



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

**CENTRO DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE  
MATERIAIS**

**RAIANNE FERREIRA BUSON**

**INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE  
RESINA POLIÉSTER INSATURADA REFORÇADOS COM FIBRAS DE BAMBU  
NATURAL E MODIFICADAS SUPERFICIALMENTE**

**FORTALEZA**

**2018**

RAIANNE FERREIRA BUSON

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE  
RESINA POLIÉSTER INSATURADA REFORÇADOS COM FIBRAS DE BAMBU  
NATURAL E MODIFICADAS SUPERFICIALMENTE

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de Concentração: Propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B985i Buson, Raianne Ferreira.  
Investigação das propriedades mecânicas dos compósitos de resina poliéster insaturada reforçados com fibras de bambu natural e modificadas superficialmente / Raianne Ferreira Buson. – 2018.  
90 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus.

1. Compósitos. 2. Fibras de bambu. 3. Caracterização mecânica. I. Título.

CDD 620.11

---

RAIANNE FERREIRA BUSON

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE  
RESINA POLIÉSTER INSATURADA REFORÇADOS COM FIBRAS DE BAMBU  
NATURAL E MODIFICADAS SUPERFICIALMENTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de concentração: Propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Aprovada em: 18/06/2018

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Enio Pontes de Deus (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alexandre de Souza Rios  
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada seria possível, por todas as graças que me concedeu durante toda minha vida acadêmica, e por todas as lutas vencidas durante esse mestrado.

Agradeço ao incentivo da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP pelo apoio financeiro que tive para desenvolver e concluir este projeto. Ao SENAI, que me deu toda uma estrutura para desenvolver grande parte desta pesquisa, e a Universidade Federal do Ceará, pela disposição dos laboratórios para realizar algumas análises necessárias para a conclusão deste projeto.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Enio Pontes de Deus, por todos os ensinamentos adquiridos durante a realização desse mestrado. Ao meu amigo e professor Me. Luiz Flávio, que foi meu principal incentivador, que me deu apoio e transformou momentos de trevas em luz.

À minha família por ter me ensinado a importância de correr atrás dos meus sonhos, de maneira digna, valorizando cada momento como se fosse único. Aos meus pais pela paciência, por me aconselharem e pelo carinho que me deram a minha vida inteira, em especial a minha mãe, que sempre foi minha maior fã, que sempre acreditou em mim e me apoiou a cada passo dado. Às minhas irmãs por todo o companheirismo e amor que sempre tivemos umas com as outras, e aos meus sobrinhos que eu tanto amo, que amenizaram minhas angústias com sorrisos.

Aos meus amigos e namorado, que sempre me alegraram e me aconselharam nos momentos de fraquezas, em especial a Marcela e Jamyson, por todos os momentos que partilhamos. Aos amigos que pude conquistar durante toda a minha jornada acadêmica, que sempre estiveram ao meu lado, tornando essa caminhada mais divertida.

Muito obrigada a todos vocês!

“Os dias prósperos não vêm por acaso, nascem de muita fadiga e persistência.”

(Henry Ford)

## RESUMO

A busca pela sustentabilidade tem incentivado a criação de novos materiais que utilizam recursos naturais em sua composição, que oferecem boas propriedades, baixo custo de obtenção e não agridem o meio ambiente. A fibra de bambu vem sendo bastante estudada como reforço de compósitos por oferecer leveza e resistência mecânica ao produto final, substituindo o uso de matérias primas provenientes do petróleo. O objetivo do presente trabalho é o tratamento e caracterização de fibras de bambu e, por fim, a aplicação das mesmas em compósitos poliméricos como agente de reforço. Foram realizados tratamentos superficiais de alcalinização e acetilação nas fibras de bambu buscando melhorar a adesão da fibra/matriz, e por consequência melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos em seguida, as fibras foram caracterizadas através de ensaios químicos, físicos, térmicos, mecânicos e morfológicos. Após a incorporação das fibras na matriz polimérica de poliéster insaturado, com teor mássico de 10%, 20% e 30% de fibras, os compósitos foram analisados através de ensaios de absorção de água, densidade, microscopia eletrônica de varredura e propriedades mecânicas de tração e impacto Izod. Através da espectroscopia de infravermelho foi possível constatar a eficácia dos tratamentos realizados, devido ao crescimento da banda correspondente ao grupo carbonila, indicando que a fibra acetilada ficou mais hidrofóbica, consonante com o ensaio de absorção de água, onde a fibra acetilada absorveu menor quantidade de água que as demais. Quando acetilada, a fibra de bambu ganhou estabilidade térmica de aproximadamente 60°C e, através do MEV, notou-se o aumento da rugosidade das fibras alcalina e acetilada, evidenciando a melhora na adesão fibra/matriz. Os resultados das propriedades mecânicas de tração nas fibras corroboram com os encontrados no ensaio de difração de raios-x, sendo maior para a fibra alcalina e menor para a fibra acetilada, que perdeu resistência mecânica devido ao tratamento com ácido. As propriedades mecânicas de tração e impacto dos compósitos melhoraram com o aumento do teor de fibras incorporadas, concluindo que as mesmas agiram como reforço nos compósitos. O melhor desempenho mecânico de tração foi do compósito com 30% de fibra alcalina, reforçando a tensão máxima em mais de 185%. Através do MEV nos compósitos foi comprovada a melhora da adesão fibra/matriz após os tratamentos, onde notou-se a presença de resina sobre as fibras e o cisalhamento da resina. Para o ensaio de impacto Izod, os compósitos com fibra acetilada obtiveram maior energia de impacto, fato justificado pela melhor adesão fibra/matriz, fato que comprova a eficácia do tratamento por acetilação.

**Palavras-chave:** Compósitos, Fibra de bambu, Caracterização mecânica.

## ABSTRACT

The search for sustainability has encouraged the creation of new resources that use natural in their composition, which good properties, low cost of search and do not harm the environment. Bamboo fiber has been widely studied as a composite reinforcement because it offers lightness and mechanical resistance to the final product, replacing the use of raw materials made from petroleum. The objective of the present work is the treatment and characterization of bamboo fibers and, finally, their application in polymeric composites as a reinforcing agent. Surface treatments of alkalization and acetylation were carried out on the bamboo fibers, and the fibers were then characterized by chemical, physical, thermal, mechanical, and morphological tests. After the incorporation of the fibers in the polymer matrix of unsaturated polyester with 10%, 20%, and 30% of fibers, the composites were analyzed by water absorption, density, scanning electron microscopy, mechanical tensile, and Izod impact. Through the FTIR, it was possible to verify the efficiency of the treatments performed, due to the growth of the band corresponding to the carbonyl group, indicating that the acetylated fiber was more hydrophobic, consonant with the water absorption test, where an acetylated fiber absorbed less water than as much. When acetylated, the bamboo fiber gained thermal stability of approximately 60°C and, through the MEV, an increase of fiber roughness was observed, evidencing the improvement in fiber / matrix adhesion. The results of the mechanical properties of traction in the fibers corroborate with those found in the x-ray diffraction test, being higher for the alkaline fiber and smaller for the acetylated fiber, which lost mechanical resistance due to acid treatment. The mechanical properties of traction and impact of the composites improved with the increase of the incorporated fiber content, concluding that they acted as reinforcement in the composites. The best mechanical tensile performance was of the composite with 30% of alkaline fiber, reinforcing the maximum tension in more than 185%. Through the SEM in the composites, the improvement of the fiber / matrix adhesion after the treatments was verified, where the presence of resin on the fibers and resin shear was noticed. For the Izod impact test, the composites with acetylated fiber obtained higher impact energy than the others, a fact justified by the better fiber / matrix adhesion, a fact that proves the effectiveness of the treatment by acetylation.

**Keywords:** Composites, Bamboo fiber, Mechanical characterization.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação e divisões das fibras utilizadas como reforço. ....	19
Figura 2: Classificação das fibras vegetais. ....	19
Figura 3: Estrutura (a) e morfologia do bambu (b). ....	21
Figura 4: Melhora na adesão mecânica da fibra com o uso de tratamentos superficiais. ....	25
Figura 5: MEV nas fibras não tratadas (a) e após alcalinização com 6% (b), 8% (c), 10% (d), 15% (e) e 25% (f). ....	26
Figura 6: Microscopia eletrônica de varredura da fibra de bambu natural (a) e fibra de bambu após a alcalinização a 2% de NaOH (b). ....	26
Figura 7: Microscopia eletrônica de varredura da fibra de bambu após o tratamento de acetilação ....	28
Figura 8: Esquema de um material compósito. ....	29
Figura 9: Classificação dos tipos de matrizes. ....	29
Figura 10: Classificação dos tipos de reforços ....	30
Figura 11: Fibras contínuas unidirecionais (a), fibras descontínuas alinhadas (b), fibras descontínuas aleatórias (c), fibras bidirecionais (d), tecidos tridimensionais. ....	30
Figura 12: Esquema da produção e caracterização das fibras. ....	33
Figura 13: Esquema da confecção e caracterização dos corpos de prova. ....	33
Figura 14: Processo de obtenção das fibras de bambu. ....	34
Figura 15: Esquema do processo de alcalinização. ....	35
Figura 16: Processo de alcalinização das fibras. ....	36
Figura 17: Phmetro utilizado. ....	36
Figura 18: Reator utilizado para realizar a acetilação das fibras. ....	37
Figura 19: Esquema do processo de acetilação. ....	37
Figura 20: Projetor de perfil utilizado (a) e leitura da área de uma das fibras analisadas (b). .	38
Figura 21: Picnômetro (a) e balança analítica (b). ....	39
Figura 22: Metalizadora utilizada. ....	40
Figura 23: Amostras das fibras metalizadas. ....	40
Figura 24: Microscópio eletrônico de varredura utilizado. ....	40
Figura 25: Espectrofotômetro utilizado. ....	41
Figura 26: Balança térmica. ....	41
Figura 27: Difratorômetro de Raios-X. ....	42

Figura 28: Corpo de prova de tração das fibras (a) e ensaio de tração nas fibras (b).....	43
Figura 29: Molde para confecção dos corpos de provas. ....	43
Figura 30: Corpos de prova de tração (a) e impacto izod (b).....	46
Figura 31: Esquema da obtenção da densidade dos corpos de prova.....	47
Figura 32: Ensaio de tração. ....	48
Figura 33: Entalhador manual (a), corpo de prova com entalhe (b) e pêndulo de impacto (c).49	
Figura 34: Impurezas na fibra natural de bambu (a) e região fibrosa (b).....	52
Figura 35: Rugosidade da fibra natural de bambu.....	52
Figura 36: Rugosidade da fibra alcalina. ....	53
Figura 37: Aparecimento de microfibrilas e microporos com o tratamento de alcalinização. .53	
Figura 38: Rugosidade da fibra acetilada. ....	54
Figura 39: Microfibrilas e microporos expostos da fibra acetilada. ....	55
Figura 40: Comparação das rugosidades das fibras natural (a), alcalina (b) e acetilada (c) em 5000x.....	55
Figura 41: Espectro amostras de bambu natural, alcalina e acetilada. ....	56
Figura 42: Análise TG e DTG em N <sub>2</sub> na fibra de bambu natural, alcalino e acetilado. ....	57
Figura 43: Análise TG e DTG em ar sintético na fibra de bambu natural, alcalino e acetilado. .....	58
Figura 44: Difratoograma de Raios-X nas fibras de bambu natural, alcalina e acetilada. ....	59
Figura 45: Fibra rompida após o ensaio de tração.....	60
Figura 46: Desempenho mecânico de tração dos corpos de prova de 100%.....	63
Figura 47: Desempenho mecânico de tração dos corpos de prova com incorporação de 10% de fibra natural, alcalina e acetilada.....	65
Figura 48: Falta de homogeneidade nos corpos de prova com 10% de fibras .....	65
Figura 49: Desempenho mecânico de tração dos corpos de prova com incorporação de 20% de fibra natural, alcalina e acetilada.....	67
Figura 50: Fratura uniforme nos corpos de prova com incorporação de 20% de fibras natural (a), alcalina (b) e acetilada (c).....	68
Figura 51: Desempenho mecânico de tração dos corpos de prova com incorporação de 30% de fibra natural, alcalina e acetilada.....	70
Figura 52: Fratura uniforme nos corpos de prova com incorporação de 30% de fibra natural (a), alcalina (b) e acetilada (c).....	70
Figura 53: Resina Compósito com fibra natural com aumento de 5000x. ....	73

Figura 54: Compósito com fibra alcalina com aumento de 5000x.....	74
Figura 55: Presença de resina sobre as fibras alcalinas com aumento de 1300x.....	74
Figura 56: Compósito com fibra acetilada com aumento de 600x.....	75
Figura 57: Cisalhamento da resina sobre as fibras com aumento de 5000x.....	75
Figura 58: Ruptura do corpo de prova de 100% Resina no ensaio de impacto.....	76
Figura 59: Fratura nos corpos de prova com 10% de fibra natural (a), alcalina (b) e acetilada (c).....	78
Figura 60: Fratura nos corpos de prova com 20% de fibra natural (a), alcalina (b) e acetilada (c).....	79
Figura 61: Fratura nos corpos de prova com 30% de fibra natural (a), alcalina (b) e acetilada (c).....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens do uso de fibras naturais em compósitos.....	18
Tabela 2: Propriedades mecânicas das fibras vegetais.....	20
Tabela 3: Principais constituintes do bambu.....	23
Tabela 4: Relação do diâmetro e resistência à tração das fibras de bambu.....	24
Tabela 5: Efeitos do tratamento alcalino em fibras vegetais.....	25
Tabela 6: Efeitos do tratamento de acetilação em fibras vegetais.....	27
Tabela 7: Propriedades das resinas termofixas.....	31
Tabela 8: Tipos de resina poliéster insaturada e suas características.....	31
Tabela 9: Propriedades da resina de poliéster utilizada.....	34
Tabela 10: Propriedades do catalisador utilizado.....	35
Tabela 11: Composição dos corpos de prova produzidos.....	44
Tabela 12: Dimensionamento da área média das fibras.....	50
Tabela 13: Densidade média das fibras.....	51
Tabela 14: Percentual de absorção média de água das fibras naturais, alcalinas e acetiladas..	51
Tabela 15: Espécies encontradas pelo FTIR.....	56
Tabela 16: Eventos encontrados na termogravimetria.....	59
Tabela 17: Cristalinidade das fibras de bambu natural, alcalina e acetilada.....	60
Tabela 18: Propriedades mecânicas das fibras natural, alcalina e acetilada.....	60
Tabela 19: Densidade média dos corpos de prova.....	61
Tabela 20: Absorção média de água nos compósitos.....	62
Tabela 21: Propriedades mecânicas de tração da resina de poliéster insaturada.....	63
Tabela 22: Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 10% de fibra natural .....	64
Tabela 23: Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 10% de fibra alcalina .....	64
Tabela 24: Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 10% de fibra acetilada .....	64
Tabela 25: Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 20% de fibra natural .....	66
Tabela 26: Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 20% de fibra alcalina .....	66

Tabela 27: Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 20% de fibra acetilada .....	67
Tabela 28: Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 30% de fibra natural .....	68
Tabela 29: Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 30% de fibra alcalina .....	69
Tabela 30: Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 30% de fibra acetilada .....	69
Tabela 31: Tenacidade média dos compósitos. ....	71
Tabela 32: Resumo das propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova. ....	72
Tabela 33: Propriedades mecânicas de impacto dos corpos de prova com 100% Resina. ....	76
Tabela 34: Propriedades mecânicas de impacto dos corpos de prova com 10% de fibra natural, alcalina e acetilada. ....	77
Tabela 35: Propriedades mecânicas de impacto dos corpos de prova com 20% de fibra natural, alcalina e acetilada. ....	79
Tabela 36: Propriedades mecânicas de impacto dos corpos de prova com 30% de fibra natural, alcalina e acetilada. ....	80
Tabela 37: Resumo das propriedades mecânicas de impacto dos corpos de prova. ....	81

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos do trabalho</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Fibras naturais</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Fibras vegetais</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2.1</b>	<i>Bambu</i> .....	<b>20</b>
<b>2.2.2</b>	<i>Constituintes do bambu</i> .....	<b>22</b>
<b>2.2.3</b>	<i>Fibras de bambu</i> .....	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Tratamentos superficiais nas fibras vegetais</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4</b>	<b>Materiais Compósitos</b> .....	<b>28</b>
<b>2.4.1</b>	<i>Definição</i> .....	<b>28</b>
<b>2.4.2</b>	<i>Matriz polimérica: Resina poliéster insaturada</i> .....	<b>31</b>
<b>2.4.3</b>	<i>Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais</i> .....	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2</b>	<b>Tratamentos das fibras</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2.1</b>	<i>Alcalinização</i> .....	<b>35</b>
<b>3.2.2</b>	<i>Acetilação</i> .....	<b>36</b>
<b>3.3</b>	<b>Ensaio nas fibras</b> .....	<b>38</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Dimensionamento</i> .....	<b>38</b>
<b>3.3.2</b>	<i>Densidade</i> .....	<b>38</b>
<b>3.3.3</b>	<i>Absorção de água</i> .....	<b>39</b>
<b>3.3.4</b>	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i> .....	<b>39</b>
<b>3.3.5</b>	<i>Espectroscopia de Infravermelho</i> .....	<b>41</b>
<b>3.3.6</b>	<i>Termogravimetria</i> .....	<b>41</b>
<b>3.3.7</b>	<i>Difração de Raios-X</i> .....	<b>42</b>

3.3.8 Tração .....	42
3.4 Produção do molde e definição de composição dos corpos de prova.....	43
3.4.1 Cálculo das proporções de resina e fibra .....	44
3.5 Produção dos corpos de prova.....	45
3.6 Ensaio nos corpos de prova .....	46
3.6.1 Densidade.....	46
3.6.2 Absorção de água.....	47
3.6.3 Tração .....	47
3.6.4 Microscopia eletrônica de varredura .....	48
3.6.5 Impacto Izod .....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	50
4.1 Ensaio nas fibras .....	50
4.1.1 Dimensionamento.....	50
4.1.2 Densidade.....	50
4.1.3 Absorção de água.....	51
4.1.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	51
4.1.5 Espectroscopia de Infravermelho .....	55
4.1.6 Termogravimetria .....	57
4.1.7 Difração de Raios-X .....	59
4.1.8 Tração .....	60
4.2 Ensaio nos corpos de prova .....	61
4.2.1 Densidade.....	61
4.2.2 Absorção de água.....	62
4.2.3 Tração .....	63
4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	72
4.2.5 Impacto Izod .....	76
5 CONCLUSÃO.....	82

<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A busca por novos materiais, com melhores propriedades, fez surgir os materiais compósitos, que combinam dois ou mais materiais para obter propriedades melhores e específicas como leveza e durabilidade. Eles vêm sendo bastante estudados e utilizados pela sociedade em diversas aplicações, sendo os mais utilizados os compósitos com matriz polimérica, reforçados por fibras sintéticas, em especial a fibra de vidro e de carbono, bastante encontrados na indústria aeronáutica, automobilística, naval e civil (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Com a crescente preocupação com o meio ambiente devido os impactos ambientais causados por toda a vida útil das fibras sintéticas, desde a sua produção, que acarreta uma grande emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, visto que elas são provenientes do petróleo, até o seu descarte, pois não são materiais renováveis nem biodegradáveis, pesquisadores vêm buscando novas alternativas utilizando fibras naturais vegetais como reforço de compósitos poliméricos que, além do aspecto ambiental e econômico, visto que utiliza um recurso natural, proporciona boas propriedades mecânicas, físicas e térmicas ao material.

As fibras vegetais, quando comparadas às fibras sintéticas, possuem vantagens como o baixo custo de obtenção, são leves, emitem uma menor quantidade de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, podem ser obtidas utilizando 80% menos energia, possuem boas propriedades mecânicas quando relacionado ao seu peso e resistência, e não danificam os equipamentos de processo (SHAWKATALY *et al.*, 2015).

Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais já estão sendo utilizados em diversos setores da sociedade como, por exemplo, na indústria automobilística, que os utilizam na parte de acabamento interno do carro, nos painéis das portas, bancos, botões e maçanetas, porém, devido a algumas desvantagens das fibras naturais como a alta absorção de umidade e a baixa resistência à degradação térmica, sua aplicação acaba sendo limitada em alguns ambientes (SHAWKATALY *et al.*, 2015).

Neste contexto, este trabalho pretende ampliar os conhecimentos científicos em fibras vegetais, em particular o bambu, utilizando de tratamentos que visam à melhora da adesão da fibra/matriz para a fabricação de compósitos poliméricos. Para a produção dos compósitos, utilizaram-se diferentes teores volumétricos de fibra de bambu, tratadas e não tratadas, com uma matriz termofixa, a poliéster insaturada, onde os compósitos foram moldados por fusão e caracterizados, avaliando-se o efeito dos tratamentos realizados e a variação dos teores das fibras constituintes no seu desempenho mecânico.

## 1.1. Objetivos do trabalho

Objetivo geral:

- Produzir compósitos de matriz de resina poliéster insaturada com fibras natural e modificadas de bambu, caracterizar e analisar a influência das fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Objetivos Específicos:

- Realizar tratamentos superficiais nas fibras de bambu buscando maior compatibilidade química entre a matriz e a fibra.
- Caracterizar as fibras de bambu natural e tratadas através de análises físicas, químicas, térmicas, microscópicas e mecânicas.
- Produzir compósitos unidirecionais de matriz de resina de poliéster insaturado e reforço de fibras de bambu natural e tratadas, com fração de volumes de fibras de 10%, 20% e 30% e avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos.
- Avaliar a influência do teor de fibras de bambu nas propriedades mecânicas dos compósitos.
- Avaliar a influência dos tratamentos nas fibras de bambu nas propriedades mecânicas dos compósitos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Fibras naturais

As fibras naturais vêm sendo objeto de estudos e pesquisas visando à substituição das fibras sintéticas, que são derivadas do petróleo, como material de reforço em compósitos, devido suas boas propriedades, conforme mostra a Tabela 1, e grande potencial de aplicação em diversos setores da sociedade.

**Tabela 1:** Vantagens e desvantagens do uso de fibras naturais em compósitos.

<b>Vantagens</b>	Baixo custo, comparada às sintéticas
	Utilização completa da fitomassa
	Produzem resíduos de baixa toxicidade na incineração
	Não-abrasivas aos equipamentos de processo
	Boas propriedades mecânicas: Peso x Resistência
	Baixo consumo de energia
	Produtos recicláveis e biodegradáveis
	Atendem às pressões ambientais para o uso de recursos naturais renováveis
	Contribuem com a geração de empregos rurais
<b>Desvantagens</b>	Produção depende do clima
	Grande variação nas propriedades
	Produção sazonal (coleta e armazenamento)
	Higroscópicas – absorvem umidade
	Biodegradáveis – baixa resistência a fungos e bactérias
Degradação da lignina em aproximadamente 200°C	

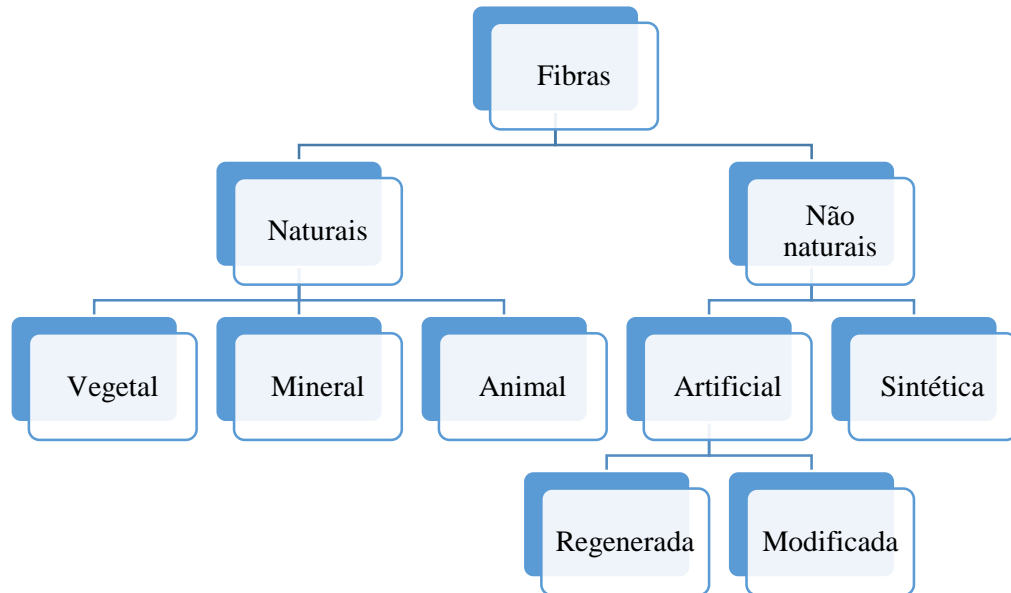
**Fonte:** Adaptado de Carvalho, 2003.

O Brasil tem se destacado como grande produtor de fibras naturais, pois possui solos férteis, boas condições climáticas e tem recebido incentivos do governo para o desenvolvimento rural, tendo produzido em 2016 cerca de 47.550 toneladas de fibras, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017).

As fibras naturais podem ser divididas em vegetais, animais e minerais, conforme mostra a Figura 1, e um fator muito importante para a escolha dessas fibras é em relação ao seu ciclo de vida, que engloba basicamente o manuseio, processamento, lavagem e secagem,

limpeza, distribuição, confecção dos artefatos, descarte final e a capacidade de renovação e reprodução da espécie, sendo as fibras vegetais as mais estudadas e utilizadas como reforço de materiais compósitos (MOURA; PAULO, 2012).

**Figura 1:** Classificação e divisões das fibras utilizadas como reforço.

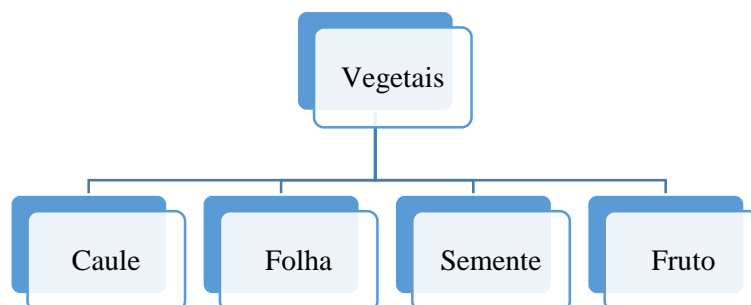


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2018.

## 2.2. Fibras vegetais

As fibras vegetais, conhecidas também como lignocelulósicas devido a sua composição conter alto teor de celulose e lignina, são classificadas de acordo com sua origem e podem ser oriundas do caule, folha, semente e fruto, conforme mostra Figura 2 (MOURA; PAULO, 2012; SHAWKATALY *et al.*, 2015).

**Figura 2:** Classificação das fibras vegetais.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2018.

As fibras vegetais mais comumente estudadas para a fabricação de compósitos são aquelas provenientes do caule ou das folhas, por possuírem melhores propriedades mecânicas que as fibras provenientes do fruto (coco) e da semente (algodão), sendo consideradas fibras rígidas, como por exemplo, a fibra de sisal e juta, que são provenientes do caule e da folha, respectivamente, conforme mostra a Tabela 2 (KU *et al.*, 2011).

**Tabela 2:** Propriedades mecânicas das fibras vegetais.

<b>Tipo de fibra vegetal</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
Coco	95 – 149	2,8 – 3,7	2,8 – 10
Algodão	287 – 597	5,5 – 12,6	7,0 – 8,0
Sisal	511 – 635	9,4 - 22	2,0 – 2,5
Juta	393 – 773	26,5	1,5 – 1,8

**Fonte:** Adaptado de Ku *et al.*, 2011.

Alguns fatores relevantes na escolha do tipo de fibra para uso como reforço em materiais poliméricos são a sua característica mecânica, a disponibilidade no mercado e a capacidade de renovação. No Brasil têm se estudado bastante as fibras de juta, sisal e coco, porém, outra fibra vem ganhando espaço, a fibra de bambu, que é uma das fibras naturais vegetais mais resistentes encontradas na natureza, combinando elevada rigidez, resistência e leveza, onde até mesmo uma Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu foi criada, a lei nº 12.484 de 2011 (BRASIL, 2011).

### **2.2.1. Bambu**

O bambu é uma planta pertencente à família das gramíneas, sendo cerca de 64% da plantação de bambu encontrada na Ásia, onde os maiores produtores são a China e Índia, 34% encontrado na América do Sul, e o restante na África e Oceania com cerca de 115 gêneros de bambu no mundo, mais de 1400 espécies, usados em diversas aplicações, desde a criação de

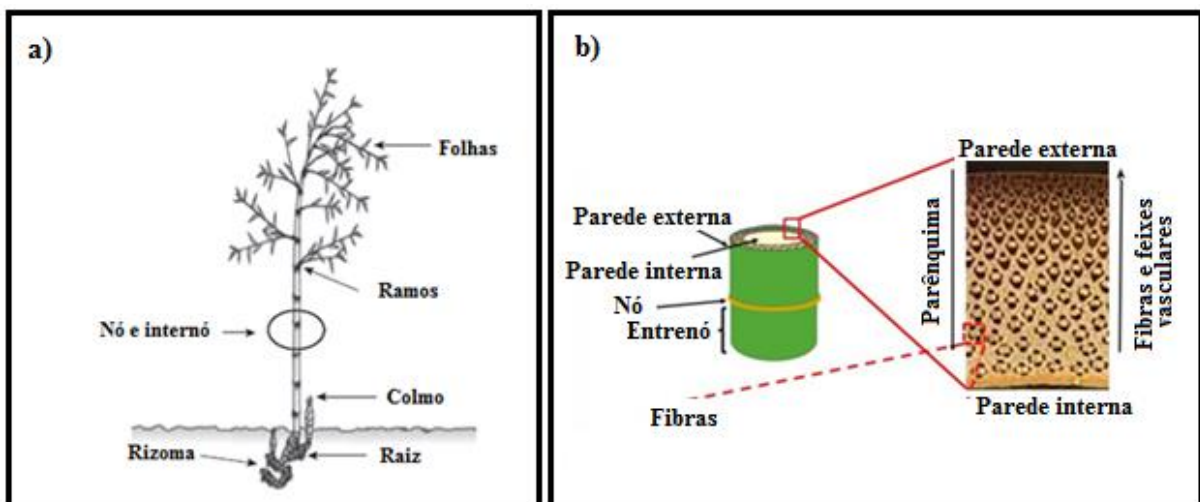
casas populares em países como Equador e Colômbia, como em grandes obras civis como pontes e templos no Japão, China e Índia (LOBOVIVOK *et al.*, 2007; SILVA, 2015; SHAWKATALY *et al.*, 2015).

No Brasil o bambu é encontrado principalmente nas regiões Norte e Nordeste, com cerca de 230 espécies nativas e 20 espécies introduzidas que vem sendo estudadas e utilizadas em diferentes aplicações, desde a produção de artesanatos, móveis e também no desenvolvimento de novos materiais, utilizando as fibras do bambu como reforço para compósitos, buscando substituir a madeira e o aço, visando diminuir o custo e aumentar as propriedades mecânicas por ser um material leve e flexível (LOBOVIVOK *et al.*, 2007; SHARMA *et al.*, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2017).

O crescimento do bambu ocorre de forma acelerada, sendo a planta de mais rápido crescimento no mundo, levando de 3 a 4 anos para atingir a idade adulta e possui elevada rigidez, resistência e baixa densidade, características importantes para produzir um bom material compósito (MI, 1997; KUMAR *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2017).

Os bambus são constituídos basicamente de um rizoma subterrâneo e de um colmo lenhoso oco com fibras dispostas em forma de feixes principalmente na região mais externa dotado de ramos e folhas (Figura 3. a). Morfologicamente o bambu é constituído de tecido parenquimatoso, vasos e fibras (Figura 3. b) (GOMIDE *et al.*, 1981; LOBOVIVOCK *et al.*, 2007).

**Figura 3:** Estrutura (a) e morfologia do bambu (b).



**Fonte:** Adaptado de Sakaray *et al.*, 2012 (a) e Barbosa, 2016 (b).

A espécie mais abundante no Brasil é a *Bambusa Vulgaris*, que foi introduzida no Brasil na época dos primeiros imigrantes portugueses, onde há uma área de mais de 30 000 hectares

de *bambusa* que forma touceiras densas com aproximadamente 15 metros de altura, colmos de 5 a 10 centímetros de diâmetro e entrenós de 24 a 40 centímetros de comprimento, utilizada como matéria prima para uma fábrica de papel no nordeste do país (LOBOVIVOK *et al.*, 2007).

Santos *et al* (2014) investigaram a capacidade de adsorção de corante azul de metileno utilizando fibra de bambu natural e carvão ativado ósseo, encontrando como resultado que o carvão ativado adsorve 96% e o bambu 55% que, apesar de adsorver menos, o bambu pode ser viável por ser um material disponível regionalmente e de baixo custo.

Orthey (2015) relatou que o procedimento da produção de móveis de bambu feitos pela empresa Oré Brasil, mostrando desde a colheita do bambu, o corte, os tratamentos químicos realizados com água e ácido pirolenhoso para proteger contra fungos e agentes xilófagos, até a produção final dos móveis, que possuem boas características, chegando a receber importantes prêmios.

Adhikari, Wood e Sudak (2015) investigaram a possibilidade de desenvolver torres de bambu de baixo custo para pequenas turbinas eólicas, analisando as características do bambu e utilizando uma torre de bambu de 12m para uma turbina eólica de 500W, fazendo análises por meio de métodos analíticos e de elementos finitos, resultando em um promissor potencial de redução de custos para pequenas torres de turbinas eólicas em países em desenvolvimento.

Francisco (2016) utilizou varas de bambu para fazer barreiras de contenção de erosão de solos, impermeabilizando o bambu com o uso de rafia de polipropileno, diminuindo o custo e aumentando a durabilidade da barreira.

Também estão sendo realizadas pesquisas que utilizem o bambu como reforço de matrizes poliméricas, como por exemplo, Yusoff *et al* (2016) que desenvolveu um material compósito utilizando as fibras de bambu como reforço, obtendo boas propriedades mecânicas de tração e flexão.

### **2.2.2. Constituintes do bambu**

Quimicamente, o bambu é semelhante à madeira, e caracteriza-se por apresentar teor relativamente alto de lignina, celulose e hemicelulose, conforme mostra a Tabela 3, que representa mais de 90% da massa total do bambu, teor de pentosana relativamente alto, elevada quantidade de extrativos e como grande desvantagem, alto teor de elementos minerais, principalmente a sílica (YOUSSELIAN; RAHBAR, 2015; POSOM; SIRISOMBOON, 2017; LI *et al.*, 2017).

**Tabela 3:** Principais constituintes do bambu.

Constituinte	Composição (%)
Celulose	26 – 65
Lignina	21 – 31
Hemicelulose	30

**Fonte:** Adaptado de Yusoff *et al*, 2016.

A celulose é um polímero linear constituído pela ligação de moléculas de glicose formando a celobiose, monômero da celulose, que ao interagirem entre si, formam uma fibra resistente responsável pela formação da parede celular da célula vegetal, agindo como componente estrutural, responsável por dar flexibilidade e resistência mecânica à fibra (YOUSSELIAN; RAHBAR, 2015).

A lignina é um biopolímero, formado na estrutura da planta, que possui uma estrutura molecular complexa e variável, que depende de diversos fatores como a espécie vegetal, localização, idade da planta, estação do ano, entre outros, sendo a responsável por conferir diversas propriedades como resistência mecânica e impermeabilidade (YOUSSELIAN; RAHBAR, 2015).

A hemicelulose é um grupo heterogêneo de polissacarídeos, localizado entre as regiões cristalinas da celulose e em interação também com a lignina, que crescem de forma desordenada, com características amorfas, agindo como componente subestrutural da planta (LUCIAN; ORLANDO, 2009).

### 2.2.3. Fibras de bambu

Através dos feixes fibrosos, podemos obter características importantes sobre a morfologia e a composição químicas das fibras de bambu, que são encontradas em maior quantidade conforme a aproximação na parte externa do bambu, conforme foi mostrado anteriormente na Figura 3 (BARBOSA, 2016).

As fibras de bambu possuem estrutura LCC (*lignincarbohydrate complex*), onde microfibrilas de celulose estão ligadas por hemiceluloses, envoltas pelo parênquima, uma matriz amorfa de lignina e hemicelulose que é responsável por transportar nutrientes para as fibras, resultando em alta resistência mecânica em relação ao peso, conforme mostra a Tabela 4 (YOUSSELIAN; RAHBAR, 2015).



**Tabela 4:** Relação do diâmetro e resistência à tração das fibras de bambu.

<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Referências</b>
0,3 – 0,4	228,4	Monteiro <i>et al.</i> (2017)
0,6- 0,7	208,8	Monteiro <i>et al.</i> (2017)
0,17	199,25	Khan <i>et al.</i> (2017)
0,48	490	Yusoff <i>et al.</i> (2016)
-	140 - 230	Kang; Kim (2011)
0,14	361	Cao; Wu (2008)
-	378	Melo (2016)

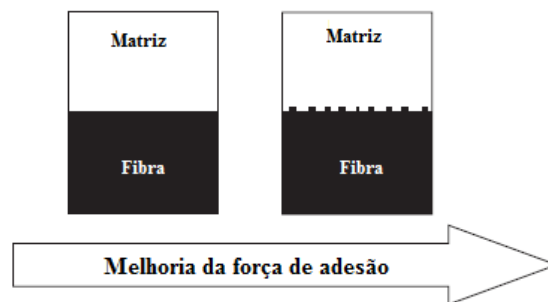
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2018.

A estrutura química da celulose, hemicelulose e lignina estão interligadas através de ligações de hidrogênio, presentes entre as hidroxilas do composto, que faz com que os constituintes do bambu sejam hidrofílicos, ou seja, reagem com a água, impossibilitando o uso isoladamente em ambientes úmidos (GHAVAMI, 2005).

### **2.3. Tratamentos superficiais nas fibras vegetais**

Para desenvolver compósitos utilizando fibras vegetais como reforço, um inconveniente dessas fibras é a sua natureza hidrofílica, que impede a compatibilidade com polímeros hidrofóbicos, implicando em baixas propriedades físico-mecânicas dos compósitos, visto que a tensão aplicada não será distribuída uniformemente no material. Contudo, alguns tratamentos são realizados para melhorar a ligação da matriz utilizada e do reforço (fibra), que sofrem a retirada de parte de seus constituintes, deixando a fibra mais áspera, melhorando a sua adesão com a matriz, conforme ilustra a Figura 4 (COSTA JÚNIOR *et al.*, 2014).

**Figura 4:** Melhora na adesão mecânica da fibra com o uso de tratamentos superficiais.



**Fonte:** Adaptado de Arbelaiz; Mondragon, 2015.

A alcalinização é um dos tratamentos mais utilizados em fibras naturais que serão aplicadas como reforço em termoplásticos ou termofixos, devido seu baixo custo e efetividade, que, de acordo com a ASTM D1695, consiste na interação das fibras com uma solução aquosa de uma base forte, na maioria de hidróxido de sódio (NaOH), acarretando na ionização das hidroxilas presentes nas paredes celulares, levando a remoção de certa quantidade de lignina, cera e óleos que recobrem a superfície externa da parede celular da fibra, alterando sua estrutura, dimensão, morfologia e propriedades mecânicas, conforme mostra a Tabela 5 (HUDA *et al.*, 2008; KANG; KIM, 2011).

**Tabela 5:** Efeitos do tratamento alcalino em fibras vegetais.

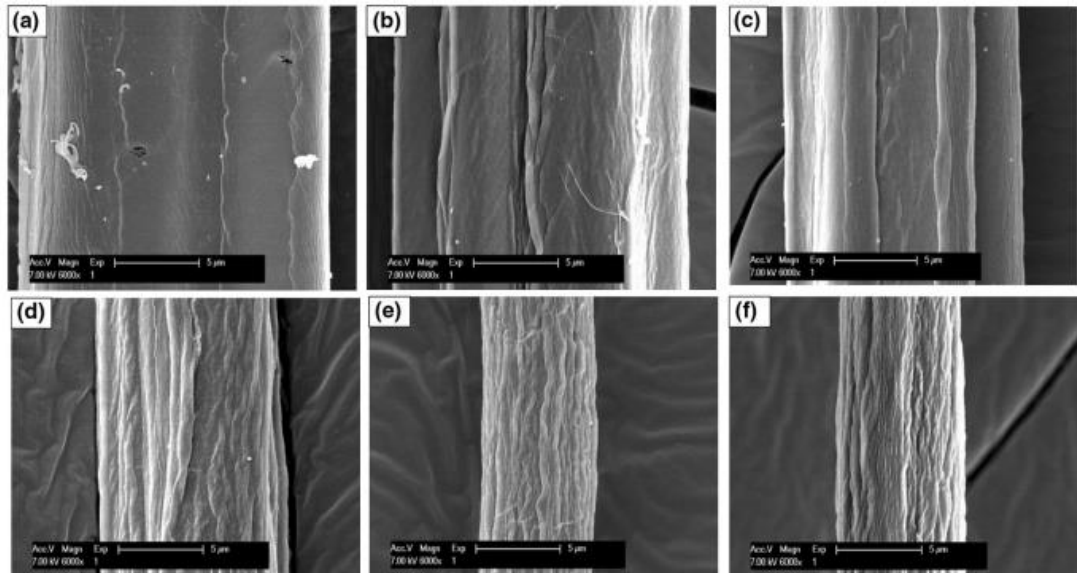
<b>Tratamento</b>	<b>Efeitos na fibra</b>	<b>Referências</b>
Alcalinização	Remove as impurezas	
	Reduz o diâmetro da fibra	
	Reduz o peso da fibra	Deshpande <i>et al.</i> (2000)
	Aumenta a rugosidade da fibra	Mohanty <i>et al.</i> (2001)
	Remove lignina, gordura, proteína e ingredientes hidrossolúveis	Huda <i>et al.</i> (2008) Kang; Kim (2011)

**Fonte:** Adaptado de SHAWKATALY *et al.*, 2015.

Chen *et al* (2016) alcalinizou fibras de bambu com NaOH em diferentes concentrações (6,8,10,15 e 25%) e caracterizou as fibras usando a microscopia eletrônica de varredura (MEV), que mostrou o aparecimento de rugas e poros na superfície da fibra e a diminuição no diâmetro da fibra, resultando da perda de impurezas na fibra. A Figura 5 mostra o aumento na rugosidade

das fibras, de acordo com o aumento da concentração da solução alcalina utilizada, estudadas por Chen *et al* (2016).

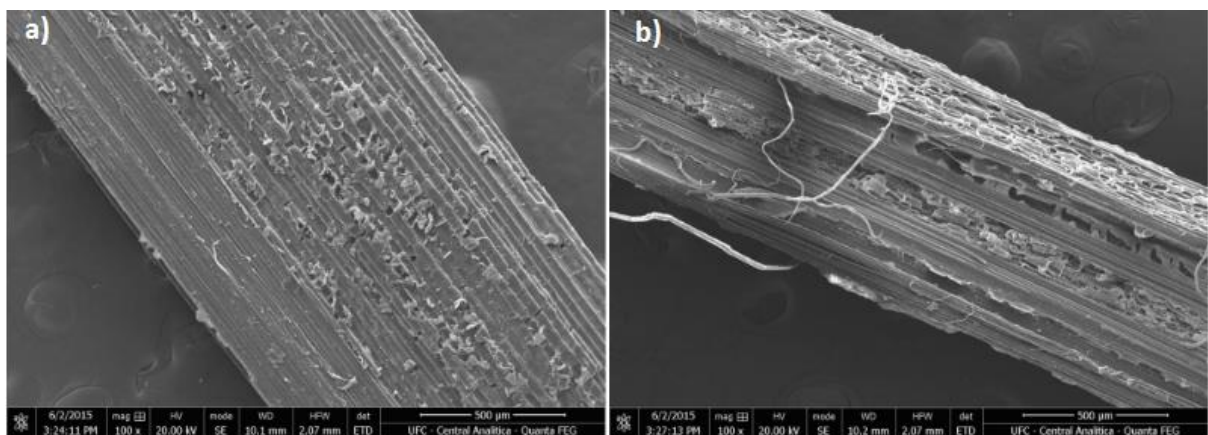
**Figura 5:** MEV nas fibras não tratadas (a) e após alcalinização com 6% (b), 8% (c), 10% (d), 15% (e) e 25% (f).



Fonte: Chen *et al.*, 2016.

Melo (2016) realizou a alcalinização em fibras de bambu com NaOH nas concentrações de 2%, 5%, 10% e 15% a 60°C durante 2h e concluiu que houve a remoção de impurezas e um aumento na rugosidade da fibra, fato observado na microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme mostra a Figura 6.

**Figura 6:** Microscopia eletrônica de varredura da fibra de bambu natural (a) e fibra de bambu após a alcalinização a 2% de NaOH (b).



Fonte: Melo, 2016.

Oushabi *et al* (2017) utilizou o tratamento alcalino em fibras de palma com NaOH em concentrações de 2%, 5% e 10% durante 1h sem aquecimento, resultando na eliminação de grandes teores de lignina e hemicelulose e melhoria das propriedades mecânicas nas fibras tratadas com 2% e 5%.

A acetilação é outro tratamento superficial bastante utilizado em fibras naturais, normalmente realizado após o tratamento de alcalinização, que causa a plastificação das lignocelulósicas, podendo reduzir a natureza higroscópica das fibras naturais e aumentar a estabilidade dimensional de compósitos, promovendo melhor adesão da fibra-matriz (D'ALMEIDA *et al.*, 2005; LOPES *et al.*, 2011; SHAWKATALY *et al.*, 2015).

O tratamento consiste em utilizar uma solução ácida. Normalmente utiliza-se uma solução de ácido acético com anidrido acético, em diferentes proporções que, ao reagir com os grupos hidroxilas presentes na parede das células, serão substituídos por grupos acetilas, que são apolares, tornando a fibra hidrofóbica, melhorando a adesão da mesma com a matriz (D'ALMEIDA *et al.*, 2005; LOPES *et al.*, 2011; SHAWKATALY *et al.*, 2015). A Tabela 6 mostra os principais efeitos da acetilação em fibras vegetais.

**Tabela 6:** Efeitos do tratamento de acetilação em fibras vegetais.

<b>Tratamento</b>	<b>Efeitos na fibra</b>	<b>Referências</b>
Acetilação	Diminui a capacidade de absorção de água	Phuong <i>et al.</i> (2010)
	Inserção de grupos acetila	Chen <i>et al.</i> (2011)
	Aumenta os microporos na superfície da fibra (maior rugosidade)	

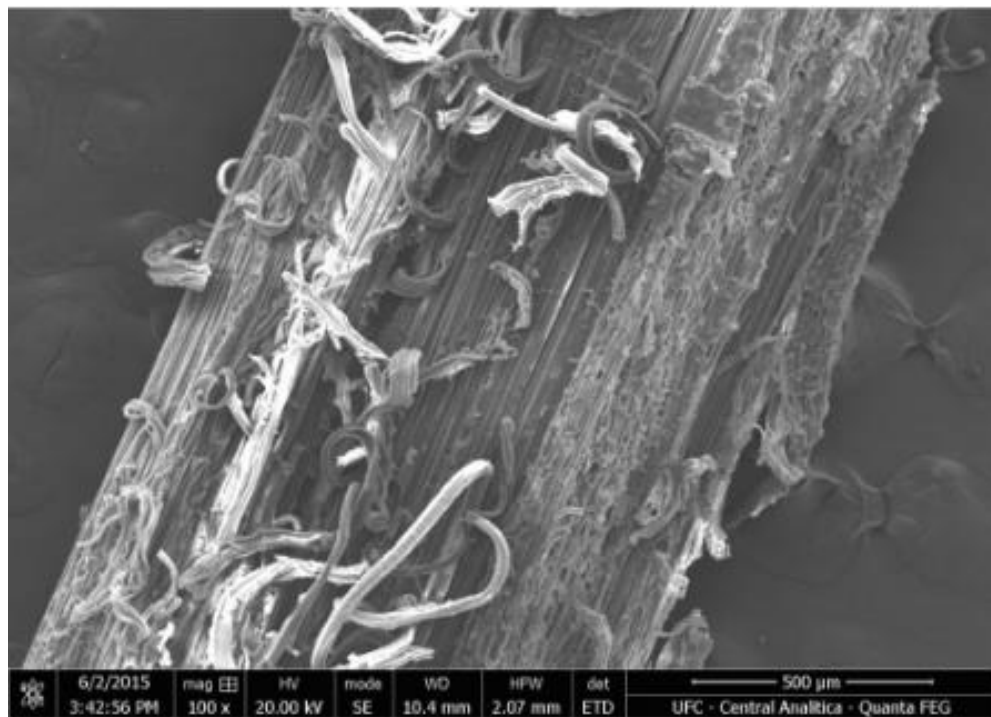
**Fonte:** Adaptado de SHAWKATALY *et al.*, 2015.

D'Almeida *et al* (2005), utilizou o tratamento de acetilação com uma solução de ácido acético e anidrido acético em fibra de bucha, comprovando através do MEV e da análise no infravermelho, que houve a redução dos grupos hidroxilas, fazendo com que a polaridade da fibra seja reduzida e por consequência aumentou a compatibilidade da fibra com uma matriz apolar.

Lopes *et al* (2011) utilizou o tratamento de alcalinização e de acetilação em fibras de curauá, utilizando uma solução de NaOH a 1% e depois realizou a acetilação com anidrido acético e ácido acético na proporção de 1,5:1,0 onde ele constatou que a fibra ficou com a superfície mais lisa.

Melo (2016) utilizou também o tratamento de acetilação em fibras de bambu, previamente alcalinizadas em diferentes concentrações de solução de NaOH, utilizando uma solução de ácido acético, anidrido acético e ácido sulfúrico, onde ele concluiu que a acetilação aumentou a polaridade das fibras através da inserção do grupo acetila, aumentou a rugosidade da fibra, como pode ser visto na Figura 7 quando comparada com a Figura 6, porém diminuiu as propriedades mecânicas, fato que é explicado devido o tratamento com ácido ser agressivo.

**Figura 7:** Microscopia eletrônica de varredura da fibra de bambu após o tratamento de acetilação.



Fonte: Melo, 2016.

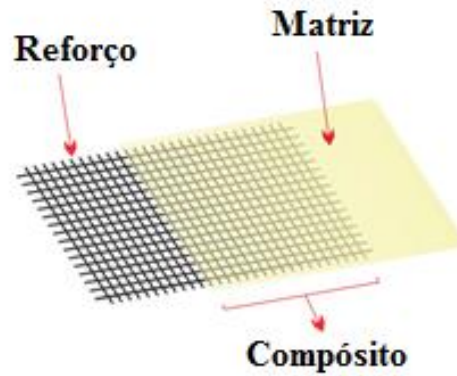
## 2.4. Materiais Compósitos

### 2.4.1. Definição

Um material compósito é a combinação de dois ou mais materiais de diferentes naturezas, que não se difundem macro e microscopicamente, como mostra a Figura 8, resultando em um material com características superiores aos seus componentes isoladamente.

Ele é dividido entre matriz, podendo ser, em geral, um polímero, metal ou cerâmica, e reforço, sendo classificado como partícula ou fibras (NIJSSEN, 2015).

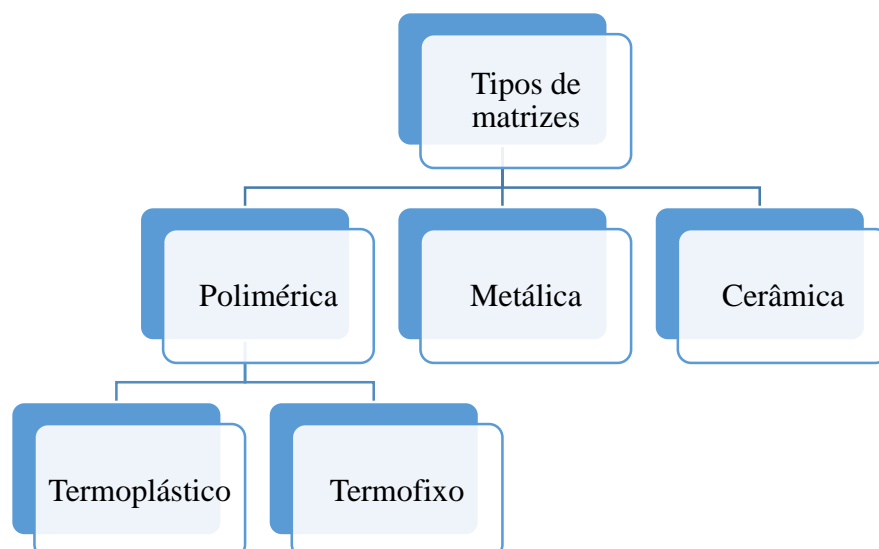
**Figura 8:** Esquema de um material compósito.



**Fonte:** Callister; Rethwisch, 2016.

A escolha da matriz é de grande importância para alcançar as características finais desejadas do material compósito, pois ela tem como função proteger as fibras, distribuir o carregamento pelas fibras, dando ao compósito grande parte de suas propriedades, sejam elas mecânicas, térmicas ou químicas. As matrizes podem ser poliméricas, cerâmicas ou metálicas, conforme mostra a Figura 9, onde a mais usual é a polimérica devido a sua diversidade de formulações e o baixo custo de processamento, podendo ser termoplástica ou termofixa (NIJSSEN, 2015).

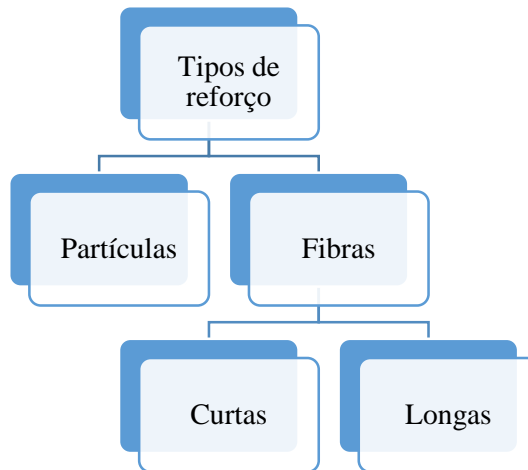
**Figura 9:** Classificação dos tipos de matrizes.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2018.

Já o reforço serve para melhorar as propriedades mecânicas do material, como por exemplo, elevando a rigidez e a resistência à ruptura, podendo ser classificados como partículas, e fibras, naturais ou sintéticas, curtas ou longas, conforme mostra a Figura 10 (NIJSSEN, 2015).

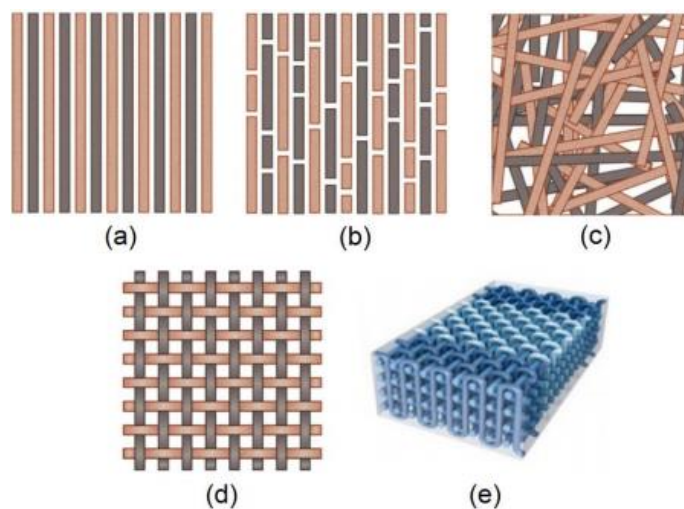
**Figura 10:** Classificação dos tipos de reforços.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2018.

As partículas são comumente utilizadas para dificultar o movimento de defeitos pelo material. As fibras são as mais importantes no ponto de vista tecnológico, pois elas podem oferecer alta rigidez e resistência em relação ao peso do material, melhorando as propriedades mecânicas do material. A Figura 11 mostra as maneiras que os reforços podem estar alocados dentro do compósito (NIJSSEN, 2015).

**Figura 11:** Fibras contínuas unidirecionais (a), fibras descontínuas alinhadas (b), fibras descontínuas aleatórias (c), fibras bidirecionais (d), tecidos tridimensionais (e).



**Fonte:** Matthews; Rawlings, 1994; Saeed et al., 2015.

### 2.4.2. Matriz polimérica: Resina poliéster insaturada

As matrizes poliméricas mais amplamente utilizadas para a fabricação de compósitos poliméricos são as resinas termofixas epóxi, os poliésteres e os ésteres vinílicos, sendo as duas últimas as mais baratas onde, em diferentes formulações, proporcionam uma ampla variedade de propriedades. A Tabela 7 mostra algumas propriedades dessas resinas.

**Tabela 7:** Propriedades das resinas termofixas.

<b>Tipo</b>	<b>Absorção de água (%) (24h à 20°C)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
Epóxi	0,1 – 0,4	1,1 – 1,4	35 - 100	3 – 6
Poliéster	0,1 – 0,3	1,2 – 1,5	40 - 90	2 – 4,5
Éster vinílico	0,1	1,2 – 1,4	69 - 83	3,1 – 3,8

**Fonte:** Adaptado de Ku *et al.*, 2011.

Devido a essas vantagens como baixo custo, estabilidade térmica e dimensional, capacidade de cura a temperatura ambiente e transparência, as resinas termorrígidas de poliéster vêm sendo bastante utilizada, sendo mais de 2 milhões de toneladas mundialmente, na fabricação de uma ampla variedade de produtos como tubos, tanques e componentes de alto desempenho para a indústria marítima e automotiva (MEDINA *et al.*, 2009).

Elas são produzidas através da reação química entre ácidos dicarboxílicos saturados e insaturados com álcoois e podem ser encontradas com diferentes composições, para cada aplicação específica. A Tabela 8 mostra os diferentes tipos de resinas poliéster insaturada e algumas características (LEVY NETO; PARDINI, 2016).

**Tabela 8:** Tipos de resina poliéster insaturada e suas características.

<b>Tipo</b>	<b>Características</b>
Ortoftálica	Uso básico, mais comum e de menor custo.
Tereftálica	Resistência física um pouco superior a ortoftálica, porém com baixa resistência a radiação UV.
Isoftálica	Boas características mecânicas, químicas e térmicas.
Isoftálica com NPG	O acréscimo do NPG melhora a resistência à hidrólise.
Bisfenólica	Melhores características químicas e térmicas.

**Fonte:** Silaex química LTDA, 2017.



As resinas de poliéster insaturado são normalmente fornecidas em forma de um líquido viscoso que, com o uso de um catalisador, transforma a resina em um sólido rígido através do processo de cura (LEVY NETO; PARDINI, 2016).

### **2.4.3. Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais**

As fibras sintéticas são bastante utilizadas, como por exemplo, a fibra de carbono e de vidro, para fabricação de compósitos utilizados em diversos setores da sociedade (civil, naval, aeroespacial, automotores), porém seu custo de fabricação é alto e acarretam problemas para o meio ambiente, por isso vem se buscando novas alternativas de reforço, utilizando fibras naturais, como por exemplo, a fibra de coco, sisal, malva, bucha e juta, bastantes exploradas na literatura brasileira (FIDELIS *et al.*, 2013).

Andrade e Nóbrega (2009) fabricaram compósitos utilizando resina de poliéster insaturada reforçada com fibra de coco do tipo Babaçu, em proporções de aproximadamente 28%, 38% e 42% de fibra onde, ao comparar as propriedades mecânicas dos compósitos com o corpo de prova feito apenas de resina, concluiu que a incorporação acima de 38% de fibra de coco resulta no aumento das propriedades mecânicas, confirmando que a fibra agiu como reforço. Abaixo dessa proporção de fibras, as propriedades mecânicas foram inferiores ao corpo de prova de resina devido à falta de homogeneidade resultante do baixo teor de fibra inserida.

Costa (2012) caracterizou compósitos de matriz poliéster com fibra de sisal com espessura de 5mm, 10mm e 15mm e frações mássicas entre 4%, 5% e 6% de fibra respectivamente, onde ele concluiu que o tamanho da fibra modifica as propriedades mecânicas do compósito, fato que pode ser explicado devido o melhor alinhamentos das fibras de maiores comprimentos.

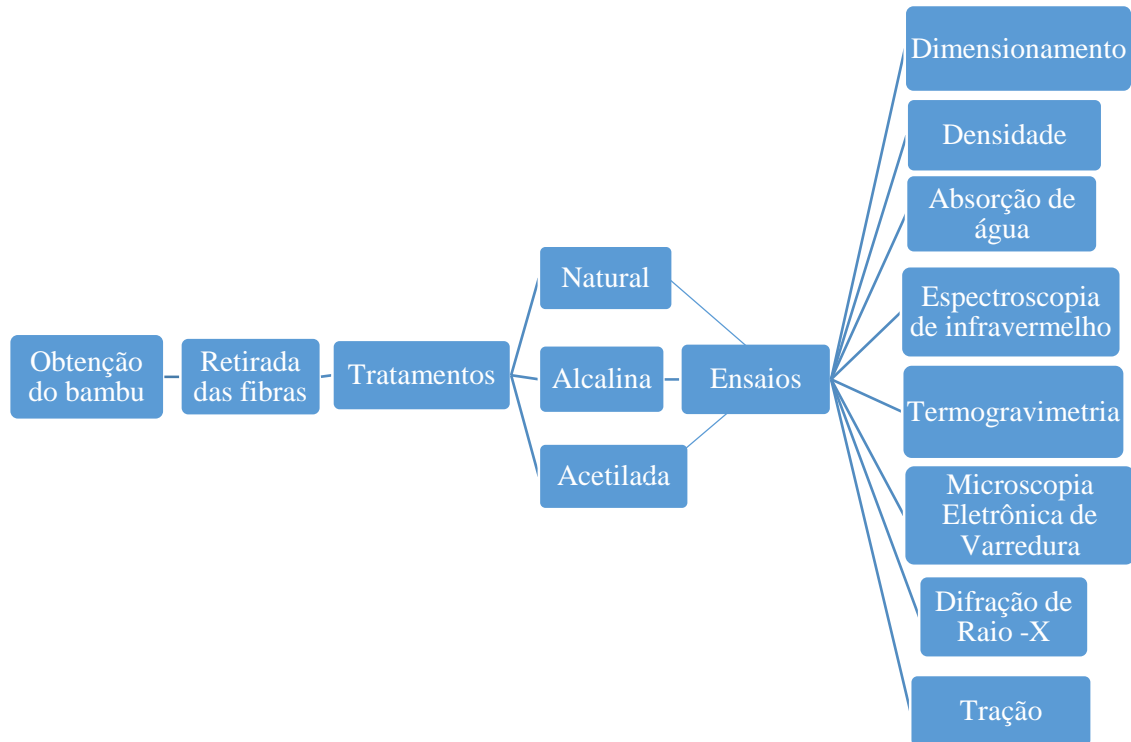
Margem (2013) estudou as características estruturais e algumas propriedades de compósitos de matriz poliéster com fibra de malva. Através do ensaio de tração nos corpos de prova somente de resina poliéster e nos compósitos com fração mássica de 10%, 20% e 30% de fibra, ele conseguiu elevar a tensão máxima de 16MPa para 60MPa e o módulo de elasticidade de 8GPa para 16GPa.

Oliveira (2013) avaliou as propriedades de compósitos de matriz de poliéster reforçados com fibras de bucha alinhadas, nas proporções de 10%, 20% e 30% de fibra onde ele pôde concluir que com o aumento da fração de fibras, o compósito melhorou suas propriedades mecânicas de tração, chegando a quase dobrar a resistência à tração quando comparado com o corpo de prova de poliéster puro, ocorrendo o mesmo com o módulo de elasticidade.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

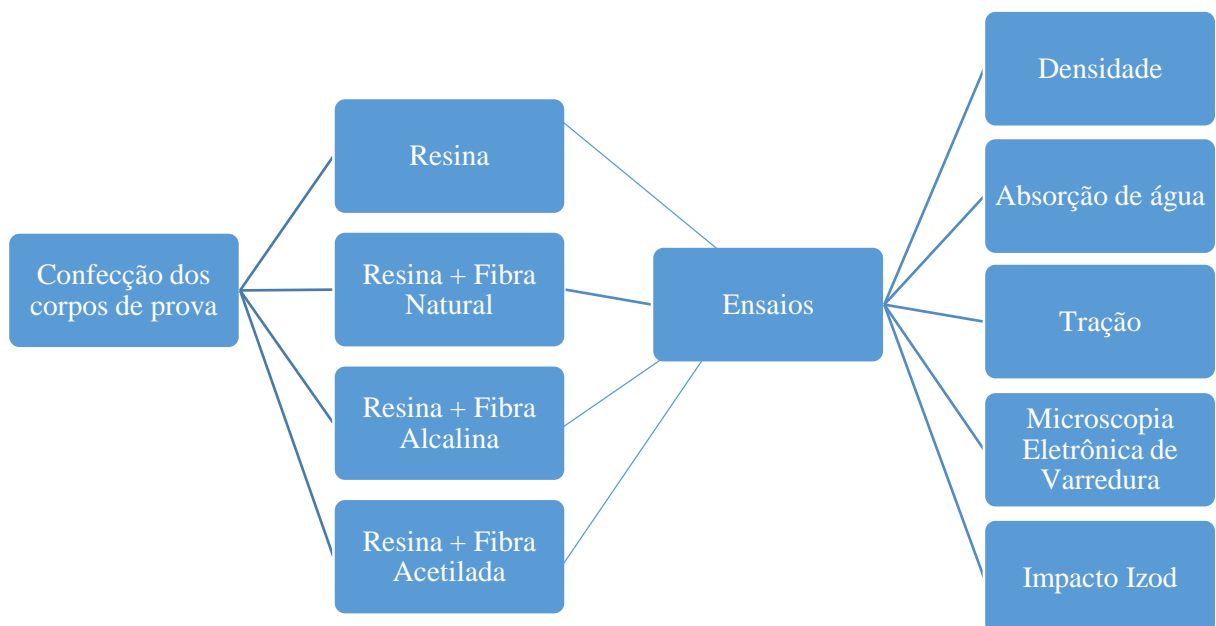
A metodologia do trabalho foi definida em duas etapas, como descrita nas Figuras 12 e 13.

**Figura 12:** Esquema da produção e caracterização das fibras.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018.

**Figura 13:** Esquema da confecção e caracterização dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018.

### 3.1. Materiais

O bambu utilizado é da espécie *Bambusa Vulgaris*, que se encontra em Fortaleza-Ceará-Brasil, já na idade adulta, com aproximadamente 4m de altura, com diâmetro interno dos colmos de 25,5 mm, e diâmetro externo 45 mm, aproximadamente. A retirada das fibras se deu conforme mostra a Figura 14, de forma mecânica e manual, com o auxílio de instrumento cortante, onde inicialmente foram separados os nós dos entrenós, retiradas lâminas de bambu dos entrenós, extraíndo a parte mais externa da casca, onde está localizada a maior quantidade de fibras, que foram separadas para posterior utilização.

**Figura 14:** Processo de obtenção das fibras de bambu.



**Fonte:** Autor, 2018.

A resina poliéster insaturada utilizada foi do tipo ortoftálica, fabricada pela NOVAPOL, modelo 430-C, juntamente com o catalisador BRASNOX DM50 (peróxido de metil etil cetona), foram fornecidos pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), localizado no município de Maracanaú, utilizando a formulação de 100ml de resina para 3ml de catalisador. As Tabelas 9 e 10 mostram as propriedades dos materiais utilizados.

**Tabela 9:** Propriedades da resina de poliéster utilizada.

Propriedades	Características
Aparência	Cristal
Viscosidade	1500 – 2000 cps (25°)
Peso específico	1,10- 1,11 (25°C)
Temperatura de exotermia	135 – 165 °C

**Fonte:** Elaborada pelo autor segundo boletim técnico da NOVAPOL, 2018.

**Tabela 10:** Propriedades do catalisador utilizado.

Análise	Valores
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1.03
Oxigênio ativo (%)	8,84

**Fonte:** Elaborada pelo autor segundo boletim técnico da BRASNOX, 2018.

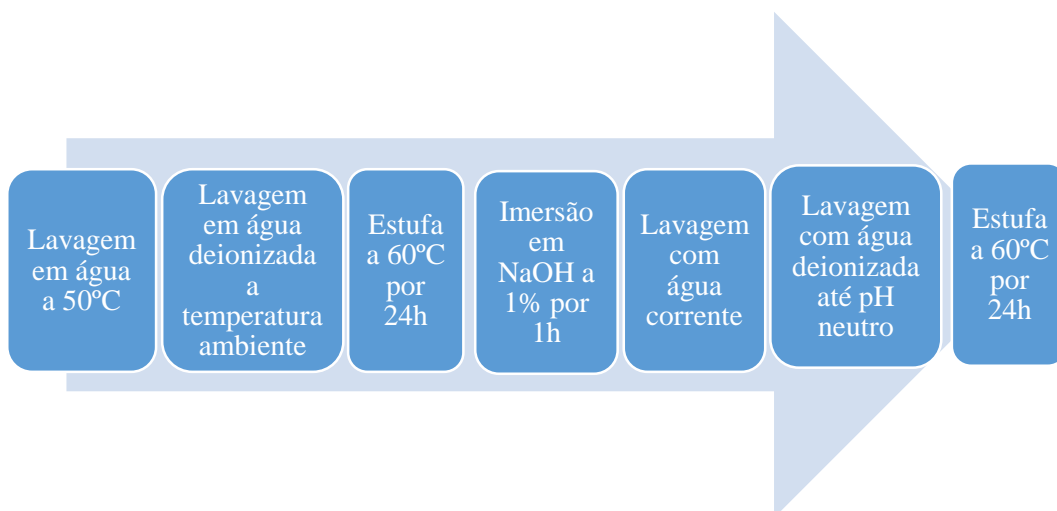
Os ensaios foram realizados em local com ambiente e temperatura controlados conforme especificado pela norma ASTM D618.

### 3.2. Tratamentos das fibras

#### 3.2.1. Alcalinização

Primeiramente as amostras de fibras foram lavadas em água a  $50 \pm 2$  °C, onde se utilizou um autoclave vertical e em seguida, lavadas com água deionizada à temperatura ambiente. Posteriormente, as fibras foram conduzidas à estufa a  $60 \pm 2$  °C por 24 h, para secagem e resfriadas em dessecador (LOPES *et al.*, 2011).

Após isso, as fibras foram imersas por 1h em solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH), a 1%. Decorrido este período as fibras foram lavadas inicialmente em água corrente e posteriormente em água deionizada até a remoção do produto (pH neutro). Em seguida, as fibras foram novamente levadas à estufa a  $60 \pm 2$  °C por 24 h, para secagem, e resfriadas em dessecador, para posterior aplicação dos tratamentos de acetilação. A Figura 15 mostra o processo de alcalinização (LOPES *et al.*, 2011).

**Figura 15:** Esquema do processo de alcalinização.

**Fonte:** Adaptado de Lopes et. al, 2011.

O processo de lavagem é mostrado na Figura 16, que foi realizado com o auxílio de baldes e espátulas. As lavagens cessaram quando o pH da solução voltou a ser neutro, medido com auxílio do phmetro de marca Tecnal, modelo TEC-3MPp, mostrado na Figura 17.

**Figura 16:** Processo de alcalinização das fibras.



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 17:** Phmetro utilizado.



**Fonte:** Autor, 2018.

### 3.2.2. Acetilação

As amostras de fibras alcalinas foram acondicionadas em um reator de condensação, sob agitação (a cada 5min) e banho termostático com solução de anidrido acético e ácido acético, na proporção de 1,5:1,0, conforme mostra a Figura 18. O tempo de reação (contato entre fibras e solução) foi de 1h e a temperatura de reação de  $100 \pm 2^\circ\text{C}$  (LOPES *et al.*, 2011).

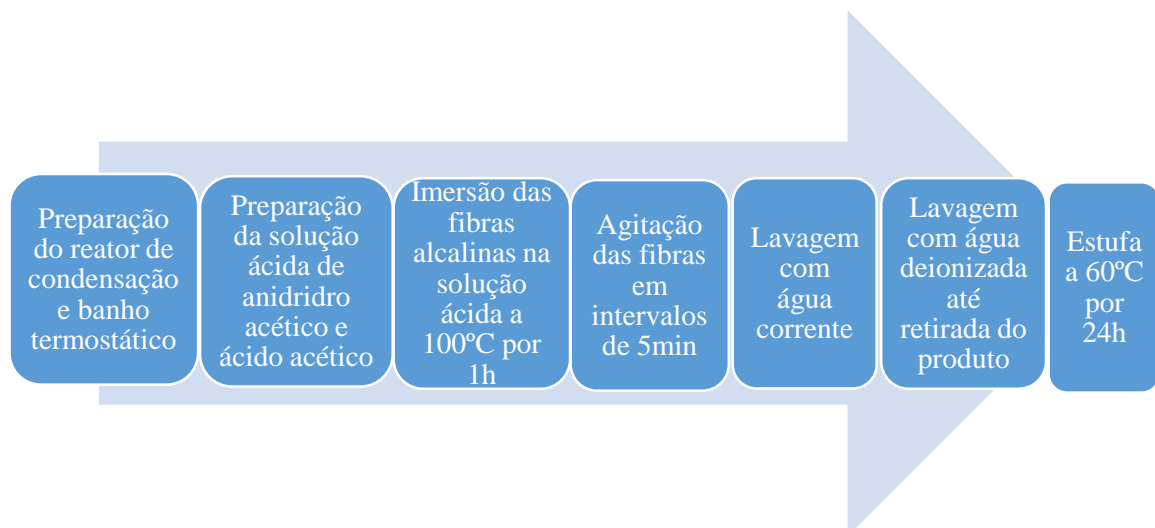
**Figura 18:** Reator utilizado para realizar a acetilação das fibras.



Fonte: Autor, 2018.

Decorrido o tempo de reação, as amostras foram lavadas inicialmente em água corrente e posteriormente em água deionizada para remoção do produto. Para uma melhor avaliação, o pH da água da última lavagem apresentou-se entre 4-5. Em seguida, as fibras foram levadas à estufa a 60°C, por 24h para secagem, resfriadas e armazenadas em dessecador até o momento dos ensaios. A Figura 19 mostra o esquema de como ocorreu o processo de acetilação nas fibras.

**Figura 19:** Esquema do processo de acetilação.



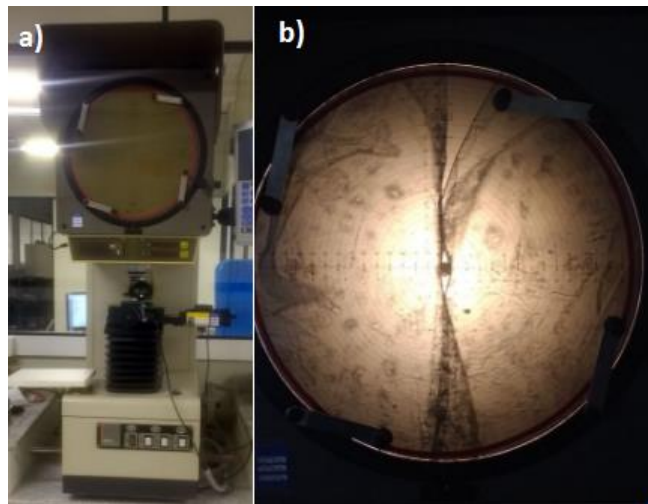
Fonte: Adaptado de Lopes *et al.*, 2011.

### 3.3. Ensaios nas fibras

#### 3.3.1. Dimensionamento

Para medir o diâmetro das fibras foi utilizado um projetor de perfil vertical de marca Mitutoyo e modelo PJ-3000 (como mostra a Figura 20), fornecido pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), localizado no município de Maracanaú, onde foi feita a leitura da área das fibras de bambu, devido perceber que as fibras não eram arredondadas, utilizando uma análise de estatística populacional, onde foram utilizadas 50 fibras para retirar o valor da área média das fibras naturais, alcalinizadas e acetiladas, dados que foram utilizados posteriormente para análise das propriedades mecânicas de cada fibra.

**Figura 20:** Projetor de perfil utilizado (a) e leitura da área de uma das fibras analisadas (b).



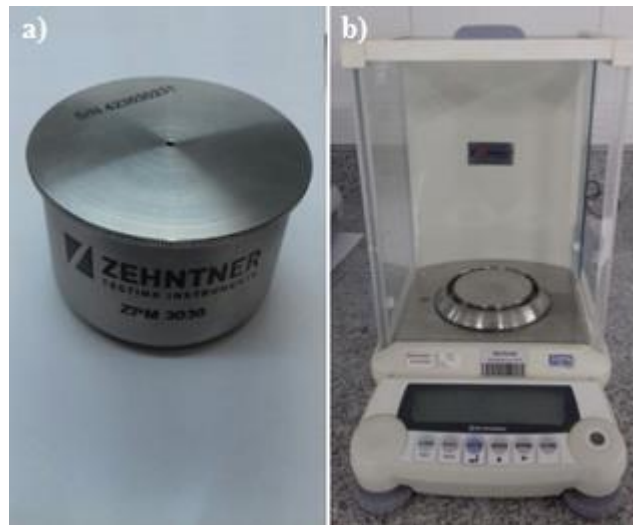
**Fonte:** Autor, 2018.

#### 3.3.2. Densidade

Para o teste de densidade das fibras naturais, alcalinizadas e acetiladas, foi utilizado a norma ASTM D792, método A, que utiliza um picnômetro, balança analítica, termômetro e água deionizada, onde inicialmente, pesa-se o picnômetro seco, 0,5g de fibra aproximadamente, depois enche o picnômetro com água deionizada e pesa novamente, depois insere a fibra e faz-se outra medição. O ensaio foi realizado em triplicata.

Através da água extravasada, após a fibra ser inserida e retirada do picnômetro, obtém-se o volume de fibra e, como é conhecida a densidade da água, é possível calcular a densidade da fibra. A Figura 21 mostra o picnômetro utilizado (a), com capacidade para 50mL, de marca ZEHNTNER e modelo ZPM 3030 e a balança analítica (b), de marca SHIMADZU e modelo AUY220.

**Figura 21:** Picnômetro (a) e balança analítica (b).



Fonte: Autor, 2018.

### 3.3.3. Absorção de água

Para o teste de absorção de água, seguiu-se a norma ASTM D570. Aproximadamente 1g de cada tipo de fibra foram imersas em água deionizada por 24h, sendo em seguida retiradas da água, secas superficialmente com o auxílio de papel toalha, e pesada novamente e, de acordo com a fórmula abaixo, pôde-se medir o percentual de absorção de água de cada fibra. O ensaio foi feito em triplicata.

$$\text{Absorção de água (\%)} = \frac{P_1 - P_0}{P_0} \times 100 \quad (1)$$

Onde,

P1 - Peso final após 24h imerso em água deionizada (g)

P0 - Peso inicial da fibra seca (g)

### 3.3.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A caracterização morfológica das fibras foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em equipamento Quanta 540 FEG - FEI, da Central Analítica da Universidade Federal do Ceará, com tensão de aceleração de 20kV e diferentes magnificações. As amostras foram fixadas em porta amostra (stub) com fita adesiva de carbono e metalizadas com ouro para condução de elétrons e para evitar acúmulo de cargas e consequente destruição das amostras, na metalizadora QT150 ES – Quorum. As Figuras 22 a 24 mostram os equipamentos e as amostras metalizadas.



**Figura 22:** Metalizadora utilizada.



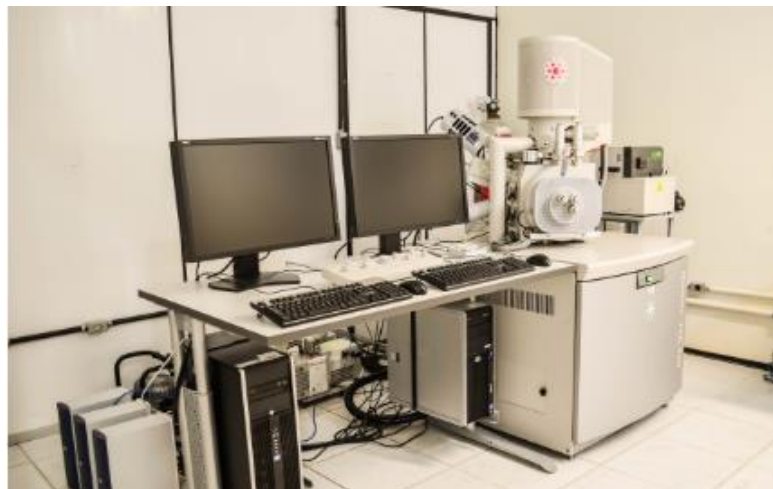
**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 23:** Amostras das fibras metalizadas.



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 24:** Microscópio eletrônico de varredura utilizado.



**Fonte:** Autor, 2018.

### 3.3.5. Espectroscopia de Infravermelho

O ensaio de infravermelho (FTIR) foi realizado na Universidade Federal do Ceará, no Departamento de Química Orgânica e Inorgânica, em equipamento de marca Shimadzu e modelo IRTracer-100, realizados em pastilha de KBr na faixa de comprimento de onda de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , visando analisar a composição química das fibras antes e depois do tratamento. A Figura 25 mostra o espectrofotômetro utilizado.

**Figura 25:** Espectrofotômetro utilizado.



Fonte: Autor, 2018.

### 3.3.6. Termogravimetria

O ensaio de termogravimetria (TG) também foi realizado na Universidade Federal do Ceará, no laboratório de ensaios térmicos do Departamento de Química Orgânica e Inorgânica, utilizando atmosfera de Nitrogênio e Ar sintético (oxidativa), com fluxo de 50mL por minuto, faixa de temperatura de 25-900°C, a uma razão de aquecimento de 10°C/min numa célula de platina e massa em torno de 10mg em equipamento de marca TA Instruments e modelo TGA50-QSéries, mostrado na Figura 26.

**Figura 26:** Balança térmica.



Fonte: Autor, 2018.

### 3.3.7. Difração de Raios-X

O teste de difração de raios-X foi realizado na Universidade Federal do Ceará, no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia Metalúrgica, em um difratômetro de marca Philips e modelo X'Pert, com 40kV em tubo de cobalto, com uma escala de picos entre 10° e 40°. A Figura 27 mostra o difratômetro utilizado.

**Figura 27:** Difratômetro de Raios-X.



**Fonte:** Autor, 2018.

O índice de cristalinidade das fibras foi calculado através dos dados obtidos pelo ensaio, através da equação abaixo:

$$Ic = \frac{Pc}{Pa+Pc} \times 100 \quad (2)$$

Onde  $Ic$  é o índice de cristalinidade do material,  $Pc$  a fração cristalina do difratograma e  $Pa$  a fração amorfa do difratograma.

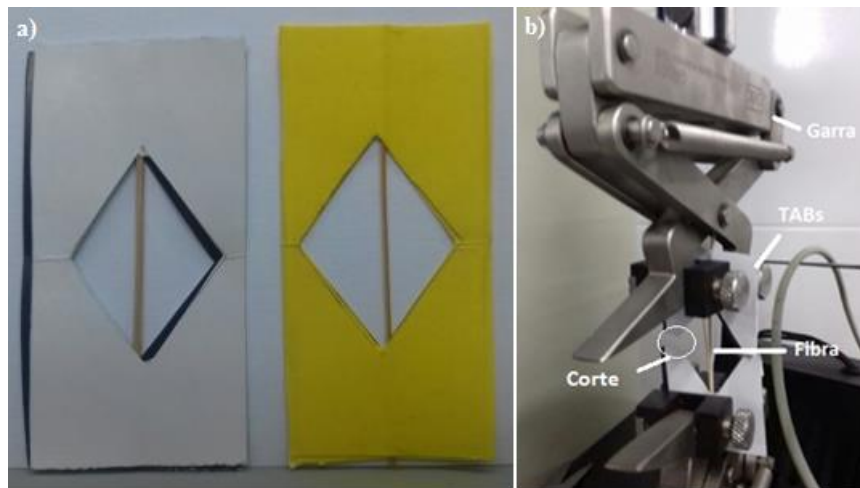
### 3.3.8. Tração

Para o ensaio de tração das fibras foram utilizadas 30 fibras de cada tipo, em uma máquina universal de ensaios de marca EMIC e modelo DL2000, célula de carga de 50kgf, garra autotravante, velocidade de 5mm/min, no SENAI. Inicialmente, foi necessário produzir corpos de prova para ensaios de fibras, de acordo com a norma ASTM C1557-14.

Utilizaram-se suportes de cartolina, chamados TABs para segurar as fibras no maquinário, que tem a função de distribuir uniformemente a carga aplicada na fibra e proteger de danos causados pelas garras. Depois de fabricados, os TABs foram inseridos na máquina

universal de ensaios e, conforme dita a norma, foi feito um corte nas laterais dos TABs para que ele não exerça uma força sobre as fibras, obtendo o resultado real do comportamento mecânico das mesmas. A Figura 28 mostra os TABs produzidos (a) e como foi realizado o ensaio de tração nas fibras (b)

**Figura 28:** Corpo de prova de tração das fibras (a) e ensaio de tração nas fibras (b).



Fonte: Autor, 2018.

### 3.4. Produção do molde e definição de composição dos corpos de prova

Para produzir os corpos de provas, utilizou-se a norma ASTM D3039 que aborda sobre as dimensões dos corpos de prova de materiais compósitos para ensaios de tração, e a norma ASTM D256, que aborda sobre as dimensões dos corpos de prova para ensaio de impacto izod, para o qual foi feito um molde de nylon, com auxílio de um centro de usinagem 5 eixos de marca HERMLE e modelo C400. A Figura 29 mostra o molde utilizado.

**Figura 29:** Molde para confecção dos corpos de provas.



Fonte: Autor, 2018.

Como a resina poliéster insaturada é o material mais caro, foram produzidos corpos de provas com diferentes composições, com 10%, 20% e 30% mássico de fibra a fim de analisar qual composição traria melhor custo benefício e melhores propriedades mecânicas. A composição dos corpos de prova está descrita na Tabela 11.

**Tabela 11:** Composição dos corpos de prova produzidos.

<b>Materiais dos corpos de prova</b>	<b>Composição Mássica</b>	<b>Nomeclatura</b>
Resina Poliéster Insaturada	100% resina	100% Resina
Resina + Fibra natural	90% resina + 10% fibra	10% Fibra Natural
	80% resina + 20% fibra	20% Fibra Natural
	70% resina + 30% fibra	30% Fibra Natural
Resina + Fibra alcalina	90% resina + 10% fibra	10% Fibra Alcalina
	80% resina + 20% fibra	20% Fibra Alcalina
	70% resina + 30% fibra	30% Fibra Alcalina
Resina + Fibra acetilada	90% resina + 10% fibra	10% Fibra Acetilada
	80% resina + 20% fibra	20% Fibra Acetilada
	70% resina + 30% fibra	30% Fibra Acetilada

**Fonte:** Autor, 2018.

### 3.4.1. Cálculo das proporções de resina e fibra

Com o auxílio do paquímetro, foram medidas as dimensões do corpo de prova no molde, obtendo por consequência o volume total de um corpo de prova.

Sabemos que o volume total do corpo de prova será a soma do volume de resina com o volume de fibra, conforme mostra a fórmula abaixo:

$$V_{cp} = V_r + V_f \quad (3)$$

Sabemos que o volume é a relação entre a massa e a densidade do material, ou seja:

$$V_{cp} = \frac{M_r}{\rho_r} + \frac{M_f}{\rho_f} \quad (4)$$

Sabemos que a massa do corpo de prova será a soma da massa de resina com a massa da fibra, conforme mostra a fórmula abaixo:

$$M_{cp} = M_r + M_f \quad (5)$$

Para substituir 10% em massa do corpo de prova por fibra teremos a seguinte equação:

$$Mf = \frac{Mcp}{10} \quad (6)$$

Fazendo (6) em (5) obteremos a seguinte equação:

$$Mr = 9Mf \quad (7)$$

Fazendo (7) em (4), obteremos a seguinte equação, na qual nos dará a massa da resina, visto que temos o volume do corpo de prova e as respectivas densidades da fibra e resina:

$$Vcp = \frac{Mr}{9\rho_f} + \frac{Mr}{\rho_r} \quad (8)$$

Retornando para a equação (7) obteremos a massa de fibra para um corpo de prova com 10% de fibra.

Como a resina é líquida, é mais fácil medir pelo volume, então utiliza-se a fórmula abaixo:

$$Vr = \frac{Mr}{\rho_r} \quad (9)$$

O mesmo procedimento foi realizado para o cálculo dos corpos de prova de 20% e 30%, que altera a equação (5), e por conseqüência obteremos outros valores da massa da fibra e do volume da resina.

### 3.5. Produção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fabricados por fusão, técnica mais barata e ambientalmente correta para produção de compósitos com matrizes termofixas, utilizando os seguintes materiais:

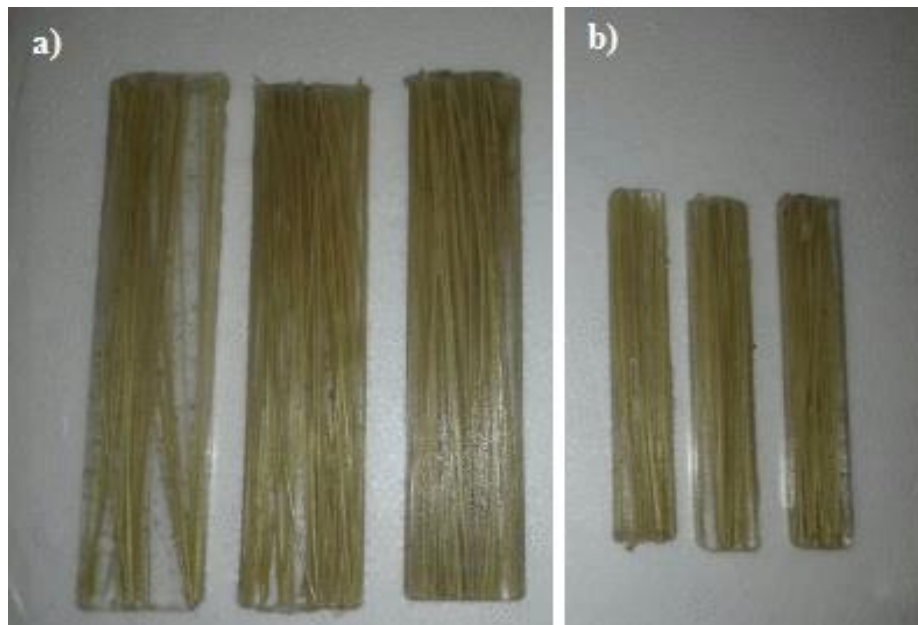
- Molde de nylon
- Proveta de 10ml e 100ml
- Desmoldante
- Resina poliéster insaturado
- Fibras de bambu
- Catalisador peróxido de metil etil cetona
- Balança analítica
- Torno e prensas

Inicialmente, foram definidas as proporções de resina e fibra para que fossem calculados os volumes e peso da resina, catalisador e fibra, onde o volume de resina foi medido na proveta de 100 ml, o catalisador na proveta de 10 ml, e as fibras pesadas na balança analítica.

Antes de fechar o molde, passou-se o desmoldante nas duas superfícies do molde para facilitar a retirada dos corpos de prova e, com a ajuda de prensas, garantiu-se que o molde estivesse bem fechado para que não houvesse vazamento de material.

Misturou-se a resina com o catalisador, que tem a função de iniciar a cura da resina, e preencheu o molde com o material e em seguida inseriu as fibras de maneira que elas tivessem a melhor distribuição no corpo de prova. Após 12h, os corpos de provas foram retirados do molde. A Figura 30 mostra alguns dos corpos de prova produzidos.

**Figura 30:** Corpos de prova de tração (a) e impacto izod (b).



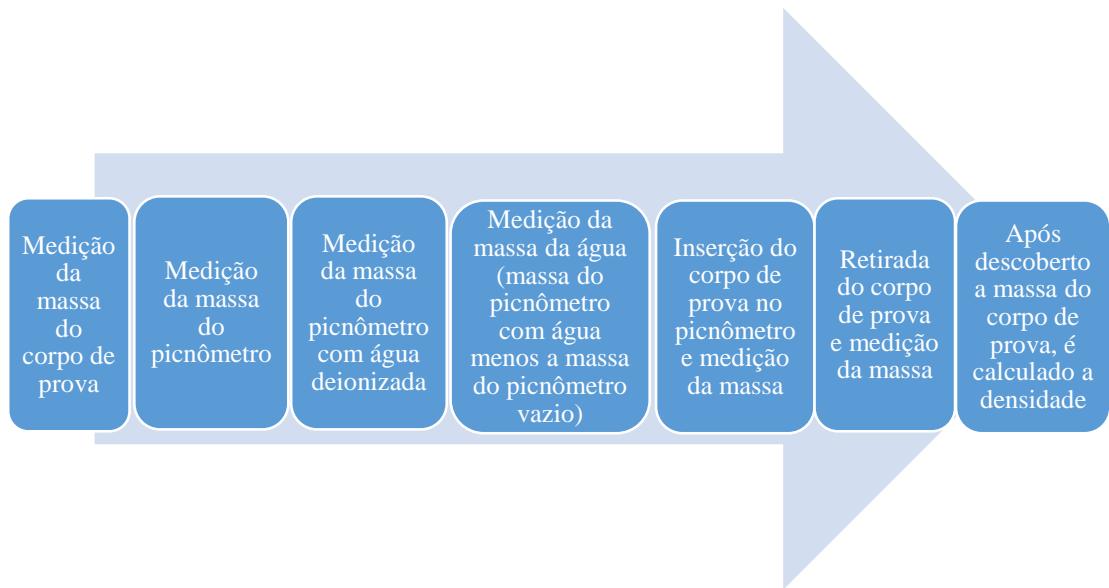
Fonte: Autor, 2018.

### 3.6. Ensaio nos corpos de prova

#### 3.6.1. Densidade

O ensaio de densidade foi realizado conforme dita a norma ASTM D792 Método A, em triplicata, utilizando um picnômetro, sendo calculada a densidade através do volume de água extravasada, conforme mostra a Figura 31.

**Figura 31:** Esquema da obtenção da densidade dos corpos de prova.



**Fonte:** Autor, 2018.

### 3.6.2. Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme dita a norma ASTM D570, em triplicata, realizando o cálculo de absorção de água através da diferença das massas dos corpos de provas antes e após a imersão em água deionizada por 24h, utilizando a balança analítica, através da equação (1).

### 3.6.3. Tração

Para o ensaio de tração dos corpos de provas foi utilizada uma máquina universal de ensaios de marca EMIC e modelo DL2000, com garras GR 006 de mordentes recartilhados com célula de carga de 2 ton, no SENAI. Inicialmente, foi utilizado um paquímetro de 200 mm para medir a largura e espessura dos corpos de prova. Com o auxílio de um marcador hidrossolúvel, foi marcada a área de trabalho de 50 mm. A velocidade de ensaio foi de 2mm/min, conforme dita a norma ASTM D3039. A Figura 32 mostra a máquina de ensaio pronta para operação. Foram utilizados 5 corpos de prova para cada condição de amostra.



**Figura 32:** Ensaio de tração.



Fonte: Autor, 2018.

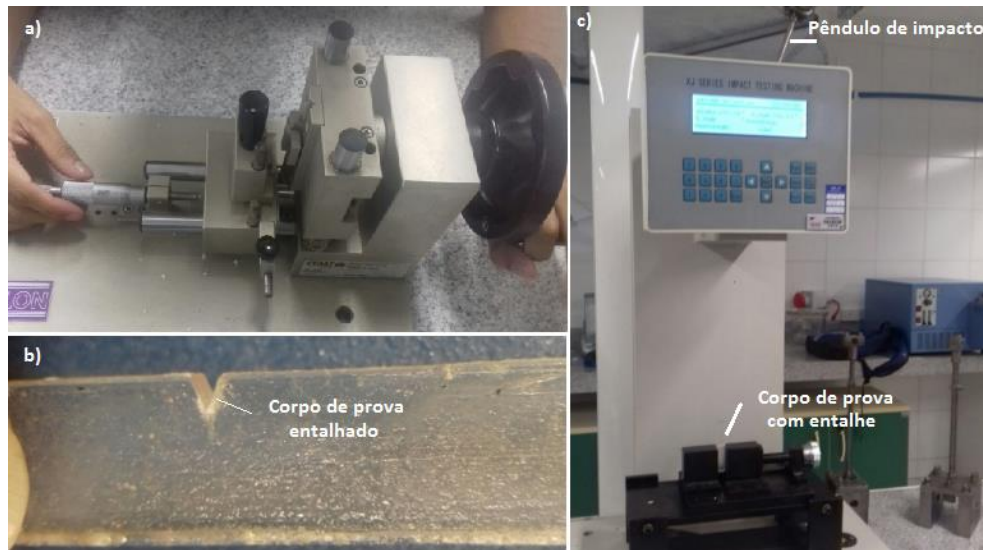
#### **3.6.4. Microscopia eletrônica de varredura**

Foi realizada a caracterização morfológica dos compósitos com 30% de fibras bambu após o ensaio de tração, buscando verificar a adesão da fibra com a matriz. O ensaio foi realizado na Central Analítica do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, utilizando a mesma metodologia e os mesmos equipamentos do ensaio realizado sobre as fibras.

#### **3.6.5. Impacto Izod**

O ensaio de impacto Izod foi realizado conforme dita a norma ASTM D256, utilizando 5 corpos de prova, no SENAI, utilizando-se o paquímetro para encontrar o centro do corpo de prova, onde foi feito um entalhe de 2,56 mm, com o auxílio de um entalhador manual de marca CEASTE para em seguida ser ensaiado no pêndulo de impacto de marca TIMEGROUP, modelo XJ25Z, com pêndulo de impacto de 2,75 J e 5,5 J. A Figura 33 representa os maquinários utilizados e um exemplo de um corpo de prova entalhado.

**Figura 33:** Entalhador manual (a), corpo de prova com entalhe (b) e pêndulo de impacto (c).



Fonte: Autor, 2018.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Ensaio nas fibras

#### 4.1.1. Dimensionamento

Foi encontrada que a área média populacional das fibras naturais foi superior às outras fibras elaboradas. Já a área de secção transversal da fibra alcalinizada foi inferior à encontrada para a fibra acetilada, fato justificado devido à perda de material superficial pela saída de grupos extraíveis (lignina de baixo peso molecular, graxas, óleos, gorduras). Já na fibra acetilada, verificou-se um aumento de área de secção, levantando a hipótese de ter ocorrido um inchamento da fibra, corroborando com a literatura. Tal inchamento pode ser decorrente da inserção de grupos acetila que contribuíram simultaneamente para o aumento do diâmetro e para a perda de interações de hidrogênio que auxiliam na compactação da fibra. As áreas médias populacionais dos diferentes tipos de fibra estão descritas na Tabela 12.

**Tabela 12:** Dimensionamento da área média das fibras.

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Área média populacional (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Desvio Padrão Populacional (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Área máxima (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Área mínima (mm<sup>2</sup>)</b>
Natural	0,7045	0,2260	1,1593	0,3307
Alcalina	0,5513	0,1968	1,0605	0,2958
Acetilada	0,6458	0,2075	1,0670	0,3290

Fonte: Autor, 2018.

#### 4.1.2. Densidade

Com o processo de alcalinização, onde a fibra perdeu parte das ceras, ligninas de baixo peso molecular e óleos, a densidade média da fibra diminuiu em relação a fibra natural (COSTA JÚNIOR *et al.*, 2014). Após a acetilação, onde a fibra recebeu grupos acetila, a densidade média da fibra aumentou em relação à fibra alcalina (MIRANDA *et al.*, 2015) conforme mostra a Tabela 13.

**Tabela 13:** Densidade média das fibras.

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Densidade média (g/ml)</b>
Natural	0,49 ± 0,01
Alcalina	0,35 ± 0,04
Acetilada	0,48 ± 0,05

**Fonte:** Autor, 2018.

#### 4.1.3. Absorção de água

Com os resultados obtidos com o ensaio de absorção de água, mostrados na Tabela 14, podemos concluir que todas as fibras absorveram água, sendo a fibra alcalinizada a mais absorvente (143,70%). Esse fato se dá devido ao aumento de hidroxilas livres decorrentes do tratamento realizado com NaOH, que facilitam as interações via ligações de hidrogênio, corroborando com a literatura. Já a fibra acetilada foi a que menos absorveu água (62,98%), o que pode ser justificado pelo processo de acetilação ter sido bem sucedido, onde a fibra ficou menos hidrofílica dada a adição de grupos acetila (LOPES *et al.*, 2011).

**Tabela 14:** Percentual de absorção média de água das fibras naturais, alcalinas e acetiladas.

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Absorção média de água em 24h (%)</b>
Natural	107,65 ± 0,96
Alcalina	143,70 ± 2,45
Acetilada	62,98 ± 3,23

**Fonte:** Autor, 2018.

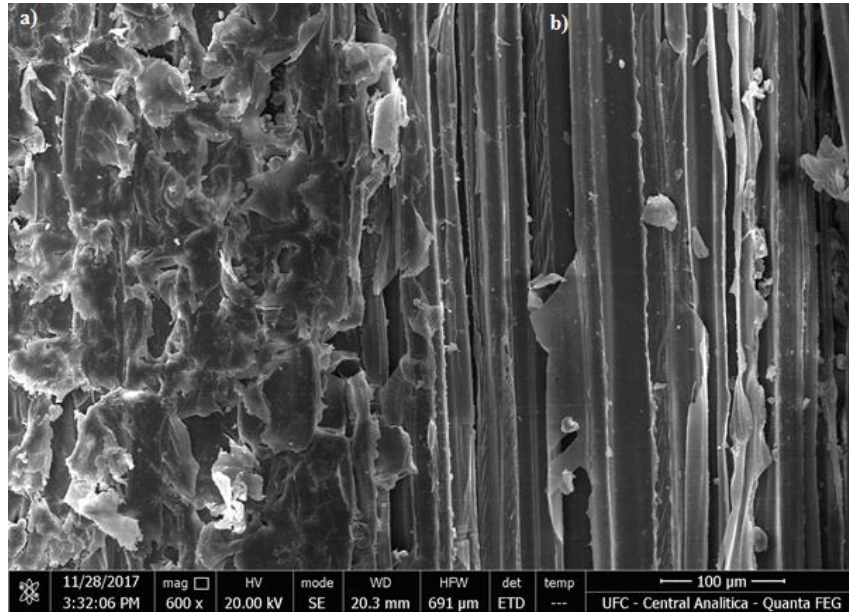
#### 4.1.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

De acordo com as imagens obtidas pelo MEV, foi verificado o comportamento da superfície das fibras de bambu e as mudanças que ocorreram devidos aos tratamentos realizados sobre as mesmas.

Conforme dito anteriormente, as fibras vegetais possuem óleos e ceras na sua superfície que podem dificultar a adesão da fibra com a matriz hidrofóbica (COSTA JÚNIOR *et al.*, 2014).

Através da análise utilizando o MEV, foi possível constatar a presença dessas impurezas na superfície da fibra natural de bambu, que podem ser observadas na Figura 34.

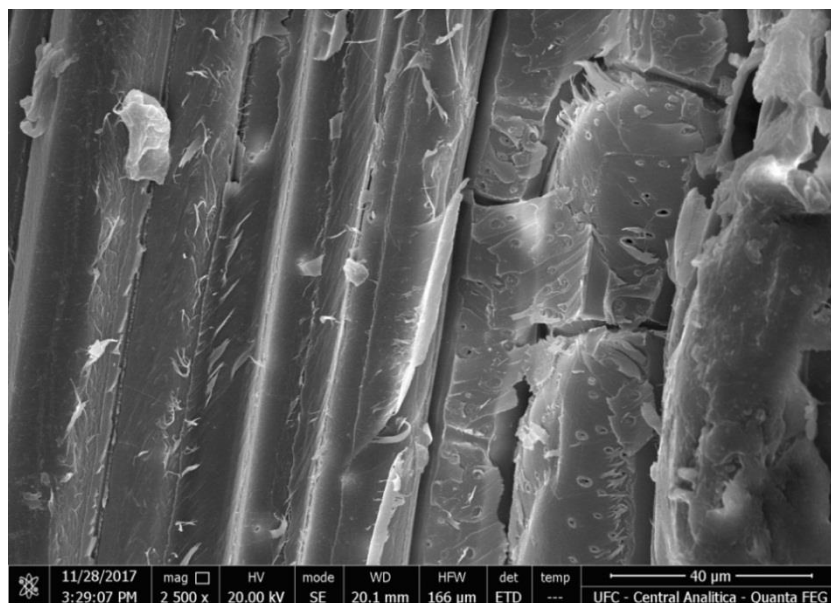
**Figura 34:** Impurezas na fibra natural de bambu (a) e região fibrosa (b).



Fonte: Autor, 2018.

Devido à presença dessas impurezas não foi possível constatar a presença de poros na superfície da fibra de bambu natural. Através da Figura 35 foi possível verificar a rugosidade da fibra natural.

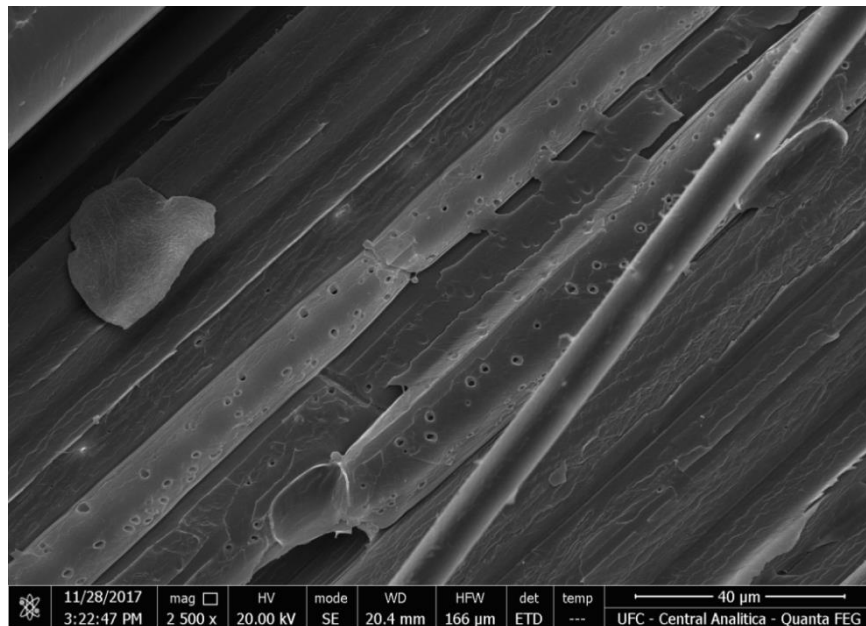
**Figura 35:** Rugosidade da fibra natural de bambu.



Fonte: Autor, 2018.

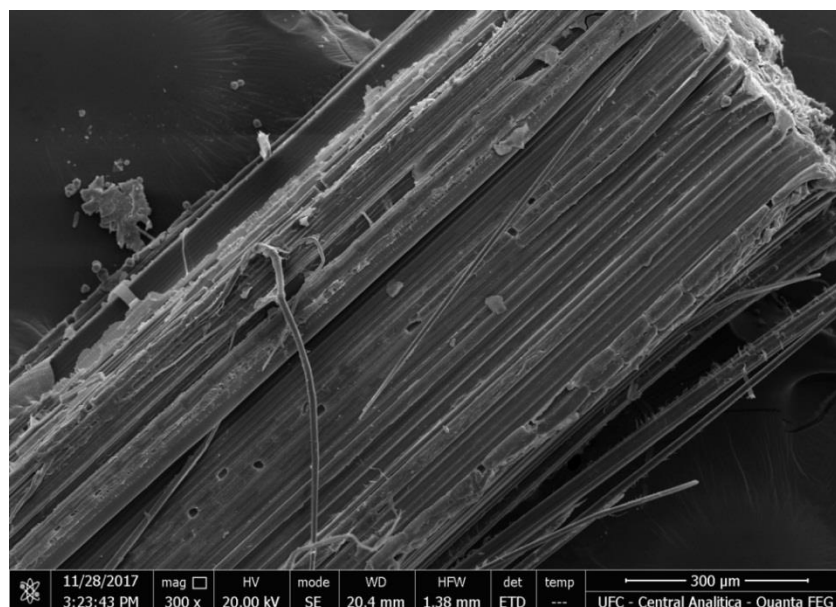
Com o tratamento de alcalinização, notou-se que a fibra obteve uma superfície mais limpa, devido à remoção de parte das impurezas presentes (óleos, ceras e gorduras), deixando a fibra mais rugosa quando comparada com a fibra natural, conforme mostra a Figura 36. Observou-se também o aparecimento de microfibrilas e microporos, observados na Figura 37. (COSTA JÚNIOR *et al.*, 2014).

**Figura 36:** Rugosidade da fibra alcalina.



Fonte: Autor, 2018.

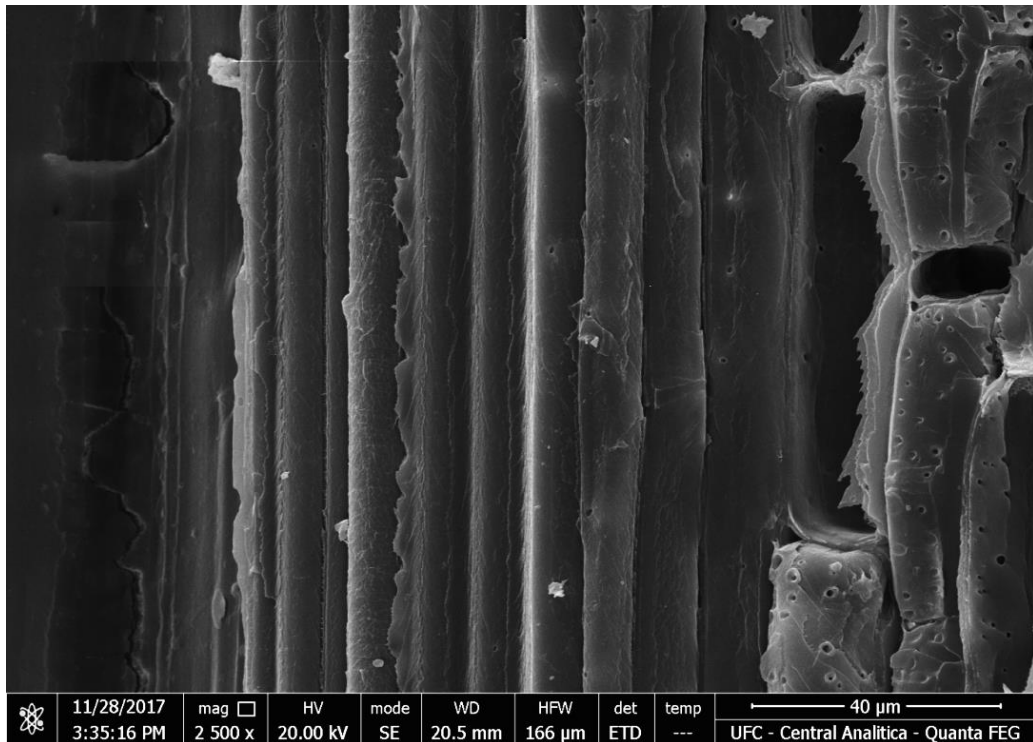
**Figura 37:** Aparecimento de microfibrilas e microporos com o tratamento de alcalinização.



Fonte: Autor, 2018.

Com o tratamento de acetilação, a superfície da fibra não apresentou impurezas como observado na fibra natural. A Figura 38 mostra que o processo de acetilação aumentou a rugosidade quando comparada com as demais fibras, indicando que a fibra aumentou sua capacidade de adesão com a matriz hidrofóbica.

**Figura 38:** Rugosidade da fibra acetilada.



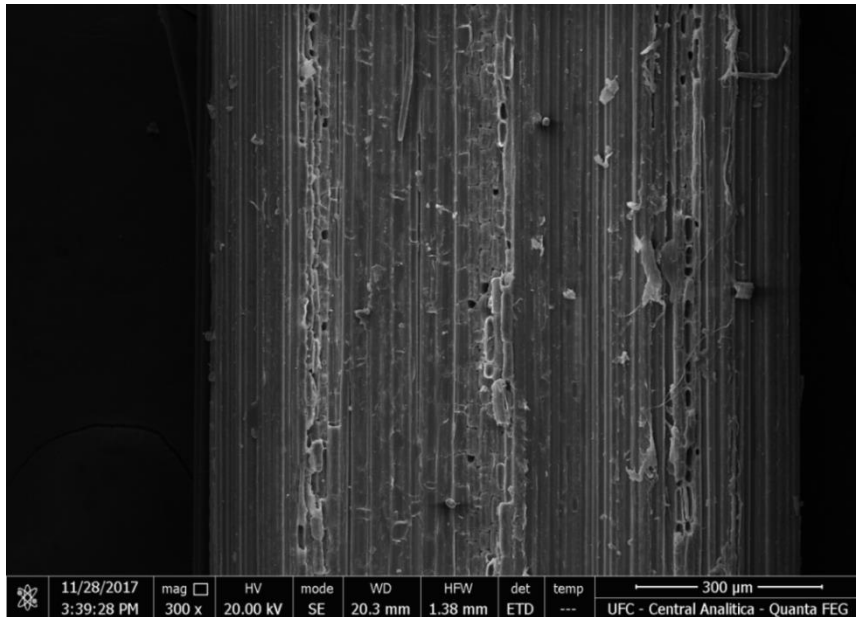
**Fonte:** Autor, 2018.

Utilizando o software Gimp 2.8.16 foi possível calcular a média da área dos microporos presentes nas fibras alcalinas e acetiladas através da relação entre o tamanho da imagem (pixels) e o comprimento padrão em micrometros na régua da imagem.

Constatou-se que houve um aumento dos microporos na fibra acetilada, comparado com a fibra alcalina, que passou de uma média de  $159\mu\text{m}^2$  para  $169\mu\text{m}^2$ , corroborando com o resultado encontrado por Phuong *et al.* (2010), citado por Shawkataly *et al.* (2015). A Figura 39 mostra as microfibrilas expostas e os microporos na fibra acetilada.



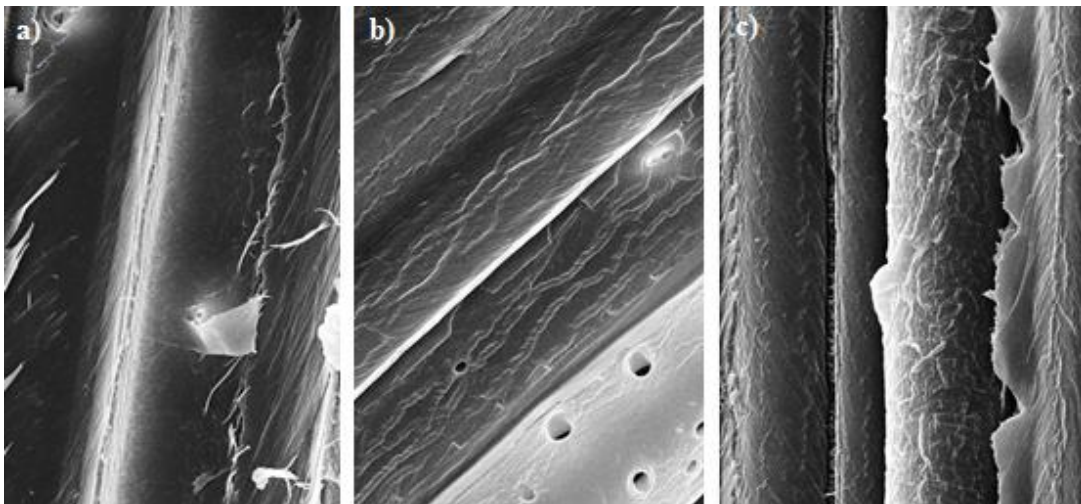
**Figura 39:** Microfibrilas e microporos expostos da fibra acetilada.



Fonte: Autor, 2018.

A Figura 40 mostra a diferença entre as rugosidades das fibras natural, alcalina e acetilada.

**Figura 40:** Comparação das rugosidades das fibras natural (a), alcalina (b) e acetilada (c) em 5000x.



Fonte: Autor, 2018.

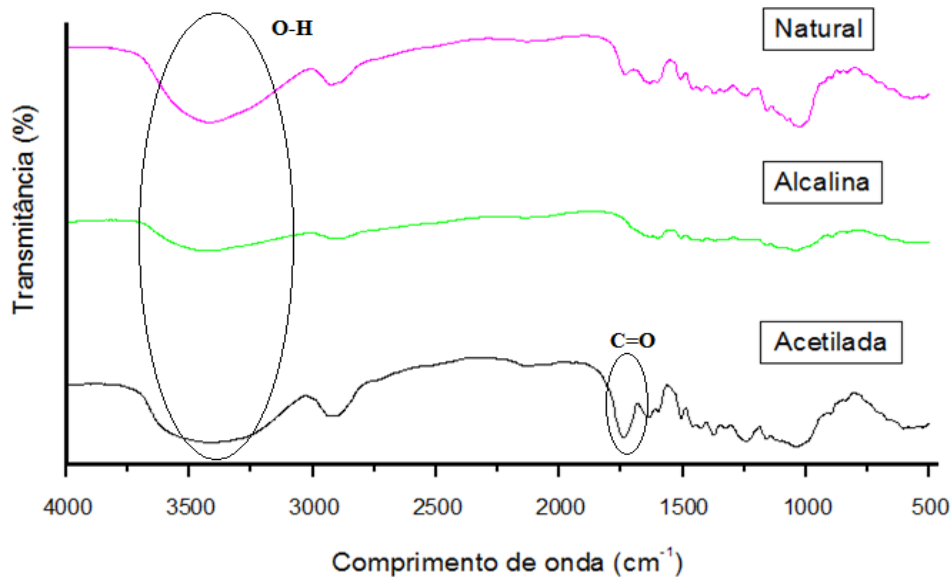
#### 4.1.5. Espectroscopia de Infravermelho

De acordo com os espectros obtidos, verificou-se que todas as amostras possuem bandas na região da presença de hidroxilas ( $3400$  e  $3200\text{ cm}^{-1}$ ), coerente com a literatura, uma vez que



o tratamento de hidrofobização (acetilação) atinge camadas superficiais, e não internas. Pelo gráfico da Figura 41, é possível verificar a ocorrência da acetilação, devido à intensificação do modo vibracional 1750-1670  $\text{cm}^{-1}$ .

**Figura 41:** Espectro amostras de bambu natural, alcalina e acetilada.



Fonte: Autor, 2018.

Observaram-se variações de estiramento (entre fraca e média) no modo vibracional encontrado em 3000  $\text{cm}^{-1}$ , referente a acoplamentos de C-H. O forte estiramento (v, F) no comprimento de onda entre 1750 e 1670  $\text{cm}^{-1}$  da fibra acetilada indica o crescimento do grupo carbonila (C=O), indicador que a acetilação ocorreu com sucesso, devido o grupo acetil possuir uma carbonila. A Tabela 15 mostra os modos vibracionais encontrados nos espectros (LOPES *et al.*, 2010; POSOM, J.; SIRISOMBOON, 2017; LI *et al.*, 2017).

**Tabela 15:** Espécies encontradas pelo FTIR.

Modo Vibracional	Intensidade	Espécie	Referência
3400 – 3200	v, L	O-H	LOPES <i>et al.</i> (2011)
3000	v, f-m	C-H (aromático)	LOPES <i>et al.</i> (2011)
1750 – 1670	v, F	C=O (éster)	KHALIL <i>et al.</i> (2001)
1300-1000	v, F	C-O	HOAREAU <i>et al.</i> (2005)

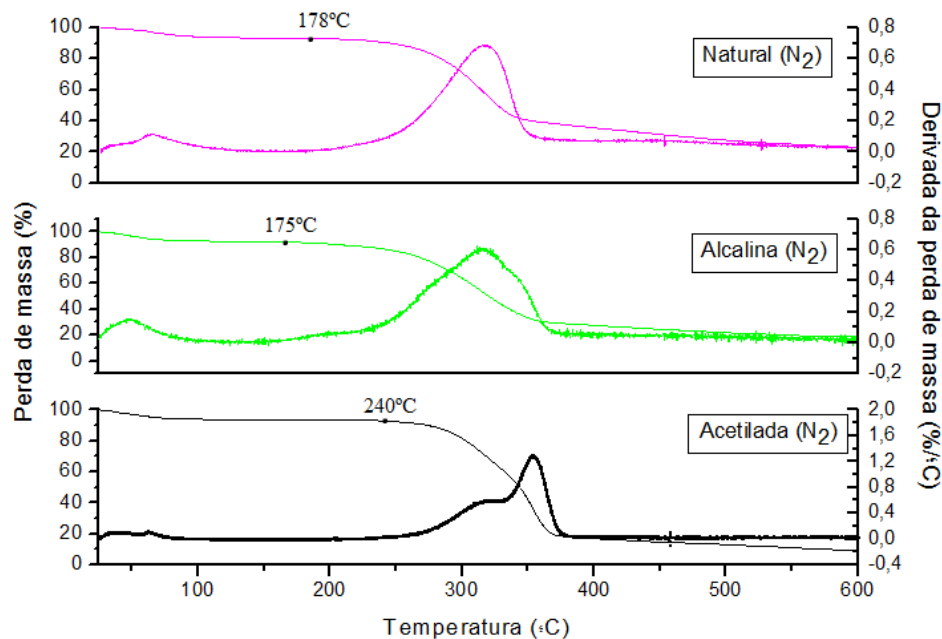
Fonte: Autor, 2018.

No modo vibracional localizado na faixa de 1300 e 1000  $\text{cm}^{-1}$  está relacionado a fortes estiramentos dos acoplamentos C-O, sendo mais acentuado na fibra acetilada (HOAREAU *et al.*, 2005; POSOM, J.; SIRISOMBOON, 2017; LI *et al.*, 2017).

#### 4.1.6. Termogravimetria

Pode-se notar que todas as amostras apresentam perda de massa na faixa de temperatura que vai de 25 a 105°C, decorrente da perda de umidade, conforme a Figura 42 (COSTA JÚNIOR *et al.*, 2014).

**Figura 42:** Análise TG e DTG em N<sub>2</sub> na fibra de bambu natural, alcalino e acetilado.



Fonte: Autor, 2018.

Em atmosfera de N<sub>2</sub>, a fibra de bambu natural apresenta um evento bem pronunciado que vai de aproximadamente 178°C a 380°C, característico da degradação térmica da lignina e celulose (YANG *et al.*, 2006; COSTA JÚNIOR *et al.*, 2014). No início deste evento, existe um pequeno evento que pode ser atribuído a degradação de extrativos naturais da fibra de bambu associado a degradação de segmentos das hemiceluloses (POPESCU *et al.*, 2011; SINGH *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2017).

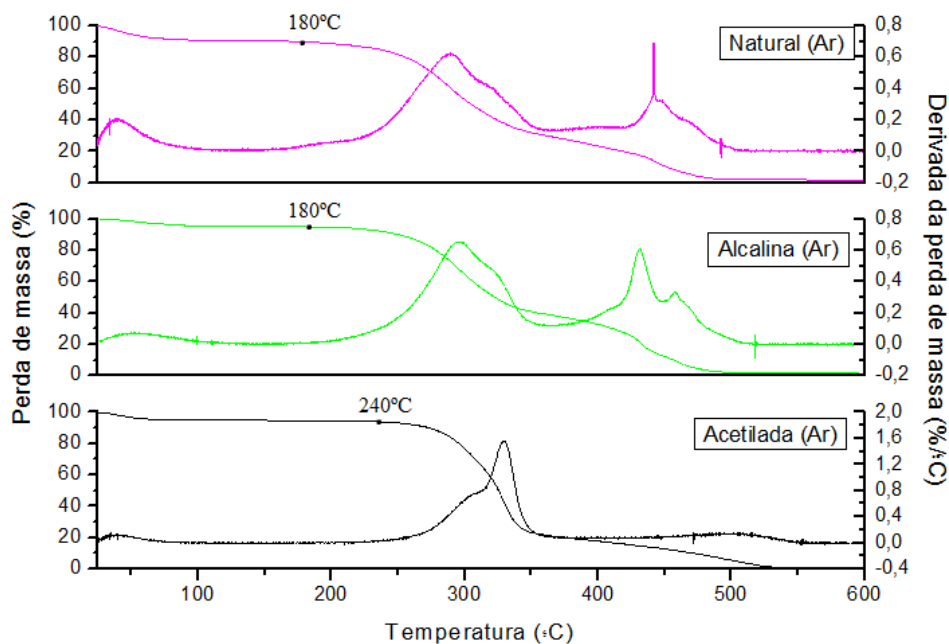
A amostra de fibra de bambu alcalinizada, não apresentou uma mudança significativa na região onde ocorre o máximo de degradação. A fibra de bambu alcalinizada teve como faixa de degradação a faixa de 175°C até 380°C, apresentando a mesma região encontrada para a degradação da fibra natural (YANG *et al.*, 2006; SINGH *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2017).

A amostra de fibra de bambu acetilada apresentou uma melhora na estabilidade térmica em atmosfera de  $N_2$ , sendo a degradação iniciada em aproximadamente em  $240^\circ C$  e indo até  $380^\circ C$ . Este aumento na temperatura de degradação da fibra acetilada está relacionado com a energia de ligação necessária para degradar o grupo acetil que foi inserido com o tratamento, proporcionando uma maior estabilidade térmica à fibra em comparação com a fibra alcalina, que possui hidroxilas livres que exigem uma quantidade menor de energia para degradar (POPESCU *et al.*, 2011; SINGH *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2017).

Pereira (2010) reportou que a degradação dos segmentos de hemicelulose, celulose e lignina ocorrem em temperaturas similares para os dois tipos de atmosfera, seja ela inerte ou oxidativa.

A avaliação da termogravimetria em atmosfera de ar sintético também revelou um ganho de estabilidade térmica quando comparado à fibra de bambu acetilada com a alcalina e a natural, tendo elevado em  $60^\circ C$  a temperatura de degradação térmica. Este resultado se torna muito importante para aplicações em materiais compósitos poliméricos, tendo em vista que em muitos casos a temperatura de processo é superior a  $200^\circ C$ . A Figura 43 mostra o comportamento da degradação das fibras de bambu em atmosfera de ar sintético e, a Tabela 16 resume os eventos encontrados nas duas atmosferas analisadas.

**Figura 43:** Análise TG e DTG em ar sintético na fibra de bambu natural, alcalino e acetilado.



Fonte: Autor, 2018.

**Tabela 16:** Eventos encontrados na termogravimetria.

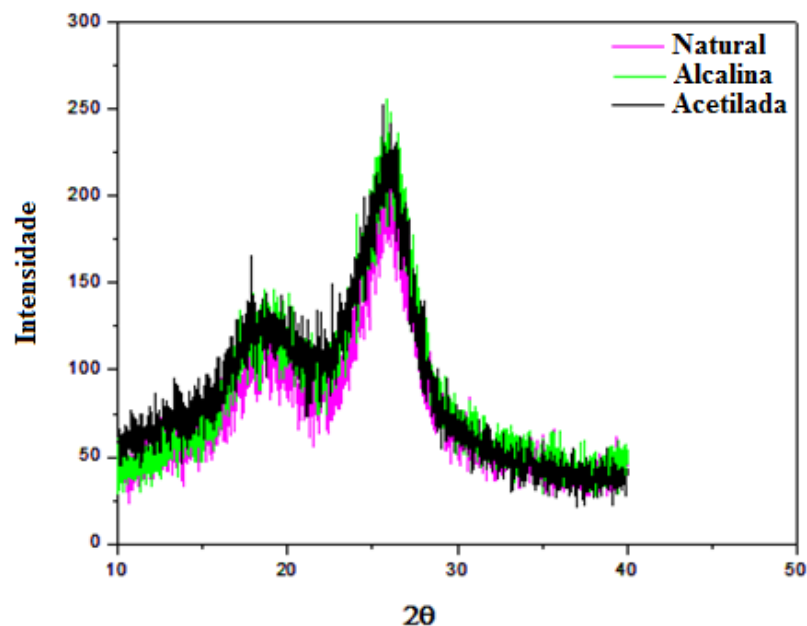
Tipo de fibra	Eventos	
	N <sub>2</sub>	Ar sintético
Natural	178°C – 380°C	180°C – 380°C
Alcalina	175°C – 380°C	180°C – 380°C
Acetilada	240°C – 380°C	240°C – 380°C

Fonte: Autor, 2018.

#### 4.1.7. Difração de Raios-X

A partir da equação 2, através do ensaio de difração de raios-X, pode-se calcular a cristalinidade superficial das fibras, que é diretamente relacionada à propriedade mecânica da mesma (LAKKAD, 1981). A Figura 44 mostra gráfico obtido para as fibras natural, alcalina e acetilada.

**Figura 44:** Difratoograma de Raios-X nas fibras de bambu natural, alcalina e acetilada.



Fonte: Autor, 2018.

Conforme mostra a Tabela 17, o índice de cristalinidade das fibras ficou na ordem alcalina>natural>acetilada. Este fato pode ser justificado pela retirada das ceras, óleos e graxas, através do tratamento alcalino, que recobrem a superfície da fibra natural, diminuindo a área amorfa da fibra, por consequência aumentando sua cristalinidade. Com o tratamento de acetilação, a fibra perde suas hidroxilas livres devido à plastilização da fibra, diminuindo a cristalinidade da fibra (COSTA JÚNIOR *et al.*, 2014; MIRANDA *et al.*, 2015).

**Tabela 17:** Cristalinidade das fibras de bambu natural, alcalina e acetilada.

Tipo de fibra	Cristalinidade (%)
Natural	66.46
Alcalina	68.52
Acetilada	62.47

Fonte: Autor, 2018.

#### 4.1.8. Tração

De acordo com o ensaio de tração realizado, pode-se concluir que as propriedades mecânicas foram afetadas após os tratamentos realizados nas fibras, conforme mostra a Tabela 18. A Figura 45 mostra o rompimento de uma fibra após o ensaio de tração.

**Tabela 18:** Propriedades mecânicas das fibras natural, alcalina e acetilada.

Tipo de fibra	Média da Tensão na força máxima (MPa)	Média da Deformação na força máxima (%)	Média do Módulo de elasticidade (MPa)
Natural	276,70 ± 70,06	17,46 ± 7,51	2260 ± 1148
Alcalina	317,30 ± 49,79	10,17 ± 2,48	3497 ± 337
Acetilada	198,20 ± 30,56	8,41 ± 1,44	2555 ± 237

Fonte: Autor, 2018.

**Figura 45:** Fibra rompida após o ensaio de tração.

Fonte: Autor, 2018.

Como visto anteriormente na Tabela 12, a fibra alcalina possui menor área que a fibra natural, o que mostra que apesar da redução da sua área, a fibra alcalinizada mostrou um desempenho mecânico superior quanto aos resultados de tensão na força máxima (COSTA JÚNIOR *et al.*, 2014). Houve uma diminuição da deformação na força máxima quando comparado com o avanço dos tratamentos químicos, sendo maior na fibra natural e menor na acetilada.

O menor desempenho mecânico encontrado foi o da fibra de bambu acetilada. Foi verificado, conforme a Tabela 12, que a área da fibra de bambu acetilada teve um aumento quando comparado com a alcalina, fato que não contribuiu com a melhora nas propriedades mecânicas, sendo sua tensão e deformação na força máxima inferiores às demais (MIRANDA *et al.*, 2015).

Esse comportamento pode ser explicado devido aos tratamentos químicos que foram utilizados, uma vez que com a acetilação, as hidroxilas dos segmentos de celulose, hemicelulose e lignina reagem formando grupos acetila devido à reação com o anidrido acético. Isso faz com que parte das interações intermoleculares das macromoléculas constituintes do arranjo lignocelulósico sejam perdidas, levando a uma redução da tensão média, devido a perda de parte das forças intermoleculares (GEORGE; MUSSONE; BRESSLER, 2015).

## 4.2. Ensaio nos corpos de prova

### 4.2.1. Densidade

De acordo com a Tabela 19, podemos observar que, à medida que aumenta o volume de fibra, o corpo de prova fica menos denso, o que é explicado devido à densidade da fibra ser menor que a da resina, onde, ao substituir em relação ao volume, fará com que o corpo de prova fique menos denso.

**Tabela 19:** Densidade média dos corpos de prova.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Densidade média (g/ml)</b>
100% Resina	1,199 ± 0,005
10% Fibra Natural	1,118 ± 0,003
20% Fibra Natural	1,106 ± 0,006
30% Fibra Natural	1,050 ± 0,003
10% Fibra Alcalina	1,129 ± 0,007
20% Fibra Alcalina	1,121 ± 0,007
30% Fibra Alcalina	1,109 ± 0,004
10% Fibra Acetilada	1,122 ± 0,002
20% Fibra Acetilada	1,112 ± 0,006
30% Fibra Acetilada	1,095 ± 0,007

**Fonte:** Autor, 2018.

A densidade dos compósitos está relacionada com a densidade das fibras, onde quanto maior a densidade da fibra, menor será a densidade do corpo de prova. Entre os corpos de prova produzidos, o que possui menor densidade é o de resina com 30% de fibra natural, com densidade de 1,050 g/ml, em seguida o compósito com incorporação de 30% de fibra acetilada, com densidade de 1,095 g/ml e por fim, o compósito com 30% de fibra alcalina, com 1,109 g/ml.

#### 4.2.2. Absorção de água

De acordo com a Tabela 20, podemos notar que o compósito feito somente de resina é a que menos absorve água, pois a resina é pouco higroscópica. Os compósitos reforçados com fibra acetilada são os que possuem menor absorção de água quando comparado com os reforçados com fibra natural e alcalina, fato explicado devido o menor teor de hidroxila na fibra acetilada.

Já para os compósitos de fibra natural, ao realizar o ensaio, notou-se que parte dos extrativos contidos na fibra dissolveu-se na água via difusão. Este fato foi percebido devido à formação de fungos na água pós-procedimento, o que levou ao compósito de fibra natural a absorver mais água via capilaridade que os compósitos de fibra alcalina, devido à existência de mais espaços para acomodação da água.

**Tabela 20:** Absorção média de água nos compósitos.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Absorção média de água em 24h (%)</b>
100% Resina	0,62 ± 0,37
10% Fibra Natural	5,71 ± 1,24
20% Fibra Natural	9,16 ± 2,35
30% Fibra Natural	12,25 ± 5,17
10% Fibra Alcalina	3,62 ± 0,45
20% Fibra Alcalina	5,91 ± 0,35
30% Fibra Alcalina	7,08 ± 0,32
10% Fibra Acetilada	2,99 ± 0,19
20% Fibra Acetilada	5,28 ± 0,26
30% Fibra Acetilada	6,87 ± 0,19

**Fonte:** Autor, 2018.

### 4.2.3. Tração

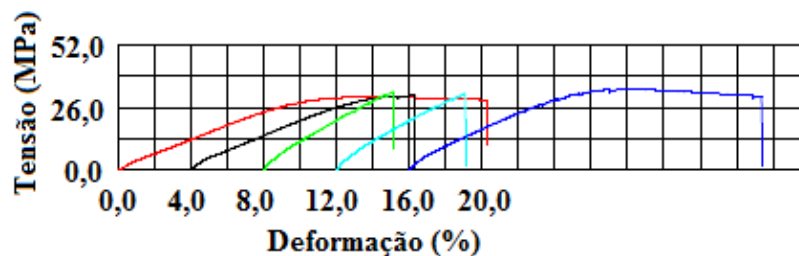
A Tabela 21 mostra as propriedades mecânicas da resina de poliéster insaturada utilizada. O perfil de desempenho dos corpos de prova pode ser avaliado na Figura 46. É possível notar que a resina sem a incorporação de fibras possui comportamento dúctil, possuindo tensão máxima entorno de 31,92 MPa e deformação máxima chegando a 10%.

**Tabela 21:** Propriedades mecânicas de tração da resina de poliéster insaturada.

Compósito 100% Resina	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
CP1	30,50	13,00	345,02
CP2	30,94	12,00	536,04
CP3	32,69	7,00	768,71
CP4	31,90	7,00	764,69
CP5	33,58	12,00	628,32
Média	31,92 ± 1,25	10,00 ± 3,00	608,60 ± 176,90

Fonte: Autor, 2018.

**Figura 46:** Desempenho mecânico de tração dos corpos de prova de 100% Resina.



Fonte: Autor, 2018.

Quando se compara este resultado com os obtidos dos compósitos, verifica-se a mudança do perfil de desempenho mecânico, onde é possível verificar a perda de ductilidade nesses últimos, evidenciando incidência de ruptura frágil.

Segundo a Tabela 22, para os compósitos com incorporação de 10% de fibra, nota-se que houve uma redução na tensão máxima para a fibra natural e um aumento pouco significativo na propriedade para os compósitos com 10% de fibra alcalina e acetilada, quando comparado com amostra 100% Resina. As Tabelas de 22 a 24 e a Figura 47, mostram os desempenhos das amostras a 10% de aplicação de fibra.



**Tabela 22:** Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 10% de fibra natural.

<b>Compósito 10% Fibra Natural</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Deformação Máxima (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
CP1	28,66	6,00	533,46
CP2	29,43	5,00	613,03
CP3	21,84	5,00	496,43
CP4	17,48	4,00	614,69
CP5	33,86	9,00	610,39
Média	26,25 ± 6,52	6,00 ± 2,00	573,60 ± 55,13

Fonte: Autor, 2018.

**Tabela 23:** Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 10% de fibra alcalina.

<b>Compósito 10% Fibra Alcalina</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Deformação Máxima (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
CP1	36,17	7,00	593,76
CP2	29,35	7,00	571,66
CP3	27,55	6,00	849,21
CP4	42,37	7,00	656,29
CP5	43,21	8,00	649,91
Média	35,73 ± 7,21	7,00 ± 1,00	664,2 ± 109,6

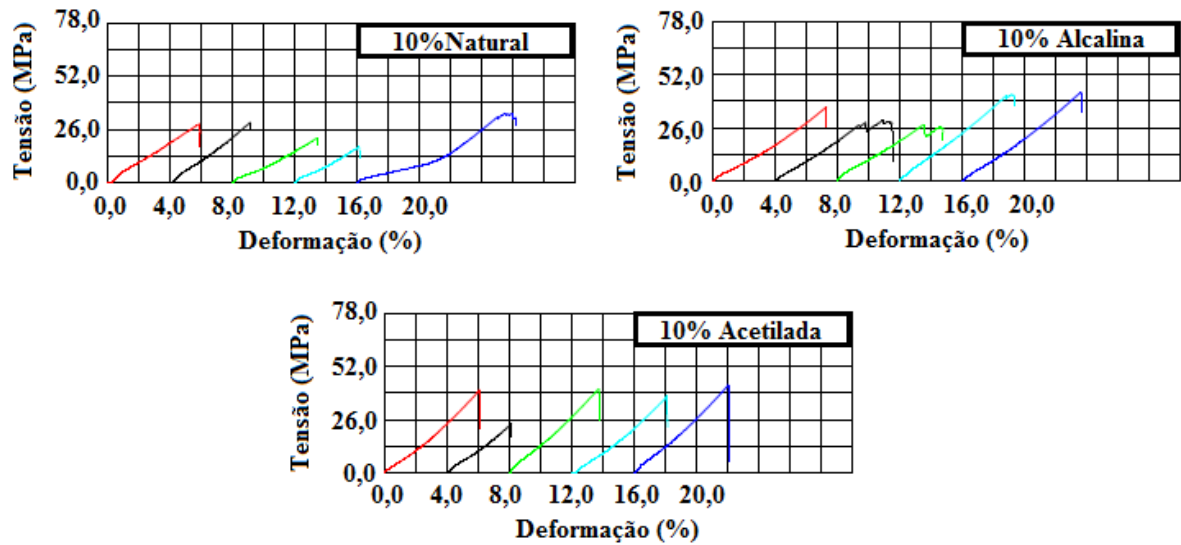
Fonte: Autor, 2018.

**Tabela 24:** Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 10% de fibra acetilada.

<b>Compósito 10% Fibra Acetilada</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Deformação Máxima (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
CP1	40,53	6,00	795,14
CP2	23,82	4,00	659,41
CP3	40,85	6,00	851,13
CP4	37,39	6,00	750,53
CP5	40,45	6,00	775,93
Média	37,20 ± 7,64	6,00 ± 1,00	766,4 ± 70,35

Fonte: Autor, 2018.

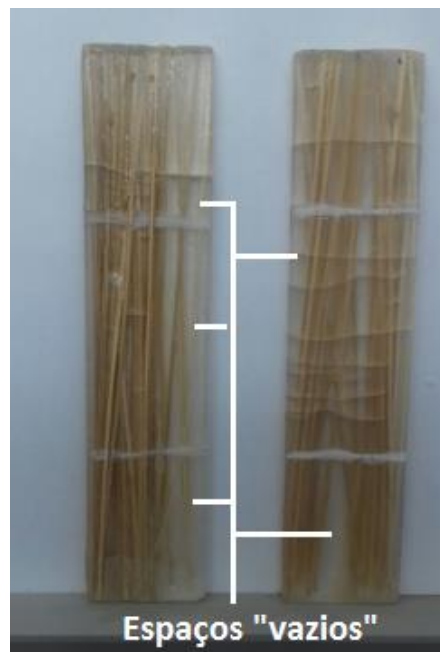
**Figura 47:** Desempenho mecânico de tração dos corpos de prova com incorporação de 10% de fibra natural, alcalina e acetilada.



Fonte: Autor, 2018.

Este fato explica-se pela falta de homogeneidade dos corpos de prova devido à baixa quantidade de fibra, onde é possível notar espaços sem fibras. A ruptura ocorre inicialmente sobre a resina, onde é possível verificar trincas no exterior do compósito. Além disso, as propriedades mecânicas mostraram que a fibra resiste mais que a resina na tensão normal trativa. A Figura 48 evidencia o ocorrido.

**Figura 48:** Falta de homogeneidade nos corpos de prova com 10% de fibras.



Fonte: Autor, 2018.

Conforme as Tabelas 22 a 24 verifica-se que houve um aumento na tensão na força máxima na ordem acetilada > alcalina > natural, onde possivelmente dois efeitos devem atuar para que este fenômeno ocorra. A não uniformidade na distribuição das fibras acarreta em falha prematura dos corpos de prova. Contudo, os tratamentos químicos realizados sobre as fibras mostraram que a fibra alcalinizada seja mais resistente à tração e a acetilada a mais aderente.

Para os compósitos com incorporação de 20% de fibra, nota-se que houve um aumento pronunciado na tensão na força máxima, quando comparado com amostra 100% Resina e os compósitos com 10% de fibras. As Tabelas de 25 a 27 e a Figura 49, mostram os desempenhos das amostras a 20% de aplicação de fibra.

**Tabela 25:** Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 20% de fibra natural.

<b>Compósito 20% Fibra Natural</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Deformação Máxima (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
CP1	53,02	9,00	645,62
CP2	62,66	10,00	999,45
CP3	75,01	10,00	1006,38
CP4	79,05	10,00	892,11
CP5	56,91	11,00	800,32
Média	65,33 ± 11,31	10,00 ± 1	824,8 ± 134,4

Fonte: Autor, 2018.

**Tabela 26:** Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 20% de fibra alcalina.

<b>Compósito 20% Fibra Alcalina</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Deformação Máxima (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
CP1	62,97	10,00	807,69
CP2	71,82	11,00	857,29
CP3	69,19	10,00	850,89
CP4	74,17	11,00	883,30
CP5	71,81	10,00	868,10
Média	69,99 ± 4,30	10,00 ± 1	853,5 ± 28,38

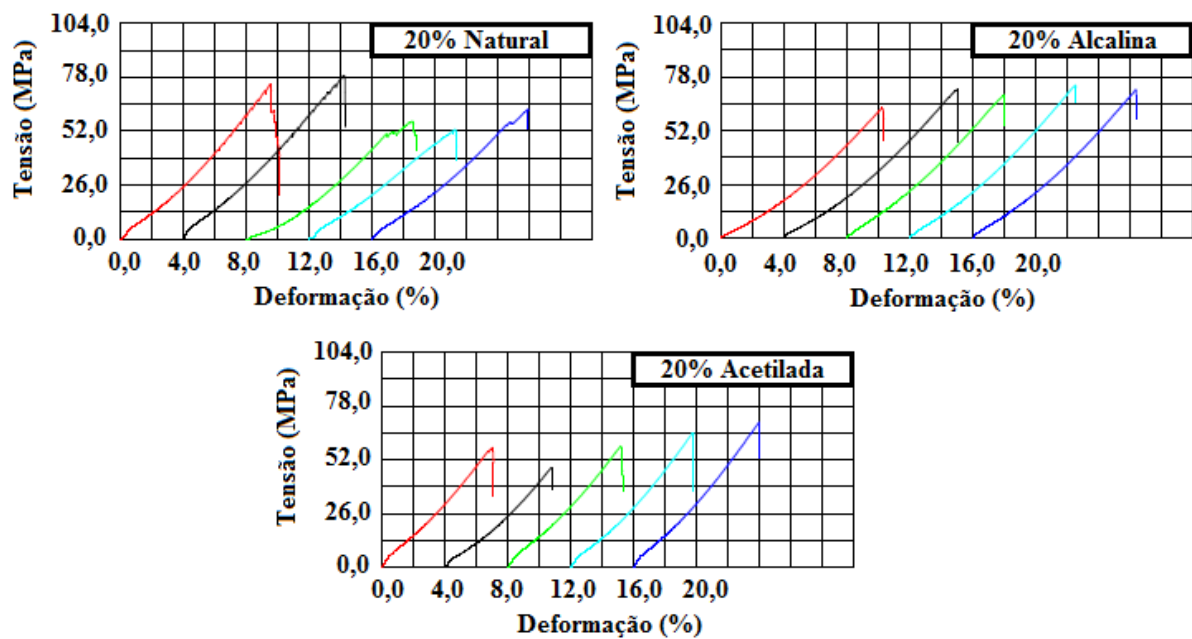
Fonte: Autor, 2018.

**Tabela 27:** Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 20% de fibra acetilada.

Compósito 20% Fibra Acetilada	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
CP1	57,60	7,00	972,45
CP2	48,32	7,00	911,49
CP3	43,08	7,00	975,30
CP4	64,61	8,00	1028,17
CP5	70,12	8,00	1042,88
Média	60,03 ± 8,19	7,00 ± 1,00	986,1 ± 52,11

Fonte: Autor, 2018.

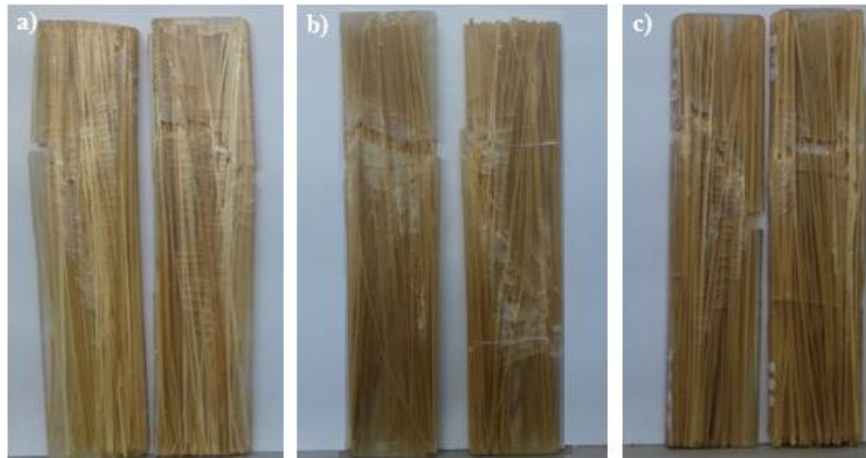
**Figura 49:** Desempenho mecânico de tração dos corpos de prova com incorporação de 20% de fibra natural, alcalina e acetilada.



Fonte: Autor, 2018.

A melhora na propriedade da tensão na força máxima é resultado da melhor dispersão das fibras de bambu dentro da matriz de poliéster insaturado. A distribuição mais uniforme dos esforços sobre as fibras faz com que a tensão na força máxima aumente, evitando falhas prematuras sobre a matriz. A Figura 50 mostra a ruptura uniforme da matriz de poliéster e das fibras.

**Figura 50:** Fratura uniforme nos corpos de prova com incorporação de 20% de fibras natural (a), alcalina (b) e acetilada (c).



**Fonte:** Autor, 2018.

Conforme as Tabelas 25 a 27 verifica-se que o desempenho mecânico das amostras elaboradas com fibra natural e alcalina são próximos entre si, sendo a alcalina superior com 69,99 MPa fato que pode ser explicado devido à boa propriedade mecânica de tração da fibra e a melhora na adesão quando comparada com a fibra natural.

O compósito com 20% de fibra acetilada teve resultados de tração inferiores aos compósitos com 20% de fibra natural e alcalina. Esses resultados sugerem que apesar da fibra acetilada possuir maior aderência à matriz, a redução na sua resistência à tração causada pelo tratamento químico de acetilação faz com que sua tensão na força máxima seja inferior. Estes resultados estão de acordo com os obtidos com as amostras a 30% de incorporação de fibras, mostrados nas Tabelas 28 a 30.

**Tabela 28:** Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 30% de fibra natural.

<b>Compósito 30% Fibra Natural</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Deformação Máxima (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
CP1	100,94	11,00	1139,46
CP2	97,26	11,00	1085,0
CP3	89,62	13,00	810,50
CP4	69,03	8,00	1237,77
CP5	96,13	10,00	1225,61
Média	90,60 ± 12,73	11,00 ± 2,00	1063,0 ± 155,40

**Fonte:** Autor, 2018.

**Tabela 29:** Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 30% de fibra alcalina.

<b>Compósito 30% Fibra Alcalina</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Deformação Máxima (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
CP1	97,50	11,00	1069,26
CP2	100,06	12,00	1053,23
CP3	89,17	11,00	940,29
CP4	83,64	11,00	988,37
CP5	88,20	11,00	1011,95
Média	91,72 ± 6,84	11,00 ± 1,00	1013,0 ± 51,67

**Fonte:** Autor, 2018.

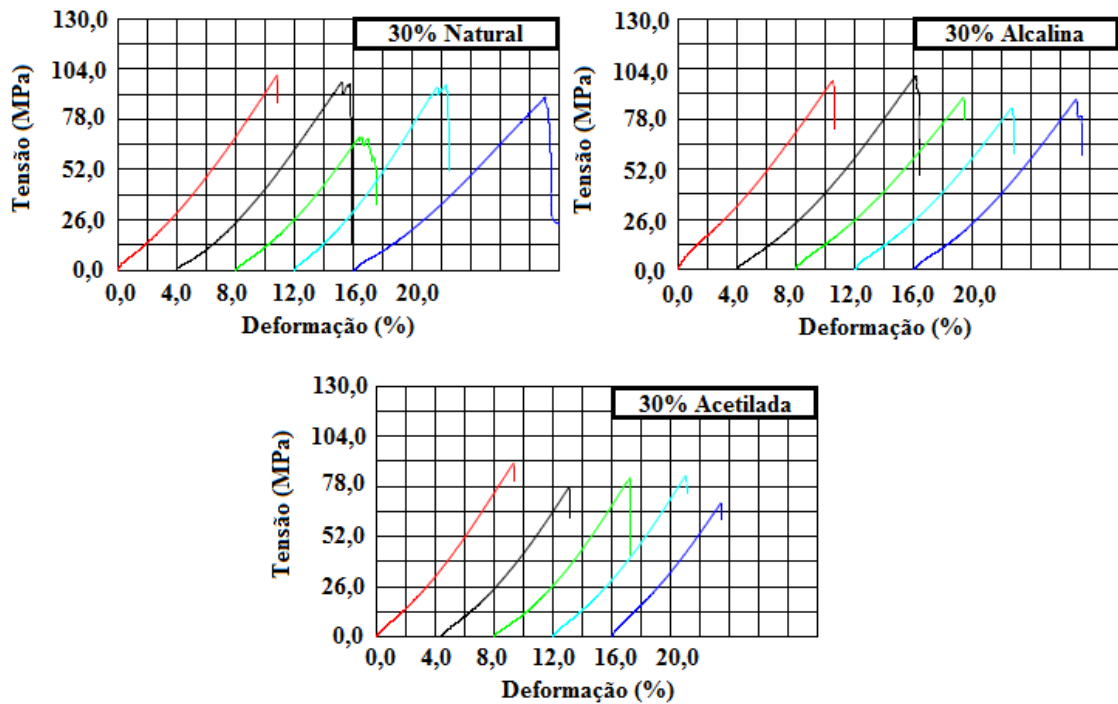
**Tabela 30:** Propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova com 30% de fibra acetilada.

<b>Compósito 30% Fibra Acetilada</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Deformação Máxima (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
CP1	89,84	9,00	1178,19
CP2	77,12	9,00	1133,62
CP3	82,35	9,00	1166,82
CP4	83,66	9,00	1169,73
CP5	69,35	7,00	1084,37
Média	80,46 ± 7,68	8,00 ± 1,00	1147,0 ± 38,68

**Fonte:** Autor, 2018.

Os compósitos com 30% de fibras natural e alcalina obtiveram desempenhos mecânicos de tração próximos entre si e o compósito com incorporação de 30% de fibra acetilada foi novamente inferior aos demais. A Figura 51 mostra o desempenho mecânico dos compósitos com 30% de incorporação de fibra de bambu.

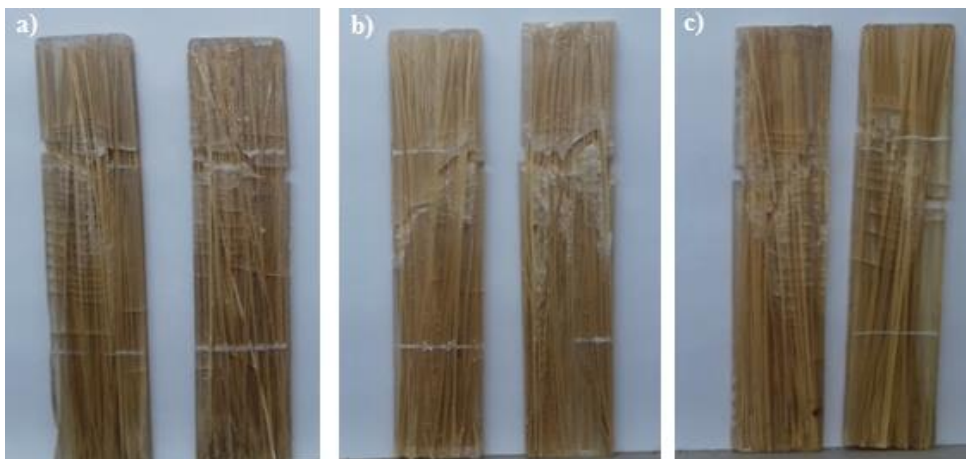
**Figura 51:** Desempenho mecânico de tração dos corpos de prova com incorporação de 30% de fibra natural, alcalina e acetilada.



Fonte: Autor, 2018.

Conforme observado para as amostras de 20% de incorporação de fibras de bambu, os compósitos a 30% de fibra também obtiveram o mesmo perfil de ruptura, mostrando rupturas tanto na matriz quanto nas fibras simultaneamente, evidenciando que, de fato, as fibras agem como agente de reforço e não como concentradores de tensão. A Figura 52 mostra a fratura nos compósitos com 30% de fibra de bambu.

**Figura 52:** Fratura uniforme nos corpos de prova com incorporação de 30% de fibra natural (a), alcalina (b) e acetilada (c).



Fonte: Autor, 2018.

Através dos ensaios de tração dos compósitos produzidos, foi possível calcular a tenacidade média dos corpos de provas, onde se concluiu que com a incorporação de 20% e 30% de fibras de bambu, a tenacidade aumentou quando comparado ao corpo de prova somente de resina. Este fato não ocorreu para a incorporação a 10% de fibra devido à falta de homogeneidade na dispersão das fibras no interior da matriz.

O aumento da incorporação da fração de fibras aumentou o desvio padrão dos valores da tenacidade, fato característico das fibras lignocelulósicas e do arranjo disperso das fibras no compósito. Os resultados de tenacidade corroboram com os encontrados para tensão máxima suportada pelos compósitos, sendo maior para os compósitos com fibra alcalina, em seguida da natural e acetilada. A Tabela 31 mostra os valores encontrados de tenacidade dos compósitos.

**Tabela 31:** Tenacidade média dos compósitos.

<b>Tenacidade média dos corpos de prova (kJ/m<sup>3</sup>)</b>	
100% Resina	1980,49 ± 681,02
10% Fibra Natural	797,44 ± 435,04
20% Fibra Natural	3285,25 ± 562,27
30% Fibra Natural	4668,28 ± 1267,57
10% Fibra Alcalina	1358, 21 ± 232,44
20% Fibra Alcalina	3301,69 ± 273,40
30% Fibra Alcalina	4760,10 ± 525,70
10% Fibra Acetilada	1001,270 ± 302,06
20% Fibra Acetilada	2094,89 ± 405,20
30% Fibra Acetilada	3175,09 ± 518,01

**Fonte:** Autor, 2018.

A Tabela 32 resume os resultados encontrados referentes ao ensaio de tração nos corpos de prova, assim como a tenacidade dos mesmos.



**Tabela 32:** Resumo das propriedades mecânicas de tração dos corpos de prova.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Média da Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Média da Deformação Máxima (%)</b>	<b>Média do Módulo de Elasticidade (MPa)</b>	<b>Tenacidade (kJ/m<sup>3</sup>)</b>
100% Resina	31,92	0,10	608,6	1980,49
10% Fibra Natural	26,25	0,06	573,6	797,44
20% Fibra Natural	65,33	0,10	824,8	3285,25
30% Fibra Natural	90,60	0,11	1063,0	4668,28
10% Fibra Alcalina	35,73	0,07	664,2	1358, 21
20% Fibra Alcalina	69,99	0,10	853,5	3301,69
30% Fibra Alcalina	91,72	0,11	1013	4760,10
10% Fibra Acetilada	37,20	0,06	766,4	1001,27
20% Fibra Acetilada	60,03	0,07	986,1	2094,89
30% Fibra Acetilada	80,46	0,08	1147,0	3175,09

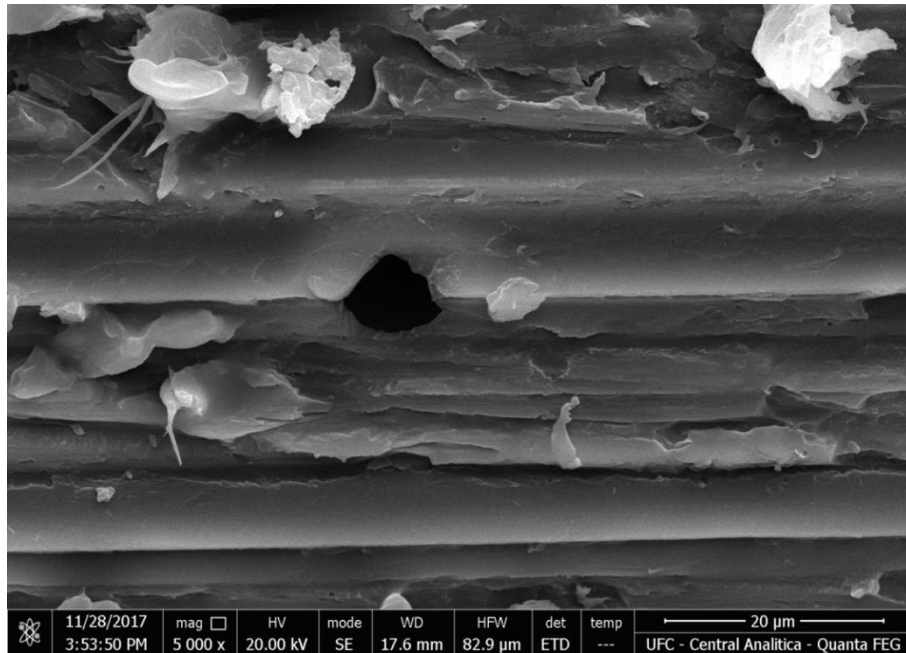
Fonte: Autor, 2018.

#### 4.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise por microscopia eletrônica de varredura foi realizada nos compósitos com teor de 30% de fibras de bambu, pós-ensaio de tração, a fim de avaliar o comportamento das fibras no compósito.

A Figura 53 mostra uma imagem obtida por MEV do compósito de fibra natural com o aumento de 5000x.

**Figura 53:** Compósito com fibra natural com aumento de 5000x.

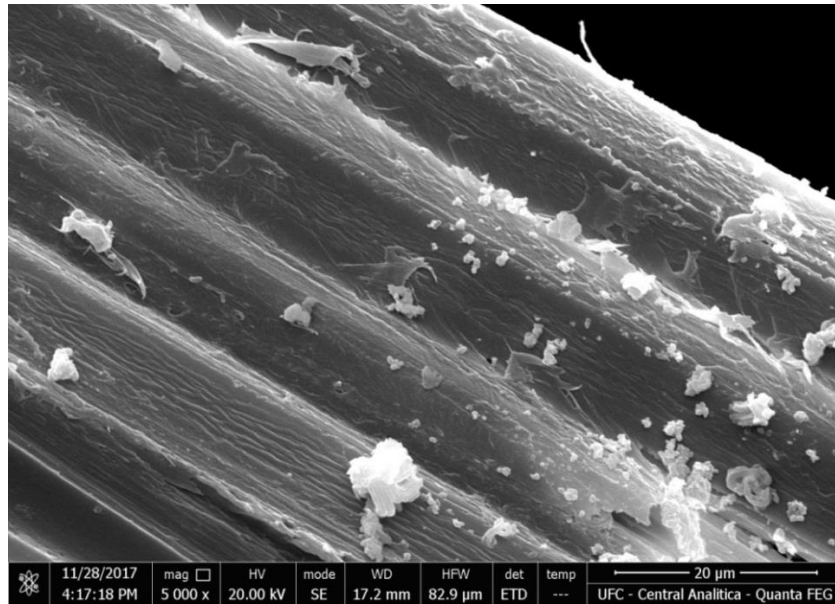


**Fonte:** Autor. 2018.

O detalhe apresenta um vazio na interface fibra/resina, possivelmente provocado por um fragmento de resina que se aderiu a uma sujidade superficial da fibra e posteriormente se destacou. Não foi possível observar a rugosidade na fibra natural, fato que age dificultando a adesão da mesma com a matriz (MILANESE, 2008).

A Figura 54 mostra o compósito elaborado com fibra alcalina a 30%, onde é possível verificar a presença de resíduos de resina aderidos à superfície das fibras. A imagem possui o aumento de 5000x onde é possível verificar também o aumento de rugosidade superficial das fibras de bambu devido ao tratamento alcalino.

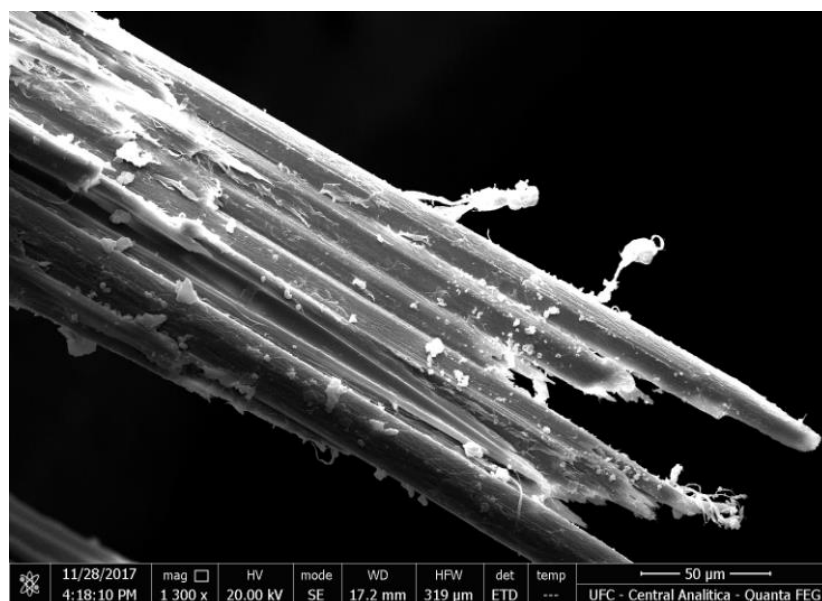
**Figura 54:** Compósito com fibra alcalina com aumento de 5000x.



**Fonte:** Autor, 2018.

É possível notar o desprendimento fibra/matriz, fato é evidenciado pela presença de resquícios de resina sobre as fibras, corroborando com o ensaio de tração, que mostraram que a ruptura iniciou sobre a resina, propagando para a interface fibra/matriz. A Figura 55 mostra a presença de resina sobre as fibras alcalinas, com aumento de 1300x, indicando a melhora na adesão da fibra alcalina com a matriz de resina poliéster insaturada, quando comparado com a fibra natural (MILANESE, 2008).

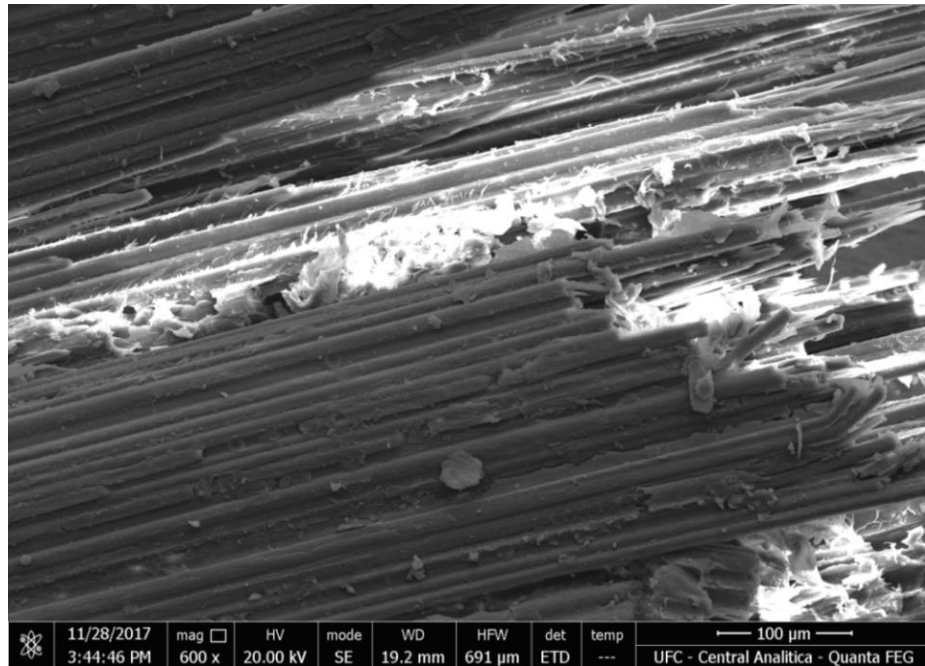
**Figura 55:** Presença de resina sobre as fibras alcalinas com aumento de 1300x.



**Fonte:** Autor, 2018.

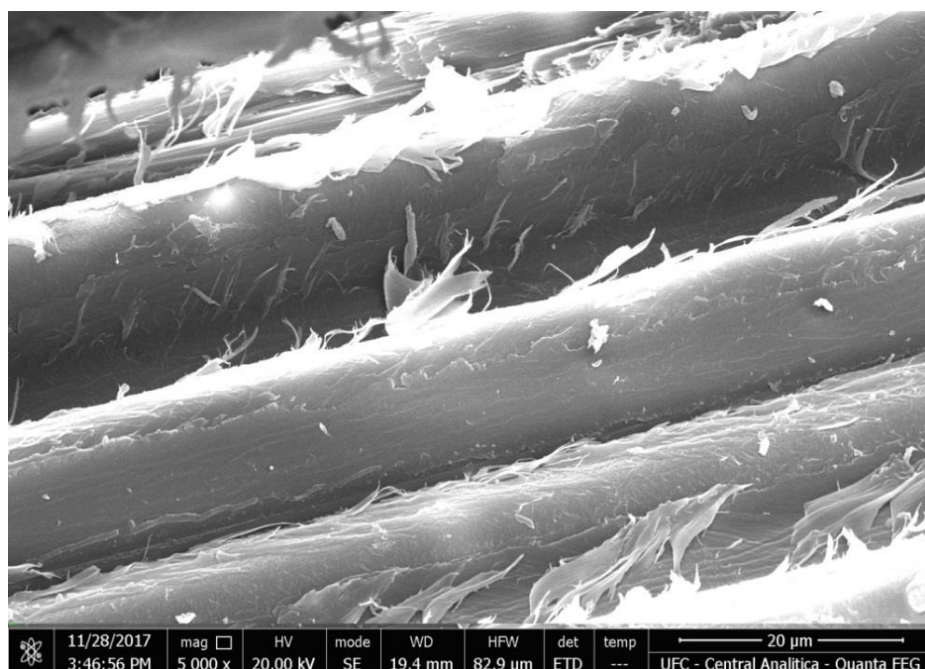
As fibras acetiladas estão recobertas com a matriz, o que mostra uma boa adesão. Foi possível notar a presença de fragmentos de resina na superfície das fibras e o cisalhamento delas pós-ensaio de tração. As Figuras 56 e 57 mostram os fatos observados (MILANESE, 2008).

**Figura 56:** Compósito com fibra acetilada com aumento de 600x.



Fonte: Autor, 2018.

**Figura 57:** Cisalhamento da resina sobre as fibras com aumento de 5000x.



Fonte: Autor, 2018.

#### 4.2.5. Impacto Izod

A Tabela 33 mostra os resultados obtidos no ensaio de impacto Izod do compósito 100% de resina, onde o compósito obteve uma energia média de impacto de 1,23 kJ/m<sup>2</sup>, absorvendo apenas 0,05 J de energia, em média.

**Tabela 33:** Propriedades mecânicas de impacto dos corpos de prova com 100% Resina.

Corpo de prova 100% Resina	Energia de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Absorção de energia (J)
CP1	1,24	0,062
CP2	1,03	0,047
CP3	1,44	0,062
CP4	1,4	0,065
CP5	1,05	0,045
Média	1,23 ± 0,17	0,05 ± 0,01

Fonte: Autor, 2018.

A Figura 58 mostra o corpo de prova elaborado de 100% de resina, rompido pelo ensaio de impacto Izod, onde se observa o comportamento frágil da resina de poliéster, uma vez que a trinca se propaga transversalmente ao corpo de prova, sem sofrer nenhum desvio, acarretando em baixa resistência ao impacto.

**Figura 58:** Ruptura do corpo de prova de 100% Resina no ensaio de impacto.



Fonte: Autor, 2018.

Conforme o aumento do teor de fibras, os compósitos produzidos tiveram um acréscimo em sua energia de impacto. Para os compósitos com incorporação de 10% de fibra, nota-se que houve um aumento bastante significativo na energia de impacto quando comparado com a amostra 100% Resina, sendo observado um aumento em mais de 2300%. A Tabela 34 mostra os desempenhos das amostras a 10% de aplicação de fibra de bambu.

**Tabela 34:** Propriedades mecânicas de impacto dos corpos de prova com 10% de fibra natural, alcalina e acetilada.

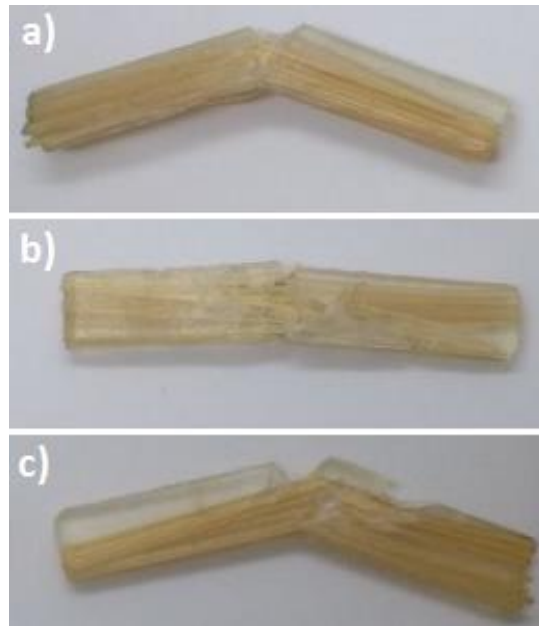
10% Fibra Natural		10% Fibra Alcalina		10% Fibra Acetilada	
Energia de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Absorção de energia (J)	Energia de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Absorção de energia (J)	Energia de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Absorção de energia (J)
33,48	1,505	41,61	1,89	39,06	1,69
35,87	1,612	31,39	1,54	38,63	1,65
31,48	1,435	45,6	1,99	25,21	1,11
24,73	1,085	44,32	1,99	17,74	0,79
22,29	1,03	25,97	1,06	27,55	1,19
29,57 ± 5,19	1,33 ± 0,26	37,77 ± 7,73	1,69 ± 0,40	29,63 ± 8,18	1,28 ± 0,38

Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que o compósito com 10% de fibra alcalina teve melhor desempenho quando comparado com os demais, fato que pode ser explicado devido à propriedade mecânica da fibra alcalina ser superior. Nota-se também que os compósitos com 10% de fibra natural e acetilada obtiveram valores bem próximos, fato que pode ser explicado devido à boa propriedade mecânica da fibra natural e a boa adesão da fibra acetilada que, apesar de ter resistência à tração inferior a da fibra natural, a sua boa adesão fez com que o comportamento dos dois fosse bem próximo.

A Figura 59 mostra a fratura dos corpos de prova com 10% de fibra de bambu após o ensaio, onde pode-se notar que nenhum dos corpos de prova rompeu por completo, indicando uma elevada tenacidade, pois, se a ruptura tivesse ocorrido, a energia absorvida seria ainda maior. A propagação da trinca é dificultada pelas fibras, fazendo com que a ruptura propague de forma longitudinal pela interface matriz/fibra. Como resultado final do ensaio de impacto Izod, verificou-se que o corpo de prova não rompe por completo, ficando dependurado pelas fibras de reforço. O mesmo ocorre com os corpos de prova com incorporação de 20% e 30% de fibra de bambu.

**Figura 59:** Fratura nos corpos de prova com 10% de fibra natural (a), alcalina (b) e acetilada (c).



**Fonte:** Autor, 2018.

O aumento no teor de fibras melhorou a dispersão das mesmas na matriz, distribuindo a energia de impacto na interface fibra/matriz, por consequência melhorando as propriedades mecânicas de impacto. Para os compósitos com 20% de fibras de bambu natural e alcalina, o desempenho mecânico dos compósitos foi bem parecido, sendo ainda superior para o compósito com fibra alcalina devido à melhor propriedade mecânica da fibra e à melhor adesão da mesma com a matriz de poliéster insaturada.

Os compósitos com 20% de fibra acetilada, apesar de ainda inferiores aos demais quanto às propriedades de impacto, obtiveram um aumento de 25% na energia de impacto quando comparado ao compósito com 10% de fibra acetilada. Este fato é justificado pelo aumento do teor de fibra, melhorando a adesão das fibras acetiladas com a matriz de poliéster instaurada. A Tabela 35 mostra os desempenhos das amostras a 20% de aplicação de fibra.



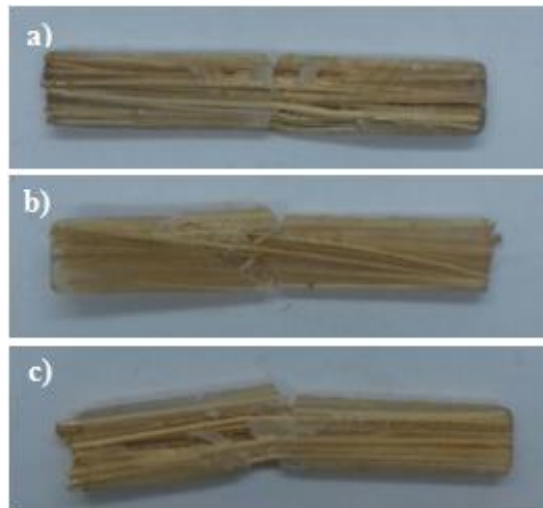
**Tabela 35:** Propriedades mecânicas de impacto dos corpos de prova com 20% de fibra natural, alcalina e acetilada.

20% Fibra Natural		20% Fibra Alcalina		20% Fibra Acetilada	
Energia de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Absorção de energia (J)	Energia de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Absorção de energia (J)	Energia de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Absorção de energia (J)
46,01	2,25	38,4	1,71	24,41	1,08
40,14	1,84	49,94	2,212	33,24	1,56
43,89	1,98	29,91	1,427	37,15	1,63
45,3	2,06	47,31	2,157	42,59	1,95
35,9	1,65	50,81	2,347	47,61	2,12
42,24 ± 3,76	1,96 ± 0,23	43,27 ± 7,99	1,97 ± 0,38	37 ± 7,95	1,67 ± 0,39

**Fonte:** Autor, 2018.

Como citado anteriormente, verifica-se que a trinca sofre bloqueio em sua propagação quando atinge as fibras, fazendo um percurso longitudinal nas mesmas, permeando na interface fibra/matriz. A Figura 60 mostra a fratura dos corpos de provas com 20% de fibras de bambu.

**Figura 60:** Fratura nos corpos de prova com 20% de fibra natural (a), alcalina (b) e acetilada (c).



**Fonte:** Autor, 2018.

Para os compósitos com incorporação de 30% de fibra, nota-se que houve um aumento de mais de 3748% na energia de impacto quando comparado com o corpo de prova 100% de resina. A Tabela 36 mostra os desempenhos das amostras a 30% de incorporação de fibra de bambu.



**Tabela 36:** Propriedades mecânicas de impacto dos corpos de prova com 30% de fibra natural, alcalina e acetilada.

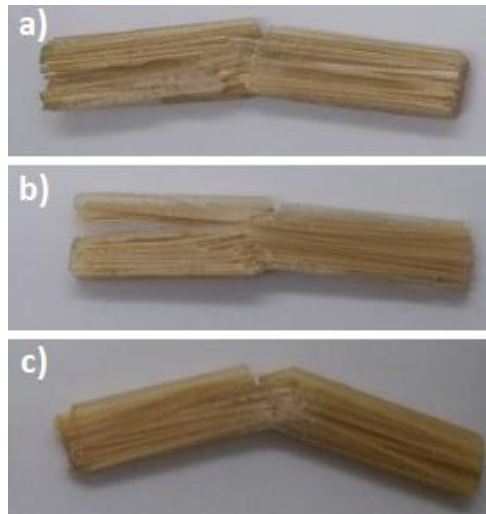
30% Fibra Natural		30% Fibra Alcalina		30% Fibra Acetilada	
Energia de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Absorção de energia (J)	Energia de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Absorção de energia (J)	Energia de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Absorção de energia (J)
40,42	1,8	49,24	2,14	43,43	1,97
48,82	2,57	40,96	1,83	48,12	2,23
48,14	1,98	48,58	2,10	55,98	2,67
47,7	2,14	38,56	1,86	56,5	2,58
42,76	1,94	59,45	2,71	53,34	2,44
45,56 ± 3,35	2,08 ± 0,29	47,35 ± 3,21	2,13 ± 0,35	51,47 ± 5,00	2,38 ± 0,28

Fonte: Autor, 2018.

Os compósitos com incorporação de 30% de fibra acetilada obtiveram um aumento significativo na energia de impacto, sendo esta composição a mais resistente ao ensaio de impacto, quando comparado com os compósitos formulados com as fibras natural e alcalina, comprovando que a adesão fibra/matriz melhorou as propriedades mecânicas de impacto, apesar da propriedade de tração da fibra ser inferior às demais. A melhora na adesão da fibra/matriz faz com que a energia de impacto seja distribuída entre a matriz e a fibra, onde essa sinergia confere desempenhos mecânicos melhores.

Os compósitos com 30% de fibra natural e alcalina obtiveram valores de resistência ao impacto próximo, obtendo pouco destaque ainda para a fibra alcalina, que possui melhor adesão que a fibra natural. A Figura 61 mostra os corpos de provas com incorporação de 30% de fibras, submetidos ao ensaio de impacto Izod.

**Figura 61:** Fratura nos corpos de prova com 30% de fibra natural (a), alcalina (b) e acetilada (c).



**Fonte:** Autor, 2018.

A Tabela 37 mostra o resumo das propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de impacto Izod nos compósitos produzidos.

**Tabela 37:** Resumo das propriedades mecânicas de impacto dos corpos de prova.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Média da Energia de Impacto (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Média da Absorção de energia (J)</b>
100% Resina	1,23	0,05
10% Fibra Natural	29,57	1,33
20% Fibra Natural	42,24	1,96
30% Fibra Natural	45,56	2,08
10% Fibra Alcalina	37,77	1,69
20% Fibra Alcalina	43,27	1,97
30% Fibra Alcalina	47,35	2,13
10% Fibra Acetilada	29,63	1,28
20% Fibra Acetilada	37	1,67
30% Fibra Acetilada	51,47	2,38

**Fonte:** Autor, 2018.

## 5. CONCLUSÃO

Os tratamentos foram realizados com sucesso, o que foi confirmado através do FTIR, que houve a intensificação do modo vibracional entre  $1750-1670\text{ cm}^{-1}$ , correspondente ao grupo carbonila, tornando a fibra mais hidrofóbica, fato constatado também pelo teste de absorção de água, onde a fibra acetilada foi a que obteve menor absorção de água.

Com a análise termogravimétrica a fibra de bambu acetilada ganhou uma maior estabilidade térmica, de  $60^{\circ}\text{C}$ , fato muito importante para utilizá-la em algumas aplicações, visto que alguns processos utilizam temperaturas acima de  $200^{\circ}\text{C}$ .

Pelas imagens geradas no MEV observou-se que a fibra natural continha muitas impurezas na sua superfície, que podem vir a atrapalhar a adesão da fibra com a matriz. Com os tratamentos realizados, as superfícies das fibras foram modificadas, contribuindo para a melhora da adesão da fibra acetilada com a matriz de resina de poliéster insaturada.

Através do ensaio de tração nas fibras, a fibra alcalina obteve maior resistência à tração que as demais, sendo a acetilada a de pior resistência à tração devido à retirada de teores de lignina, resultados que corroboram com os encontrados através do ensaio de cristalinidades das fibras, onde a fibra acetilada foi a menos cristalina. Portanto, para aplicações que exijam melhores propriedades mecânicas, a fibra alcalina é mais vantajosa, porém, para aplicações que não exigem muito das propriedades mecânicas, e sim da térmica durante o processamento, a fibra acetilada é a melhor solução.

Os resultados do ensaio de densidade dos corpos de prova corroboram com o volume e densidade das fibras e resina utilizadas na composição do material, onde foi observado que, com o aumento do teor de fibras, a densidade diminui.

Com as análises de absorção de água dos corpos de prova, o compósito de fibra acetilada foi o que menos absorveu água quando comparado aos compósitos incorporados com fibras naturais e alcalinas. Este fato é explicado devido à acetilação causar à plastilização da fibra, tornando-a menos hidrofílica, dificultando a entrada da água através da capilaridade.

Com o aumento da proporção de fibras no corpo de prova, o material ganhou mais resistência mecânica à tração, visto que as fibras sustentaram a carga no material, sendo o aumento da tensão máxima de mais de 150% nos corpos de prova com 30% de fibras, sendo o

aumento de mais de 185% para o compósito com incorporação de 30% de fibra alcalina, que obteve o maior destaque.

A análise por microscopia eletrônica de varredura nos compósitos constatou que o compósito com incorporação de fibras acetiladas teve a melhor adesão da fibra com a matriz, fato explicado devido à presença de resíduos de resina sobre as fibras e o cisalhamento da mesma após o ensaio de tração.

No ensaio de impacto, os compósitos com incorporação de 30% de fibras obtiveram melhor desempenho mecânico, tendo aumentando a energia de impacto em mais de 3600%, sendo o aumento de mais de 4080% para o compósito com incorporação de 30% de fibra acetilada, que obteve maior destaque.

## **TRABALHOS FUTUROS**

Os resultados obtidos neste trabalho sugerem pesquisas futuras a serem desenvolvidas. Sugere-se:

- Desenvolver um método ou equipamento que facilite a extração de fibras de bambu, de forma a obter fibras com dimensões mais similares.
- Aperfeiçoar o processo de fabricação dos compósitos utilizando técnicas mais elaboradas como infusão a vácuo, moldagem por transferência de resina, entre outros.
- Estudar a influência da fibra de bambu em outros sistemas poliméricos, visando minimizar o custo, utilizando, por exemplo, resíduos poliméricos.
- Realizar outros ensaios sobre os compósitos que não foram realizados nesse estudo, como: intemperismo acelerado e biodegradabilidade.
- Utilizar os compósitos produzidos para desenvolver produtos, como por exemplo, a fabricação de pás eólicas para micro geração de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS

ADHIKARI, R.C.; WOOD, D.H.; SUDAK, L.. Low-cost bamboo lattice towers for small wind turbines. **Energy For Sustainable Development**, Calgary, v. 28, p.21-28, out. 2015.

ANDRADE, E. C.; NÓBREGA, M. M. S. Compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de babaçu *orrbignya speciosa*: caracterização mecânica. in: Congresso Brasileiro de Polímeros, 10., 2009, Foz do Iguaçu. **Anais...** . Foz do Iguaçu: Cbpol, 2009. p. 1 - 8.

ARBELAIZ, A.; MONDRAGON, I. Testing the effect of processing and surface treatment on the interfacial adhesion of single fibres in natural fibre composites. In: FARUK, O; SAIN, M. **Biofiber Reinforcements in Composite Materials**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. p. 772.

ASTM C1557-14, **Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM D1695-12, **Standard Terminology of Celulose and Cellulose Derivatives**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM D256-10e1, **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM D3039 / D3039M-14, **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM D618-13, **Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM D792-13, **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

BARBOSA, B. A. **Tratamento de bambu utilizando de nanopartículas de prata**. 2016. Disponível em: <[http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio\\_resumo2016/relatorios\\_pdf/ctc/QUI/QUI-Bernardo Abraham Barbosa.pdf](http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2016/relatorios_pdf/ctc/QUI/QUI-Bernardo%20Abraham%20Barbosa.pdf)>. Acesso em: 8 jun. 2017.

BRASIL. LEI Nº 12.484, DE 8 DE SETEMBRO DE 2011. **Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu.**, Brasília,DF, set. 2011. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2011/lei/112484.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/112484.htm)>. Acesso em: 20 jul. 2017.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016.

CAO, Y.; WU, Y. Evaluation of statistical strength of bamboo fiber and mechanical properties of fiber reinforced green composites. **Journal Of Central South University Of Technology**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.564-567, set. 2008. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11771-008-0422-z>.

CARVALHO, Laura Hecker de. **Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras Vegetais**. UFCG. 2003. Disponível no site: [www.abpol.com.br/apostilacompositos.doc](http://www.abpol.com.br/apostilacompositos.doc). Acessado em abril de 2017.

CHEN, H. Y.; MIAO, M. H.; DING, X. Chemical treatments of bamboo to modify its moisture absorption and adhesion to vinyl ester resin in humid environment. **Journal of Composite Materials**, v. 45, p. 1533 – 1542, 2011.

CHEN, H. *et al.* Effect of alkali treatment on microstructure and mechanical properties of individual bamboo fibers. **Cellulose**, [s.l.], v. 24, n. 1, p.333-347, 3 nov. 2016.

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**. 2012. 106 F. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

COSTA JÚNIOR, A. E. *et al.* Thermal and mechanical properties of biocomposites based on a cashew nut shell liquid matrix reinforced with bamboo fibers. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 49, n. 18, p.2203-2215, 28 jul. 2014.

D'ALMEIDA, A. L. F. S.; CALADO, V.; BARRETO, D. W.; D'ALMEIDA, J. R. M. Acetilação da fibra de bucha (*Luffa cylindrica*). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.15, n.001, p.59-62, 2005.

DESHPANDE, A. P.; BHASKAR RAO, M.; LAKSHMANA RAO, C. Extraction of bamboo fibres and their use as reinforcement in polymeric composites . **Journal of Applied Polymer Science**, v. 76, p. 83-92, 2010.

FIDELIS, M. E. A.; PEREIRA, T. V. C.; GOMES, O. F. M.; SILVA, F. A. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of Material Research and Technology**, v.2, p.149-157, 2013.

FRANCISCO, A. B.; Nota: Parcelas experimentais de controle de erosão em ravinas com o uso de barreiras de fibra vegetal. **Boletim Gaúcho de Geografia (BGG)**, Porto Alegre, v.43, n. 2, dez. 2016.

GEORGE, M.; MUSSONE, P. G.; BRESSLER, D. C. Modification of the cellulosic component of hemp fibers using sulfonic acid derivatives: Surface and thermal characterization. **Carbohydrate Polymers**, p. 230 – 239, 2015.

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

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. Influência da idade do *Bambusa Vulgaris* nas suas características químicas e anatômicas visando a produção de polpa celulósica. In: **Congresso Anual da ABCP**, 148, São Paulo, 1981. São Paulo, Livro Técnico, ABCP, v.1, p.5-29, 1981.

GOPINATH, A.; KUMAR, M. S.; ELAYAPERUMAL, A. Experimental Investigations on Mechanical Properties Of Jute Fiber Reinforced Composites with Polyester and Epoxy Resin

Matrices. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 97, p.2052-2063, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.448>.

HOAREAU, W.; TRINDADE, W. G.; SIEGMUND, B.; CASTELLAN, A.; FROLLINI, E. Sugar cane bagasse and curaua lignins oxidized by chlorine dioxide and reacted with furfuryl alcohol: Characterization and stability. **Polymer Degradation and Stability**, v.86, p.567-576, 2005.

HUDA, M. S.; DRZAL, L. T.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Effect of fiber surface-treatments on the properties of laminated biocomposites from poly(lactic acid) (PLA) and kenaf fibers. **Composites Science and Technology**, v. 68, n.2, p.424-432, 2008.

INATOMI, T. A. H.; UDAETA, M. E. M. Análise dos Impactos Ambientais na Produção de Energia dentro do Planejamento Integrado de Recursos. In: III Workshop Internacional Brasil - Japão: Implicações Regionais e Globais em Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2005, Campinas - Brasil. **Anais...** Campinas: III Workshop Internacional Brasil - Japão: Implicações Regionais e Globais em Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2005.

IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2016**. Brasília, 2017.

KANG, J.; KIM, S. Improvement in the mechanical properties of polylactide and bamboo fiber biocomposites by fiber surface modification. **Macromolecular Research**, v. 19, 789 – 796, 2011.

KHALIL, H. P. S. A.; ISMAIL, H.; ROZMAN, H. D.; AHMAD, M. N. The effect of acetylation on interfacial shear strength between plant fibres and various matrices. **European Polymer Journal**, v.37, p.1037-1045, 2001.

KHAN, Z. *et al.* Fracture behaviour of bamboo fiber reinforced epoxy composites. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 116, p.186-199, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.015>.

KU, H. *et al.* A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 42, n. 4, p.856-873, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.010>.

KUMAR, A. *et al.* Engineered bamboo scrimber: Influence of density on the mechanical and water absorption properties. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 127, p.815-827, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.069>.

LAKKAD, S. C.; PATEL, J. M. Mechanical properties of bambu, a natural composite. **Fibre Science and Technology**, [s.l.], v. 14, n. 4, p.319-322, jun. 1981. Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/0015-0568\(81\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0015-0568(81)90023-3).

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais - Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2016.

LI, M.; ZHOU, S.; GUO, X. Effects of alkali-treated bamboo fibers on the morphology and mechanical properties of oil well cement. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 150, p.619-625, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.215>.



LOBOVIKOV, M.; PAUDEL, S.; PIAZZA, M.; REN, H.; WU, J. **World bamboo resources: a thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005**. Rome: Non- wood forest products, 2007.

LOPES, F. F. M.; ARAÚJO, G. T.; LUNA, S.; NASCIMENTO, J. W. B.; SILVA, V. R. Modificação das propriedades das fibras de curauá por acetilação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.3, p. 316-321, 2011.

LOPES, F. F. M.; ARAÚJO, G. T.; NASCIMENTO, J. W. B.; GADELHA, T. S.; SILVA, V. R. Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.7, p. 783-788, 2010.

LUCIAN, A. L.; ORLANDO, J. R. **The nanoscience and technology of renewable biomaterials**. Carolina do Norte: John Wiley and Sons, 2009. ISBN: 978-1-4051-6786-4.

MARGEM, J. I. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva**. 2013. 139 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacases, 2013.

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

MEDINA, L.; SCHLEDJEWSKI, R.; SCHLARB, A. K. Process related mechanical properties of press molded natural fiber reinforced polymers. **Composites Science and Technology**, v.69, p.1404–1411, 2009.

MELO, S. L. S. **Investigação das propriedades mecânicas e adesão interfacial dos compósitos de polipropileno virgem e reciclado reforçados com fibras e microfibras de bambu**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MI, Y.; CHEN, X.; GUO, Q. Bamboo Fiberreinforced Polypropylene Composites: Crystallization and Interfacial Morphology. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 64: p.1267–1273, 1997.

MILANESE, A. C. **Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras de sisal e de vidro**. 2008. 131f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

MIRANDA, C. S. *et al.* Effect of surface treatment on properties of bagasse piassava fiber *Attalea funifera* Martius. **Química Nova**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.161-165, 2015.

MOHANTY, A.; MISRA, M.; DRZAL, L. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview . **Composite Interfaces**, v. 8, p. 313 – 343, 2001.

MONTEIRO, S. N. *et al.* Weibull analysis of the tensile strength dependence with fiber diameter of giant bamboo. **Journal Of Materials Research And Technology**, [s.l.], p.1-7, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.07.001>.

MOURA, R.; PAULO, R. **Introdução à tecnologia têxtil**. Fortaleza: Senai, 2012. Color.

NIJSSEN, R. P. L. **Composite materials: an introduction**. Rotterdam: VKCN, 2015.

OLIVEIRA, M. P. **Propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos poliméricos reforçados por fibras de bucha**. 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciência de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

ORTHEY, A. L. **Uso do bambu industrializado no Brasil e sua aplicação no design de móveis: Estudo de caso da empresa Oré Brasil**. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

OUSHABI, A. *et al.* The effect of alkali treatment on mechanical, morphological and thermal properties of date palm fibers (DPFs): Study of the interface of DPF–Polyurethane composite. **South African Journal Of Chemical Engineering**, [s.l.], v. 23, p.116-123, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajce.2017.04.005>.

PEREIRA, A. L. S. **Extração de nanocelulose de fibras vegetais**. 2010. 54 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

PHUONG, N. T.; SOLLOGOUB, C.; GUINAULT, A. Relationship between fibre chemical treatment and properties of recycled PP/bamboo fibre composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 29 , p. 3244 – 3256, 2010.

POPESCU, M. C.; POPESCU, C. M.; LISA, G.; SAKATA, Y. Evaluation of morphological and chemical aspects of different Wood species by spectroscopy and thermal methods. **Journal of Molecular Structure**, v. 988, p. 65-72, 2011.

POSOM, J.; SIRISOMBOON, P. Evaluation of lower heating value and elemental composition of bamboo using near infrared spectroscopy. **Energy**, [s.l.], v. 121, p.147-158, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.020>.

RIBEIRO, R. A. S.; RIBEIRO, M. G. S.; MIRANDA, I. P.A. Bending strength and nondestructive evaluation of structural bamboo. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 146, p.38-42, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.074>.

SAEED, M.-U., CHEN, Z., LI, B. Manufacturing strategies for microvascular polymeric composites: A review. **Composites: Part A**, v. 78, p. 327-340, 2015.

SAKARAY, H.; TOGATI, N. V. K.; REDDY, I. R. Investigation on properties of bamboo as reinforcing material in concrete . **International Journal of Engineering Research** , v. 2 ,p. 77 – 83, 2012.

SANTOS, G. H. F.; MÓDENES, A. N.; OLIVEIRA, A. P.; TASCHIN, A. R.; BRAGIÃO, M. E.; BEZERRA, I. G. O. Aplicação da fibra de bambu in natura e carvão ativado ósseo como adsorvente na remoção de corante azul de metileno. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 20., 2014, Florianópolis.**Anais... .** Florianópolis: COBEQ, 2014.

SHARMA, B.; GATÓO, A.; RAMAGE, M. H. Effect of processing methods on the mechanical properties of engineered bamboo. **Construction And Building Materials**, [s.l.],

v. 83, p.95-101, maio 2015. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.048>.

SHAWKATALY, A. K. H. P. *et al.* The use of bamboo fibres as reinforcements in composites. In: FARUK, O; SAIN, M. **Biofiber Reinforcements in Composite Materials**. Cambridge: Woodhead Publishing, p. 488-524, 2015.

SILAEX QUÍMICA LTDA. **Poliéster insaturado**. Disponível em:  
<<http://www.silaex.com.br/poliéster.htm>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

SILVA, R. V. **Merostachys sprengr. (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae: Arthrotyliidiinae) no leste do estado de Minas Gerais, Brasil**. 2015. 135 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Botânica, Universidade Federal de Viçosa, 2015.

SINGH, A. S.; HALDER, S.; WANG, J. Extraction of bamboo micron fibers by optimized mechano-chemical process using a central composite design and their surface modification. **Materials Chemistry And Physics**, [s.l.], v. 199, p.23-33, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.06.040>.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; ZHENG, C.; LEE, D. H.; LIANG, D. T. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicelluloses, celluloses and lignin. **Energy & Fuels**, v. 20, p. 388-393, 2006.

YOUSSEFIAN, S.; RAHBAR, N. Molecular Origin of Strength and Stiffness in Bamboo Fibrils. **Scientific Reports**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.1-13, 8 jun. 2015.

YUSOFF, R. B.; TAKAGIB, H.; NAKAGAITOB, A. N. Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid green composites reinforced by kenaf, bamboo and coir fibers. **Industrial Crops And Products**, Tokushima, v. 94, p.562-573, dez. 2016.