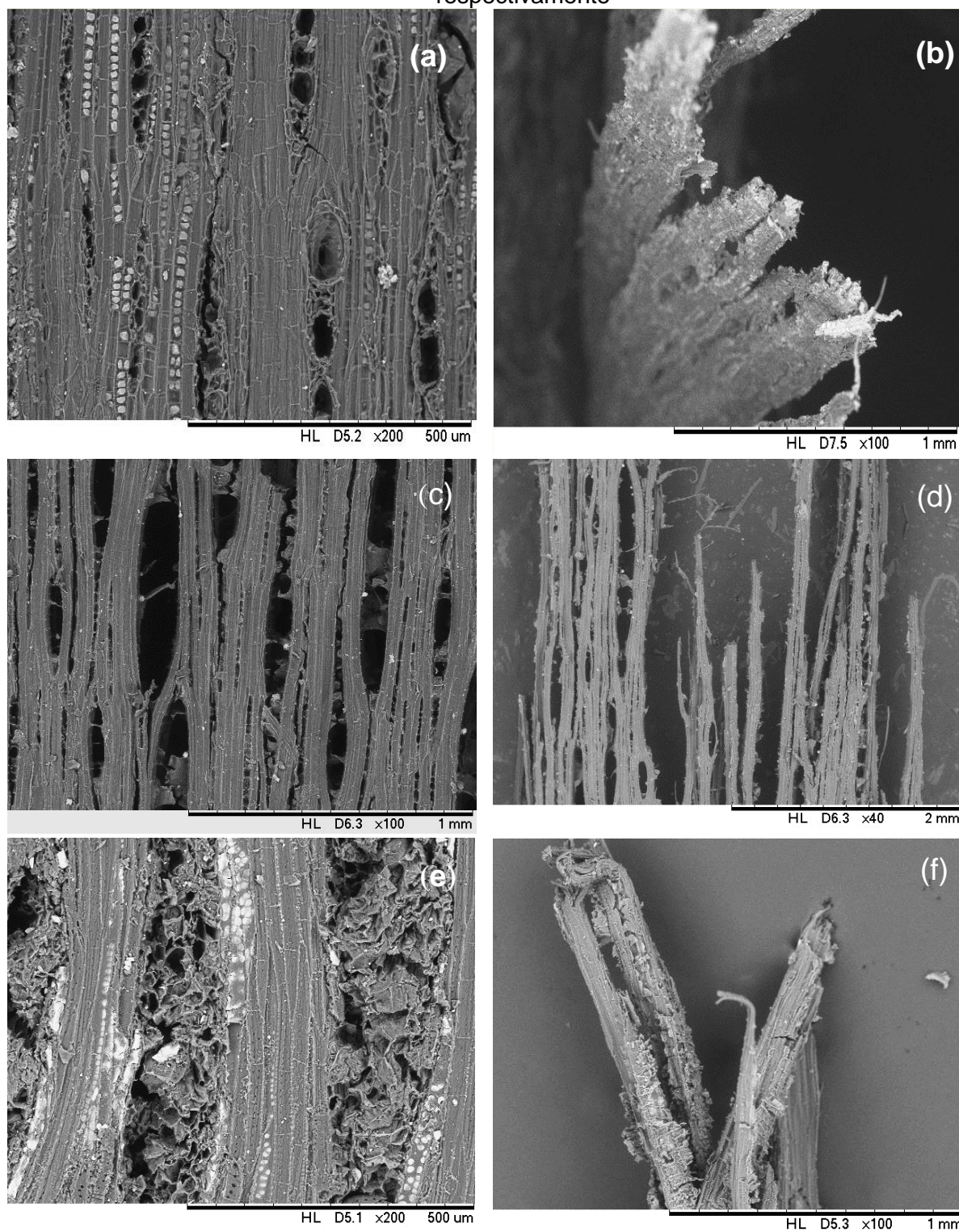
**Figura 49:** Comparativo da força máxima pelo tipo das fibras – NORMA ASTM D3822-96



**Fonte:** Autor, (2018).

Foram preparadas amostras de fibras para os procedimentos metalográficos a serem observadas ao microscópio eletrônico de varredura. A Figura 50 mostra a característica morfológica da superfície das fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba, respectivamente.

**Figura 50:** (a), (c) e (e). Apresentam o aspecto superficial das fibras de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba, respectivamente, (b), (d) e (f). Mostram a região de fratura das fibras ensaiadas em tração para Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba, respectivamente



**Fonte:** Autor, (2018).

As fibras estudadas apresentaram um aspecto superficial irregular com cavidades, microcavidades, relevos e presença de resíduos do processamento de

extração manual das fibras, já que as mesmas não passaram por nenhum tratamento superficial, como pode ser visualizado na Figura 50 a) Mutamba, c) Pente de Macaco e e) Pindaíba. Na Figura 50 b) Mutamba, d) Pente de Macaco e f) Pindaíba, mostram a região de fratura das fibras ensaiadas em tração, onde se pode observar uma deformação plástica longitudinal com desfibramento e rompimento das fibras elementares.

Em geral as fibras vegetais são constituídas por diversas fibras elementares ligadas entre si, como mostra a Figura 50, o que resulta em uma variabilidade nas propriedades das fibras vegetais. As fibras estudadas apresentam microestrutura semelhante às demais fibras vegetais originadas do caule; em sua composição microestrutural pode-se dar destaque ao alto percentual das microfibrilas de celulose (fibras elementares) levando a bons resultados nas propriedades mecânicas das mesmas. COSTA (2012)

Como mencionado anteriormente as microfibrilas contribuem para o aumento da resistência mecânica, pois as mesmas podem resistir individualmente a solicitações mecânicas como estudado por RODRIGUES (2014). Esse tipo de microfibrilas é comum em todas as fibras utilizadas no trabalho, porém é possível observar um grande número dessas microfibrilas na Mutamba. Já o Pente de Macaco apresentou uma quantidade significativa de vazios que podem contribuir para uma melhor adesão da fibra com a matriz, porém se a viscosidade da resina for alta, isso pode contribuir para possíveis defeitos nos compósitos a serem fabricados.

Um aspecto importante é a rugosidade da superfície das fibras que é fundamental na adesão fibra-matriz, que está evidenciada em todas as fibras analisadas, porém as fibras de Pindaíba apresentaram uma maior rugosidade, isso pode ser devido ao fato de que as fibras de Pindaíba são mais densas que as demais, e durante a normalização isso pode ter favorecido o aparecimento de superfícies rugosas.

### 5.3 AVALIAÇÃO DA FABRICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

As fibras utilizadas na fabricação dos compósitos analisados demonstraram um comportamento satisfatório de um modo geral, uma vez que, os corpos de prova confeccionados para o desenvolvimento deste trabalho apresentaram uma boa trabalhabilidade e poucos defeitos.

O pente de macaco normalizado apresentou uma ótima trabalhabilidade tanto para fabricação das pré-pregs de fibras utilizando o tear como para fabricação dos corpos de prova segundo as normas ASTM D638 e ASTM D5942, características essenciais como: boa acomodação no tear, boa molhabilidade pela resina e fácil manuseio, foram observadas no pente de macaco, fazendo com que os compósitos reforçados com esta fibra se apresentassem em sua grande maioria isentos de bolhas e vazios, que são defeitos comuns na maioria dos compósitos reforçados com fibras naturais.

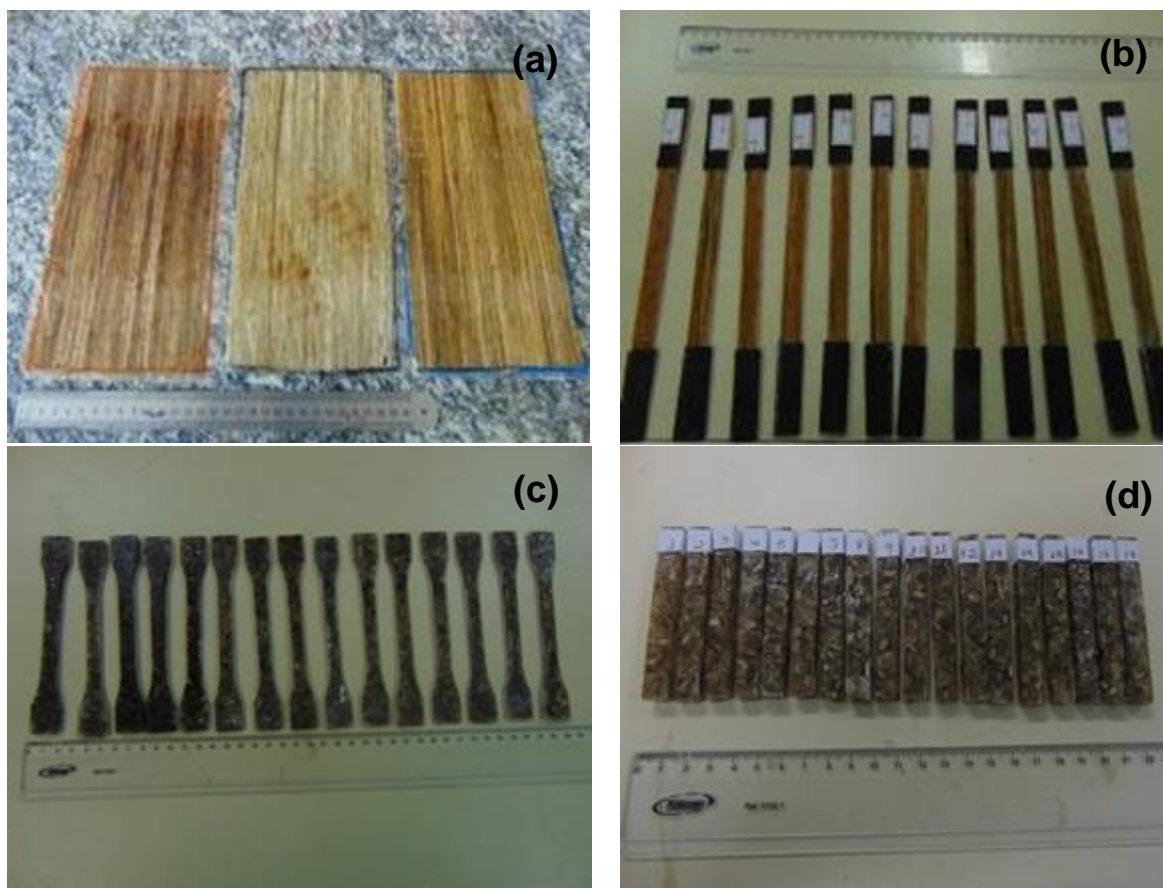
A mutamba, assim como, o pente de macaco não apresentou dificuldades para a fabricação dos compósitos, as características de boa acomodação no tear, boa molhabilidade pela resina e fácil manuseio também foram observados na fibra de mutamba. A fabricação dos compósitos utilizando esta fibra como reforço não apresentaram dificuldades e atendeu de forma satisfatória a confecção dos corpos de provas estabelecidos nas normas utilizadas neste trabalho.

A fibra de pindaíba quando comparada com as outras fibras foi a que apresentou maior dificuldade na fabricação dos materiais compósitos, diferente do pente de macaco e da mutamba, a pindaíba apresenta uma maior dificuldade em relação a sua acomodação no tear, sendo necessário um maior cuidado na hora da fabricação das pré-pregs, pois o atrito da fibra de pindaíba com a linha de amarração (sisal) pode acabar rompendo parte da linha de amarração, comprometendo o processo de fabricação das pré-pregs de fibras utilizadas na fabricação dos compósitos que foram utilizados na confecção dos corpos de prova que vão atender a norma ASTM D3039. Com relação à fabricação dos corpos de prova de tração segundo as normas ASTM D638 e ASTM D5942 não foi observado nenhuma dificuldade, a fibra teve uma boa acomodação no molde, já com relação à molhabilidade a fibra de pindaíba foi observado uma menor molhabilidade, porém nada disso comprometeu o processo de fabricação dos materiais compósitos a partir dessa fibra.

Assim como na extração e preparação das fibras, o pente de macaco e a mutamba tiveram um melhor desempenho quando comparados com a pindaíba, mas assim como na etapa de extração e preparação este comportamento diferenciado da pindaíba não comprometeu a aplicação desta fibra na fabricação dos compósitos e dos corpos de prova utilizados no desenvolvimento deste trabalho. A Figura 51 a), b),

c) e d) mostram as placas de compósitos e os corpos de prova utilizados nos ensaios realizados neste trabalho.

**Figura 51:** (a) Placas de compósitos de Pindaíba, Pente de Macaco e Mutamba (b) Corpos de prova de Mutamba da Norma ASTM D3039, (c) Corpos de prova de Pindaíba da norma ASTM D638 e (d) Corpos de prova de Pente de Macaco da Norma ASTM D5942.



Fonte: Autor, (2018)

## 5.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO E ASPECTO DA FRATURA

### 5.4.1 Resistência a tração dos corpos de prova de Matriz Pura

A Tabela 4 abaixo mostra os resultados obtidos no ensaio de tração dos corpos de prova fabricados com poliéster sem reforço.

**Tabela 4:** Resultados de ensaio de tração do corpo de prova da resina pura

Resina	Força Máxima (N)	Deformação Máxima (mm/mm)	Tensão (MPa)
Resina Pura	1497,39±175,02	0,097±0,014	33,28±3,89

Fonte: Autor, (2018)

A alteração da resina de poliéster pela adição de 0,33% (v/v) de agente de cura teve como objetivo melhorar a molhabilidade e impregnação das fibras pelo polímero, adequando a viscosidade da matriz. A resina de poliéster pela adição de 0,33% (v/v) de agente de cura foi padronizada tanto para a fabricação dos compósitos ao longo de todo o trabalho, como para a caracterização mecânica em tração e impacto.

Os resultados obtidos do ensaio de tração da resina pura mostrados na Tabela 4 acima servirão de comparação para os corpos de prova contendo reforço. O gráfico representado na Figura 52 apresenta a curva tensão versus deformação do corpo de prova contendo apenas a resina pura e o agente de cura.

**Figura 52:** Curvas tensão versus deformação do corpo de prova da resina pura.



**Fonte:** Autor, (2018)

O resultado de resistência à tração obtido para resina pura apenas com agente de cura foi de 33,28 MPa, que foi 34% inferior ao obtido por (RIBEIRO, 2015). Isso pode ter ocorrido pela diferença entre a resina e o agente de cura utilizado nos respectivos trabalhos.

A curva apresentada na Figura 52 mostra que a matriz poliéster apresenta um comportamento dúctil quando ensaiada em tração, não apresentando nenhuma capacidade de absorção de energia após o início do trincamento da matriz. RIBEIRO (2015).

### 5.4.2- Fibras Longas e Alinhadas

A tabela 5 mostra os resultados de tração para os corpos de prova confeccionados com as fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba, segundo a norma ASTM D3039-00.

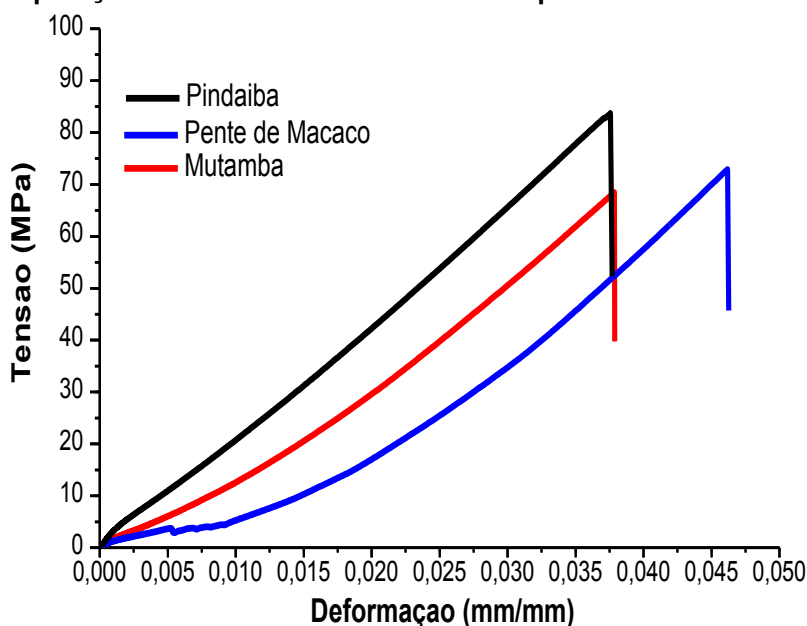
**Tabela 5:** Resultado de tração para os corpos de prova confeccionados com as fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba alinhadas.

Fibra	Força Máxima (N)	Deformação Máxima (mm/mm)	Tensão (MPa)	Fração Mássica (%)
<b>Mutamba</b>	1016,51±175,31	0,03±0,006	67,76±11,68	14,05
<b>Pente de Macaco</b>	1053,75±156,94	0,04±0,005	70,25±10,46	14,77
<b>Pindaíba</b>	1240,93±291,20	0,046±0,008	82,72±19,41	24,28

Fonte: Autor, (2018)

A Figura 53 apresenta a curva tensão versus deformação dos corpos de prova feitos com as fibras longas e alinhadas, segundo a norma ASTM D3039M-00.

**Figura 53:** Curva tensão/deformação dos corpos de prova das fibras longas e alinhadas  
**Comparação das Curvas Características Representativas da Média**

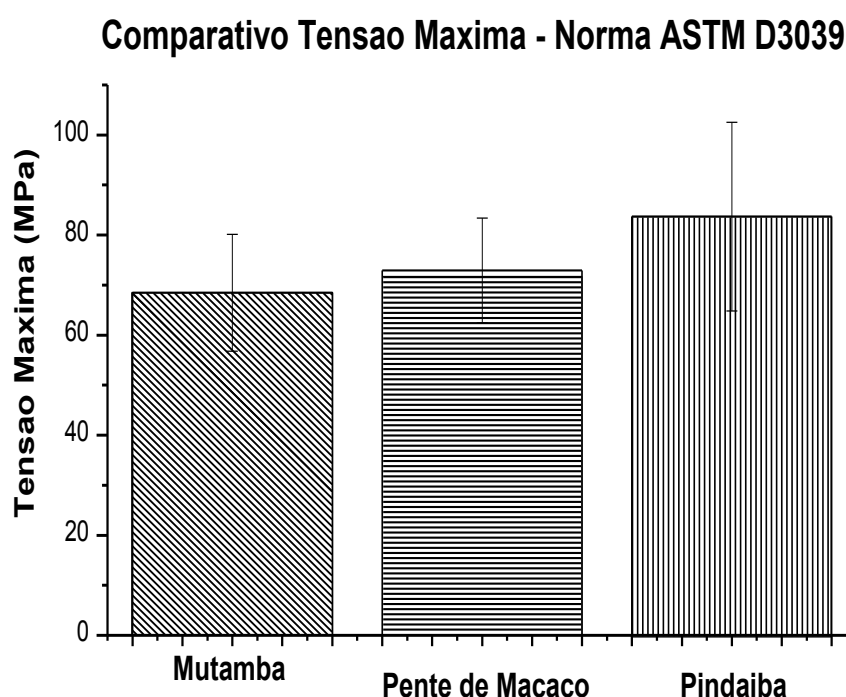


Fonte: Autor, (2018).



Através da análise do gráfico da curva tensão/deformação dos corpos de prova das fibras longas e alinhadas pode-se observar que os compósitos que obtiveram melhores resultados ao ensaio de tração foram os confeccionados com a fibra de Pindaíba, com uma tensão média de  $82,72 \pm 19,41$  MPa, seguido dos compósitos confeccionados com a fibra de Pente de Macaco que obtiveram uma tensão média de  $70,25 \pm 10,46$  MPa este resultado é 15% inferior ao melhor resultado obtido e é superior 3,5% ao menor resultado obtido, a menor média de resistência a tração foi observada para os compósitos fabricados com a fibra de Mutamba com uma tensão média de  $67,76 \pm 11,68$  MPa, que é 18% inferior ao melhor resultado obtido neste ensaio. A Figura 54 apresenta um comparativo entre as máximas obtidas no ensaio de tração para os compósitos confeccionados segundo a norma ASTM D3039.

**Figura 54:** Comparativo entre as tensões máximas obtidas no ensaio de tração segundo a norma ASTM D3039.



**Fonte:** Autor, (2018)

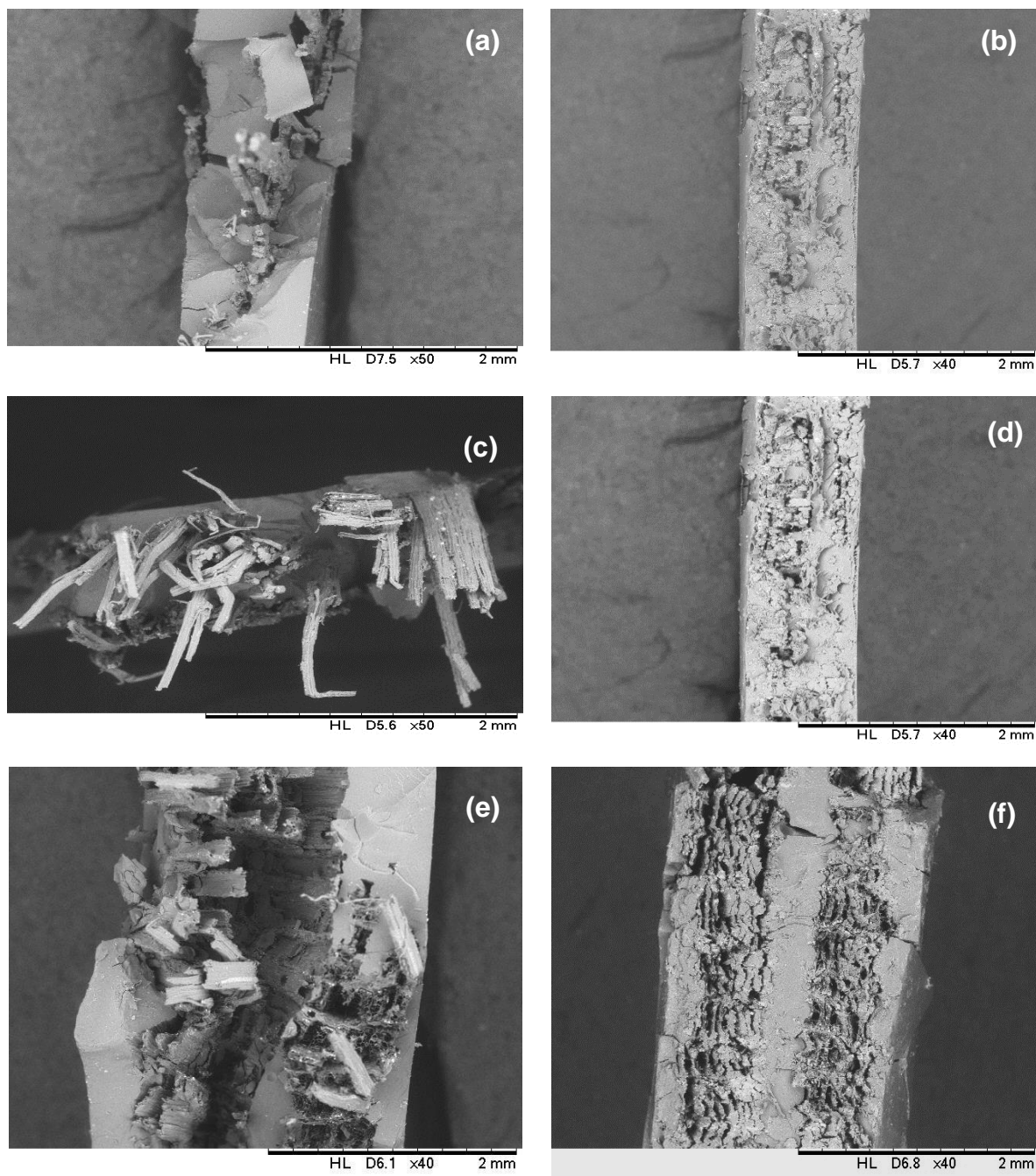
Em comparativo com os resultados obtidos para o ensaio de tração em resina pura (sem reforço) pode-se afirmar que os resultados foram satisfatórios pois todos

ultrapassaram o valor da média de resistência à tração da resina pura, confirmando assim, que as fibras utilizadas cumpriram seu papel como reforço. Sendo que a pindaíba foi 59,8% superior a resina pura, o pente de macaco foi 52,6% superior e a mutamba 50,9% superior.

Os resultados de resistência à tração obtidos neste trabalho em relação as configurações de 0°/0°/0° para fibra de Juta de CAVALCANTE, (2008) que foi de 53,30 MPa e de SANTOS (2015) que foi de 69,00 MPa, para o resultado obtido por CAVALCANTE, (2008), A pindaíba foi 35,5 % superior, o Pente de Macaco foi 24 % superior e a Mutamba foi 21 % superior. Já para o resultado obtido por SANTOS (2015), apenas a Pindaíba e o Pente de Macaco foram superiores, sendo que a Pindaíba foi 16,6% superior e o Pente de Macaco 2% superior. A mutamba foi a única que apresentou resultado 2 % inferior ao obtido por SANTOS (2015).

A Figura 55 mostra o aspecto fractográfico das fibras de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba respectivamente. (a) observa-se a presença significativa de fibras na matriz, *pull out*, ocorrência de regiões de alongamento da fibra e trincamento da matriz, isso pode ter ocorrido por conta da fraca interação entre fibra/matriz facilitando assim a propagação da trinca. Na Figura (b) temos o topo do corpo de prova de Mutamba cortado manualmente para verificar se há a presença de vazios, foi verificado que ao longo do corpo de prova o número de vazio diminuiu. Na Figura (c) o mecanismo de falha predominante foi o rompimento de fibra, o que mostra uma boa interação fibra/matriz. Na Figura (d) temos o topo do corpo de prova do Pente de Macaco cortado, foi observado a presença de vazios. (e) observa-se *pull out*, pouco alongamento da fibra e trincamento da matriz que pode ser explicado pelo fato de a fibra ter tido uma boa adesão a mesma e ao receber a tensão houve rompimento tanto da matriz como da fibra. (f) observa-se a propagação da trinca.

**Figura 55:** (a) e (b) fibra de mutamba topo e topo cortado, (c) e (d) fibra de pente de macaco topo e topo cortado, (e) e (f) fibra de pindaíba topo e topo cortado.



**Fonte:** Autor, (2018)

### 5.4.3 Fibras Curtas

#### 5.4.3.1- Compósitos reforçados com fibras de 5 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos nos ensaios de tração nos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 5 mm de comprimento.

**Tabela 6:** Resultado dos ensaios de tração dos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 5 mm de comprimento.

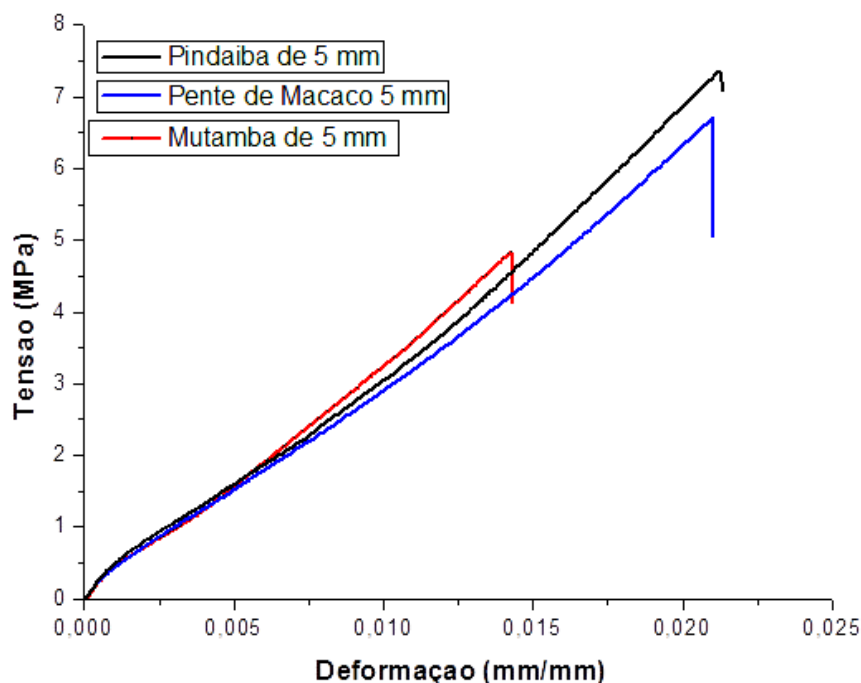
<b>Fibra</b>	<b>Força Máxima (N)</b>	<b>Deformação Máxima (mm/mm)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>	<b>Fração Mássica (%)</b>
<b>Mutamba 5mm</b>	156,62±16,35	0,016±0,002	4,89±0,51	16,56
<b>Pente de Macaco 5mm</b>	216,89±47,64	0,022±0,004	6,78±1,49	11,44
<b>Pindaíba 5mm</b>	234,07±48,64	0,024±0,004	7,31±1,52	15,65

**Fonte:** Autor, (2018).

A Figura 56 ilustra o comportamento típico tensão versus deformação dos corpos de prova característicos das séries de compósitos reforçados por fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 5 mm.

**Figura 56:** Curvas tensão versus deformação dos corpos de prova característicos de compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 5 mm.

**Comparação das Curvas Características Representativas da Média**

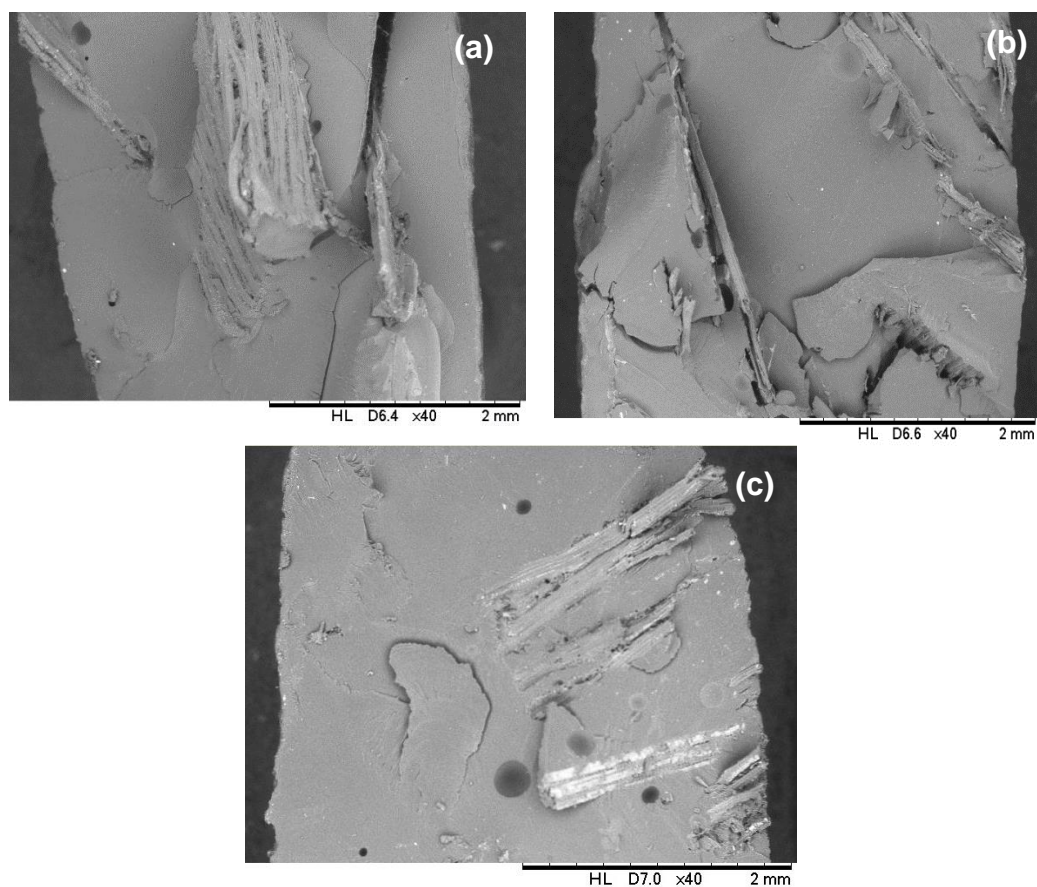


**Fonte:** Autor, (2018).

Analisando o gráfico das curvas tensão versus deformação dos corpos de prova característicos de compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 5 mm pode-se observar que os compósitos que obtiveram melhores resultados ao ensaio de tração foram os confeccionados com a fibra de Pindaíba, com uma tensão média de  $7,31 \pm 1,52$  MPa, seguido dos compósitos confeccionados com a fibra de Pente de Macaco que obtiveram uma tensão média de  $6,78 \pm 1,49$  MPa este resultado é 7,3% inferior ao melhor resultado obtido e é superior 28% ao menor resultado obtido, a menor média de resistência a tensão foi observada para os compósitos fabricados com a fibra de Mutamba com uma tensão média de  $4,89 \pm 0,51$  MPa, que é 33% inferior ao melhor resultado obtido neste ensaio.

A Figura 57 mostra as micrografias eletrônicas de varredura dos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 5 mm. Pode-se observar a superfície de fratura onde mostra os mecanismos de falhas dominantes.

**Figura 57:** Superfície de fratura dos compósitos reforçados com fibras de: (a) mutamba de 5 mm; (b) pente de macaco de 5 mm; (c) pindaíba de 5 mm.



**Fonte:** Autor, (2018).

Na Figura 57 (a) pode-se observar a presença de alguns vazios, trincas na matriz, o mecanismo de falha dominante foi *pull out*. (b) foi observado a presença de vazios, presença de fibra a superfície da matriz, o mecanismo de falha dominante foi *pull out*. (c) foi observado a presença de vazios, presença de fibra a superfície da matriz, o mecanismo de falha dominante foi *pull out*.

#### 5.4.3.2 Compósitos reforçados com fibras de 10 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos nos ensaios de tração nos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 10 mm de comprimento.

**Tabela 7:** Resultado dos ensaios de tração dos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 10 mm de comprimento.

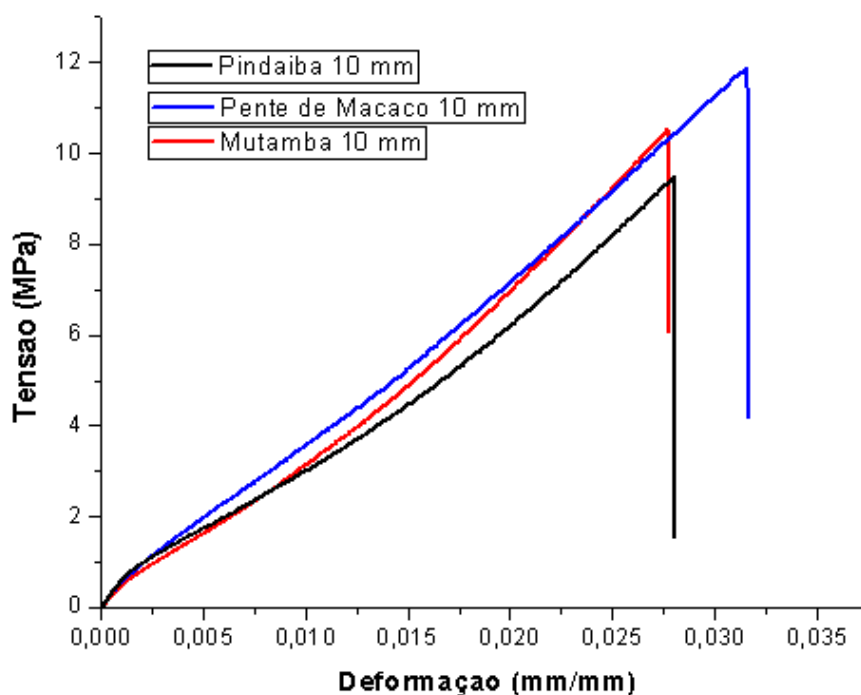
Fibra	Força Máxima (N)	Deformação Máxima	Tensão (MPa)	Fração Mássica
<b>Mutamba 10mm</b>	324,64±45,18	0,025±0,003	10,14±1,41	10,02
<b>Pente de Macaco 10mm</b>	389,88±77,02	0,030±0,005	12,18±2,41	7,20
<b>Pindaíba 10 mm</b>	295,51±54,41	0,029±0,005	9,23±1,64	14,49

**Fonte:** Autor, (2018).

A Figura 58 ilustra o comportamento típico tensão versus deformação dos corpos de prova característicos das séries de compósitos reforçados por fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 10 mm.

**Figura 58:** Curvas tensão versus deformação dos corpos de prova característicos de compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 10 mm.

#### Comparação das Curvas Características Representativas da Média



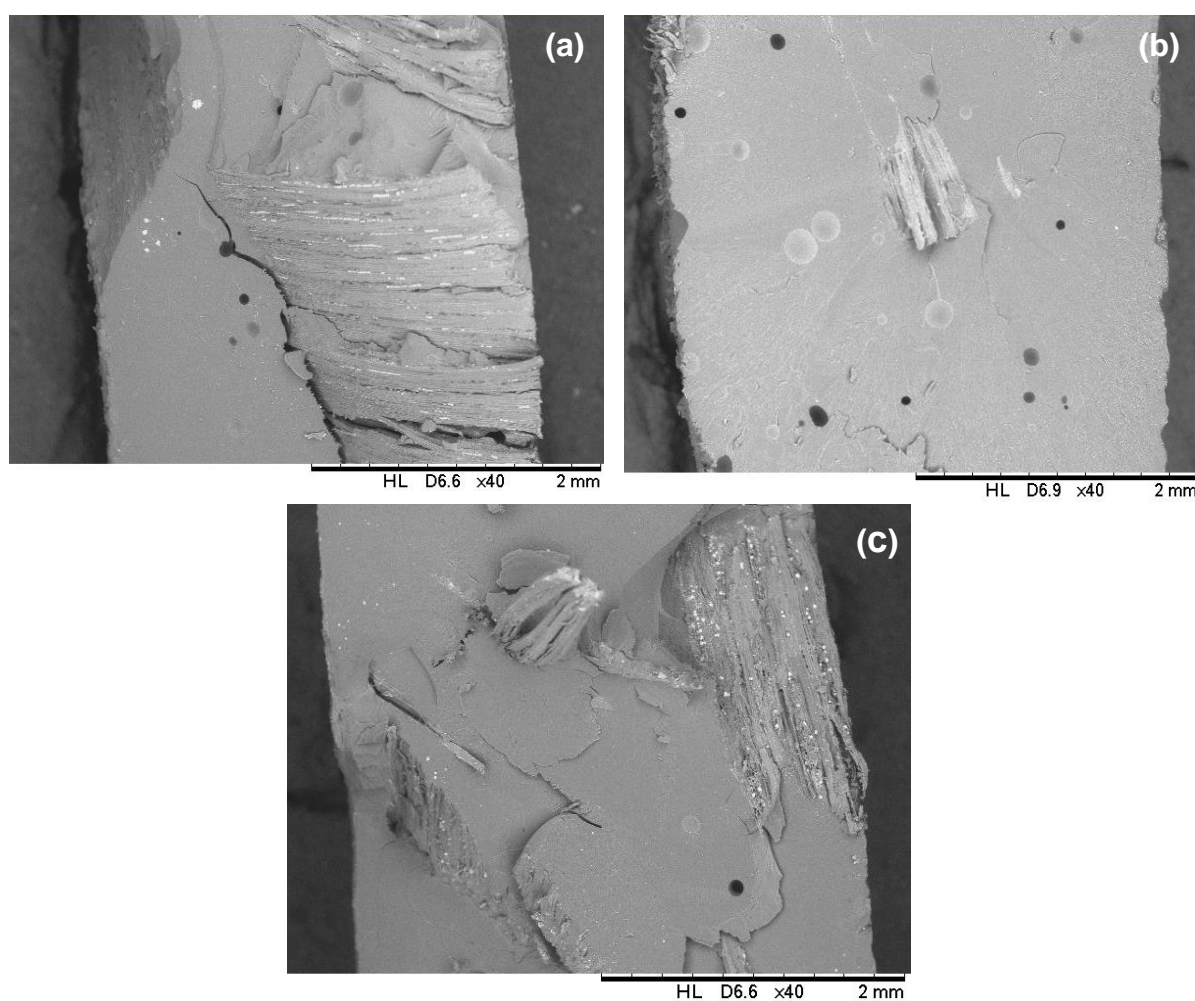
**Fonte:** Autor, (2018).

Para as curvas tensão versus deformação dos corpos de prova característicos de compósitos reforçados com fibras de Mutamba, pente de macaco e pindaíba de 10 mm, pode-se observar que os compósitos que obtiveram melhores resultados ao

ensaio de tração foram os confeccionados com a fibra de Pente de macaco, com uma tensão média de  $12,18 \pm 2,41$  MPa, seguido dos compósitos confeccionados com a fibra de Mutamba que obtiveram uma tensão média de  $10,14 \pm 1,41$  MPa este resultado é 17% inferior ao melhor resultado obtido e é superior 9% ao menor resultado obtido, a menor média de resistência a tração foi observada para os compósitos fabricados com a fibra de Pindaíba com uma tensão média de  $9,23 \pm 1,64$  MPa, que é 24% inferior ao melhor resultado obtido neste ensaio.

A Figura 59 mostra as micrografias eletrônicas de varredura dos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 10 mm. Pode-se observar a superfície de fratura onde mostra os mecanismos de falhas dominantes

**Figura 59:** Superfície de fratura dos compósitos reforçados com fibras de: (a) mutamba de 10 mm; (b) pente de macaco de 10 mm; (c) pindaíba de 10 mm.



**Fonte:** Autor, (2018)

Na Figura 59 (a) pode-se observar a presença de alguns vazios, trincas na matriz, o mecanismo de falha dominante foi *pull out*. (b) foi observado a presença de



vazios, e bolhas o que pode ter contribuído para a propagação da trica, (c) foi verificado que o mecanismo de falha dominante foi de fibras rompidas.

*5.4.3.3- Compósitos reforçados com fibras de 15 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.*

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos nos ensaios de tração nos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 15 mm de comprimento.

**Tabela 8:** Resultado dos ensaios de tração dos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 15 mm de comprimento.

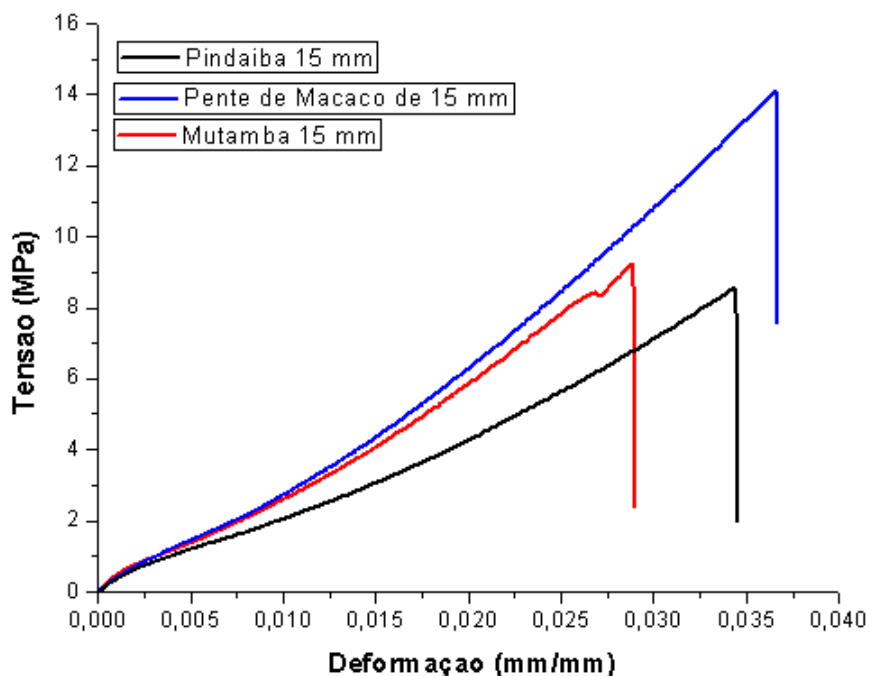
<b>Fibra</b>	<b>Força Máxima (N)</b>	<b>Deformação Máxima (mm/mm)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>	<b>Fração Mássica (%)</b>
<b>Mutamba 15mm</b>	294,81±39,77	0,029±0,006	9,21±1,24	9,59
<b>Pente de Macaco 15mm</b>	449,64±69,42	0,037±0,005	14,05±2,17	7,20
<b>Pindaíba 15mm</b>	280,35±61,57	0,026±0,007	8,76±1,92	14,96

**Fonte:** Autor, (2018)

A Figura 60 ilustra o comportamento típico tensão versus deformação dos corpos de prova característicos das séries de compósitos reforçados por fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 15 mm.

**Figura 60:** Curvas tensão versus deformação dos corpos de prova característicos de compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 15 mm.

#### Comparação das Curvas Características Representativas da Média

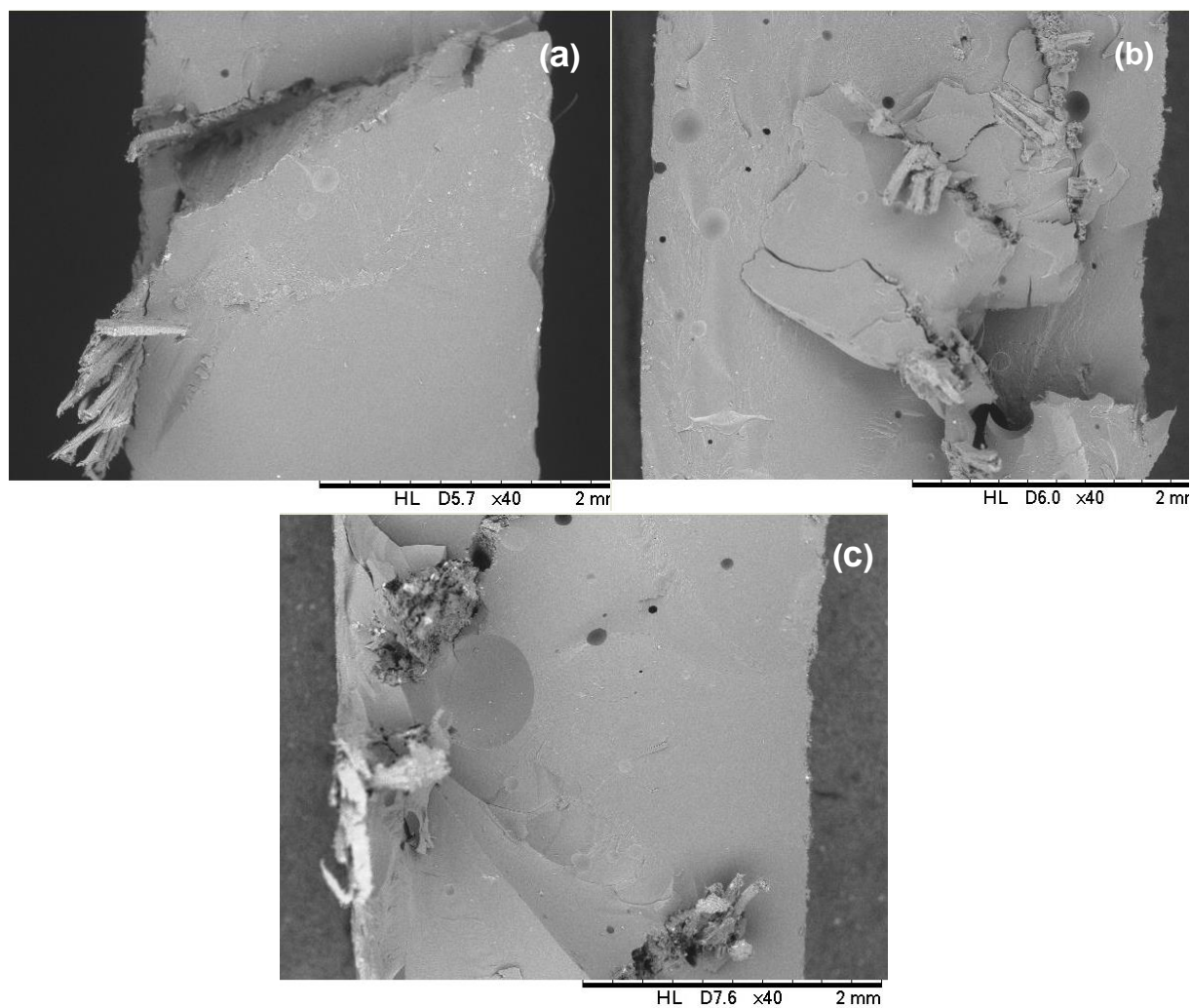


Fonte: Autor, (2018).

As curvas tensão versus deformação dos corpos de prova característicos de compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 15 mm, pode-se observar que os compósitos que obtiveram melhores resultados ao ensaio de tração foram os confeccionados com a fibra de Pente de macaco, com uma tensão média de  $14,05 \pm 2,17$  MPa, seguido dos compósitos confeccionados com a fibra de Mutamba que obtiveram uma tensão média de  $9,21 \pm 1,24$  MPa este resultado é 34% inferior ao melhor resultado obtido e é superior 5% ao menor resultado obtido, a menor média de resistência a tração foi observada para os compósitos fabricados com a fibra de Pindaíba com uma tensão média de  $8,76 \pm 1,92$  MPa, que é 38% inferior ao melhor resultado obtido neste ensaio.

A Figura 61 mostra as micrografias eletrônicas de varredura dos compósitos reforçados com fibras de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 15 mm. Pode-se observar a superfície de fratura onde mostra os mecanismos de falhas dominantes.

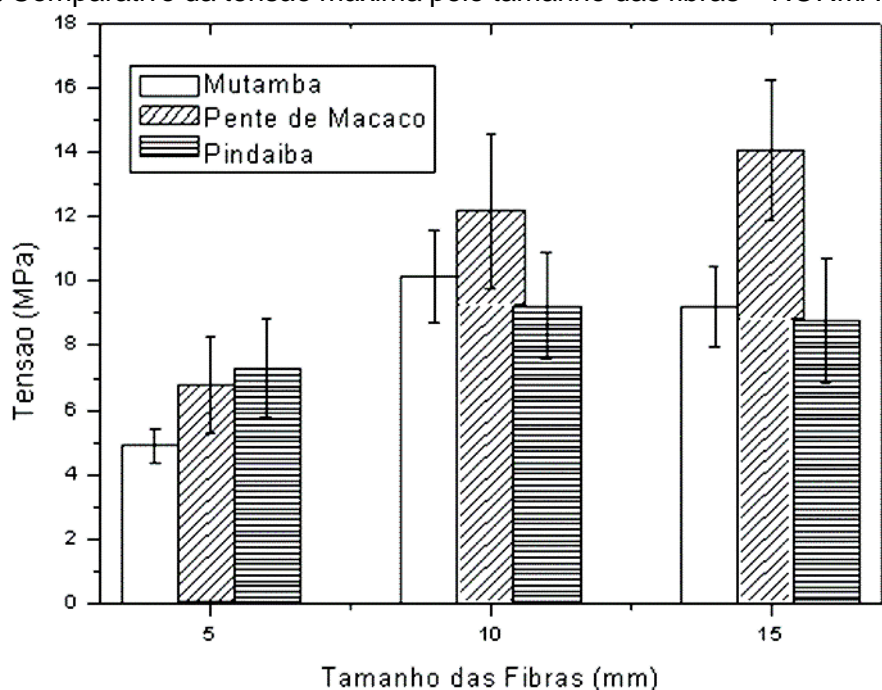
**Figura 61:** Superfície de fratura dos compósitos reforçados com fibras de: (a) mutamba de 15 mm; (b) pente de macaco de 15 mm; (c) pindaíba de 15 mm.



Fonte: Autor, (2018)

Na Figura 61 (a) pode-se observar a presença de alguns vazios, trincas na matriz o que ocasionou a falha. (b) o mecanismo de falha observado nesta figura foi o de *pull out*, (c) observa-se a presença de vazios e bolhas e ainda as marcas de propagação das trincas.

A Figura 62 mostra o gráfico comparativo da tensão máxima pelo tamanho das fibras – NORMA ASTM D638.

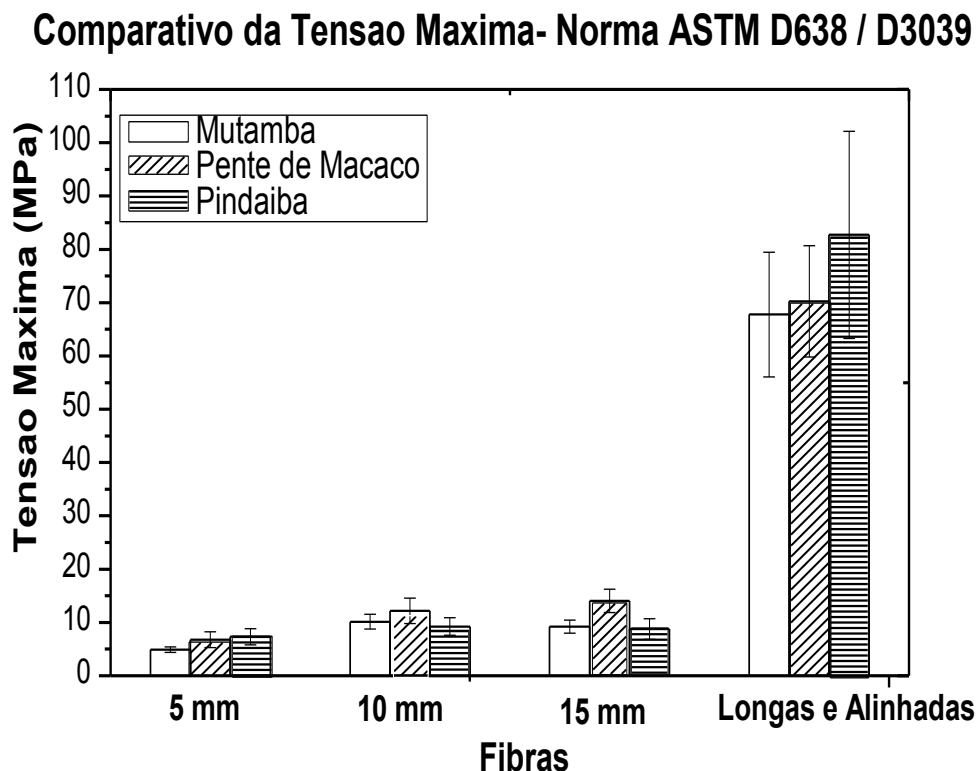
**Figura 62:** Comparativo da tensão máxima pelo tamanho das fibras – NORMA ASTM D638

**Fonte:** Autor, (2018).

Houve uma mudança significativa na ordem dos melhores resultados para as fibras, nos compósitos de 5 mm o melhor resultado foi o da pindaíba, já nos compósitos de 10 e 15 mm os melhores resultados de tensão foram para os compósitos de Pente de macaco. A Pindaíba para os tamanhos de 10 e 15 mm apresentou o menor desempenho, isso pode ter ocorrido em função da diferença de tamanho das fibras e de suas massas específicas; essa diferença de massa específica foi de 55%, ou seja, quanto maior a massa específica menor será a quantidade de reforço, o que prejudica a interação matriz/fibra.

A Figura 63 mostra um comparativo da máxima resistência a tração dos compósitos confeccionados segundo as normas ASTM D638 / D3039, ou seja, compósitos com fibras curtas e aleatórias (ASTM D638) e compósitos com fibras longas e alinhadas (ASTM D3039).

**Figura 63:** Comparativo da máxima resistência a tração dos compósitos confeccionados segundo as Normas ASTM D638 / D3039.



Fonte: Autor, (2018).

Segundo a literatura compósitos com fibras longas e alinhadas tendem a apresentar propriedades mecânicas superiores aos compósitos confeccionadas a partir de fibras curtas e aleatórias. Ao comparar os compósitos de fibras longas e alinhadas aos compósitos fabricados com fibras curtas e aleatórias isto foi evidenciado nos resultados obtidos neste trabalho. Maior valor obtido para compósitos com fibras longas e alinhadas foi de  $82,72 \pm 19,41$  MPa para a fibra de Pindaíba e o maior valor obtido para compósitos com fibras curtas e aleatórios foi de  $14,05 \pm 2,17$  MPa para a fibra de Pente de Macaco no tamanho de 15 mm. O resultado obtido no ensaio de tração para fibras longas e alinhadas é 83% superior ao melhor resultado obtido para fibras curtas e aleatórias.

## 5.5 RESULTADO DO ENSAIO DE IMPACTO E ASPECTO DA FRATURA

### 5.5.1 Ensaio de impacto da resina pura

A caracterização mecânica em relação à resistência ao impacto da matriz polimérica mostrado na Tabela 9.

**Tabela 9:** Resultados da caracterização mecânica (impacto) da matriz polimérica pura.

Compósito	Resistência ao Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )
Resina Pura	27,08 ± 4,86

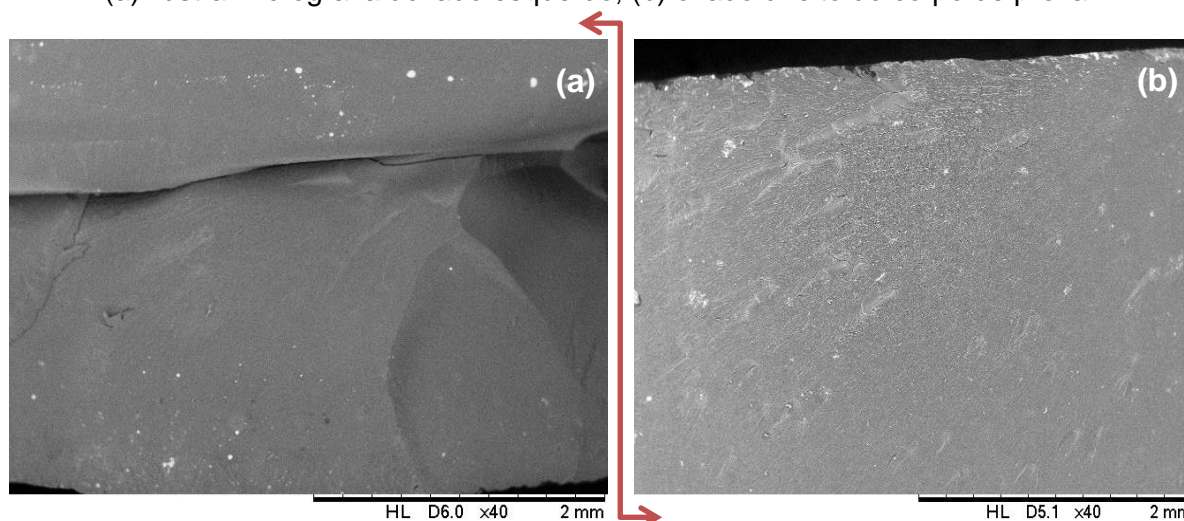
Fonte: Autor, (2018)

Os resultados obtidos do ensaio de resistência ao impacto da resina pura mostrados na tabela 9 acima servirão de comparação para os corpos de prova contendo reforço.

O resultado de resistência ao impacto obtido para resina pura apenas com agente de cura foi de 27,08 MPa, que foi 17% superior ao obtido por RODRIGUES (2008) e 5% inferior ao resultado obtido por COSTA (2016).

A Figura 64 mostra o aspecto de fratura dos corpos de prova de resina pura do ensaio de impacto.

**Figura 64:** Superfície de fratura do corpo de prova de resina pura do ensaio de impacto. (a) ilustra micrografia do lado esquerdo, (b) o lado direito do corpo de prova.



Fonte: Autor, (2018).

Analisando a imagem pode-se observar na fratura da matriz pura, que não ha impedimentos para propagação de trincas e sendo assim o material se rompe com

facilidade, caracteriza-se ainda por uma superfície de fratura plana, com pouca absorção de energia de impacto do material.

### 5.5.2 Fibras Longas e Alinhadas

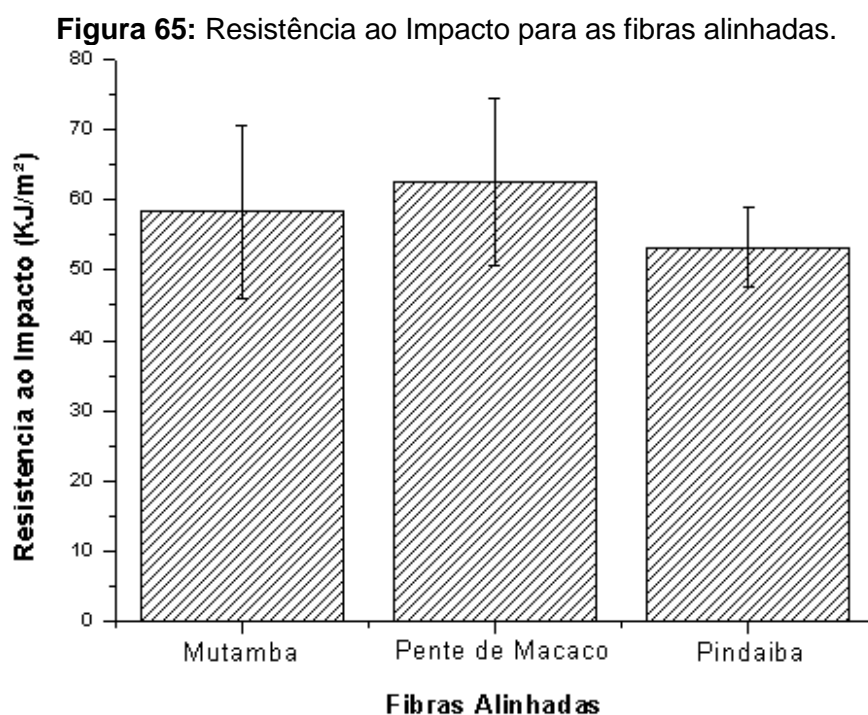
A caracterização mecânica em relação à resistência ao impacto dos compósitos reforçados com as fibras longas e alinhadas de mutamba, pente de macaco e pindaíba são mostrados os resultados na Tabela 10.

**Tabela 10:** Resultados da caracterização mecânica (impacto) dos compósitos reforçados por fibras longas e alinhadas.

Fibras	Resistência ao impacto média (KJ/m <sup>2</sup> )
Mutamba	58,33 ± 12,31
Pente de Macaco	62,5 ± 11,92
Pindaíba	53,12 ± 5,65

Fonte: Autor, (2018)

A Figura 65 mostra o resultado médio de resistência ao impacto encontrado para as fibras alinhadas de mutamba, pente de macaco e pindaíba.



Fonte: Autor, (2018)

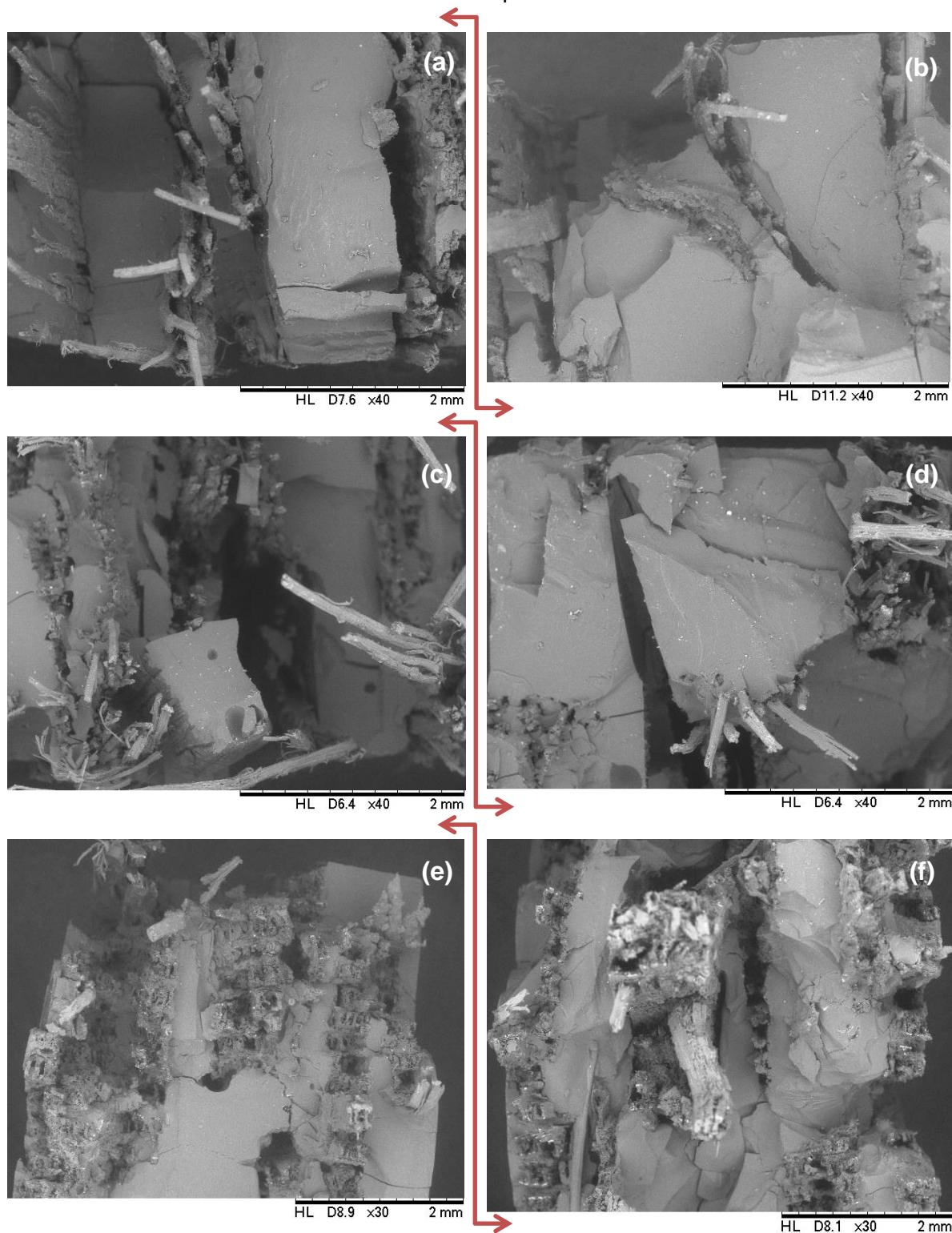
Através da análise do gráfico de resistência ao impacto dos corpos de prova das fibras longas e alinhadas pode-se observar que os compósitos que obtiveram

melhores resultados ao ensaio de impacto foram os confeccionados com a fibra de Pente de Macaco, que apresenta uma resistência ao impacto de  $62,5 \pm 11,92$  KJ/m<sup>2</sup>, seguido dos compósitos confeccionados com a fibra de Mutamba que apresenta uma resistência ao impacto de  $58,33 \pm 12,31$  KJ/m<sup>2</sup>, este resultado é 6,7% inferior ao melhor resultado obtido e é superior 9% ao menor resultado obtido, a menor média que apresenta uma resistência ao impacto que foi observada para os compósitos fabricados com a fibra de Pindaíba que apresenta uma resistência ao impacto de  $53,12 \pm 5,65$  KJ/m<sup>2</sup>, é 15% inferior ao melhor resultado obtido neste ensaio.

A Figura 66 mostra a morfologia dos corpos de prova do ensaio de impacto dos compósitos com fibras longas e alinhadas.



**Figura 66:** Micrografia eletrônica dos corpos de prova de impacto de fibras longas e alinhadas. (a), (c) e (e). Ilustra micrografia do lado esquerdo para a mutamba, pente de macaco e pindaíba, (b), (d) e (f) o lado direito do corpo de prova para a mutamba, pente de macaco e pindaíba.



Fonte: Autor, (2018)

A Figura 66 (a) e (b) mostra a fratura do compósito com fibras de Mutamba, verifica-se que houve o *pull out* e descolamento das fibras da matriz. Já para a Figura

66 (c) e (d) que mostra a fratura dos compósitos de Pente de Macaco que apresentou o maior desempenho entre os compósitos com fibras, apresentou *pull out* e descolamento das fibras da matriz. Segundo COSTA (2016) esses elementos elevam a resistência ao impacto dos compósitos. Para a Figura 66 (e) e (f) observa-se a presença de muitas extremidades de fibras que podem ter gerado concentradores de tensões e possíveis iniciadores de trincas, diminuindo sua resistência ao impacto além de uma concentração muito grande de *pull out*.

### 5.5.3- Fibras Curtas

#### 5.5.3.1 Compósitos reforçados com fibras de 5 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.

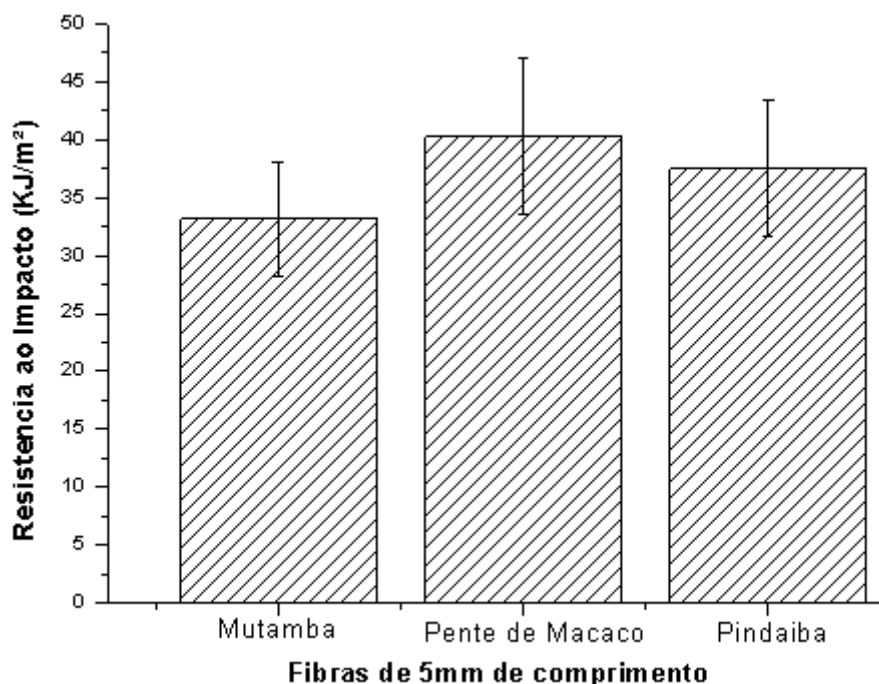
A caracterização mecânica em relação à resistência ao impacto dos compósitos reforçados com as fibras curtas de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 5 mm de comprimento são mostrados os resultados na Tabela 11.

**Tabela 11:** Resultados da caracterização mecânica (impacto) dos compósitos reforçados por fibras curtas de 5 mm de comprimento.

<b>Fibras</b>	<b>Resistência ao impacto média (KJ/m<sup>2</sup>)</b>
Mutamba 5 mm	33,15 ± 4,89
Pente de Macaco 5 mm	40,27 ± 6,78
Pindaíba 5 mm	37,5 ± 5,82

**Fonte:** Autor, (2018).

A Figura 67 mostra o resultado médio de resistência ao impacto encontrado para as fibras curtas de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 5 mm de comprimento.

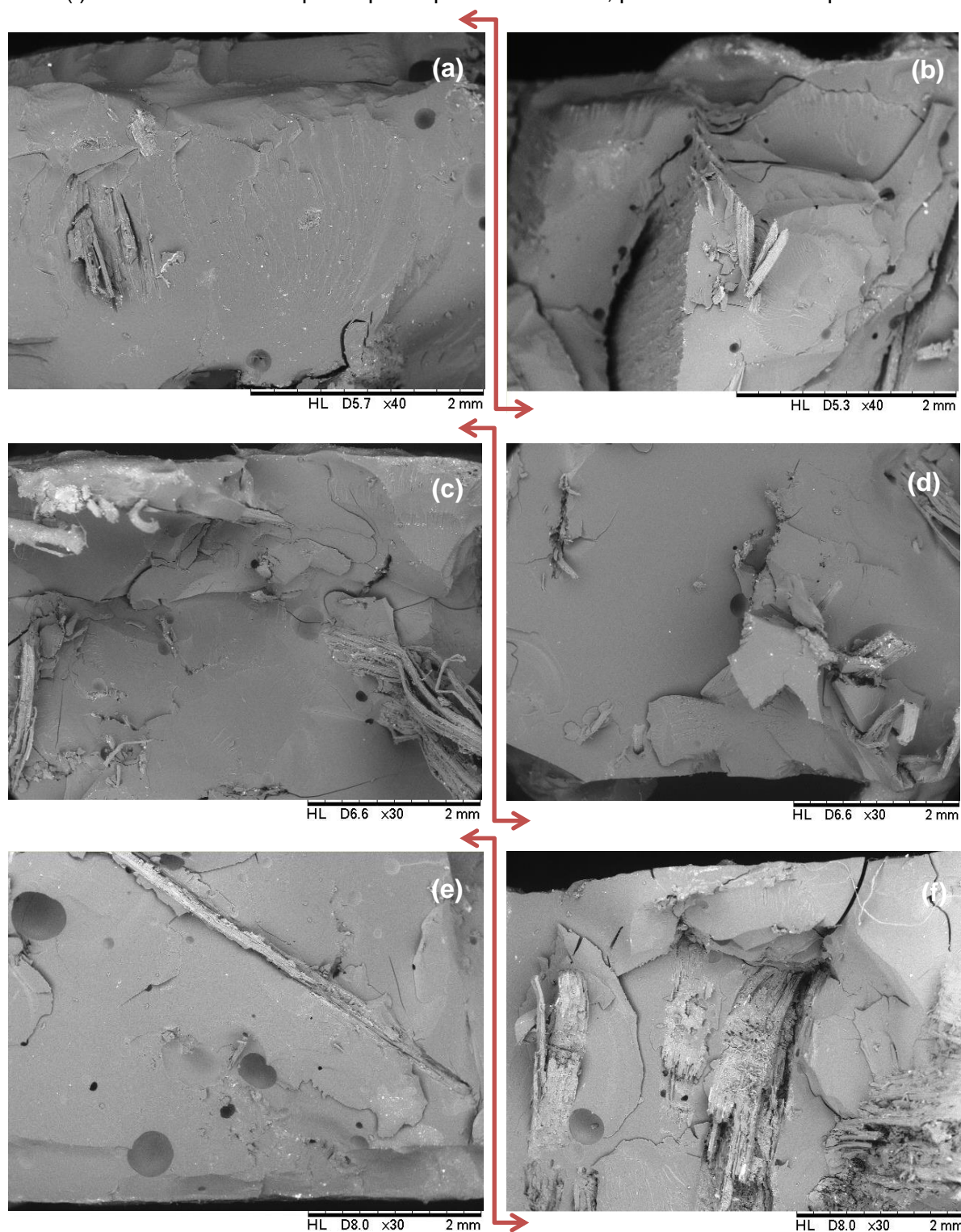
**Figura 67:** Resistência ao Impacto para as fibras curtas 5 mm.

Fonte: Autor, (2018).

Através da análise do gráfico de resultado médio de resistência ao impacto encontrado para as fibras curtas de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba de 5 mm de comprimento pode-se observar que os compósitos que obtiveram melhores resultados ao ensaio de impacto foram os confeccionados com a fibra de Pente de Macaco, que apresenta uma resistência ao impacto de  $40,27 \pm 6,78$  KJ/m<sup>2</sup>, seguido dos compósitos confeccionados com a fibra de Pindaíba que apresenta uma resistência ao impacto de  $37,5 \pm 5,82$  KJ/m<sup>2</sup>, este resultado é 7% inferior ao melhor resultado obtido e é superior 11,6% ao menor resultado obtido, a menor média que apresenta uma resistência ao impacto que foi observada para os compósitos fabricados com a fibra de Mutamba que apresenta uma resistência ao impacto de  $33,15 \pm 4,89$  KJ/m<sup>2</sup>, é 17% inferior ao melhor resultado obtido neste ensaio.

A Figura 68 mostra a morfologia dos corpos de prova do ensaio de impacto dos compósitos com fibras curtas e aleatórias de 5 mm.

**Figura 68:** Micrografia eletrônica dos corpos de prova de impacto de 5 mm. (a), (c) e (e). Ilustra micrografia do lado esquerdo para a mutamba, pente de macaco e pindaíba, (b), (d) e (f) o lado direito do corpo de prova para a mutamba, pente de macaco e pindaíba.



**Fonte:** Autor, (2018).

A Figura 68 (a) e (b) mostra a fratura do compósito com fibras de Mutamba, verifica-se a incidência de trinca e porosidade que são elementos que diminuem a

resistência ao impacto. A Figura 68 (c) e (d) que mostra a fratura dos compósitos de Pente de Macaco que apresentou o maior desempenho entre os compósitos com fibras, podemos observar uma certa uniformidade da superfície de fratura, apresentou *pull out*. Para a Figura 68 (e) e (f) observa-se novamente a presença de muitas extremidades de fibras que concentrações de tensões e são iniciadores de trincas, diminuindo sua resistência ao impacto. Pode-se observar também a presença de poros com tamanhos significativos. Esse é outro fator que reduz a resistência ao impacto.

#### 5.5.3.2 Compósitos reforçados com fibras de 10 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.

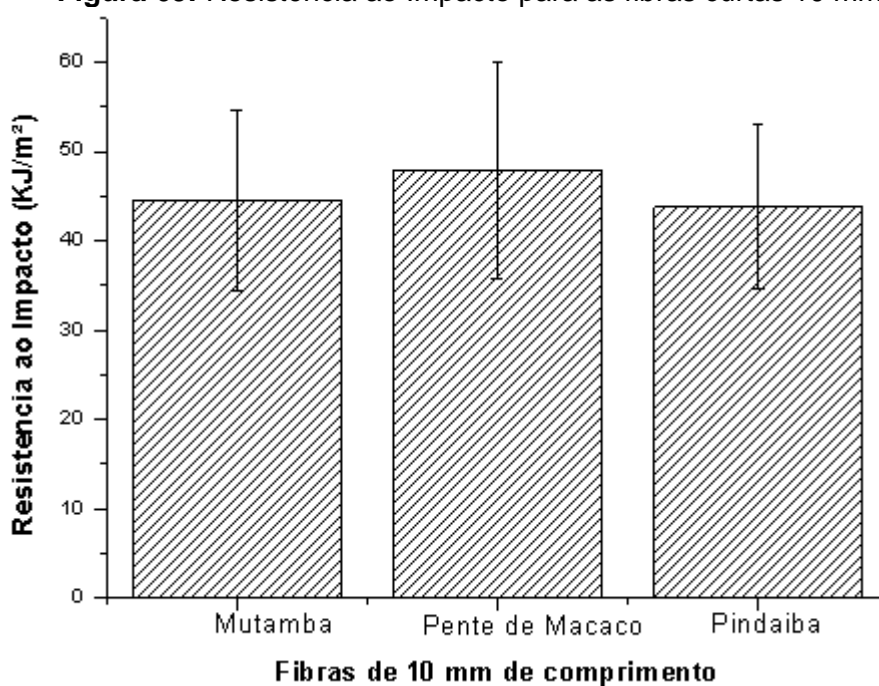
A caracterização mecânica em relação à resistência ao impacto dos compósitos reforçados com as fibras curtas de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 10 mm de comprimento são mostrados os resultados na Tabela 12.

**Tabela 12:** Resultados da caracterização mecânica (impacto) dos compósitos reforçados por fibras curtas de 10 mm de comprimento.

<b>Fibras</b>	<b>Resistência ao impacto média (KJ/m<sup>2</sup>)</b>
Mutamba 10 mm	44,44 ± 10,14
Pente de Macaco 10 mm	47,91 ± 12,18
Pindaíba 10 mm	43,75 ± 9,23

**Fonte:** Autor, (2018).

A Figura 69 mostra o resultado médio de resistência ao impacto encontrado para as fibras curtas de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 10 mm de comprimento.

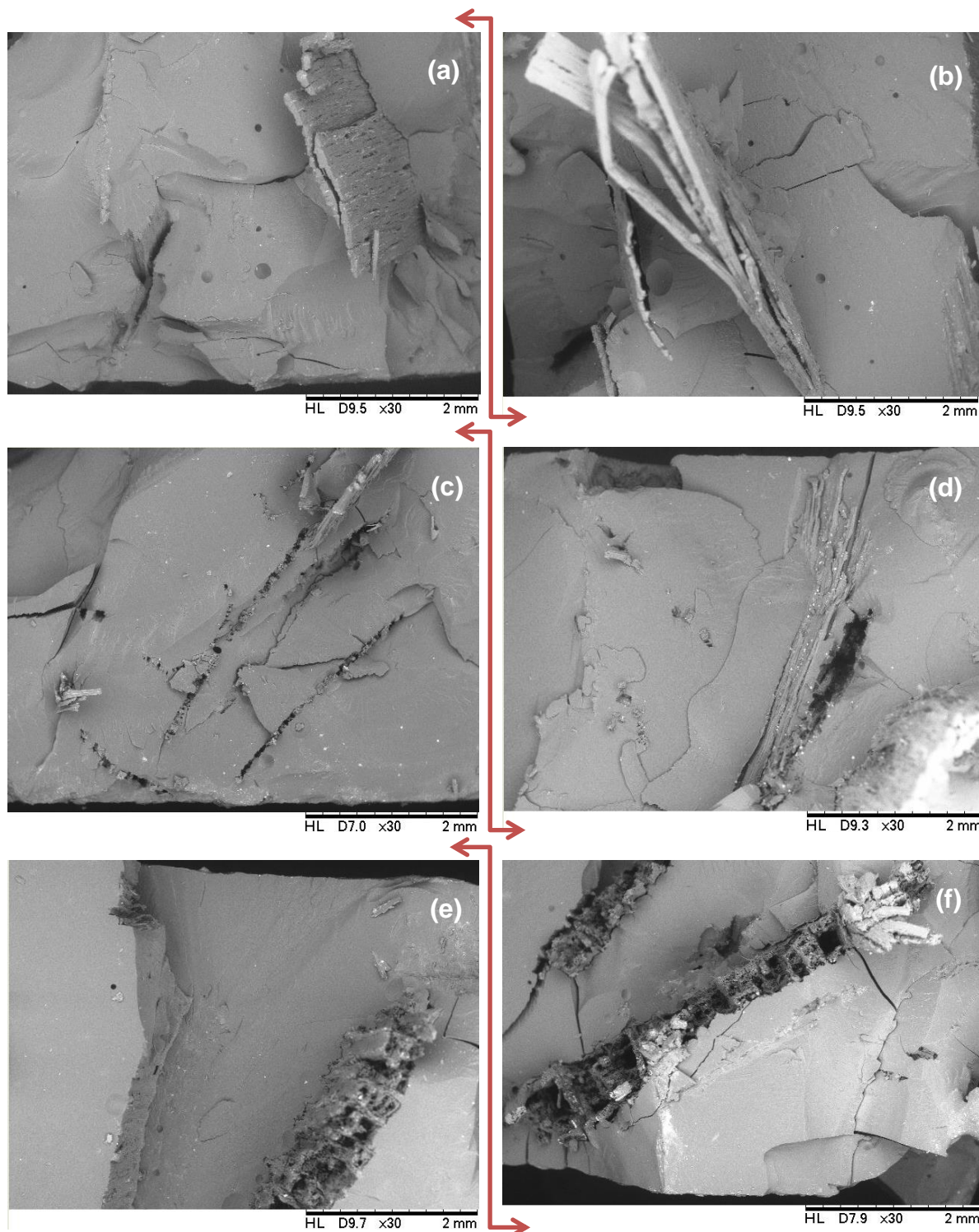
**Figura 69:** Resistência ao Impacto para as fibras curtas 10 mm.

Fonte: Autor, (2018).

Através da análise do gráfico de resultado médio de resistência ao impacto encontrado para as fibras curtas de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba de 10 mm de comprimento pode-se observar que os compósitos que obtiveram melhores resultados ao ensaio de impacto foram os confeccionados com a fibra de Pente de Macaco, que apresenta uma resistência ao impacto de  $47,91 \pm 12,18 \text{KJ/m}^2$ , seguido dos compósitos confeccionados com a fibra de Mutamba que apresenta uma resistência ao impacto de  $44,44 \pm 10,14 \text{KJ/m}^2$ , este resultado é 7% inferior ao melhor resultado obtido e é superior 1,5% ao menor resultado obtido, a menor média que apresenta uma resistência ao impacto que foi observada para os compósitos fabricados com a fibra de Pindaíba que apresenta uma resistência ao impacto de  $43,75 \pm 9,23 \text{KJ/m}^2$ , é 9% inferior ao melhor resultado obtido neste ensaio.

A Figura 70 mostra a morfologia dos corpos de prova do ensaio de impacto dos compósitos com fibras curtas e aleatórias de 10 mm.

**Figura 70:** Micrografia eletrônica dos corpos de prova de impacto de 10 mm. (a), (c) e (e). Ilustra micrografia do lado esquerdo para a mutamba, pente de macaco e pindaíba, (b), (d) e (f) o lado direito do corpo de prova para a mutamba, pente de macaco e pindaíba.



**Fonte:** Autor, (2018).

A Figura 70 (a) e (b) mostra a fratura do compósito com fibras de Mutamba, que assim como nos corpos de prova de 5 mm verifica-se porosidade bem como a presença de muitas extremidades de fibras que são elementos que diminuem a

resistência ao impacto. Já para a Figura 70 (c) e (d) que mostra a fratura dos compósitos de Pente de Macaco que apresentou o maior desempenho entre os compósitos com fibras, novamente podemos observar uniformidade da superfície de fratura, apresentou *pull out*. Para a Figura 70 (e) e (f) observa-se novamente a presença de muitas extremidades de fibras que geram concentradores de tensões e são iniciadores de trincas, como pode ser melhor visualizado na figura (f) diminuindo sua resistência ao impacto.

#### 5.5.3.3 Compósitos reforçados com fibras de 15 mm de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba.

A caracterização mecânica em relação à resistência ao impacto dos compósitos reforçados com as fibras curtas de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 15 mm de comprimento são mostrados os resultados na Tabela 13.

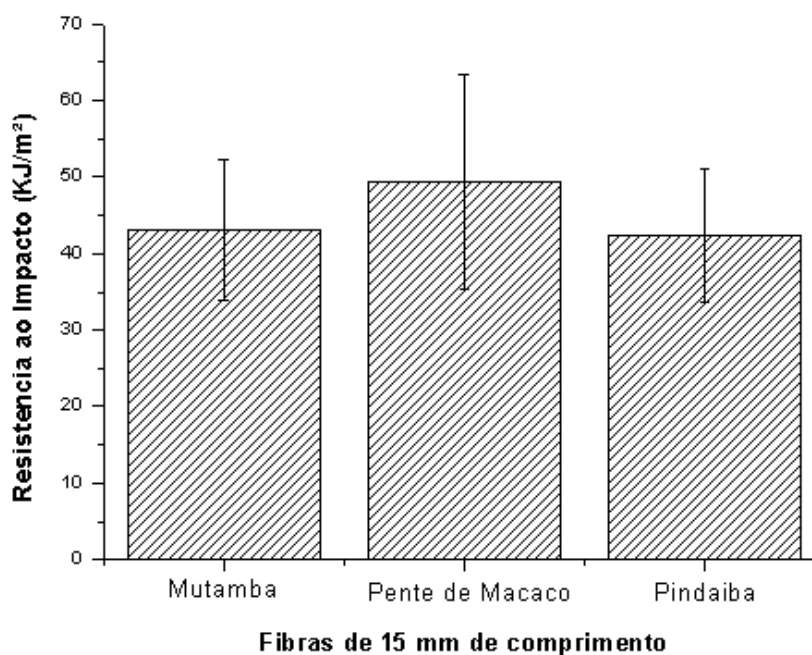
**Tabela 13:** Resultados da caracterização mecânica (impacto) dos compósitos reforçados por fibras curtas de 15 mm de comprimento.

<b>Fibras</b>	<b>Resistência ao impacto média (KJ/m<sup>2</sup>)</b>
Mutamba 15 mm	43,05 ± 9,21
Pente de Macaco 15 mm	49,3 ± 14,05
Pindaiba 15 mm	42,36 ± 8,76

**Fonte:** Autor, (2018).

A Figura 71 mostra o resultado médio de resistência ao Impacto encontrado para as fibras curtas de mutamba, pente de macaco e pindaíba de 15 mm de comprimento.



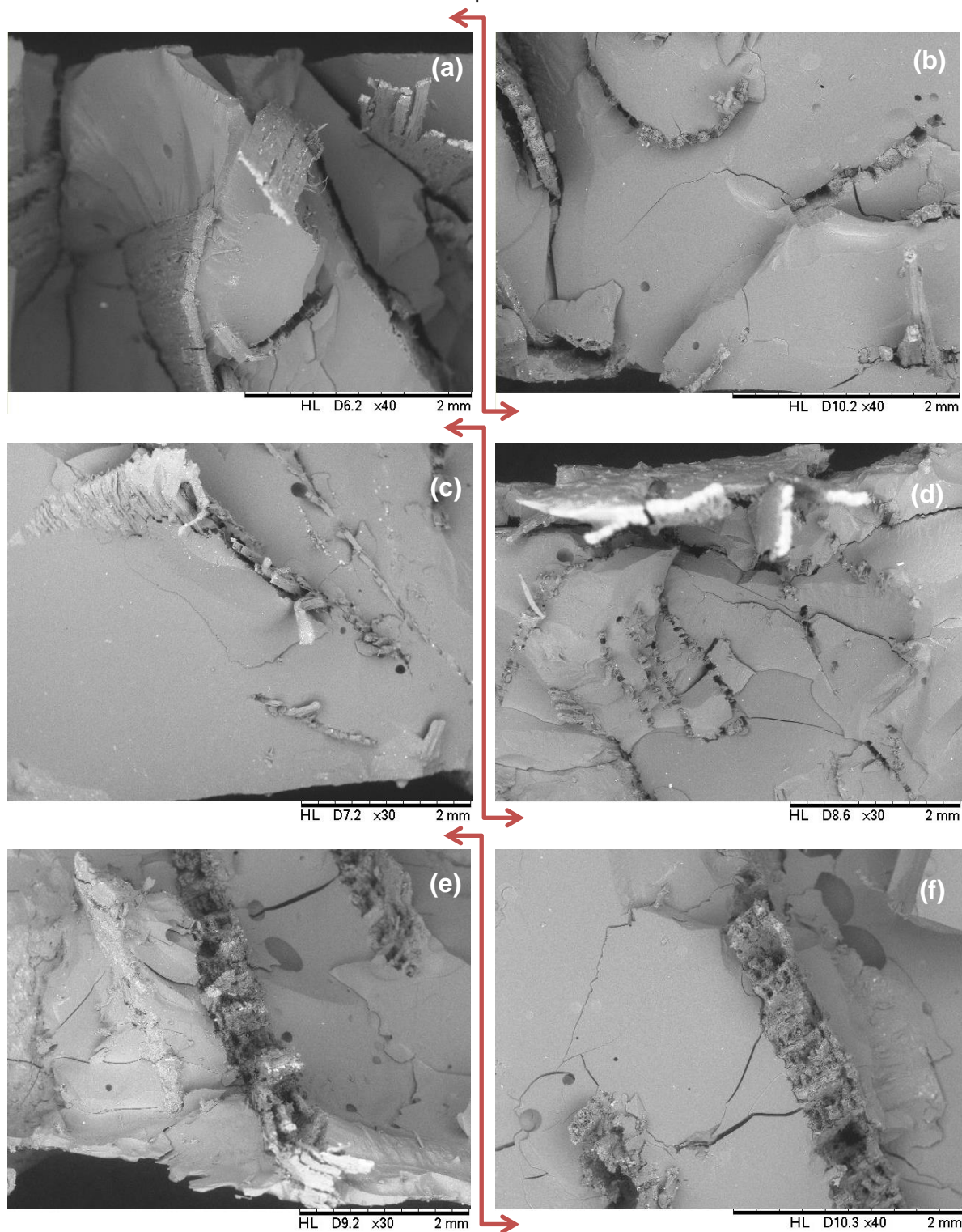
**Figura 71:** Resistência ao Impacto para as fibras curtas 15 mm.

**Fonte:** Autor, (2018)

Através da análise do gráfico de resultado médio de resistência ao impacto encontrado para as fibras curtas de Mutamba, Pente de Macaco e Pindaíba de 15 mm de comprimento pode-se observar que os compósitos que obtiveram melhores resultados ao ensaio de impacto foram os confeccionados com a fibra de Pente de Macaco, que apresenta uma resistência ao impacto de  $49,3 \pm 14,05$  KJ/m<sup>2</sup>, seguido dos compósitos confeccionados com a fibra de Mutamba que apresenta uma resistência ao impacto de  $43,05 \pm 9,21$  KJ/m<sup>2</sup>, este resultado é 12,7% inferior ao melhor resultado obtido e é superior 1,6% ao menor resultado obtido, a menor média que apresenta uma resistência ao impacto que foi observada para os compósitos fabricados com a fibra de Pindaíba que apresenta uma resistência ao impacto de  $42,36 \pm 8,76$  KJ/m<sup>2</sup>, é 14% inferior ao melhor resultado obtido neste ensaio.

A Figura 72 mostra a morfologia dos corpos de prova do ensaio de impacto dos compósitos com fibras curtas e aleatórias de 15 mm.

**Figura 72:** Micrografia eletrônica dos corpos de prova de impacto de 15 mm. (a), (c) e (e). Ilustra micrografia do lado esquerdo para a mutamba, pente de macaco e pindaíba, (b), (d) e (f) o lado direito do corpo de prova para a mutamba, pente de macaco e pindaíba.

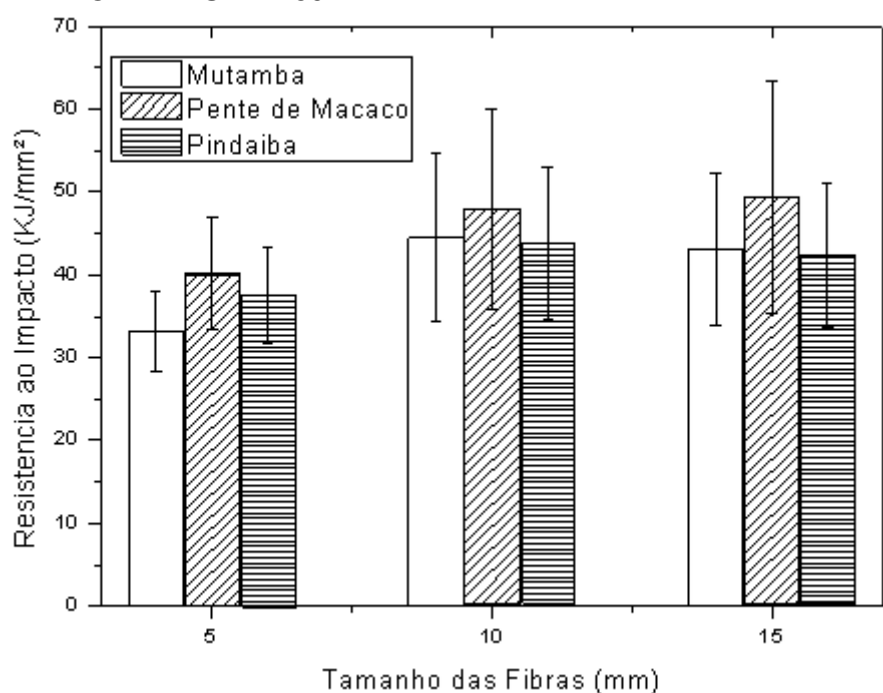


**Fonte:** Autor, (2018).

A Figura 72 (a) e (b) mostra a fratura do compósito com fibras de Mutamba, verifica-se a presença de trincas na matriz porosidade bem como a presença de muitas extremidades de fibras que são elementos que diminuem a resistência ao impacto. A Figura 72 (c) e (d) que mostra a fratura dos compósitos de Pente de Macaco que apresentou o maior desempenho entre os compósitos com fibras, é observado a presença de poros e trincas, porém como houve um aumento no tamanho da fibra e a extremidade da superfície de fratura não teve ocorrência de extremidades de fibras o resultado foi satisfatório. Para a Figura 72 (e) e (f) observa-se uma quantidade significativa de poros bem como a presença nítida de trincas diminuindo assim sua resistência ao impacto.

A Figura 73 apresenta um comparativo da resistência ao impacto pelo tamanho das fibras segundo a norma ASTM D5942-96.

**Figura 73:** Comparativo da resistência ao impacto pelo tamanho das fibras – NORMA ASTM D5942

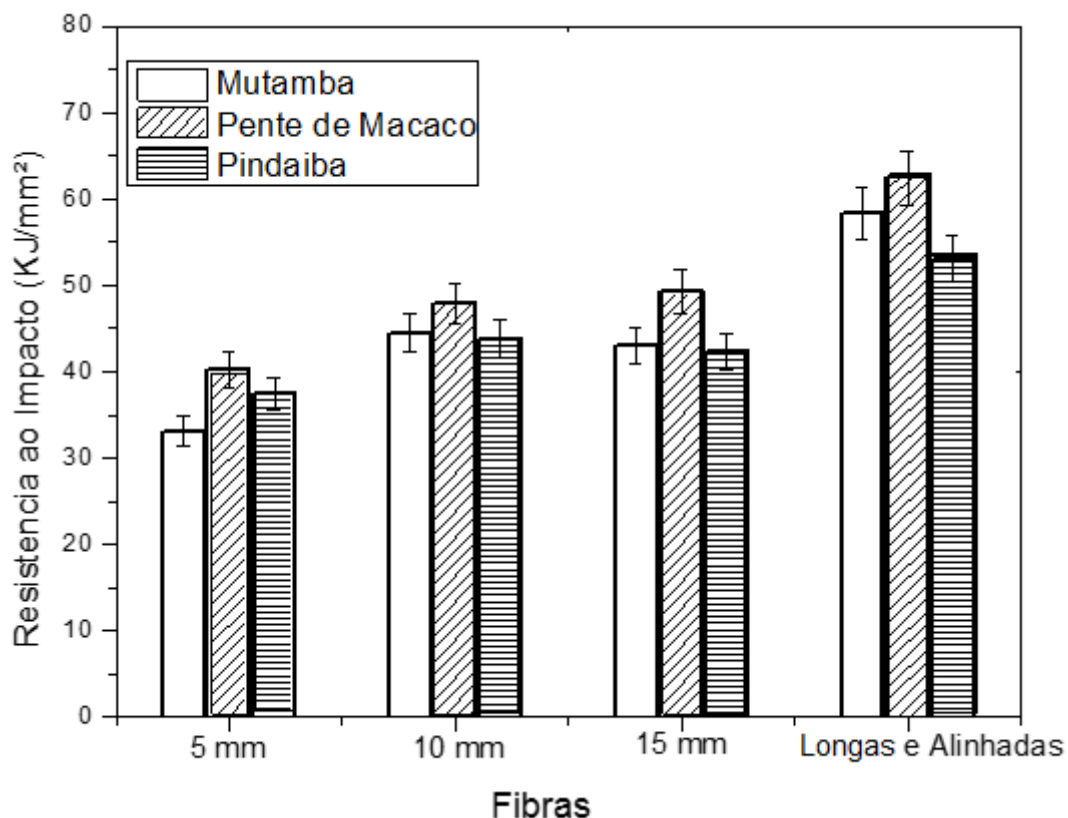


**Fonte:** Autor, (2018).

Os resultados mostram que com o aumento do tamanho da fibra a resistência ao impacto para as fibras foi melhorada, sendo que o Pente de Macaco no tamanho de 15 mm se sobressaiu quando comparado ao tamanho de 10 mm a mutamba e a pindaíba para os tamanhos de 10 e 15 mm não apresentaram grandes variáveis de resistência ao impacto.

A Figura 74 mostra um comparativo da resistência ao impacto pelo tamanho e orientação das fibras.

**Figura 74:** Comparativo da resistência ao impacto pelo tamanho e orientação das fibras



Fonte: Autor, (2018)

Segundo a literatura compósitos com fibras longas e alinhadas tendem a apresentar propriedades mecânicas superiores aos compósitos confeccionadas a partir de fibras aleatórias. Ao comparar os compósitos de fibras longas e alinhadas aos compósitos fabricados com fibras curtas e aleatórias isto foi evidenciado nos resultados obtidos neste trabalho. Maior valor obtido para compósitos com fibras longas e alinhadas foi de  $62,5 \pm 11,92$  KJ/m<sup>2</sup> para a fibra de Pente de Macaco e o maior valor obtido para compósitos com fibras curtas e aleatórias foi de  $49,3 \pm 14,05$  KJ/m<sup>2</sup> também para a fibra de Pente de Macaco no tamanho de 15 mm. O resultado obtido no ensaio de impacto para fibras longas e alinhadas é 21% superior ao melhor resultado obtido para fibras curtas e aleatórias.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1. CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar mecanicamente em tração e impacto os compósitos reforçados com fibras de pente de macaco (*Apeiba tibourbou* Aubl.), mutamba (*Guazuma ulmifolia*) e pindaíba (*Guatteria Poeppigiana*) em matriz poliéster e todos os objetivos específicos tiveram um direcionamento no sentido de consolidar essa caracterização mecânica dos compósitos poliméricos de matriz poliéster reforçados com as fibras naturais já mencionadas.

Diante do exposto estão listadas as seguintes conclusões para esta pesquisa:

- Com relação ao acesso: às fibras o Pente de Macaco se mostrou mais acessível em relação às fibras de Mutamba e Pindaíba. A Mutamba e a Pindaíba apresentaram ainda seu conhecimento populacional mais restrito, por normalmente serem encontradas em regiões de mata densas e fechadas;
- Com relação à extração e preparação das fibras: o pente de macaco e a Mutamba apresentam uma fácil extração manual, já a pindaíba apresentou dificuldades na sua extração em relação às outras fibras, devido a mesma antes de ser extraída ter que passar por um processo de raspagem manual, para então poder ser melhor trabalhada. Já na preparação o pente de Macaco mostrou uma facilidade maior para ser normalizado em relação às demais fibras, uma vez que, a Mutamba e a Pindaíba após a secagem apresentarem algumas distorções dificultando seu manuseio para fabricação das pré-pregs;
- A fibra de Pente de Macaco apresentou menor massa específica em relação à fibra de Mutamba e Pindaíba, o que é uma vantagem para a fabricação de compósitos dada à possibilidade de se fabricar materiais de menor massa específica e conseqüentemente mais leves;

- Os resultados de umidade mostraram um teor relativamente baixo e uniforme para todas as fibras estudadas e apresentaram valores próximos aos encontrados na literatura para outras espécies de fibras naturais;
- No ensaio de tração das fibras foi observado que as fibras de Mutamba e Pindaíba apresentaram valores de força bem superiores ao Pente de Macaco;
- As morfologias das fibras estudadas apresentaram um aspecto superficial irregular com cavidades, microcavidades, relevos e presença de resíduos do processamento de extração manual das fibras, já que as mesmas não passaram por nenhum tratamento superficial;
- Um aspecto importante observado foi à rugosidade da superfície das fibras que é fundamental na adesão fibra-matriz, que está evidenciada em todas as fibras analisadas, porém as fibras de Pindaíba apresentaram uma maior rugosidade;
- Com relação à fabricação dos compósitos as fibras utilizadas demonstraram um comportamento satisfatório de um modo geral, uma vez que, os corpos de prova confeccionados para o desenvolvimento deste trabalho apresentaram uma boa trabalhabilidade e poucos defeitos;
- O valor médio de resistência à tração dos compósitos segundo a norma ASTM D3039M-00 foi de 82,72 MPa para Pindaíba, 70,25 MPa para o Pente de Macaco e 67,76 MPa para a Mutamba. A Pindaíba foi 18% superior a Mutamba e 15 % superior ao Pente de Macaco;
- O valor médio de resistência à tração dos compósitos segundo a norma ASTM D638 – 10 para fibras com 5 mm foi de 7,31 MPa para Pindaíba, 6,77 MPa para o Pente de Macaco e de 4,89 MPa para a Mutamba. A Pindaíba foi 33% superior a Mutamba e 7,3 % superior ao Pente de Macaco;
- O valor médio de resistência à tração dos compósitos segundo a norma ASTM D638 – 10 para fibras com 10 mm foi de 12,18 MPa para Pente de Macaco, 10,14 MPa para a Mutamba e de 9,23 MPa para a Pindaíba. O Pente de Macaco foi 24% superior a Pindaíba e 17% superior a Mutamba;

- O valor médio de resistência à tração dos compósitos segundo a norma ASTM D638 – 10 para fibras com 15 mm foi de 14,05 MPa para Pente de Macaco, 9,21 MPa para a Mutamba e de 8,76 MPa para a Pindaíba. O Pente de Macaco foi 38% superior a Pindaíba e 34% superior a Mutamba;
- O valor médio de resistência ao impacto dos compósitos segundo a norma ASTM D5942-96 para fibras contínuas e alinhadas foi de 62,5 KJ/m<sup>2</sup> para o Pente de Macaco, 58,33 KJ/m<sup>2</sup> para a Mutamba e 53,12 KJ/m<sup>2</sup> para a Pindaíba. O Pente de Macaco foi 15% superior a Pindaíba e 6,7% superior a Mutamba;
- O valor médio de resistência ao impacto dos compósitos segundo a norma ASTM D5942-96 para fibras com 5 mm foi de 40,27 KJ/m<sup>2</sup> para o Pente de Macaco, 37,5 KJ/m<sup>2</sup> para a Pindaíba e 33,15 KJ/m<sup>2</sup> para a Mutamba. O Pente de Macaco foi 17,7% superior a Mutamba e 7% superior a Pindaíba;
- O valor médio de resistência ao impacto dos compósitos segundo a norma ASTM D5942-96 para fibras com 10 mm foi de 47,91 KJ/m<sup>2</sup> para o Pente de Macaco, 44,44 KJ/m<sup>2</sup> para a Mutamba e 43,75 KJ/m<sup>2</sup> para a Pindaíba. O Pente de Macaco 9% superior a Pindaíba e 7% superior a Mutamba;
- O valor médio de resistência ao impacto dos compósitos segundo a norma ASTM D5942-96 para fibras com 15 mm foi de 49,3 KJ/m<sup>2</sup> para o Pente de Macaco, 43,05 KJ/m<sup>2</sup> para a Mutamba e 42,36 KJ/m<sup>2</sup> para a Pindaíba. O Pente de Macaco foi 14% superior a Pindaíba e 12,7% superior a Mutamba;
- As propriedades mecânicas em tração mostram coerência com as propriedades mecânicas de Impacto, para todos os compósitos estudados;
- A morfologia dos compósitos estudados pelo método de microscopia eletrônica de varredura foi satisfatória indicando falhas dominantes em cada compósito fabricado, e mostrando as características das superfícies de fraturas dos mesmos;
- O mecanismo de falha dominante no ensaio de tração nos compósitos estudados foi *pull out* e a propagação de trincas, com pequenas incidências de

porosidade. Esses mecanismos foram determinantes nos resultados de resistência à tração dos compósitos;

- O mecanismo de falha dominante no ensaio de impacto dos compósitos estudados foi a presença de muitas extremidades de fibras, propagação de trincas e porosidades, com pequenas incidências de *pull out*. Esses mecanismos foram determinantes nos resultados de resistência ao impacto dos compósitos;
- Os resultados de tração e impacto se mostraram bastantes coerentes com os mecanismos de falhas evidenciados nos compósitos desta pesquisa, ou seja, os melhores resultados obtidos foram os que tiveram pouco incidência de falhas catastróficas;
- Os resultados dos ensaios mecânicos de tração dos compósitos para as fibras estudadas em muitos casos se mostraram superiores aos resultados obtidos na literatura pesquisada para compósitos confeccionados com fibras de Juta, por exemplo.



## 6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Fabricar compósitos utilizando mais de uma das fibras estudadas com objetivo de avaliar a interação entre elas;
- ✓ Realizar tratamento químico nas fibras com objetivo de avaliar a interação fibra/matriz;
- ✓ Fabricar compósitos utilizando direções e ângulos diferentes no alinhamento das fibras;
- ✓ Realizar envelhecimento natural e avaliar o comportamento mecânico;
- ✓ Fazer o estudo de absorção de água nos compósitos;
- ✓ Utilizar ferramentas computacionais para realização de planejamento experimental no estudo de configurações e composições otimizadas dos compósitos;
- ✓ Utilizar outras matrizes poliméricas aplicando nas fibras estudadas para avaliar o seu comportamento mecânico;
- ✓ Realizar outros ensaios mecânicos, como flexão e fadiga nos compósitos estudados;

## REFERÊNCIAS

ALBINANTE, S. R.; PACHECO, E. B. A. V.; VISCONTE, L. L. Y; (2013). **Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas**. Quim. Nova, Vol. 36, Nº 1, PP 114-122, 2013.

ANDERSON, T.L. **Fracture mechanics: Fundamentals and applications**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 1995.

ASTM D 3822 – FIBERS. **Standard test method for tensile properties of single textile**. Annual Book of ASTM Standards, 1996.

ASTM D 5942 - 96, "**Standard Test Method for Determining Charpy Impact Strength of Plastic**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM D 638 - 10, "**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM D3039 / D3039 M – 00, "**Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

AZIZ, S. H. et al. Modified polyester resins for natural fibre composites. **Composites Science and Technology**, n. 65, p. 525-535, 2005.

BARBOSA, P. A **Características Estruturais e Propriedades De Compósitos Poliméricos Reforçados Com Fibras De Buriti**. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Do Norte Fluminense – Uenf Campos Dos Goytacazes – Rj Dezembro – 2011.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. v. 2, 627 p.

CARVALHO, P. E.R. **Mutamba Guazuma ulmifolia**: Taxonomia e Nomenclatura. 2007.

CAVALCANTE, J. M. de F. **Desenvolvimento de um processo para a incorporação de fios de juta em matriz termoplástica e caracterização dos compósitos**. Tese (Doutorado), Programa de doutorado em engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, PP. 172, 2008.

COLEMAN J. N., KHAN U., BLAU W. J., GUN'KO Y. K., **Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube –polymer composites**, *Carbon*, v. 44, n. 9, pág. 1624-1652, 2006.

COSTA D. S **Caracterização de Materiais Compósitos de Matriz Poliéster e Fibras de Bambu, Sisal e Vidro e Híbridos Bambu/Sisal, Bambu/Vidro e Sisal/Vidro**. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2012.

COSTA D. S **estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais** (Tese de Doutorado) - Universidade Federal do Para- 2016.

DE PAULA, P. G. P **Formulação e Caracterização De Compósitos Com Fibras Vegetais E Matriz Termoplástica**. Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais). Outubro De 2011.

DIAS, M. C. **Estudos taxonômicos do gênero Xylopia L. (Annonaceae) no Brasil extra-amazônico**. 1988. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1988.

ESMERALDO, M. A. **Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

FONTELES, C.A.L **COMPÓSITOS POLIMÉRICOS À BASE DE MATRIZ TERMOFIXA E COCO BABAÇU (*Orbignya phalerata*): ANÁLISE POR SORÇÃO DE ÁGUA E PROPRIEDADES MECÂNICAS** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais) Universidade Federal do Piauí, 2013.

FRANCO, L. A. L. **Análise fractográfica de compósitos poliméricos estruturais.** Dissertação (Mestrado em Física e Química de Materiais Aeroespaciais) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

GIRNOS, E. C. **Morfologia, anatomia e aspectos da germinação de *Apeiba tibourbou* Aubl. (Tiliaceae).** Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Faculdade de Ciências Biologia - UNESP, Rio Claro. 1993.

GONÇALVES. S. C. D; FREITAS. O. D; SOUTO. O. K. K; BARBOSA. X. R; FERREIRA. R. T. **Fibras celulósicas.** (RELATÓRIO). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal-RN Novembro de 2003.

GUIMARÃES FILHO, M.A.S. **Avaliação mecânica de compósitos de resina poliéster reforçada com fibras longas de babaçu antes e após a Mercerização.** 2011. 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Engenharia de Materiais - Universidade Federal do Pará, 2011.

HULL, D. **Na Introduction to Composite Material.** Ed.Cambridge University Press, Cambridge, 1989.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An Introduction to Composite Materials, Cambridge Solid State Science Series,** Second Edition, Cambridge, 1996.

JUNIOR, L.S. **Descrição macroscópica e microscópica da madeira aplicada na identificação das principais espécies comercializadas no Estado de São Paulo – Progamas “São Paulo amigos da Amazônia” e “Cadmadeira”.** (Dissertação de Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2013.

KLOCK, U ; ANDRADE S. **A Química Da Madeira** (4ª. Edição Revisada) Universidade Federal Do Paraná Setor De Ciências Agrárias Departamento De Engenharia E Tecnologia Florestal. Curitiba, 2013.

LOPES, I. A. F. **Estudo do Processo de Infusão a vácuo em Materiais Compósitos – produção de tampa de bagageira para autocarro.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto, Porto, 2009.

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

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** 2. Ed. Nova Odessa, SP: Editora Plantarum, 1998. 352 p.

LOHMANN, L.G. **Bignoniaceae in Lista de Espécies da Flora do Brasil.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2010.

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

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia.** São Paulo: Artliber, 2011.

MATOS V. P, FERREIRA, E. G. B. S, FERREIRA, R. L.C, SENA, L. H. M, SALES A. G. F. A, **Efeito do tipo de embalagem e do ambiente de armazenamento sobre a germinação e o vigor das sementes de apeiba tibourbou AUBL.,** R. Árvore, Viçosa-MG, v.32, n.4, p.617, 2008.

MELO, D F. DOS A; CUNHA, L. C; CONCEIÇÃO, E. C; MELO, D DE S; PEREIRA, M. E; LEÃO, L. P. **Avaliação Toxicológica Do Extrato Seco Padronizado De Apeiba Tibourbou Aubl. (Tiliaceae), Em Camundongos.** Universidade Federal de Goiás,

Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde. “Núcleo de Estudos e Pesquisas Tóxico-Farmacológicas (Nepet) / Faculdade de Farmácia-UFG;” 2012/2016.

**NASCIMENTO, D. C. O. Análise das propriedades de compósitos de fibras de piaçava e matriz de resina epóxi.** Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2009.

**NETO, J.M.A. Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2016.

**NÓBREGA, M. M. S. Compósitos de Matriz Poliéster com Fibras de Caroá Neoglaziovia Variegata: Caracterização Mecânica e Sorção de Água.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Centro de Ciências e Tecnologia - Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande: PB, 2007.

**OLIVEIRA, J. O. Compósito reforçado com sisal para aplicação na moda. 2012, 65p. Dissertação** Mestrado (Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2012.

**OLIVEIRA, W. C. Comportamento em tração e impacto de materiais compósitos de matriz poliéster e adição de cargas obtidas a partir da cominuição de fibras vegetais de Mutumba, Pente de Macaco e Pindaíba.** Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia de Materiais. Unifesspa 2016.

**PACHECO, V. M; MATOS, P. V; FERREIRA. C. L. R; FELICIANO. P. L. A. Germinação de sementes de Apeiba tibourbou Aubl. em função de diferentes substratos e temperaturas.** SCIENTIA FORESTALIS. (Artigo). Março 2007.

**PEREIRA, J. C. Curso de projeto estrutural com materiais compostos.** UFSC, 99 p., 2000.

RIBEIRO, M. M; **Comportamento em tração / flexão e aspecto fractográfico de matriz poliéster com pó de aerosil e de madeira com a inclusão de fibras curtas de sisal e juta.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Mestrado em Engenharia Mecânica, Belém, 2015.

RODRIGUES DA J. S **estudo da técnica de infusão de resina aplicada à fabricação de compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras naturais da Amazônia.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Para- 2014.

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

ROMÃO, C.M.N. **Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz poliméricas reforçados com fibras naturais.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia mecânica, Universidade do Porto, 2003.

SANTOS.J.E.M. **Placas laminadas de poliéster e fibras de juta em diferentes configurações.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, 2015.

SANTOS, H.M **Metodologia de Extração de Fibras Vegetais e Confecção de Corpos de Prova de Compósito de Matriz Poliéster, em Conformidade com a Norma ASTM D638 e ASTM D3039.** Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia de Materiais. Unifesspa 2016.

SILVA I. L. A **propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta.** (Tese de doutorado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF Campos dos Goytacazes – RJ 2014.

SILVA, F. A.; CHAWLA, N.; TOLEDO FILHO, R. D. **Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers.** Composites Science and Technology, n. 68, p. 3438–3443, 2008.

SILVA, R. V. **Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, H. S. P. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro**. Dissertação (Mestrado em Minas, Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2010.