



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM**  
**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DE COMPOSTOS  
POLIMÉRICOS E FIBRAS NATURAIS  
TRATADAS COM PLASMA**

**RENAN AUGUSTO DA CUNHA**

**JOINVILLE, SC**  
**2020**

**RENAN AUGUSTO DA CUNHA**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS  
POLIMÉRICOS E FIBRAS NATURAIS TRATADAS COM PLASMA**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

**JOINVILLE, SC  
2020**

**RENAN AUGUSTO DA CUNHA**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS  
POLIMÉRICOS E FIBRAS NATURAIS TRATADAS COM PLASMA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC0001) do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Banca Examinadora:**

Orientador:

---

Prof. Dr. Ricardo de Medeiros  
UDESC/CCT

Membros:

---

Profa. Dra. Daniela Becker  
UDESC/CCT

---

Prof. Dr. Luís Cesar Fontana  
UDESC/CCT

**Joinville, 2 de outubro de 2020.**

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato a minha família e amigos que me apoiaram e ajudaram de diferentes formas para concluir a elaboração desse trabalho.

Meus agradecimentos ao professor Dr. Ricardo de Medeiros pela orientação, explicações e paciência oferecido para o desenvolvimento desse trabalho.

Quero agradecer ao professor Dr. Luís Cesar Fontana pela ajuda para realizar o tratamento de plasma, explicações sobre o tema e por aceitar a participar da banca examinadora.

Agradeço a professora Dr. Daniela Becker pelo auxílio e disponibilidade para ajudar em vários momentos durante a realização do trabalho e por aceitar a participar da banca examinadora.

Ao professor Dr. Cesar Edil da Costa e professora Dr. Marilena Valadares Folgueras pelas análises de termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

Sou grato pela infraestrutura do Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CMU/CTT/UDESC).

Agradeço a Universidade do Estado de Santa Catarina por ter me oferecido educação de qualidade e gratuita.

Expresso meus agradecimentos também aos professores do departamento de Engenharia Mecânica (UDESC/ CCT) pelo conhecimento compartilhado e excelente trabalho executado na minha formação acadêmica.

## RESUMO

As indústrias têm cada vez mais aumentado o seu interesse em utilizar materiais mais leve e resistentes para otimizar a performance de seus produtos, logo a utilização de materiais compósitos tem aumentado. Pesquisas sobre a utilização de fibras naturais como reforço em matrizes poliméricas tem mostrado que essa classe de fibra tem grande potencial de substituir fibras inorgânicas, como a fibra de vidro, por exemplo. As vantagens de se utilizar as fibras naturais são principalmente a sua extração a partir de fontes renováveis, sua biodegradação, pouca toxicidade, baixa densidade e baixo custo. Vários tratamentos vêm sendo estudados para melhorar a adesão da fibra vegetal com a matriz polimérica, o principal meio de alteração causado nesses tratamentos é o aumento da rugosidade das fibras por meio da extração de lignina e hemicelulose. Este trabalho buscou estudar o tratamento de fibra de bananeira com plasma de rádio frequência utilizando argônio e oxigênio, para isso elaborou-se corpos de provas composto de fibras tratadas e não tratadas alinhadas em matriz de resina poliéster, e mediu as propriedades axiais do compósito, também avaliou-se a degradação térmica das fibras por meio de análise de termogravimetria e a superfície através de microscopia eletrônica de varredura. Pode-se perceber que o tratamento de plasma provocou alterações na superfície das fibras levando a mudanças nas propriedades mecânicas do compósito, visto que a tensão de ruptura teve um aumento de 17%, o módulo de elasticidade reduziu 6% e o compósito teve um aumento no alongamento máximo de 4%, o que indicou uma diminuição da rigidez da fibra, sendo essas alterações possivelmente provocadas pela extração da lignina e hemicelulose durante o tratamento. No gráfico de degradação térmica percebeu-se que a fibra tratada com plasma de argônio e oxigênio teve maior estabilidade térmica provocada possivelmente pela extração de moléculas de hemicelulose mais externas, característica notada na análise de microscopia eletrônica de varredura.

**Palavras-Chave:** Fibra de bananeira, Compósito, Resina poliéster, Tratamento de plasma.

## ABSTRACT

Industries have increasingly increased their interest in using lighter and more resistant materials to optimize the performance of their products, so the use of composite materials has increased. Research on the use of natural fiber as reinforcement in polymeric matrices has shown that this class of fiber has great potential to replace inorganic fibers, such as fiberglass for example. The advantages of using natural fibers are mainly their extraction from renewable sources, their biodegradation, little beauty, low density and low cost. Several treatments have been studied to improve the addition of plant fiber with the polymer matrix the main means of alteration caused in these treatments is the increase in the roughness of the fibers through the extraction of lignin and hemicellulose. This work aimed to study the treatment of banana fiber with radio frequency plasma using argon and oxygen, for this we elaborated specimen bodies composed of treated and untreated fibers aligned in polyester resin matrix and evaluated the axial properties of the composite, also evaluated the thermal degradation of the fibers by thermogravimetry analysis. It can be noticed that plasma treatment caused changes in the surface of the fibers leading to changes in the mechanical properties of the composite, since the rupture stress had an increase of 17%, the modulus of elasticity reduced 6% and the composite had an increase in the maximum elongation of 4%, which indicated a decrease in fiber stiffness, and these changes were possible caused by lignine and hemicellulose extraction during treatment. In the thermal degradation graph, it was noticed that the fiber treated with argon and oxygen plasma had greater thermal stability caused by the extraction of more external hemicellulose molecules.

**Keywords:** Banana fiber, Composite, Polyester resin, Plasma treatment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 2.1</b> – Classificação dos materiais compósitos de acordo com a disposição das fibras.	17
<b>Figura 2.2</b> – Proporção de celulose, lignina, hemicelulose, pectina e extrativos de alguns tipos de fibras naturais. ....	20
<b>Figura 2.3</b> – Estrutura interna das fibrilas de uma fibra vegetal. ....	21
<b>Figura 2.4</b> – Estrutura interna das microfibrilas. ....	21
<b>Figura 2.5</b> – Esquema dos diferentes tipos de fibras presentes no pseudocaule da bananeira.	22
<b>Figura 2.6</b> – Fluxograma dos processos e reações que podem ocorrendo dentro do plasma. .	25
<b>Figura 2.7</b> – Reação de retirada de hidrogênio pelo oxigênio atômico. ....	27
<b>Figura 2.8</b> – Módulo elástico do compósito de matriz HDPE com fibra de bananeira ou vidro em relação a percentagem em fibra. ....	29
<b>Figura 2.9</b> – Resistência ao impacto do compósito de matriz HDPE com fibra de bananeira ou vidro em relação a percentagem em fibra. ....	30
<b>Figura 2.10</b> – MEV da superfície da fibra de bananeira. (a) Fibra de bananeira sem tratamento ampliada 500x (b) Fibra de bananeira sem tratamento ampliada 1500x (c) Fibra de bananeira tratada com barrilha ampliada 500x (d) Fibra de bananeira tratada com barrilha ampliada 1500x ....	31
<b>Figura 3.1</b> – Fluxograma representando a metodologia científica utilizada. ....	33
<b>Figura 3.2</b> – Procedimento de extração da fibra, a) corte do pseudocaule, b) extração da calha, c) corte da calha em tiras, d) corte da seda e parte da renda, e) raspagem da sobra da renda. ....	34
<b>Figura 3.3</b> – Fita de fibra de bananeira pronta após finalizar os processos de fabricação. ....	34
<b>Figura 3.4</b> – Representação esquemática do sistema de tratamento a plasma das fitas de fibra de bananeira. ....	35
<b>Figura 3.5</b> – Fibra posicionada dentro do reator antes do tratamento. ....	36
<b>Figura 3.6</b> – Plasma de argônio e oxigênio produzido por bobina de RF na posição 2. ....	36
<b>Figura 3.7</b> – Esquema do posicionamento da bobina durante o tratamento. ....	36
<b>Figura 3.8</b> – Projetos de perfil PL-A3000 da Mitutoyo, equipamento do laboratório de Metrologia da UDESC. ....	37

<b>Figura 3.9</b> – Equipamento de análise MEV Field Emission do Laboratório de Microscopia Eletrônica da UDESC-CCT. ....	38
<b>Figura 3.10</b> – Placa de vidro com desmoldante e tecido <i>Peel Ply</i> . ....	40
<b>Figura 3.11</b> – Posicionamento da fibra no molde para elaboração do compósito. ....	40
<b>Figura 3.12</b> – Processo de dispersão da resina na fibra. ....	41
<b>Figura 3.13</b> – Processo de corte da placa de compósito nos corpos de provas. ....	42
<b>Figura 3.14</b> – Corpos de provas da amostra FST finalizados para o ensaio de tração. ....	43
<b>Figura 3.15</b> – Posicionamento do corpo de prova na máquina para o ensaio de tração. ....	43
<b>Figura 4.1</b> – Formação de plasma entre as fibras. ....	46
<b>Figura 4.2</b> – Coloração do plasma durante o tratamento. ....	46
<b>Figura 4.3</b> – Amostras queimadas durante o tratamento de plasma. ....	47
<b>Figura 4.4</b> – Análise de Termogravimetria das amostras FST e FCT. ....	48
<b>Figura 4.5</b> – Gráfico da derivada do percentual de massa. ....	48
<b>Figura 4.6</b> – Características encontradas na fita de fibra de bananeira. ....	49
<b>Figura 4.7</b> – Superfície da amostra FST. ....	50
<b>Figura 4.8</b> – Superfície da amostra FCT. ....	50
<b>Figura 4.9</b> – Rugosidade da superfície das amostras FST e FCT. ....	51
<b>Figura 4.12</b> – Gráfico de tensão x deformação do CDPs S4, fibra sem tratamento. ....	52
<b>Figura 4.13</b> – Gráfico de tensão x deformação do CDPs T5, fibra com tratamento. ....	52



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.1</b> – Produção de banana no Brasil e nos principais estados, em 2018.....	15
<b>Tabela 2.1</b> – Propriedades de algumas fibras sintéticas. E-glass (fibra de vidro). .....	19
<b>Tabela 2.2</b> – Proporção dos constituintes da fibra de bananeira. ....	23
<b>Tabela 2.3</b> – Propriedades das fibras de bananeira.....	23
<b>Tabela 2.4</b> – Principais processos de colisões presentes no plasma. Os átomos $A^*$ e $B^*$ significam que estão no estado excitados. ....	25
<b>Tabela 2.5</b> – Capacidade de oxidação de alguns átomos e moléculas.....	28
<b>Tabela 2.6</b> – Propriedades mecânicas do compósito de fibra de bananeira secas a tração.....	32
<b>Tabela 4.1</b> – Dimensões das fitas e fibras utilizadas para o desenvolvimento do trabalho. ....	44
<b>Tabela 4.2</b> – Resultados do ensaio de tração dos compósitos das amostras FST e FCT.....	53

## LISTA DE SÍMBOLOS

$e^-$	Elétron
<b>A</b>	Átomo de uma espécie qualquer
<b>B</b>	Átomo de uma espécie qualquer
$A^+$	Íon positivo da espécie A
$B^+$	Íon positivo da espécie B
$A^*$	Átomo excitado da espécie A
$B^*$	Átomo excitado da espécie B
$\gamma$	Fóton
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxigênio
<b>Ar</b>	Argônio
<b>E</b>	Módulo de Elasticidade a Tração
$\sigma_{rup}$	Tensão de Ruptura a Tração
$\epsilon_{max}$	Alongamento Máximo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	14
1.2	OBJETIVOS .....	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos .....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
2.1	MATERIAIS COMPOSITOS .....	16
2.1.1	Classificação dos Materiais Compósitos .....	17
2.1.2	Matrizes Poliméricas .....	18
2.1.3	Fibras Sintéticas .....	19
2.1.4	Fibras Naturais .....	19
2.1.5	Fibra de Bananeira .....	22
2.2	PLASMA .....	23
2.2.1	Plasma de Rádio Frequência (RF) .....	26
2.2.2	Interação Plasma Superfície .....	26
2.2.3	Plasma de Argônio com Oxigênio.....	27
2.3	TRABALHOS RELACIONADOS .....	28
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
3.1	Extração da Fibra de Bananeira .....	33
3.2	Tratamento de Plasma .....	35
3.3	Caracterização Geométrica.....	37
3.4	Análise de Termogravimetria (TG).....	37
3.5	Microscopia Eletrônica de Varredura Field Emission (FEG) .....	38
3.6	Elaboração dos Copos de provas .....	39
3.7	Ensaio Mecânicos .....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
4.1	Caracterização Geométrica.....	44
4.2	Tratamento de Plasma .....	45
4.3	Análise de Termogravimetria (TG).....	47
4.4	Análise de Microscopia de Varredura Field Emission (FEG) .....	49
4.5	Propriedades Mecânicas.....	51

<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>55</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	56
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>57</b>
<b>Anexo A .....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As indústrias têm cada vez mais aumentado o seu interesse em utilizar materiais mais leve e resistentes para otimizar a performance de seus produtos, logo a utilização de materiais compósitos tem aumentado. Muitas indústrias já utilizam esse material em seus produtos, como por exemplo, as indústrias automobilísticas e aeroespacial.

Pesquisas sobre a utilização de fibras naturais como reforço em matrizes poliméricas tem mostrado que essa classe de fibra tem grande potencial de substituir fibras inorgânicas, como a fibra de vidro, por exemplo. As vantagens de se utilizar as fibras vegetais são principalmente a sua extração a partir de fontes renováveis, sua biodegradação, pouca toxicidade, baixa densidade, baixo custo, baixo gasto de energia para produção e baixa abrasão em equipamentos (BECKER *et al.*, 2011; JOSHI *et al.*, 2004).

As fibras vegetais apresentam como desvantagens a baixa adesão em algumas matrizes poliméricas, alta absorção de umidade, limitação de temperatura de processamento e baixa resistência ao fogo (AZWA *et al.*, 2013; FAZITA *et al.*, 2016). Muitos estudos estão sendo realizados para desenvolver e caracterizar tratamentos que melhorem a adesão das fibras naturais nas matrizes poliméricas, os principais tratamentos são mercerização, silanização e acetilação. Esses tratamentos modificam a superfícies das fibras, muitas vezes retirando extrativos, lignina e hemicelulose (ALBINANTE; PACHECO; VISCONTE, 2013). Tais tratamentos, faz-se necessário a utilização de reagentes químicos fortes e prejudiciais à saúde, se mal manuseados ou descartados incorretamente, além de ter um tempo de tratamento relativamente alto. Uma opção de tratamento de fibras que está sendo muito estudada, é a utilização do plasma para modificar sua superfície.

O plasma é uma ferramenta ideal para torna a superfície da fibra mais reativa, já que, as espécies presentes no plasma possuem energia suficiente para fazer a dissociação de ligação químicas em polímeros, monômeros e substâncias orgânicas (FRIEDRICH, 2012). O tratamento de plasma tem sido aplicado em fibras de carbono, e seu mecanismo de alteração da superfície da fibra é atribuído a alteração da rugosidade e ou implementação de grupos funcionais, sem alterar a estrutura interna da fibra, pois as alterações são pouco profundas, alterando apenas camadas moleculares (DILSIZ, 2000). Esse tratamento é versátil, visto que, pode-se alterar a combinação de gás de trabalho, implementando assim diferentes grupos

funcionais, sendo o tratamento rápido e livres de solventes (LOOS; NAHORNY; FONTANA, 2013).

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Cada vez mais as empresas aumentam sua responsabilidade ambiental, buscando fazer descartes corretos de rejeitos, porém esses descartes gera um custo alto que é agregado no produto. A utilização de tratamentos mais eficientes e com menor geração de resíduos tem sido buscado no meio industrial. Materiais naturais ou ditos verdes são boas formas de reduzirem os impactos ambientais, por conta disso a utilização de fibras naturais é uma boa alternativa para produção de produtos mais sustentáveis, pois essas fibras são obtidas através de plantas como a bananeira, coco, bambu etc. Muitas vezes utiliza-se os restos orgânicos dessas plantas para fabricação da fibra como é o exemplo da bananeira em que se utiliza as fibras do pseudocaule, sendo comum seu corte após a extração do fruto.

Muitos projetos de engenharia necessitam de algumas propriedades específicas como baixa densidade, alta resistência mecânica, resistência a fadiga, resistência a oxidação, e tais fatores são encontrados nos materiais compósitos (CALLISTER; RETHWISCH, 2009). As fibras de vidro e carbono são mais utilizadas, pois apresentam alta resistência mecânica quando comparadas com as fibras naturais, mas costumam ser mais caras e geram mais resíduos na sua fabricação.

Com uma visão ambiental e econômica torna-se importante estudar as fibras naturais e os tratamentos relacionados a maximizar seu potencial estrutural. O Brasil produziu em 2018 segundo IBGE (2018) 6.752.171 toneladas de banana, e o estado de Santa Catarina foi um dos principais produtores da fruta, produzindo 709.127 toneladas como pode ser observado na Tabela 1.1. Devido à grande produção da fruta e potencial econômico que a extração da fibra pode gerar no estado, escolheu-se essa fibra para realização desse trabalho.

Costuma-se utilizar tratamentos químicos para melhorar as propriedades da fibra natural, porém esses tratamentos muitas vezes utilizam reagentes químicos que podem ser prejudiciais ao meio ambiente em caso de descarte incorreto, o que vai de contra ao viés ecológico da utilização de fibra natural. A fim de estudar uma alternativa para o tratamento químico da fibra natural optou-se pelo tratamento com plasma, já que, não possui a geração de resíduos poluentes e age de forma a melhorar a adesão da fibra com a matriz.

**Tabela 1.1** – Produção de banana no Brasil e nos principais estados, em 2018.

<b>Estados</b>	<b>Área Colhida (ha)</b>	<b>Produção (t)</b>	<b>Rendimento (t/ha)</b>
São Paulo	48.740	1.061.410	21,78
Bahia	67.026	825.422	12,31
Minas Gerais	46.510	766.966	16,49
Santa Catarina	28.977	709.127	24,47
Pernambuco	39.462	429.338	10,88
Outros	218.569	2.959.908	13,54
<b>Brasil</b>	<b>449.284</b>	<b>6.752.171</b>	<b>15,03</b>

Fonte: Adaptado de IBGE - Produção Agrícola Municipal, 2018.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Estudar o material compósito formado de fibra de bananeira, tratada com plasma RF de argônio e oxigênio, e matriz de resina poliéster, em proporção de 40% de fibra 60% de resina, produzidos através do método de laminação a vácuo. Além disso, este trabalho visa estudar o tratamento de plasma em fibra de bananeira, assim como o comportamento da fibra após ser submetida ao plasma de argônio e oxigênio.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Pode-se acrescentar, como objetivos específicos:

- Estudar o tratamento de fibra de bananeira por plasma RF de argônio e oxigênio.
- Modificar a superfície da fibra de bananeira.
- Verificar as propriedades mecânicas do compósito utilizando fitas de fibra de bananeiras como reforço.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalho é de âmbito multidisciplinar, envolvendo conceitos de ciências dos materiais, física e método de fabricação, além de também proporcionar contato com ferramentas de medição e análise.

Na área de ciências dos materiais aplica-se conceitos de materiais compósitos, poliméricos, ensaios mecânicos e análises de microscopia. A preparação do plasma, determinação de parâmetros do tratamento, escolha de gases e análise de fenômenos, são exemplos da aplicação de conceitos físicos no trabalho, que também, envolve o estudo de métodos de fabricação de fibra de bananeira partindo desde a extração do pseudocaule. A seguir será mostrado com mais detalhe os conceitos teóricos presentes neste trabalho.

### 2.1 MATERIAIS COMPOSITOS

Materiais compósitos são uma composição de dois ou mais materiais diferentes, de forma macroscópica, que se tornam um único material com propriedades diferentes dos que os componham. As propriedades que podem ser melhoradas são a resistência estática, fadiga, rigidez, resistência à corrosão, abrasão, redução do peso, capacidade de trabalho em temperaturas altas ou baixas, isolamento ou condutividade térmica, elétrica ou acústica, dureza, ductibilidade e aparência estética (MENDONÇA, 2003).

Os materiais compósitos podem ser explicados também como um sistema de materiais formado por mais de uma fase, onde projeta-se as propriedades finais da mistura para que tenham um desempenho melhor que das fases individuais de seus constituintes, para isso, o material deve satisfazer três critérios, os constituintes devem ter fração volumétrica maiores que 5%, as propriedades dos constituintes devem ser diferentes e as propriedades do compósito deve ser diferentes das fases (DANIEL; ISHAI, 1994).

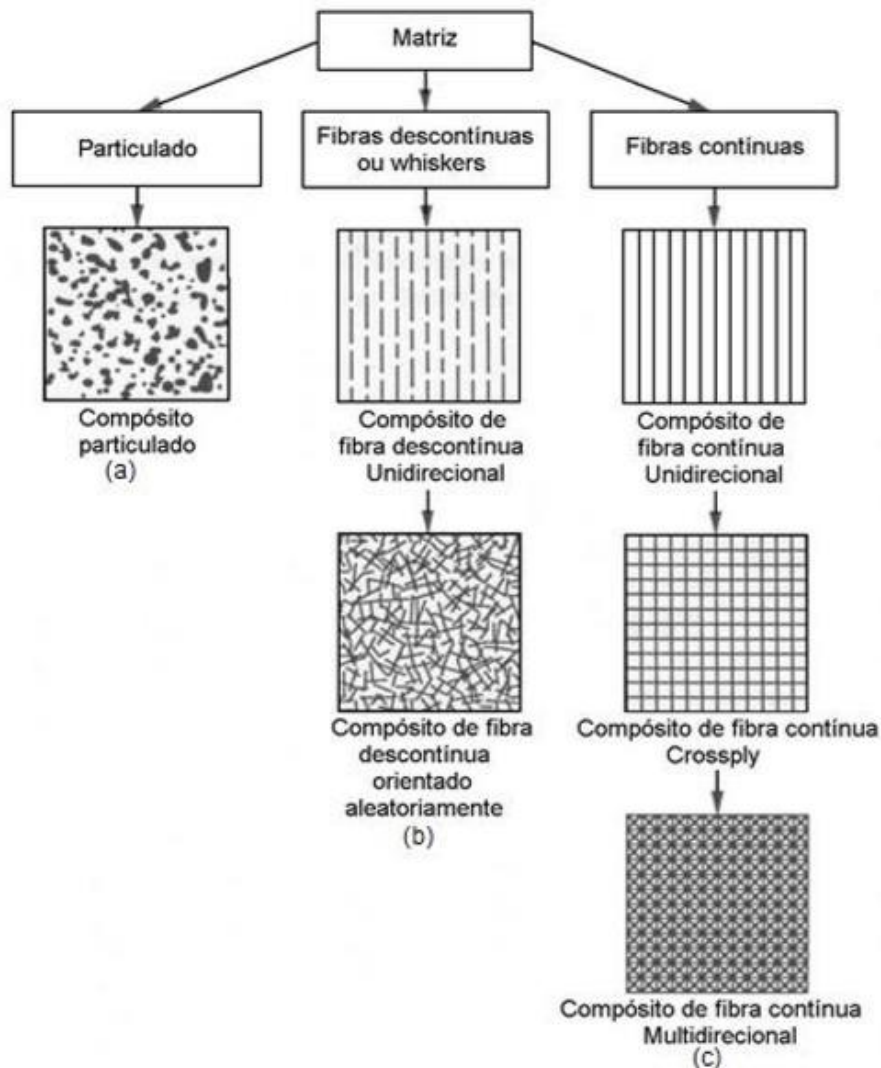
Pereira (2003) compreendeu que o compósito é um material formado por fibra (reforços) e a matriz, sendo a fibra a parte que mais influência nas propriedades de rigidez e resistência a ruptura, já a matriz é responsável em transferir os esforços externos para as fibras, além de protegê-las de ataques químicos externos.



### 2.1.1 Classificação dos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a natureza da fase dispersa na matriz, podendo ter fases dispersas e de formas variadas, como é mostrado na Figura 2.1 (DANIEL; ISHAI, 1994).

**Figura 2.1** – Classificação dos materiais compósitos de acordo com a disposição das fibras.



Fonte: Adaptado de DANIEL e ISHAI, 1994.

As formas das fases no compósito podem ser de três tipos, particulados (Figura 2.1(a)), fibras descontinuas (Figura 2.1(b)) e fibras contínuas (Figura 2.1(c)). Essas formas combinadas com o módulo de organização das fibras na matriz geram compósitos com propriedades diferentes, criando assim, uma vasta gama de propriedades. Os compósitos com fibras contínuas tentem a ter propriedades melhores, visto que, podem ser alinhadas no sentido do esforço, ou

criar combinações com duas ou mais direções de fibras (*crossply* ou tecidos multidirecionais) melhorando as propriedades em direções variadas (DANIEL; ISHAI, 1994).

Outra classificação dada a materiais compósitos, é em relação ao tipo de matriz em que o reforço é empregado, podendo ter as seguintes composições (DANIEL; ISHAI, 1994):

- Matriz metálica;
- Matriz cerâmica;
- Matriz polimérica;
- Matriz carbônica;

### 2.1.2 Matrizes Poliméricas

As matrizes poliméricas podem ser divididas em termorrígidas (termofixas) e termoplásticas. Matrizes termorrígidas, geralmente necessitam da adição de uma agente catalisador compatível, que possui influência direta no tempo de cura da matriz. O catalisador inicia a reação, formando várias ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas o que forma inúmeras ligações covalentes. Devido as ligações covalente, as matrizes termorrígidas não podem ser retrabalhadas novamente no mesmo processo após curada, o que as torna diferente das matrizes termoplásticas, onde ocorre ligações de Van Der Waals, e é possível o reprocesso levando o material a fusão novamente (CAMPBELL, 2011; RANA; FANGUEIRO, 2016; MENDONÇA, 2005).

Os polímeros termoplásticos apresentam boa fluidez quando aquecidos, podem ser dissolvidos em alguns solventes e são recicláveis. Alguns exemplos são o polietileno (PE), polipropileno (PP), politereftalato de etileno (PET) e policarbonato (PC) (GORNI, 2003).

Os termorrígidos são estáveis e possuem ruptura frágil. Os exemplos mais comuns são o epóxi e poliéster (GORNI, 2003). A resina epóxi é muito utilizada como matriz em compósitos de maior responsabilidade estrutural, pois, possui propriedades mecânicas melhores que a resina poliéster, boa aderência com a maioria das fibras, resistência a absorção de umidade e estabilidade dimensional (MENDONÇA, 2005).

A resina poliéster pode ser classificada com insaturada e saturada, dependendo do tipo de ácido que irá caracterizar a ligação entre as cadeias de carbônicas (BLASS, 1988). Para elaboração de compósitos de baixa responsabilidade é muito utilizada a resina poliéster insaturada, pois essa pode possuir bom desempenho mecânico, custo menor que outras resinas termofixas e tem baixa reatividade (MARINUCCI, 2011).

### 2.1.3 Fibras Sintéticas

Os reforços sintéticos são produzidos em laboratórios, ou seja, não estão presentes na natureza. Os principais reforços sintéticos são as fibras de vidro, carbono e aramida. As fibras de vidro são usadas em aplicações como pás de turbinas, navios e estruturas de baixo rendimento, pois, apresentam baixo custo entre as fibras inorgânicas (TALREJA; VARNA, 2015). São comumente usados em matrizes de epóxi ou poliéster, tem característica rígida e possui como desvantagem sua fragilidade, porém, tal desvantagem pode-se ser compensada pela matriz (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

As fibras de carbono são empregadas em projetos de alto desempenho, devido sua baixa densidade e resistência a tração alta comparada com a fibra de vidro, sendo aplicada na indústria aeroespacial, automobilística entre outras (TALREJA; VARNA, 2015). Callister e Rethwisch (2009) explicam que essa fibra apresenta desempenho melhor que as fibras de vidro e são mais caras.

As fibras de aramida, também conhecida como Kevlar, tem elevada resistência mecânica, boa estabilidade dimensional, módulo de elasticidade alto e baixa densidade comparado com a fibra de carbono ou vidro (NOSSA, 2011). A Tabela 2.1 apresenta as propriedades mecânicas de algumas fibras sintéticas, como fibra de vidro, de aramida e de carbono, respectivamente.

**Tabela 2.1** – Propriedades de algumas fibras sintéticas. E-glass (fibra de vidro).

<b>Material</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Resistência a tração (MPa)</b>	<b>Deformação até a falha (%)</b>
E-glass	2600	76	2000	2,6
<i>Kevlar<sup>TM</sup></i>	1450	130	3000	2,3
Carbono HM	1950	380	2400	0,6
Carbono HS	1750	230	3400	1,4

Fonte: Adaptado de TALREJA e VARNA, 2015.

### 2.1.4 Fibras Naturais

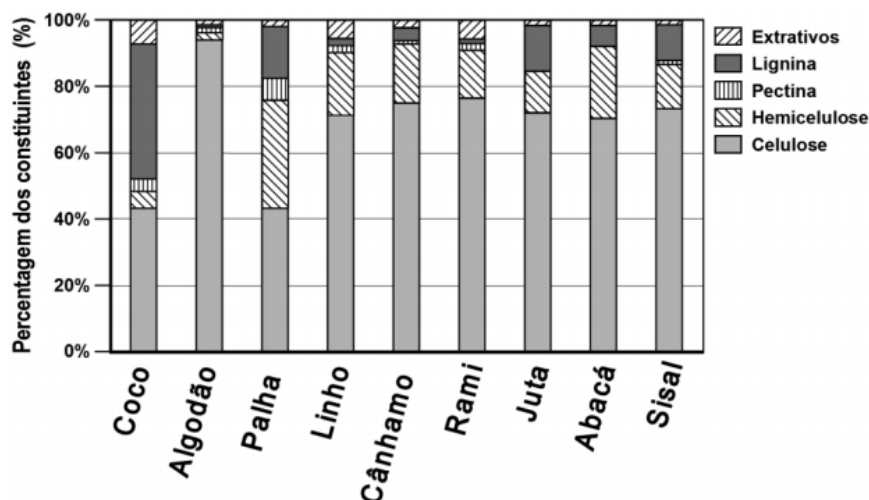
As fibras naturais são classificadas de acordo com sua origem, podendo ser, mineral, animal ou vegetal. Algumas rochas proporcionam as fibras minerais, já, as fibras animais são retiradas do cabelo, seda e lã (OSORIO *et al.*, 2010).

Fibras extraídas das plantas são denominadas de fibras vegetais e podem ser agrupadas de acordo com a parte da planta que são extraídas. Os tipos de fibras vegetais são fibra da semente (ex. algodão), do caule (ex. bananeira, juta, linho), folha (ex. sisal, piaçava, curauá), fruto (ex. coco) e da raiz (ex. zacatão) (SILVA, 2011).

O fato de as fibras naturais serem leves, não abrasivas, possuírem custo baixo de produção, proporciona um certo interesse na utilização de tais fibras como reforço estrutural (BALZER *et al.*, 2007). As principais vantagens da fibra vegetal é a baixa densidade, facilidade de reciclagem e baixa abrasão comparado com a fibra de vidro (RAZERA, 2006). Como desvantagem as fibras vegetais possuem a limitação da temperatura de processamento (até 200°C), baixa adesão fibra matriz e pouca molhabilidade (LUNA; LIZARAZO-MARRIAGA; MARIÑO, 2016; FUENTES *et al.*, 2011).

As fibras lignocelulósicas, ou fibras vegetais, são compostas por cinco componentes básicos: celulose, hemicelulose, pectina, lignina e extrativos (gorduras, proteínas e sais inorgânicos). A celulose é o componente de maior proporção na fibra, sendo responsável pela resistência mecânica, devido sua orientação molecular, ver Figura 2.4. A hemicelulose é formada por um conjunto de moléculas complexas e amorfas, compostas em sua maioria por cadeias de carbono com um grupo hidroxila. Outro componente presente nas fibras naturais é a lignina, sendo esta, uma macromolécula composta por cadeia aromática, reticulada, com alta massa molar, amorfa e com unidades de fenilpropano (CLEMONS; CAULFIELD, 2005; FOWLER; HUGHES; ELIAS, 2006). A Figura 2.2 mostra a variação de concentração dos componentes de acordo com o tipo de fibra vegetal.

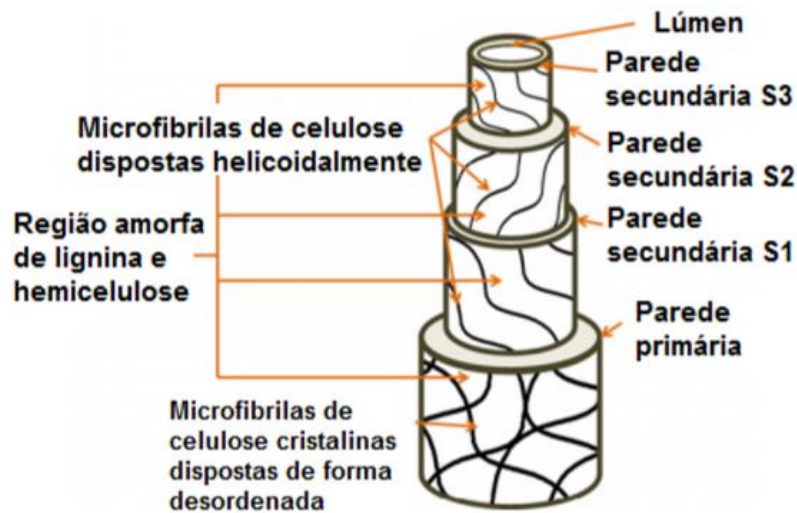
**Figura 2.2** – Proporção de celulose, lignina, hemicelulose, pectina e extrativos de alguns tipos de fibras naturais.



Fonte: Adaptado de CLEMONS e CAULFIELD, 2005.

As fibras vegetais são compostas pela união de várias fibrilas ligadas pelas moléculas de lignina e hemicelulose. A estrutura interna dessas fibrilas é mostrada na Figura 2.3, onde pode-se perceber a existência de quatro paredes celulares, sendo a parede S2 responsável pela propriedade mecânica da fibra devido ter a maior espessura (AZWA *et al.*, 2013).

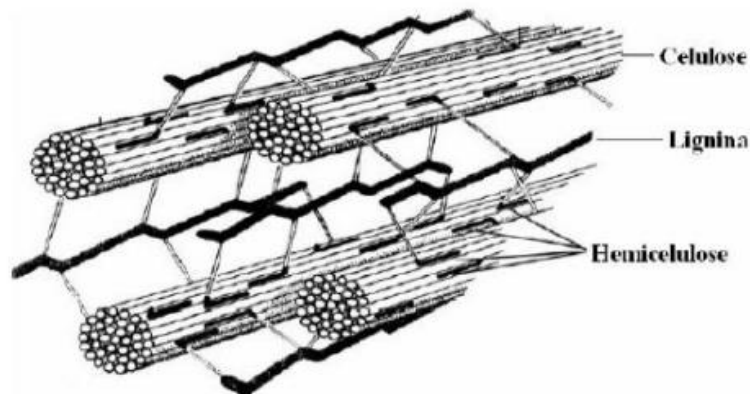
**Figura 2.3** – Estrutura interna das fibrilas de uma fibra vegetal.



Fonte: Adaptado de AZWA *et al.*, 2013.

As microfibrilas de celulose estão orientadas em espirais, proporcionando resistência e flexibilidade ao material. A molécula de lignina está presente ao redor, com a função de aumentar a resistência dos ataques químicos e enzimáticos. As estruturas de celulose e lignina são ligadas por moléculas de hemicelulose (CASTRO, 2006). A estrutura interna das microfibrilas pode ser observado na Figura 2.4.

**Figura 2.4** – Estrutura interna das microfibrilas.



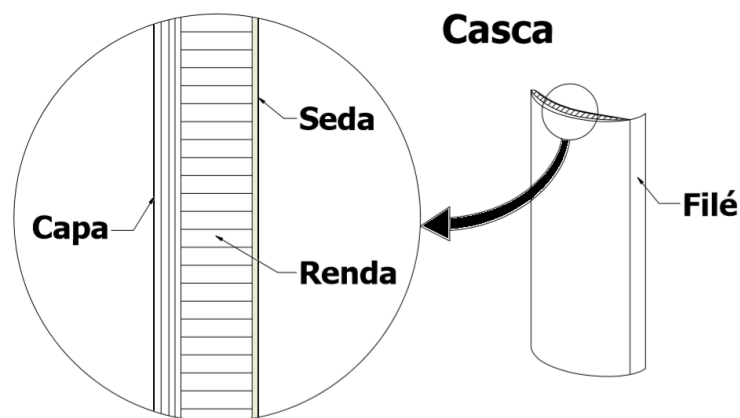
Fonte: LEE, 1997.

### 2.1.5 Fibra de Bananeira

A bananeira tem diferentes tipos de fibras em sua totalidade, as fibras que se destacam são as do pseudocaule localizadas nas bainhas foliares, também chamada de casca. Nesta região, encontra-se a fibra denominada de capa, localizada na camada mais externa, sendo essa a fibra mais grossa, com elevada resistência mecânica a tração e mais rígida quando comparada com as outras fibras constituintes, ideal para utilização como reforço em compósitos. A renda é a fibra intermediária, é a fibra de menor resistência, porém ideal na confecção de artesanato devido sua aparência vazada. A outra fibra presente na casca é a seda, esta fibra tem a característica de ser mais fina e de baixa resistência mecânica, sendo muito usada na elaboração de acabamentos de artesanatos (GUIMARÃES, 2012). Ainda, pode-se encontrar o filé no final da casca, sendo característica dessa fibra ter aparência transparente (*c.f.* Figura 2.5).

As propriedades da fibra de bananeira, assim como de qualquer outra fibra vegetal, dependem do percentual dos seus constituintes, celulose, lignina e hemicelulose. Tais percentuais podem variar de acordo com a espécie da planta, sua origem, região de plantio e modo de colheita, o que torna essa variação uma desvantagem para as fibras de bananeiras. Seu percentual de umidade e limite de temperatura de processo (200°C) podem ser outras desvantagens (SILVA, 2011).

**Figura 2.5** – Esquema dos diferentes tipos de fibras presentes no pseudocaule da bananeira.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 2.2 apresenta as porcentagens de celulose, hemicelulose, lignina e outros compostos, sendo possível perceber que a celulose é o componente mais presente na fibra de bananeira, seguido pela hemicelulose.

**Tabela 2.2** – Proporção dos constituintes da fibra de bananeira.

<b>Fontes</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Outros (%)</b>
Nery e José (2018)	61,2	14,1	5,2	19,5
Khan <i>et al.</i> (2013)	63-64	4	6	27
Bledzki e Gassan (1999)	60-65	6-8	5-10	17-29
Mukhopadhyay e Figueiro (2009)	31	14	15	40
Venkateshwaran e Elayaperumal (2010)	43,46	38,54	9	9

A lignina e hemicelulose possuem papel importante na fibra, ligando as moléculas de celulose, porém, mesmo com a lignina ajudando a aumentar a resistência da fibra, em muitos tratamentos químicos este componente é extraído com o intuito de provocar o desfibramento na superfície, tornando a superfície da fibra mais rugosa e melhorando a adesão com a matriz. A extração de ceras da superfície da fibra também provoca uma melhora na interface fibra matriz no compósito (NERY; JOSÉ, 2018).

A Tabela 2.3 mostra algumas propriedades da fibra de bananeira, onde pode-se realizar uma comparação com a Tabela 2.1, percebe-se que a densidade da fibra de bananeira é menor que de algumas fibras sintéticas.

**Tabela 2.3** – Propriedades das fibras de bananeira.

<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistencia a Tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade a Tração (GPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
1,2	74	2,2	3,2

Fonte: adaptado de SILVA, 2003.

## 2.2 PLASMA

O plasma segundo Giné-Rosias (1998), é um gás parcialmente ionizado onde existe íons positivos e elétrons em movimento, durante esse processo ocorre a transferência de energia por condução, aquecimento e radiação, sendo então necessário fornecer energia para a produção dos íons. Outra definição de plasma é dada por Lieberman e Lichtenberg (2005), explicam que o plasma é um gás formado por várias partículas livres carregadas, porém, em média são eletricamente neutras e com movimento aleatório.

Em laboratório se produz o plasma através de um gás inicialmente neutro, e então emprega-se um campo elétrico para acelerar elétrons sobre os átomos neutros do gás. As colisões dos elétrons nos átomos do gás provocam uma série de reações, como pode-se observar na Tabela 2.4, uma dessas reações liberam íons e elétrons livres, provocando assim, uma reação em cadeia e mantendo a descarga. O campo elétrico pode ser gerado por meio de diferença de potencial entre os eletrodos ou através de indução de um campo magnético variável em alta frequência (BRAITHWAITE, 2000).

As colisões presentes no plasma podem ser elásticas ou inelásticas. Quando a colisão é do tipo elástica a energia cinética é conservada e o momento redistribuído, devido a esses fatores as espécies na colisão tendem a ter a velocidade alterada (HARRY, 2010). Nas colisões inelásticas o momento continua sendo redistribuído, porém a energia cinética não se conserva. Parte da energia cinética acaba sendo absorvida pelo átomo ou molécula, gerando íons ou átomos excitados (BRAITHWAITE, 2000).

Existe quatro processos de colisões inelástica indispensáveis, sendo esses, ionização, recombinação, excitação e relaxação. Quando o elétron está com uma energia mínima necessária para remover elétrons fracamente ligado ao átomo, é dito que esse elétron atingiu a o potencial de ionização. O processo de ionização corre através da colisão inelástica de um elétron no potencial de ionização e um átomo, gerando um íon e dois elétrons livres. A ionização é um processo fundamental para a manutenção das descargas, visto que, ocorre a liberação de elétrons livre para colidirem com outros átomos, provocando novas reações. Alguns elétrons livres podem ligar-se novamente com íons no plasma, gerando o processo de recombinação. A relaxação ocorre quando um átomo excitado, ou seja, com seu nível de energia alterado devido a mudanças de eletrosferas de um ou mais elétrons, retorna a seu estado fundamental de energia emitindo um fóton. O processo de excitação é responsável em gerar átomos excitados, isto ocorre através da colisão de elétrons, no potencial de excitação, e átomos neutros (CHAPMAN, 1980). Na Tabela 2.4 pode-se ver os principais processos de colisões presentes no plasma.

A Figura 2.6 apresenta um fluxograma dos processos e reações que formam o plasma, mostrando também os caminhos necessário para ocorrer tais reações. O plasma pode ser considerado frio ou quente, sua classificação vai depender do grau de ionização, ou seja, a fração percentual de espécies neutras que foram ionizadas no plasma (ALVES, 2001). Plasma quente possui o grau de ionização próximo de 100%, são exemplos o núcleo de estrelas e relâmpagos. O plasma frio tem grau de ionização menor, geralmente é produzido em baixa pressão para diminuir a probabilidade de colisões. Se um plasma possui elétrons em temperaturas maiores que os íons, tal plasma é dito fora do equilíbrio térmico, caso a



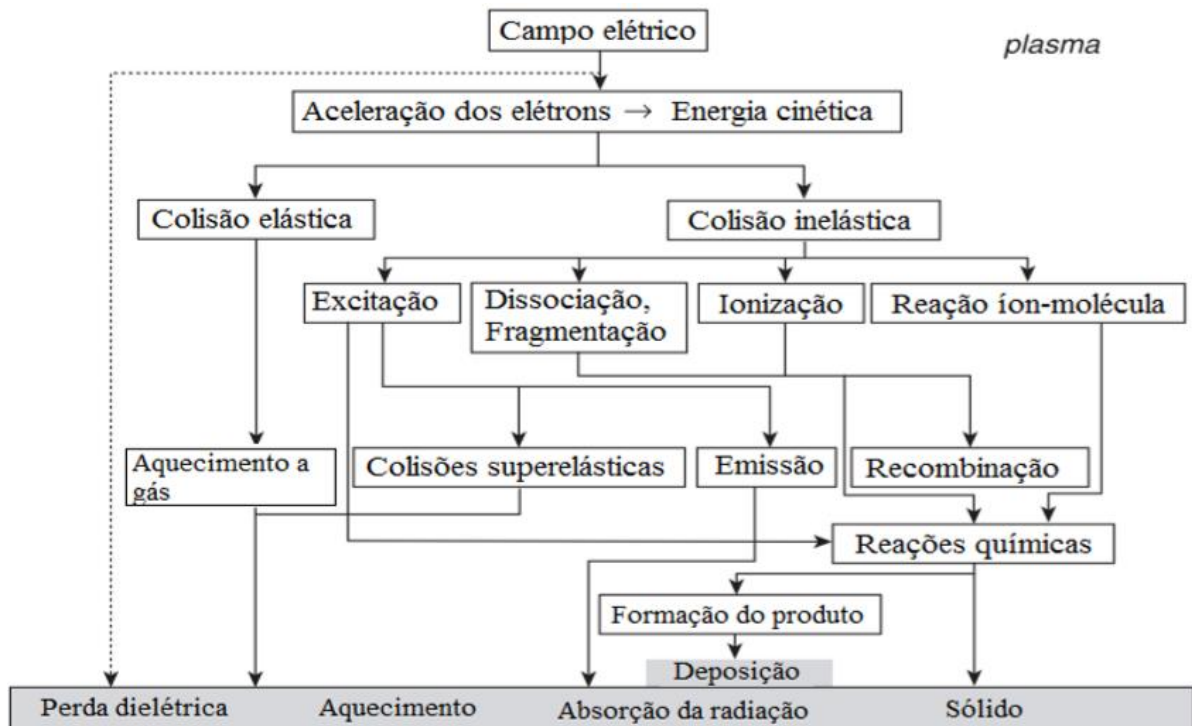
temperatura de ambos seja próxima, então o equilíbrio térmico é atingido (BÁRDOS; BARÁNKOVÁ, 2010).

**Tabela 2.4** – Principais processos de colisões presentes no plasma. Os átomos A\* e B\* significam que estão no estado excitados.

Reação	Processo	Espécies
$e^- + A \rightarrow A^+ + e^- + e^-$	Ionização	Elétrons e átomos
$A^+ + B \rightarrow A^+ + B^+ + e^-$	Ionização	Íons e átomos
$e^- + A^+ \rightarrow A + \gamma$	Recombinação	Elétrons, íon e fóton
$e^- + A \rightarrow A^* + e^-$	Excitação	Elétrons e átomos
$A^+ + B \rightarrow A^+ + B^*$	Excitação	Íons e átomo
$A^* \rightarrow A + \gamma$	Relaxação	Átomo e fóton

Fonte: Adaptado de BRAITHWAITE, 2000.

**Figura 2.6** – Fluxograma dos processos e reações que podem ocorrendo dentro do plasma.



Fonte: Adaptado de FRIEDRICH, 2012.

### 2.2.1 Plasma de Rádio Frequência (RF)

Uma possível classificação do plasma é em relação a frequência de onda fornecida pela fonte, podendo ser DC (corrente contínua), RF (rádio frequência) e micro-ondas. A frequência RF é caracterizada dentro do intervalo de 1 até 500 MHz (CHABERT; BRAITHWAITE, 2011).

O plasma RF pode ser gerado através de dois eletrodos, chamados assim de plasma capacitivos (CCP - *capacitively coupled plasma*), tais eletrodos são ligados a fonte em frequência de 13,56 MHz e potência de geralmente 1kW. Existe também o plasma de indução (ICP - *inductively coupled plasma*), gerados por meio de indutores, seu funcionamento é através da passagem de corrente elétrica em uma bobina, em frequência RF, gerando um campo magnético variável no tempo, o que produz um campo elétrico que acelera os elétrons de forma a colidirem com os átomos. O plasma ICP tende a ser mais eficiente que o CCP, alcançando densidades de plasma de  $10^{10}$  a  $10^{12}$  cm<sup>-3</sup> (CHABERT; BRAITHWAITE, 2011).

### 2.2.2 Interação Plasma Superfície

Os principais fenômenos que acontecem na implementação do plasma sobre a superfície são o *etching* e *sputtering*. O *etching* acontece quando espécies do plasma e do material interagem entre si formando produtos mais voláteis, que acabam se desprendendo do material. Íons com alto momento estão mais presentes na camada da bainha iônica, próxima ao cátodo, onde o campo elétrico pode chegar a 100 vezes o campo do centro do plasma, portanto esses são os principais responsáveis pelo efeito de *etching* no substrato. O argônio por ser um gás neutro não participa com o efeito de *etching*, porém seu efeito é apenas por *sputtering* na superfície, enquanto gases mais eletronegativos como o oxigênio interagem principalmente por *etching*. Os parâmetros que influenciam o efeito de *etching* são o gás de trabalho, tensão, energia do plasma e tipo do substrato, sendo comum esse efeito ocorrer em substrato polimérico (FARIAS, 2012; PHAN; YOON; MOON, 2017; COBURN; WINTERS, 1981).

O mecanismo de *sputtering* ocorre por meio de colisões de espécies de alta energia do plasma sobre o material, retirando fisicamente átomos durante a colisão, essas regiões ficam ativas para novas ligações (FARIAS, 2012).

Para modificar a superfície da fibra de forma a melhorar a interação fibra e matriz, existe quatro formas diferentes, sendo essas, remoção de contaminantes na superfície, aumento da

rugosidade da superfície da fibra, aumento da energia da superfície e por último a anexação de grupos funcionais na fibra (TIWARI; BIJWE, 2014).

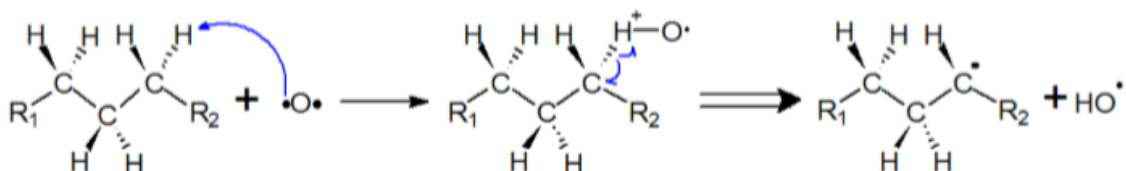
A remoção de contaminante, aumento da rugosidade e aumento da energia de superfície são causados predominantemente pelos dois mecanismos, o *etching* e *sputtering*. Com a formação de radicais livres no material, devido aos mecanismos citados anteriormente, existe a possibilidade de se realizar a anexação de grupos funcionais em meio a esses sítios reativos. A polimerização, como é chamado esse mecanismo, ocorre através da deposição de uma camada fina de um polímero na superfície, sendo as características dessa camada estabelecida pelos parâmetros de trabalho e gás empregado (AHMED, 2007).

### 2.2.3 Plasma de Argônio com Oxigênio

O plasma de oxigênio (O<sub>2</sub>) puro pode ser de difícil manutenção, dependendo dos parâmetros usados, tornando assim necessária a utilização do argônio (Ar) para auxiliar a geração do plasma, já que, esse é um gás nobre de fácil ionização. O O<sub>2</sub> reage com a superfície através de reações químicas e físicas, enquanto o argônio interage apenas de forma física (GARCIA; BITTENCOURT; JOVA, 2011).

O oxigênio tende a atrair os elétrons de outros átomos para próximo do seu núcleo devido a sua característica eletronegativa. Quando esse estiver ligado a um átomo de uma molécula orgânica a sua eletronegatividade irá interferir nas ligações vizinhas, enfraquecendo a ligação do átomo ligado ao O<sub>2</sub> com os átomos da molécula orgânica (Figura 2.7). A eletronegatividade do O<sub>2</sub> dificulta a manutenção do plasma devido a sua tendência de capturar elétrons de baixa energia presentes no plasma (FARIAS, 2017).

**Figura 2.7** – Reação de retirada de hidrogênio pelo oxigênio atômico.



Fonte: FARIA, 2017.

O poder de oxidação de uma molécula está relacionado a capacidade de atrair elétrons para si em relação a um referencial. A capacidade de oxidação relativa é atribuída ao átomo em

relação ao valor do gás cloro (1,36 V), sendo esse de valor relativo 1, e os demais uma proporção do íon cloro (MUNTER, 2001). Na Tabela 2.5 está apresentado a capacidade de oxidação relativa de algumas átomos e moléculas.

**Tabela 2.5** – Capacidade de oxidação de alguns átomos e moléculas.

<b>Espécie</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Capacidade de oxidação relativa</b>
Hipoclorito de sódio	NaClO	0,69
Oxigênio molecular	O <sub>2</sub>	0,90
Íon cloro	Cl <sup>-</sup>	1,00
Ácido hipoclorídrico	HClO	1,10
Peróxido de hidrogênio	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,30
Ozônio	O <sub>3</sub>	1,52
Oxigênio atômico	O	1,78
Radical hidroxila	HO <sup>-</sup>	2,05
Flúor	F	2,25
Dióxido de titânio com lacunas carregadas positivamente	TiO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2,35

Fonte: Adaptado de OZONE FACT SHEET, 2003.

Analisando a Tabela 2.5, podemos perceber que moléculas com oxigênio tende a ter uma capacidade de oxidação elevada, o que torna reações como adição de grupos funcionais e implementação de sítios reativos de maior probabilidade em moléculas orgânicas. Segundo Farias (2017) o plasma de Ar e O<sub>2</sub> em meio orgânico pode apresentar inúmeras composições de moléculas formadas por átomos de C, H, O e N, inclusive as apresentadas na Tabela 2.5 com esses elementos, como por exemplo HO<sup>-</sup>, O e O<sub>3</sub> sendo essas moléculas de alta capacidade de oxidação.

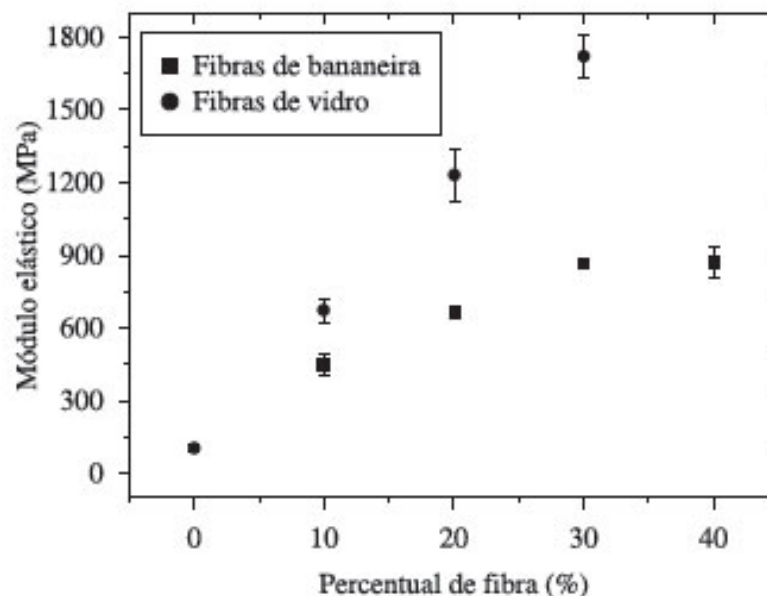
### 2.3 TRABALHOS RELACIONADOS

Gomes *et al.* (2013) estudou as propriedades mecânicas da fibra natural da banana prata do pseudocaule, em meio a matriz polimérica de polietilenos de alta densidade (HDPE). A extração

da fibra foi realizada de modo manual e as tiras foram lavadas em solução de extrato pirolenhoso e secas em temperatura ambiente, após esta etapa, a fibra foi triturada em partículas pequenas.

Os corpos de provas elaborados foram de fibra de bananeira e de vidro nas porcentagens de 10, 20, 30 e 40% na matriz de HDPE. Concluiu-se, que a porcentagem de 40% de fibra proporciona ao módulo de elasticidade um aumento de 732% em relação ao polímero HDPE, sendo 105 MPa o módulo da matriz (GOMES; VISCONTE; PACHECO, 2013) (*c.f.* Figura 2.8). Baseado na Figura 2.8, os autores observaram que as porcentagens de 10% de fibra natural o módulo de elasticidade do compósito é próximo do compósito de reforço com fibra de vidro, este comportamento pode ser explicado, devido à alta porcentagem de resina nos dois compósitos, o que a torna muito mais influente na propriedade do compósito. Outra conclusão feita pelo autor, foi que a fibra de bananeira melhora as propriedades mecânicas, principalmente na propriedade de resistência ao impacto, onde a fibra de bananeira atinge valores melhores que a fibra de vidro para frações volumétricas menores (GOMES; VISCONTE; PACHECO, 2013) (*c.f.* Figura 2.9).

**Figura 2.8** – Módulo elástico do compósito de matriz HDPE com fibra de bananeira ou vidro em relação a porcentagem em fibra.

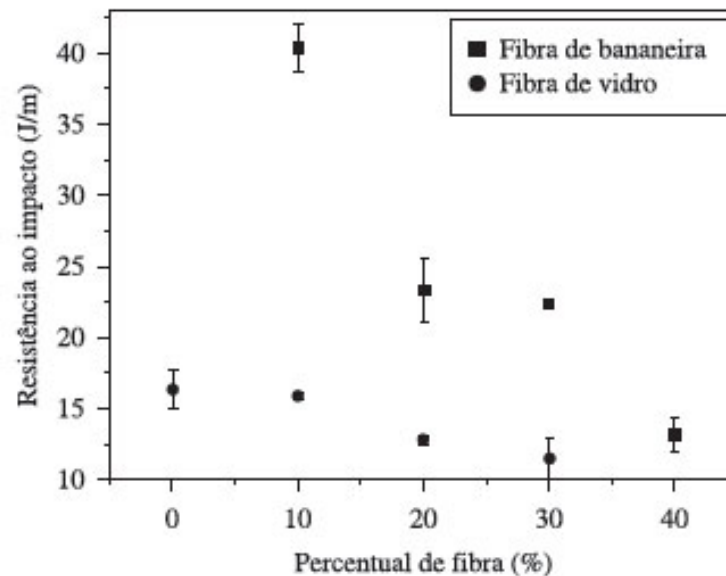


Fonte: GOMES; VISCONTE; PACHECO, 2013.

Compósito formado por fibra de bananeira em matriz de resina epóxi foi estudado por Carvalho (2015). A autora estudou as características mecânicas do compósito sem tratamento da fibra e com tratamento de carbonato de sódio, variando também, a disposição da fibra na matriz em duas configurações, sendo essas, fibra alinhada e aleatória. Variou-se as

porcentagens das fibras na matriz em dois percentuais, 30 e 40% respectivamente (CARVALHO, 2015).

**Figura 2.9** – Resistência ao impacto do compósito de matriz HDPE com fibra de bananeira ou vidro em relação a percentagem em fibra.



Fonte: GOMES; VISCONTE; PACHECO, 2013.

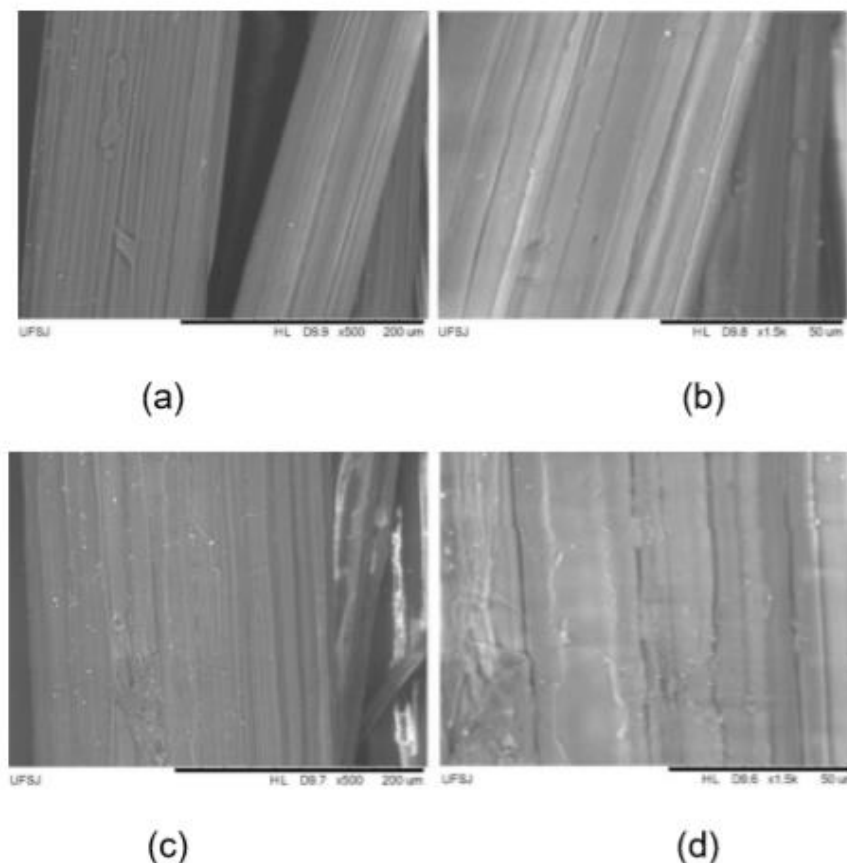
O principal objetivo do trabalho foi verificar o desempenho do tratamento químico com carbonato de sódio empregado na fibra de bananeira, comparando o compósito de matriz epóxi com e sem tratamento. As propriedades testadas foram resistência a tração, módulo de elasticidade na tração, resistência a flexão e módulo de elasticidade na flexão, para considerar as diferentes variáveis que influenciam essas propriedades, como o alinhamento das fibras, fração volumétrica e a presença ou não do tratamento, realizou-se um estudo de planejamento experimental (DoE) juntamente com uma análise de variância (ANOVA) (CARVALHO, 2015).

Com a utilização do DoE Carvalho (2015) propôs 8 combinações das variáveis de entrada e para cada combinação ensaiou-se 5 corpos de provas, o que permitiu um estudo da variância e uma confiança maior dos resultados. A resina epóxi utilizada é a base de bisfenol com endurecedor Aradur HY 951 na proporção de 1/13, os corpos de provas foram fabricados em uma prensa térmica na temperatura de 100°C, a resina tinha como característica mecânica as propriedades de 1,41 GPa de módulo de elasticidade a tração, 31,57 MPa de resistência a tração, 1,56 GPa para módulo de elasticidade em flexão e 53,83 MPa de resistência a flexão (CARVALHO, 2015).

O tratamento com o carbonato de sódio (barrilha) proporcionou segundo Carvalho (2015) um aumento na rugosidade da superfície da fibra, devido a extração de hemicelulose e lignina, como ser observado na Figura 2.10.

A conclusão de Carvalho ao analisar seus resultados, foi de que o tratamento de carbonato de sódio proporciona uma melhora nas propriedades mecânicas do compósito devido ao aumento da rugosidade da superfície e a extração de hemicelulose e lignina, acarretando, em uma melhor na adesão fibra e matriz. As propriedades mecânicas são maximizadas na combinação de 40% de fibra de bananeira e 60% de resina epóxi, com a fibra longa alinhada e com tratamento (CARVALHO, 2015).

**Figura 2.10** – MEV da superfície da fibra de bananeira. (a) Fibra de bananeira sem tratamento ampliada 500x (b) Fibra de bananeira sem tratamento ampliada 1500x (c) Fibra de bananeira tratada com barrilha ampliada 500x (d) Fibra de bananeira tratada com barrilha ampliada 1500x



Fonte: CARVALHO, 2015.

Carneiro (2013) estudou o tratamento de plasma sobre fibra de coco para obtenção de nanofibras e na produção de compósitos de matriz PHB (poli 3-hidroxibutirato). Variou-se o gás de trabalho no tratamento de plasma entre as seguintes composições, ar atmosférico,

argônio, ar atmosférico seguido de argônio, SF<sub>6</sub>, e ar atmosférico seguido de CH<sub>4</sub>. Dentre os gases utilizados, o tratamento com ar atmosférico seguido de argônio apresentou maior efeito na remoção de lignina, tal resultado foi obtido por meio de análise de FTIR, MEV e termogravimétrica. O plasma foi gerado através de um reator de indução magnética de rádio frequência, com tempo de tratamento de 15 min para cada gás (CARNEIRO, 2013).

Por meio de análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), Carneiro (2013) concluiu que os tratamentos de plasma utilizando o ar atmosférico ou argônio, modificou a superfície das fibras, retirado ceras e moléculas da superfície tornando as fibrilas de coco mais expostas e ao todo mais rugosa.

Mota (2010) estudou o compósito de fibra de bananeira escovada e dispersa na matriz de resina poliéster, as proporções de massa utilizadas foram de 3%, 6% e 9% de fibra. As amostras foram tratadas com Hexano por um período de 90 min para retirada de ceras. O compósito foi fabricado pelo método de *Hand Lay Up* com ao auxílio de um molde de mármore e uma prensa hidráulica e as propriedades mecânicas mensuradas foram o módulo de elasticidade a tração, tensão de ruptura a tração, módulo de elasticidade e tensão última em ensaio de flexão 3 pontos (MOTA, 2010). O resultado do ensaio de tração pode ser visto na Tabela 2.6.

**Tabela 2.6** – Propriedades mecânicas do compósito de fibra de bananeira secas a tração.

<b>Propriedades</b>	<b>3% de fibra</b>	<b>6% de fibra</b>	<b>9% de fibra</b>
<b>Resistência a Tração (MPa)</b>	9,2	8,4	9,3
<b>Módulo de Elasticidade a Tração (GPa)</b>	1,0	1,5	1,2

Fonte: Adaptado de MOTA, 2010.

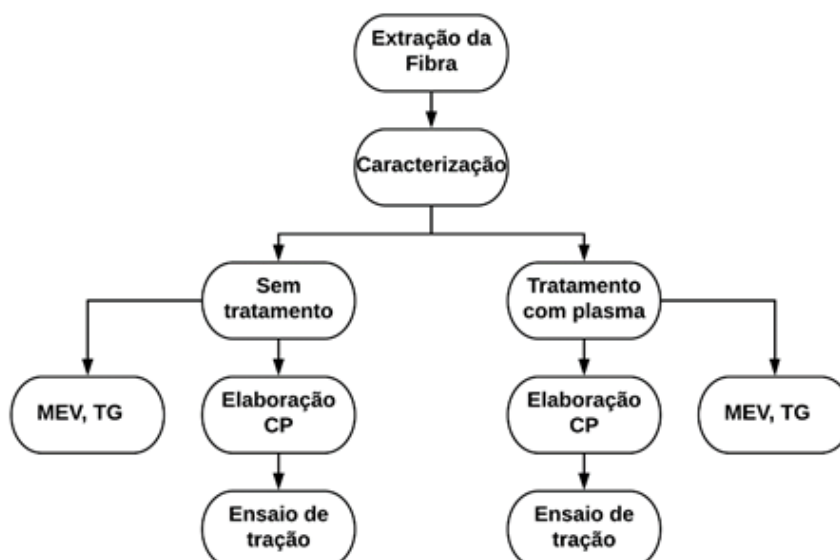
Mota (2010) conclui que as fibras de bananeira possuem módulo de elasticidade relativamente baixo, porém com um alongamento superior que as demais fibras e sua resistência a tração é boa quando comparada a outras fibras vegetais.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada neste trabalho é definida por etapas fundamentais, sendo essas a extração da fibra e caracterização. Tanto para fibras sem tratamento quanto para fibra tratada elaborou-se corpos de provas para realizar o ensaio de tração e realizou-se o a análise de MEV e TG (Figura 3.1).

**Figura 3.1** – Fluxograma representando a metodologia científica utilizada.



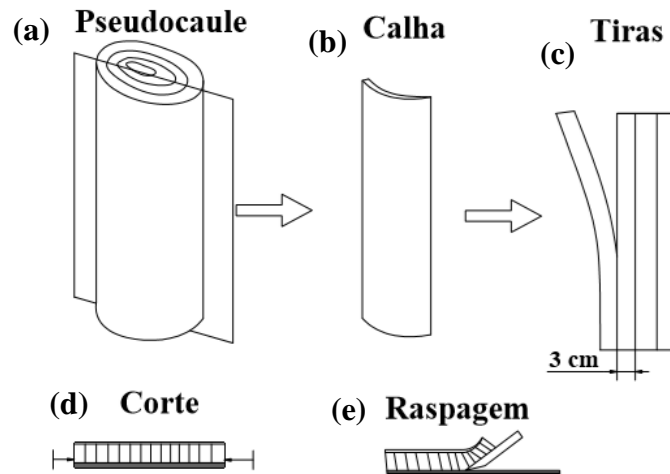
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 3.1 Extração da Fibra de Bananeira

A extração da fibra de bananeira foi realizada pelo autor, utilizando procedimentos artesanais. A banana escolhida é do gênero *Musa*, subgrupo *Cavendish*, popularmente conhecida como banana nanica, a planta foi extraída na região norte do estado de Santa Catarina e seu fruto já havia sido colhido. Após o corte do pseudocaule (Figura 3.2(a)), região cilíndrica formada por cascas e localizada entre as folhas e a raiz da planta, iniciou-se a etapa de extração das cascas (ou calhas), como pode ser observado na Figura 3.2(b). Com as calhas separadas, realizou-se o corte de tirar de aproximadamente 3 cm de largura, Figura 3.2(c). As tiras da bananeira foram cortadas paralelamente a superfície para retirar a seda e a maior quantidade da renda (Figura

3.2(d)), a seguir realizou-se a raspagem das tiras para que toda a renda fosse retirada e somente a fibra capa sobra-se, Figura 3.2(e).

**Figura 3.2** – Procedimento de extração da fibra, a) corte do pseudocaule, b) extração da calha, c) corte da calha em tiras, d) corte da seda e parte da renda, e) raspagem da sobra da renda.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As tiras após a raspagem, foram para a etapa de secagem ao sol, onde permaneceram penduradas por aproximadamente 3 dias. Com as tiras secas pode-se cortá-las em fitas de aproximadamente 2 mm de largura por 30 cm de comprimento, dimensões para elaboração dos corpos de provas nos ensaios de tração.

Para este trabalho optou-se em utilizar fitas, tais fitas são formadas por várias fibras posicionadas na direção axial ligadas pela própria resina da planta. A utilização das fitas tem como vantagem a redução do esforço de produção, o que torna o processo mais rápido e barato, mas as desvantagens são a diminuição de área de contato fibra matriz e maior concentração de extrativos (ver Figura 3.3).

**Figura 3.3** – Fita de fibra de bananeira pronta após finalizar os processos de fabricação.

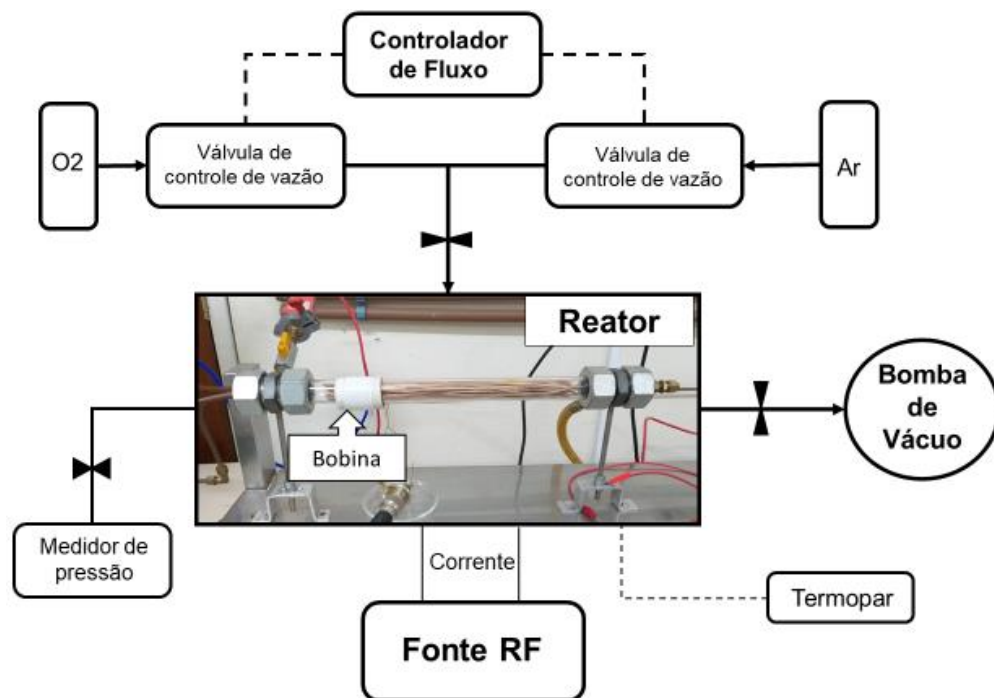


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.2 Tratamento de Plasma

Utilizou-se o reator de rádio frequência do Laboratório de Plasma da UDESC - CCT que produz um plasma ICP, a potência utilizada foi de 100 W com gás de argônio e oxigênio na porcentagem de 80 e 20%, respectivamente, sendo o fluxo total de 30 cm<sup>3</sup>/min. O esquema do sistema utilizado é mostrado na Figura 3.4.

**Figura 3.4** – Representação esquemática do sistema de tratamento a plasma das fitas de fibra de bananeira.

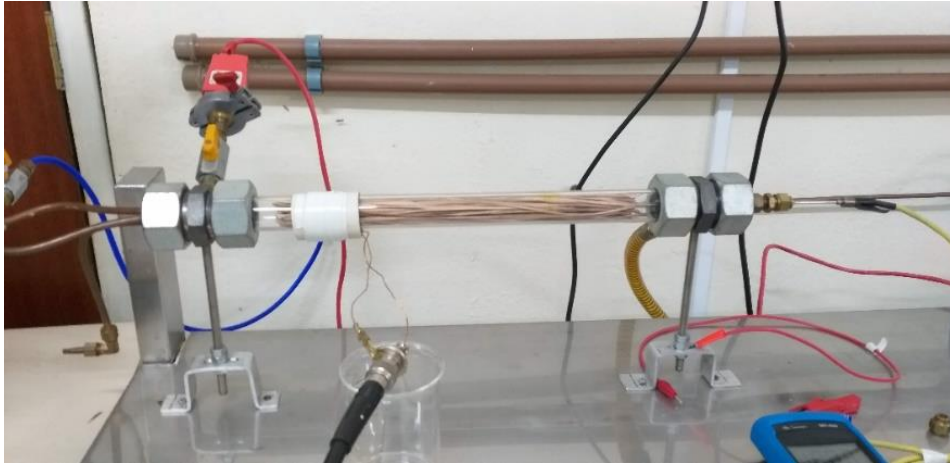


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As fitas foram divididas em 4 lotes de 7g e tratadas separadamente, para cada lote seguiu-se os procedimentos que serão mostrados a seguir:

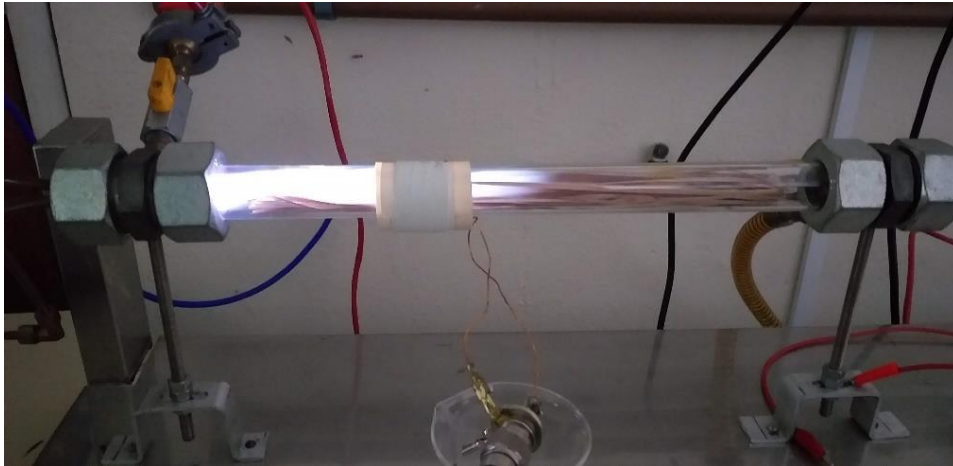
- 1) Inseriu-se as fibras no reator como é mostrado na Figura 3.5.
- 2) Acionou-se a bomba de vácuo até uma pressão aproximada de  $5,7 \times 10^{-1}$  Torr.
- 3) O fluxo de gás foi aberto e a fonte ativada, produzindo o plasma (Figura 3.6).
- 4) Com o plasma ativado o tempo começou a ser contabilizado.
- 5) A bobina com plasma foi posicionada em 5 regiões igualmente espaçada de modo a percorrer toda a extensão da fibra. O posicionamento da bobina é apresentado na Figura 3.7. A bobina manteve-se em cada posição por 1 min com o plasma ativado.
- 6) O procedimento 5 foi repetido, resultando no tempo total de tratamento de 10 min.
- 7) Retirou-se as fitas do reator, guardando-as em temperatura ambiente.

**Figura 3.5** – Fibra posicionada dentro do reator antes do tratamento.



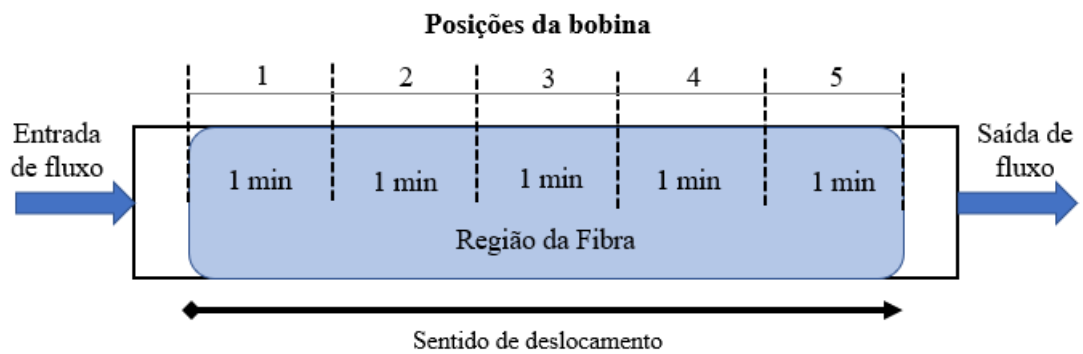
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

**Figura 3.6** – Plasma de argônio e oxigênio produzido por bobina de RF na posição 2.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

**Figura 3.7** – Esquema do posicionamento da bobina durante o tratamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Durante o tratamento com o plasma ativado, a pressão de trabalho teve variações, porém tendeu a ficar próxima de 0,7 Torr, enquanto a temperatura registrada no termopar entre as fibras ficou inferior a 180 °C.

### 3.3 Caracterização Geométrica

Para auxiliar no planejamento de elaboração dos corpos de provas, aproximou-se o formato das fitas em um paralelepípedo de comprimento de 30 cm. Com o intuito de descobrir a largura e altura dessa representação geométrica utilizou-se um projetor de perfil PL-A3000 da Mitutoyo para realizar medidas de 5 amostras de fitas, para cada fita realizou-se 5 medições em posições diferentes (Figura 3.8). Assim, a altura do paralelepípedo equivale a espessura média obtida e a largura a média das larguras das fitas.

**Figura 3.8** – Projetor de perfil PL-A3000 da Mitutoyo, equipamento do laboratório de Metrologia da UDESC.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.4 Análise de Termogravimetria (TG)

A análise de TG foi utilizada para entender como ocorre a degradação da fita de fibra de bananeira de acordo com a temperatura, também é possível determinar a degradação de certas fases presentes na fibra em determinados patamares de temperatura. Durante o processo de

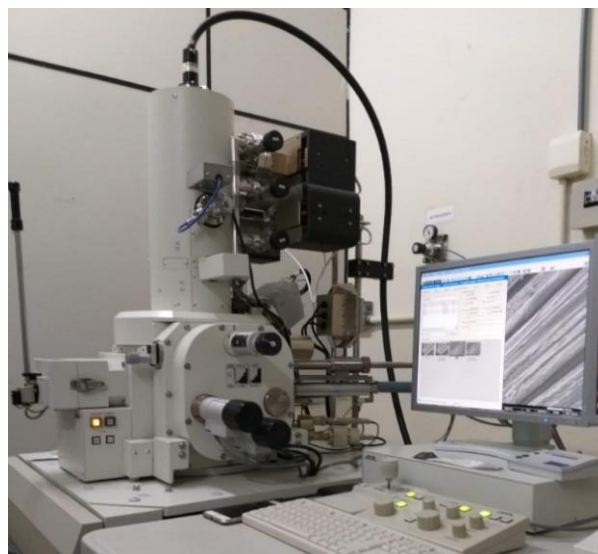
tratamento de plasma ocorre a geração de calor o que aumenta a temperatura da amostra, por conta desse fator deve-se entender qual é a temperatura limite de processo para esse tipo específico de fibra. As amostras foram submetidas a uma atmosfera controlada de nitrogênio, com fluxo de 40 ml/min, até uma temperatura de 1000°C com taxa de aquecimento de 10 °C/min. O equipamento utilizado foi Netzsch STA 449C do laboratório de análise térmicas da UDESC-CCT.

### 3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura Field Emission (FEG)

O equipamento usado para realizar a análise de FEG foi o Microscópio Eletrônico de Varredura Field Emission, modelo JSM-0601F, de fabricação da JEOL LTD e a evaporadora SCD 050 BAL-TEC do Laboratório de Microscopia Eletrônica da UDESC - CTT (Figura 3.9).

A análise de FEG ocorre através da incidência de elétrons sobre a superfície, tais elétrons são captados pelo aparelho que transforma os dados em imagens, permitindo assim a obtenção de imagens tridimensionais e de alta resolução com ampliações elevadas. Para a análise as amostras foram cortadas com comprimento de 2 cm e colocada sobre fitas de carbono dupla faces, após realizou-se a deposição de uma fina camada de ouro, com o tempo de deposição de 90 segundos, esse procedimento foi necessário, pois, a amostra não era condutora de elétrons.

**Figura 3.9** – Equipamento de análise MEV Field Emission do Laboratório de Microscopia Eletrônica da UDESC-CCT.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.6 Elaboração dos Copos de provas

Os corpos de provas (CPs) de material compósitos preparados para ensaio de tração foram baseados na norma ASTM D3039 para ensaio das propriedades na direção 0°. A porcentagem em massa de resina e fibra utilizada para confecção dos CPs foi de 60% e 40% respectivamente, porém sabe-se que o equipamento de laminação a vácuo do laboratório de vibrações e estruturas leves da UDESC - CCT possui um percentual de criação de bolhas de ar no compósito de no máximo 10%.

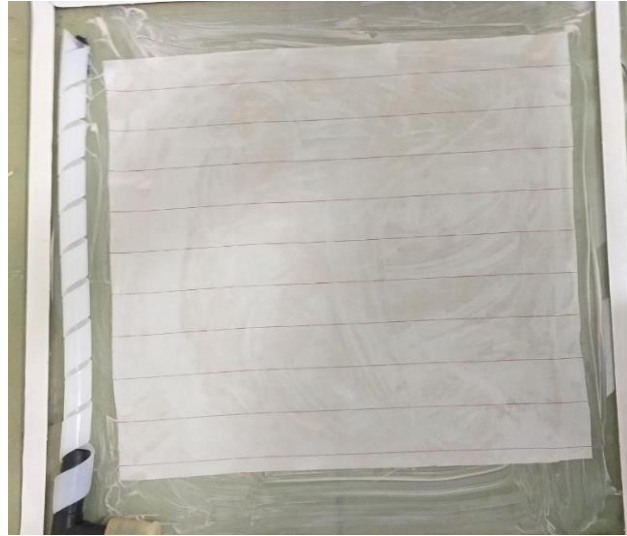
O equipamento de laminação utiliza o método de moldagem por transferência de resina assistida à vácuo, porém para este caso a resina foi depositada sobre a fibra e não é succionada de um reservatório de acordo com o método original. Utilizou-se a resina poliéster insaturada confeccionada pela empresa Tamborão Química Industrial LTDA, Joinville – SC, juntamente com o catalisador MEK produzido a base de peróxido de mek, na proporção de 2g (60 gotas) de catalizador para 100g de resina.

Para análise da influência do tratamento sobre as fitas de fibra de bananeira realizou-se a manufatura de 7 CPs sem o tratamento e 9 CPs com o tratamento, com o intuito de realizar uma análise das propriedades mecânica a tração dos compósitos. As amostras passaram por uma etapa de perda de umidade na estufa a 50 °C por 1h antes de serem utilizadas na confecção dos CPs. O tempo entre o tratamento das fibras e confecção dos corpos de provas foi de 5 h aproximadamente.

Os procedimentos seguidos para criação dos CPs são mostrados a seguir:

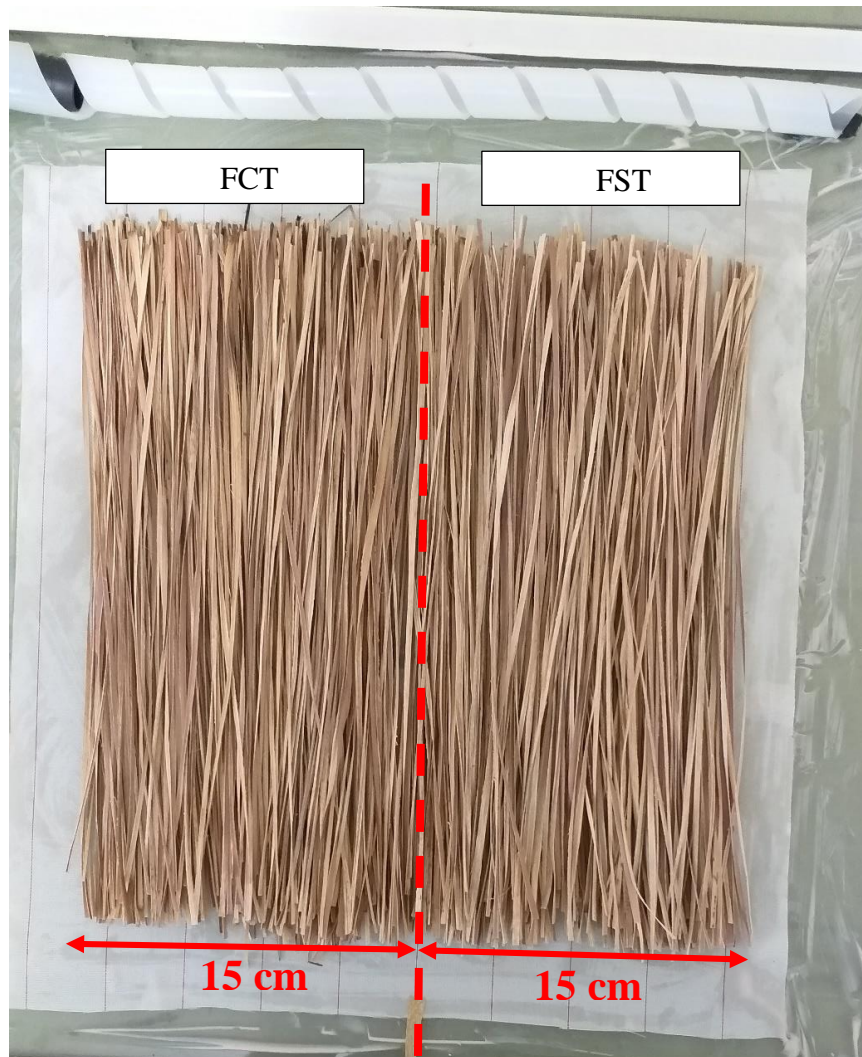
- **Procedimento 1 – Preparação do molde:** Inicialmente o molde é limpo, após determina-se o perímetro da bolsa de vácuo com fita *tacky tape* (fita selante) dupla face. Aplica-se o agente desmoldante sobre a placa de vidro, para facilitar a retirada do compósito e posterior limpeza, após realiza-se a forragem do molde com um tecido *Peel Ply*, sendo esse um tecido sintético. Posteriormente, adiciona-se um tubo de plástico cortado em espiral para homogeneizar a pressão no perímetro do molde. O resultado desse procedimento pode ser visto na Figura 3.10.
- **Procedimento 2 – Posicionamento das fibras:** Posicionou-se 25g da amostra de FST alinhadas paralelamente na metade do molde, enquanto a outra metade do molde utilizou-se 25g de amostras FCT (Figura 3.11). Sabendo que a massa total de fibra é de 50g determinou-se a massa da resina respeitando a porcentagem de 60% de resina, logo adicionou-se 75g de resina mais 55g para compensar as perdas no sistema.

**Figura 3.10** – Placa de vidro com desmoldante e tecido *Peel Ply*.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

**Figura 3.11** – Posicionamento da fibra no molde para elaboração do compósito.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



- **Procedimento 3 – Aplicação da resina:** A resina foi pesada em uma balança digital de incerteza de medição de 2g. Adicionou-se a resina poliéster misturada com o endurecedor MEK sobre as fibras na quantidade de 130g de resina e 2,6g (78 gotas) de catalizador.
- **Procedimento 4 – Fechamento do molde:** Adiciona-se uma camada de tecido *Peel Ply* sobre a fibra e a resina, também adicionou uma tela de plástico para ajudar na remoção, posteriormente o molde é selado com um plástico e ligado a uma bomba de vácuo. Estando o sistema todo fechado com auxílio de fita dupla face, a bomba de vácuo é ativada retirando o ar de dentro do molde, esse efeito causa uma pressão sobre a fibra e espalha a resina. A bomba de vácuo é mantida ligada por 30 min para garantir que a resina tenha se espalhado sobre a fibra e removido o excesso de resina. Após o desligamento da bomba de vácuo o molde continua fechado por um período de 36 horas para que ocorra a cura por completo da resina (Figura 3.12).

**Figura 3.12** – Processo de dispersão da resina na fibra.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

- **Procedimento 5 – Corte dos CPs:** O molde é aberto com cuidado, retira-se o tecido *Peel Ply* e a placa de compósito do molde. Adiciona-se uma marcação na placa para identificar o lado com a amostra FST e FCT. Após, a placa é cortada em uma serra a disco, para extração dos CDPs de acordo com a norma ASTM 3039, como pode ser observado na Figura 3.13. A região central da placa de compósito foi descartada devido a mistura das duas amostras. Após o corte realizou-se a colagem dos *tab* para reforçar a região dos corpos de provas de acordo com a norma ASTM 3039.

**Figura 3.13** – Processo de corte da placa de compósito nos corpos de provas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

- **Procedimento 6 – Medição dos CDPs:** Tendo os CDPs sido cortados, realizou-se suas identificações. O padrão de identificação foi baseado na amostra presente no compósito, usando a abreviação S + número para identificar os CDPs da fita sem tratamento e T + número para CDPs das amostras com tratamento. Os CDPs foram medidos com um paquímetro digital da Mitutoyo, de incremento digital 0,01 mm para a largura e espessura, enquanto para a medição do comprimento utilizou-se uma régua com resolução de 1 mm. A medição de largura e espessura ocorreram em três regiões diferentes dos CPs, sendo essas o topo, centro e base, e posteriormente calculou-se a média aritmética dessas medidas. Na Figura 3.14 é possível ver os CPs finalizados após a medição.

**Figura 3.14** – Corpos de provas da amostra FST finalizados para o ensaio de tração.

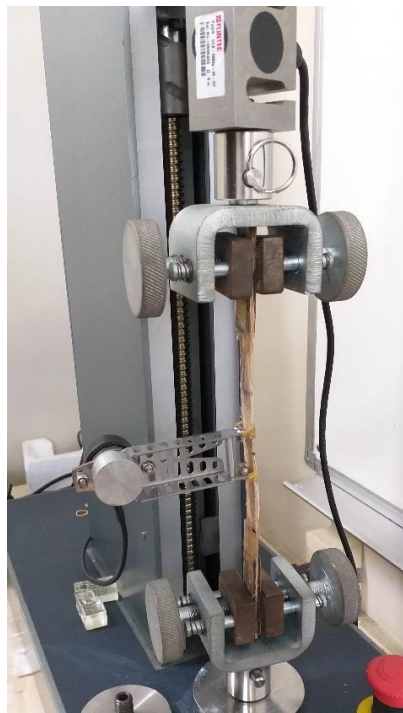


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.7 Ensaios Mecânicos

O ensaio de tração foi realizado com uma máquina universal de ensaio, produzida pela empresa Oswaldo Filizota do modelo AME localizada na UDESC - CCT. Utilizou-se uma célula de carga de 5 kN e velocidade de ensaio de 1 mm/min. O ensaio foi baseado na norma ASTM 3039. A Figura 3.15 apresenta o posicionamento do CP antes do ensaio.

**Figura 3.15** – Posicionamento do corpo de prova na máquina para o ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 4 RESULTADOS E DISCULSSÕES

### 4.1 Caracterização Geométrica

As fitas de fibra de bananeira foram medidas com o intuito de caracterizar suas dimensões após o processo de fabricação. As dimensões das amostras podem ser observadas na Tabela 5.1. Analisando os resultados de medição pode-se perceber uma variação considerada na incerteza de medição da largura da fita, isso ocorre, pois, o processo de fabricação é artesanal sem um controle adequado para manter a largura das fitas iguais.

**Tabela 4.1** – Dimensões das fitas e fibras utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.

<b>Amostra</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
Fita	$2 \pm 1,3$	$0,6 \pm 0,4$
	<b>Diâmetro (mm)</b>	
Fibra	$0,15 \pm 0,09$	--

Fonte: Feita pelo próprio autor.

Pode-se estimar a quantidade mínima de fibra dentro da uma fita de bananeira, sendo  $L$  a largura da fita,  $t$  a espessura,  $d$  o diâmetro da fibra e  $qtd$  a quantidade de fibra dentro da fita de bananeira.

$$qtd = \frac{Lt}{d^2}. \quad (4.1)$$

Utilizando os dados da Tabela 5.1, encontra-se a quantidade estimada de 55 fibras que compõem a fita de bananeira. Sabendo o número de fibras na fita de bananeira, pode-se comparar a área superficial em contato com a matriz polimérica da fita com a área superficial dessa quantidade de fibras caso fosse utilizada separadamente para elaborar o compósito, como

$$\Delta A = 2(L + t)c - qtd(\pi d)c, \quad (4.2)$$

onde  $c$  é o comprimento da fibra, sendo para esse caso um comprimento unitário.

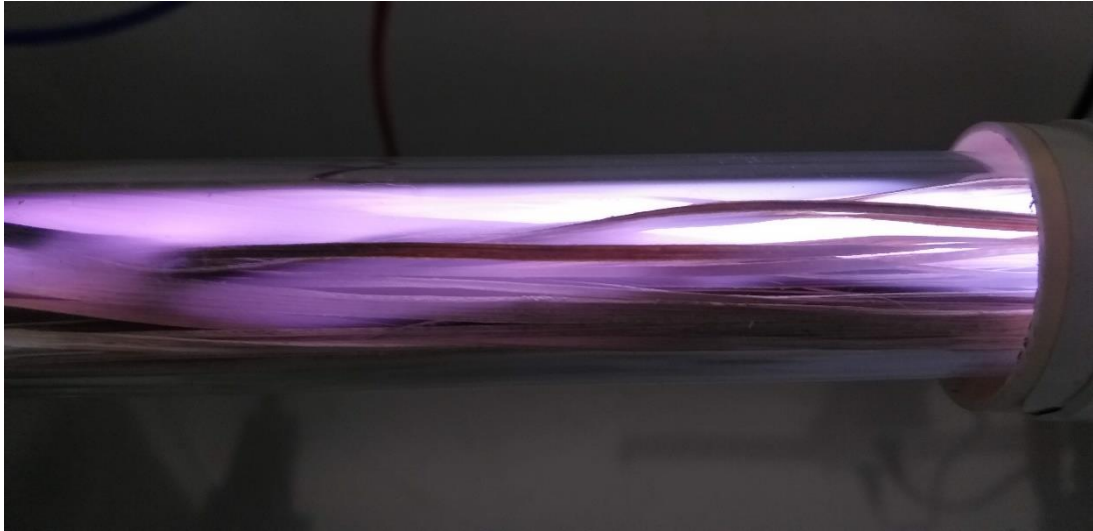
Resolvendo a Equação (4.2) encontra-se que  $\Delta A = -21,025 \text{ mm}^2$ , ou seja, a área superficial da fita é aproximadamente 21% da área correspondente das fibras que a compõe, logo pode-se conjecturar que a utilização de fitas de fibra de bananeira reduz a área da interface entre fibra e matriz quando comparada com a utilização de fibras separadamente, o que pode reduzir a capacidade de transferência de esforço da matriz para a fibra. É importante salientar que esse é um cálculo aproximado, em que as fitas e fibras são aproximadas a geometrias perfeitas como paralelepípedo e cilindro respectivamente, sendo o seu formato real com presença de variações e rugosidades na superfície que influenciam na interface fibra matriz, porém o resultado obtido mostra uma diferença expressiva de aproximadamente 4,6 vezes de diferença entre as áreas.

## 4.2 Tratamento de Plasma

A utilização de plasma RF de argônio e oxigênio para tratar as fibras de bananeira, sendo essas amostras não condutora de eletricidade, mostrou-se eficaz e possível de realização. Percebe-se na Figura 4.1 que o plasma foi ativado e manteve-se ligado por todo o tempo de tratamento. Analisando a Figura 4.1 percebe-se também que o plasma estava presente em meio as fibras, envolvendo praticamente todas dentro daquela seção do reator, e como a bobina era deslocada em intervalos de 1 min pode-se considerar que todas as fibras sofreram a incidência das reações presentes no plasma, onde mesmo em regiões em que o plasma não tinha liberação de luminosidade, reações com moléculas ativadas poderiam estar acontecendo, pois, mesmo o fluxo de gás tendo uma direção determinada no sistema a presença das fibras no reator pode provocar um escoamento turbulento com presença de refluxo em regiões localizadas.

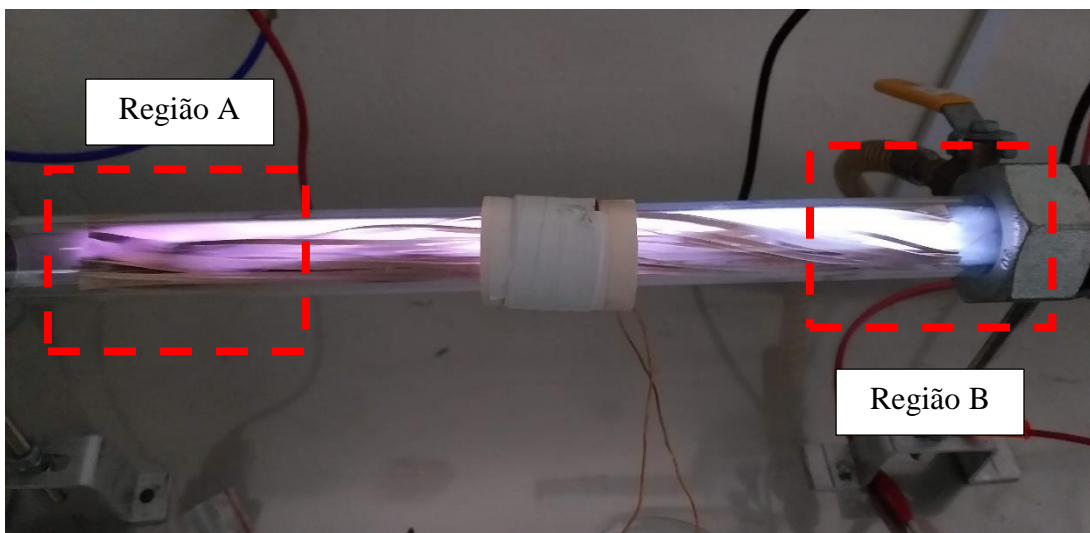
Devido ao fluxo de gás ser no sentido da “Região A” para a “Região B” (Figura 4.2), tem-se a concentração de plasma no início de 80% de argônio e 20% de oxigênio, pois essa foi a concentração regulada no controlado de fluxo, e percebe-se na “Região A” a coloração rosa, sendo essa a cor característica do plasma contendo maior concentração de argônio. Na “Região B” o plasma possui cor azulada, o que indica uma maior concentração de oxigênio. Essa mudança de coloração ocorre devido a uma mudança na concentração de gases, isto pode ter ocorrido devido a liberação de moléculas contendo oxigênio e perda de umidade das fibras, indicando uma possível mudança na superfície da fibra através de reações do plasma e aumento de temperatura.

**Figura 4.1** – Formação de plasma entre as fibras.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

**Figura 4.2** – Coloração do plasma durante o tratamento.

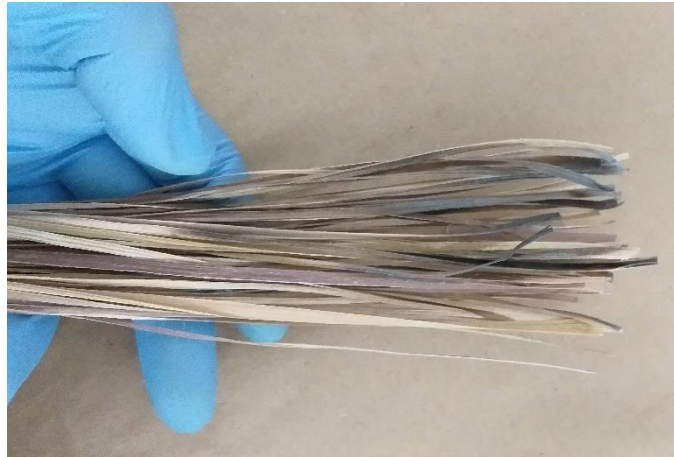


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após o tratamento algumas fibras tiveram regiões queimadas devido ao aumento de temperatura localizada (Figura 4.3). As regiões mais afetadas foram as pontas, pois esse lugar tem maior dificuldade de transmitir o fluxo de calor, acarretando no aumento de temperatura, outro fator que provocou esses defeitos foi devido a essas pontas estarem localizadas na região de entrada do fluxo, onde como já discutido apresenta grande concentração de argônio que é uma molécula maior e neutra provocando maior geração de temperatura no plasma.

As amostras que queimaram foram descartadas para a elaboração dos corpos de provas devido suas propriedades mecânicas estarem afetadas, o percentual de fibras que sofreram com esse problema no tratamento foi inferior a 10%.

**Figura 4.3** – Amostras queimadas durante o tratamento de plasma.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

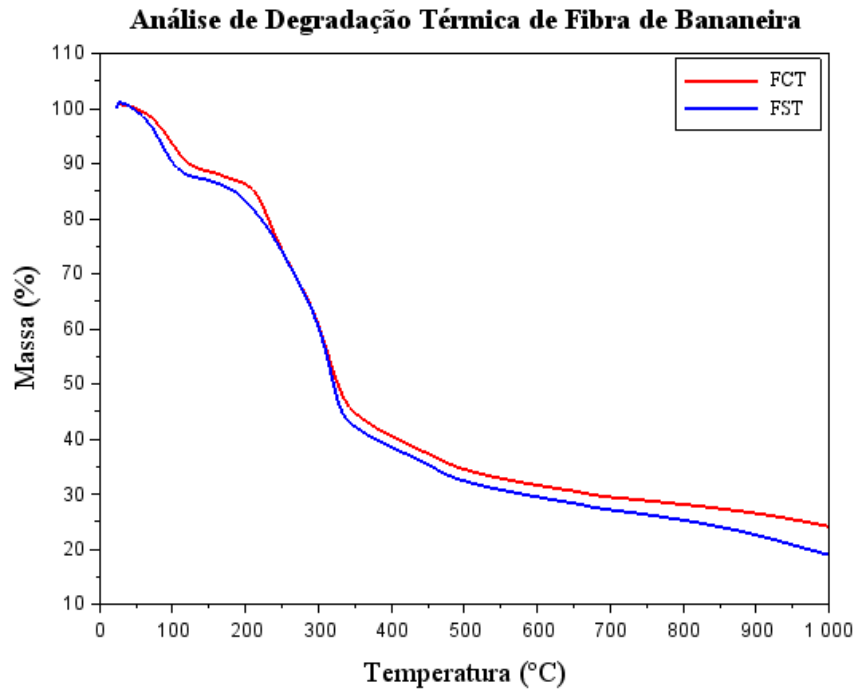
### 4.3 Análise de Termogravimetria (TG)

A análise de termogravimetria mostra o comportamento da fibra durante o processo de degradação térmica, podendo analisar as faixas de temperaturas que as fases presentes se degradaram. Na Figura 4.4 pode-se observar o gráfico da degradação térmica das amostras FST e FCT, quando se analisa o gráfico, percebe-se que até uma temperatura de aproximadamente 120 °C ocorre uma perda de massa de 12% para a amostra FST e de 10% de FCT. Segundo Azwa *et al.* (2013), está relacionada a perda de umidade da fibra, sendo esse considerado o primeiro estágio de degradação. O segundo estágio acontece na faixa de temperatura de 200 a 310 °C para FST e 220 a 310 °C na amostra FCT. Neste estágio Nery e José (2018) explicam que ocorre a despolimerização da hemicelulose e quebra das ligações glicólicas da celulose. Durante o segundo estágio ambas as amostras perderam cerca de 40 % de massa, sendo essa a maior e mais rápida perda de massa do processo de degradação. A degradação total da celulose acontece no terceiro estágio que está na faixa de 340 a 500 °C com um percentual de perda de massa de 10 % (NERY; JOSÉ, 2018).

A lignina é um componente de difícil decomposição, pois, sua decomposição é lenta e inicia em 100 °C indo até 900 °C sem pico definido no gráfico de TG, já que o fluxo de perda de massa é muito baixo (YANG *et al.*, 2007). Na Figura 4.5 é apresentado a derivada do

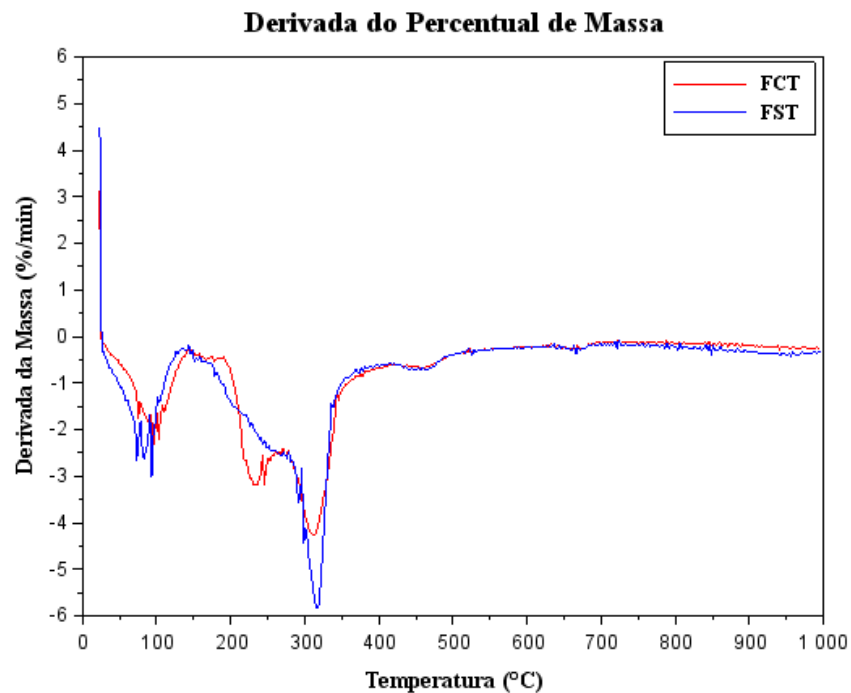
percentual de massa durante a análise de TG, essa medida é obtida para auxiliar a interpretação de degradação das fases da análise TG por meio da variação da velocidade de perda de massa.

**Figura 4.4** – Análise de Termogravimetria das amostras FST e FCT.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

**Figura 4.5** – Gráfico da derivada do percentual de massa.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



A Figura 4.4, mostra que a amostra FST começa a sofrer com a degradação térmica efetivamente a partir de 200 °C e a FCT de 220 °C, indicando uma maior estabilidade térmica para a fibra com o tratamento de plasma, possivelmente provocada pela extração de moléculas de hemicelulose da superfície das fibras durante o tratamento, também percebe-se que a amostra FCT tinha percentual de unidade menor e juntamente com a variação dos constituintes na fibra pode explicar a diferença de percentual de massa das curvas, já que essa variação é entre 2 a 5%.

#### 4.4 Análise de Microscopia de Varredura Field Emission (FEG)

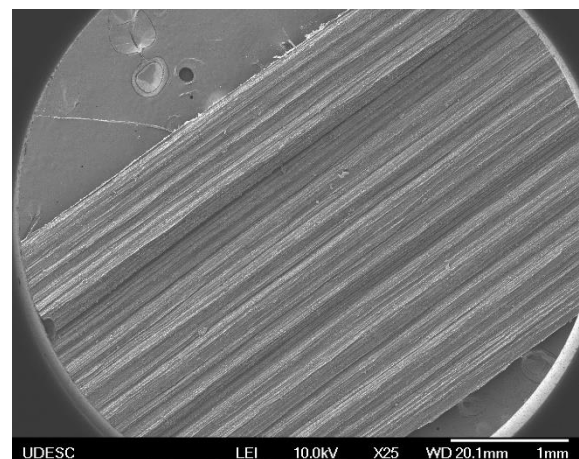
É possível observar a superfície da fibra de bananeira na Figura 4.6(a), onde percebe-se que a fibra é composta por várias fibrilas ligadas paralelamente e recobertas por camadas de ceras de baixo peso molecular (NERY; JOSÉ, 2018). A fibra possui uma superfície lisa com baixa inclusões de defeitos o que dificulta a aderência com a matriz polimérica.

Na Figura 4.6(a) nota-se a presença de fibrilas com aproximadamente 2 µm de espessura, que possivelmente se soltou durante o processo de manufatura. Analisando a Figura 4.6(b), verifica-se que a fita da fibra de bananeira é composta por feixes de fibras de bananeira paralelamente ligadas.

**Figura 4.6** – Características encontradas na fita de fibra de bananeira.



a) Fibrila de bananeira na amostra FST, 1000x.

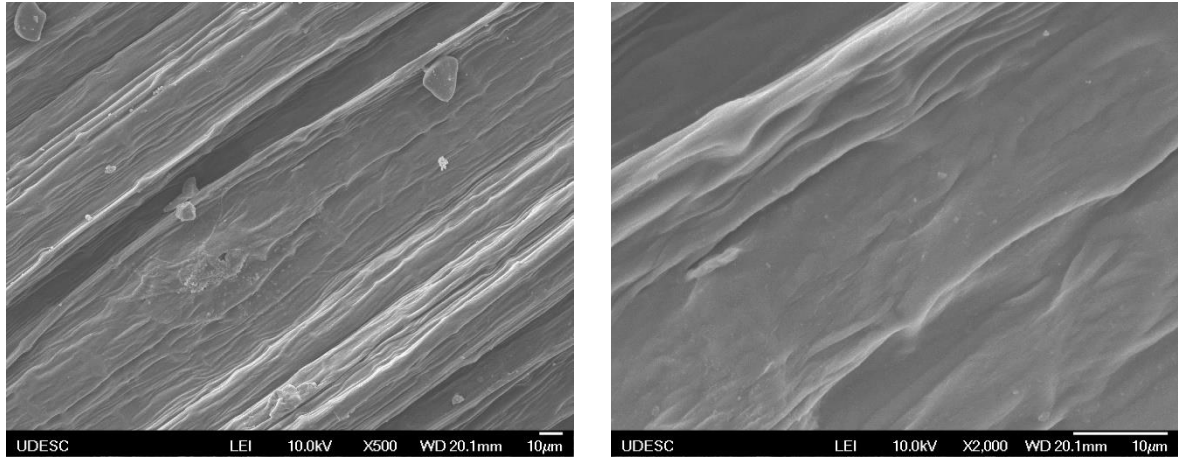


b) Posicionamento das fibras elementares na fita de bananeira, 25x.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 4.7 mostra a superfície das fibras elementares em resoluções diferentes, mostrando que a superfície é composta por vales e picos, porém com rugosidade baixa e presença de pequenas partículas de ceras.

**Figura 4.7** – Superfície da amostra FST.



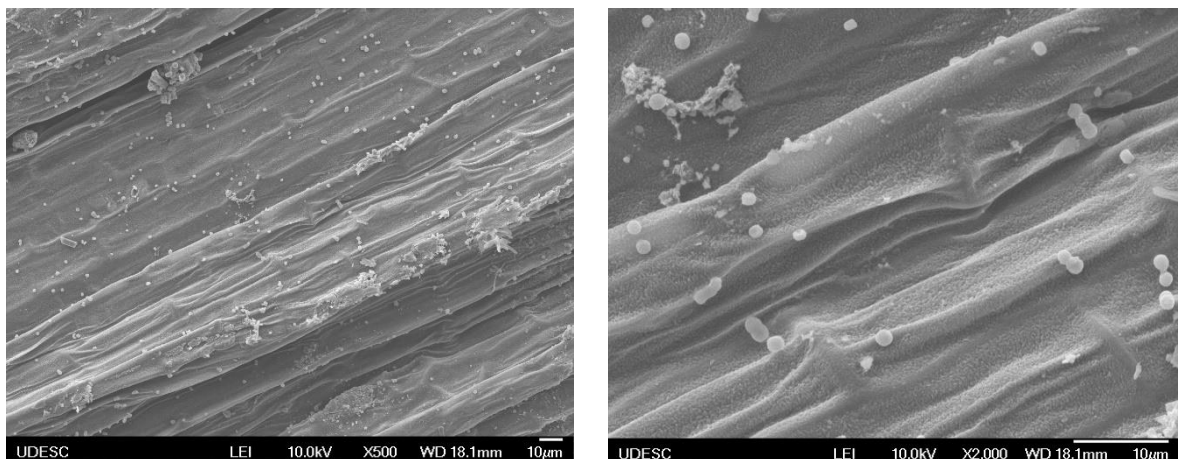
a) Amostra FST 500x de aumento.

b) Amostra FST 2000x de aumento.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A superfície da fibra tratada com plasma é observada na Figura 4.8, onde percebe-se a presença de ceras, indicando a baixa eficiência do tratamento em retirar essa fase, também se nota a deposição de partículas com composição desconhecida de características esféricas com aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  de raio. Carneiro (2013) ao realizar o tratamento das fibras de coco com plasma RF de argônio e ar atmosférico não encontrou a presença de tais partículas na superfície das amostras. Na Figura 4.8(b), consegue ver os veios criados nas regiões de vales na superfície da fibra.

**Figura 4.8** – Superfície da amostra FCT.



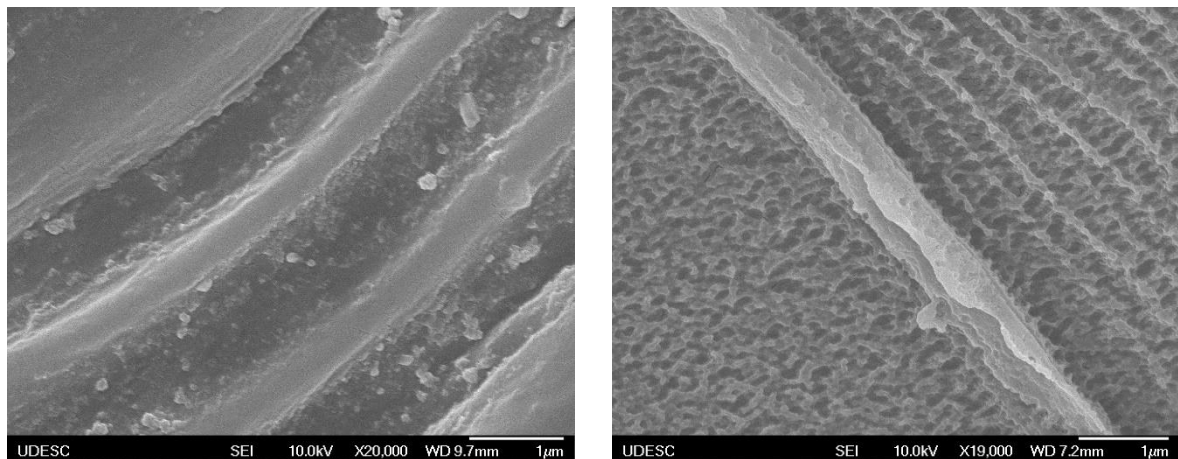
a) Amostra FCT 500x de aumento.

b) Amostra FCT 2000x de aumento.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os veios apresentados anteriormente, podem ser melhor observados na Figura 4.9(b), onde fica claro quando se compara com a Figura 4.9(a) que o tratamento de plasma provocou a remoção de material da superfície da fibra, alterando sua rugosidade, os defeitos provocados são inferiores a 1  $\mu\text{m}$ . Percebe-se também que a região de pico foi afetada pelo tratamento, ocorrendo a retirada de material. Carneiro (2013) relacionou o aumento da rugosidade provocado pelo tratamento de plasma a retirada de moléculas de lignina e hemicelulose da fibra.

**Figura 4.9** – Rugosidade da superfície das amostras FST e FCT.



a) Amostra FST 20000x de aumento.

b) Amostra FCT 19000x de aumento.

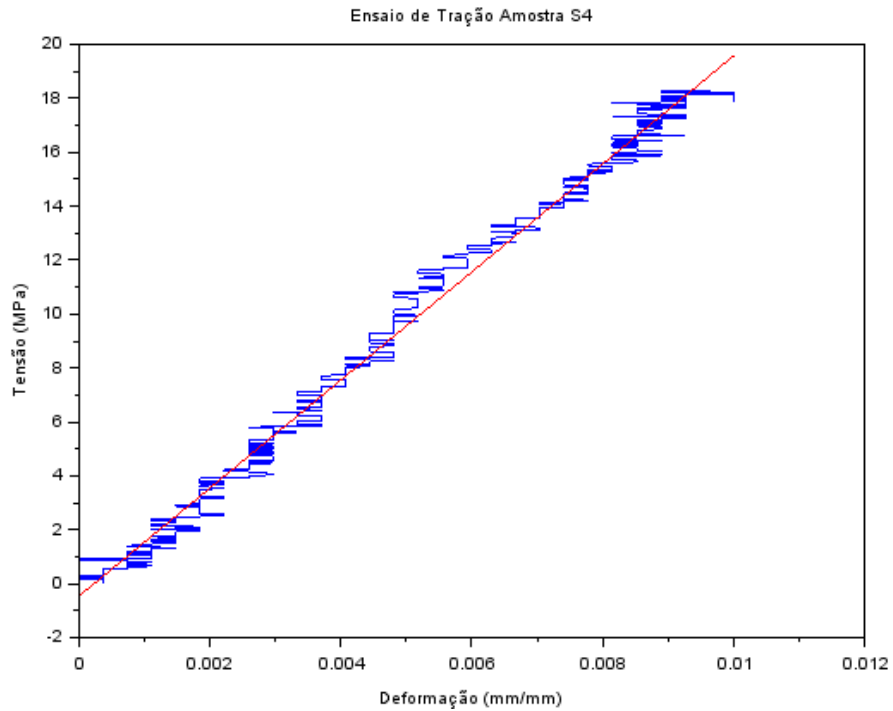
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.5 Propriedades Mecânicas

Os resultados obtidos nos ensaios de tração são apresentados na Tabela 5.2. Analisando os dados, percebe-se que a amostra FCT teve um aumento de 17% na tensão de ruptura a tração em relação a amostra FST. Comparando o módulo de elasticidade a tração pode-se notar que a amostra FCT teve uma diminuição de 6%, indicando juntamente com o aumento no alongamento (4%) que o compósito com a amostra FCT teve uma pequena diminuição da rigidez. Essas mudanças de propriedades indicam que a ligação entre a interface fibra e matriz foi otimizada e os esforços foram melhor transferidos da matriz para a fibra, e a pequena perda de rigidez do compósito pode estar relacionada a extração da lignina e hemicelulose no tratamento, já que, essa é responsável por tal característica na fibra. Outra possível explicação para perda de rigidez pode estar relacionada a presença de porosidade nos compósitos e incertezas de medição. Os gráficos de tensão por deformação dos CDPs S4 e T5 são

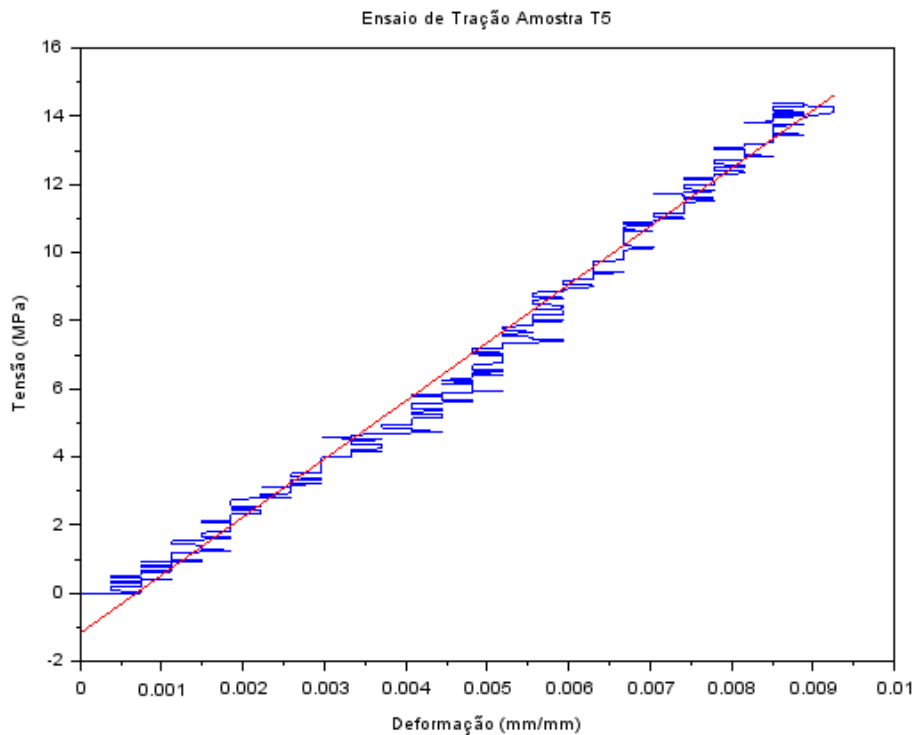
apresentados na Figura 4.12 e 4.13, os demais gráficos estão no anexo A, onde pode-se perceber a ruptura frágil do material devido o emprego da resina poliéster como matriz.

**Figura 4.10** – Gráfico de tensão x deformação do CDPs S4, fibra sem tratamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

**Figura 4.11** – Gráfico de tensão x deformação do CDPs T5, fibra com tratamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

**Tabela 4.2** – Resultados do ensaio de tração dos compósitos das amostras FST e FCT.

Percentual de Massa	Compósito de fibra de bananeira					
	Sem tratamento (FST)			Com tratamento (FCT)		
	E (GPa)	$\sigma_{rup}$ (MPa)	$\varepsilon_{max}$ (%)	E (GPa)	$\sigma_{rup}$ (MPa)	$\varepsilon_{max}$ (%)
40 % fibra 60 % resina	$2 \pm 0,6$	$17 \pm 5,0$	$1 \pm 0,5$	$2 \pm 1,8$	$21 \pm 7,8$	$1 \pm 0,8$

Fonte: Feito pelo próprio autor.

Os corpos de provas T1, T7, T8 e T9 não contribuíram para o cálculo do módulo de elasticidade e alongamento, pois, tiveram a ruptura fora do extensômetro e incoerência nos dados de deslocamento. O corpo de prova T6 foi totalmente descartado na análise, devido ter sofrido escorregamento na garra de fixação, os demais corpos de provas tiveram a ruptura dentro da região útil.

Os resultados obtidos podem ser comparados com os resultados apresentado no tópico 2.3 no trabalho de Mota (2010), onde é esperado que fibras longas e alinhadas tenham propriedades mecânicas no sentido axial melhor que fibras dispersas. No trabalho de Carvalho (2015) mostra-se que a porcentagem de 40% de fibra e 60% de resina apresentam características mecânicas melhores do que fibras dispersas em porcentagens inferiores, o que evidencia também a coerência que as propriedades obtidas neste trabalho estejam superiores às do trabalho de Mota (2010).



## 5 CONCLUSÕES

Estudou-se o tratamento de fibra de bananeira com plasma de rádio frequência utilizando argônio e oxigênio, para isso elaborou-se corpos de provas composto de fibras tratadas e não tratadas alinhadas em matriz de resina poliéster, e mediu-se as propriedades axiais do compósito, também avaliou-se a degradação térmica das fibras por meio de análise de termogravimetria, e verificou-se através de análise de microscopia eletrônica de varredura de emissão de campo a superfície da fibra antes e após o tratamento, com base nos resultados obtidos pode-se chegar nas seguintes conclusões:

- O tratamento de plasma RF de argônio e oxigênio, em fibra de bananeira mostrou-se efetivo no aumentando a resistência a tração.
- O tratamento de plasma mostrou-se sustentável sem a geração de resíduos prejudiciais para o meio ambiente.
- Observou-se que para o tratamento a plasma realizado, o percentual de queima das extremidades das fibras foi inferior a 10%.
- A utilização de fitas de fibra de bananeira reduz o tempo de processamento da fibra e mostra-se viável para elaboração do compósito em matriz de resina poliéster.
- As fitas de bananeira podem ser utilizadas em processo de produção com temperatura inferior a 200°C quando não tratadas com o plasma e 220°C quando tratadas com plasma, indicando uma maior estabilidade térmica da fibra tratada.
- A utilização de fitas de fibra de bananeira reduz a área de contato da fibra e matriz em cerca de 4,7 vezes em relação a utilização de fibras escovadas.
- O tratamento provocou a retirada de material na superfície da fibra, alterando a rugosidade.
- Ocorreu a deposição de partículas de composição desconhecidas sobre a fibra.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Elaborar o trabalho variando o tempo, proporção de gases e parâmetros do tratamento de plasma com o intuito encontrar a melhor combinação que maximize a propriedade do compósito.
- Realizar o tratamento de plasma em fibras dispersas e fibras escovadas longas.
- Tratar a fibra em reator de plasma atmosférico e mostrar a praticidade do processo.
- Estudar o tempo de ativação da superfície da fibra de bananeira após o tratamento de plasma.
- Estudar o tratamento de plasma em fibra de bananeira em diferentes matrizes.
- Estudar a porcentagem de componentes da fibra de bananeira retirada durante o tratamento de plasma.
- Desenvolver processos de extração de fibras automatizados e de melhor repetibilidade.
- Estudar o tratamento de plasma em outras fibras.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINANTE, Sandra Regina; PACHECO, Élen Beatriz Acordi Vasques; VISCONTE, Leila Lea Yuan. Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. *Quím. Nova*, São Paulo, v.36, n.1, p. 114-122, 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422013000100021&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422013000100021&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 06 jul. 2020.
- ALVES, Clodomiro. Nitretação a Plasma – Fundamentos e Aplicações. Editora UFRN, 2001.
- AHMED, A., 2007, A review of plasma treatment for application on textile substrate, Degree of BSc., Faculty of Textile Science, Textile Institute of Pakistan, Pakistan.
- ASTM. D3039 standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 1971.
- AZWA, Z. *et al.* Are view on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design*, Elsevier, v. 47, p. 424–442, 2013.
- BALZER, P. S.; VICENTE, L. L.; BRIESEMEISTER, R.; BECKER, D.; SOLDI, V.; RODOLFO Jr., A.; FELTRAN, M. B. Estudo das Propriedades Mecânicas de um Composto de PVC Modificado com Fibras de Bananeira. *Polimeros: Ciência e Tecnologia* 2007, 17, 1.
- BÁRDOS, L.; BARÁNKOVÁ, H. Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications. *Thin Solid Films*, v. 518, n. 23, p. 6705–6713, 2010.
- BECKER, Daniela et al. Influência da sequência de mistura do PP-MA nas propriedades dos compósitos de PP e fibra de bananeira. *Polímeros*, São Carlos, v. 21, n. 1, p. 7-12, 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14282011000100004&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282011000100004&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 11Set.2020.
- BLASS, A. Processamento de Polímeros: Resina Poliéster. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1988. 313 p.
- BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibers. *Progress in Polymer Science*. 1999, 24, 221.
- BRAITHWAITE, N. S. J. Introduction to gas discharges. *Plasma Sources Science and Technology*, v. 9, p. 517–527, 2000.
- CALLISTER, Jr. W. D., RETHWISCH, D. G. *Material science and engineering an introducton*. 8.ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2009, 885p.
- CAMPBELL, F. C. *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. [S.l.]:

- Elsevier, 2011.
- CARNEIRO, Mateus Rangel Duarte. *Tratamento de fibras de coco por plasma para obtenção de nanofibras e produção de compósitos de matriz de PHB*. 2013. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CARVALHO, A. C. *Fabricação e caracterização de compósitos à base de resina epóxi e fibras de bananeira*. 2015. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei.
- CASTRO, A. M. *Produção e Propriedades de Celulases de Fungos Filamentosos obtidas a partir de Celulignina de Bagaço de Cana-de-Açúcar (Saccharum spp)*. 2006, 88 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CHABERT, P.; BRAITHWAITE, N. S. J. *Physics of Radio-Frequency Plasmas*. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 2011.
- CHAPMAN, B. *Glow Discharge Processes Sputtering and Plasma Etching*. 1. ed. New York: Wiley-Interscience Publications, 1980.
- CLEMONS, C. M.; CAULFIELD, D. F.; *Natural fibers: Functional fillers for plastics*, Wiley-VCH Verlag: Weinheim, 2005, chap. 11.
- COBURN, J.; WINTERS, H.F. *Plasma etching—a discussion of mechanisms*. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 1981, 10, 119–141.
- DANIEL, I. M.; ISHAI O. *Engineering mechanics of composite materials.*, New York: Oxford University Press, 1994, 395 p.
- DILSIZ, N. *Plasma surface modification of carbon fibers: a review*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 14, n. 7, p. 975–987, 2000.
- FARIAS, J. G. G. de. *Modificação superficial de fibras de coco por tratamento a plasma para utilização como fase de reforço em amido termoplástico*. 2012. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- FARIAS, C. E. *Estudo da degradação de compostos em plasma de radiofrequência de argônio e oxigênio*. 2017, p.239, Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.
- FAZITA, M. N. *et al.* *Green composites made of bamboo fabric and poly (lactic) acid for packaging applications – a review*. *Materials, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 9, n. 6, p. 435, 2016.

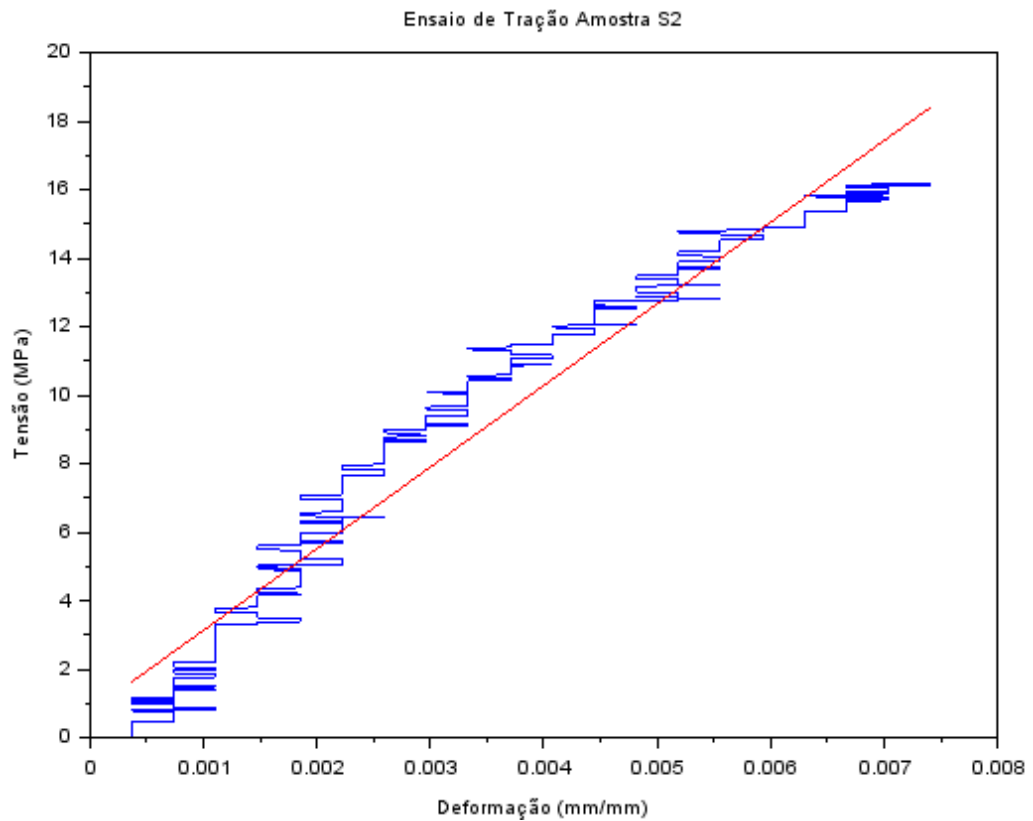
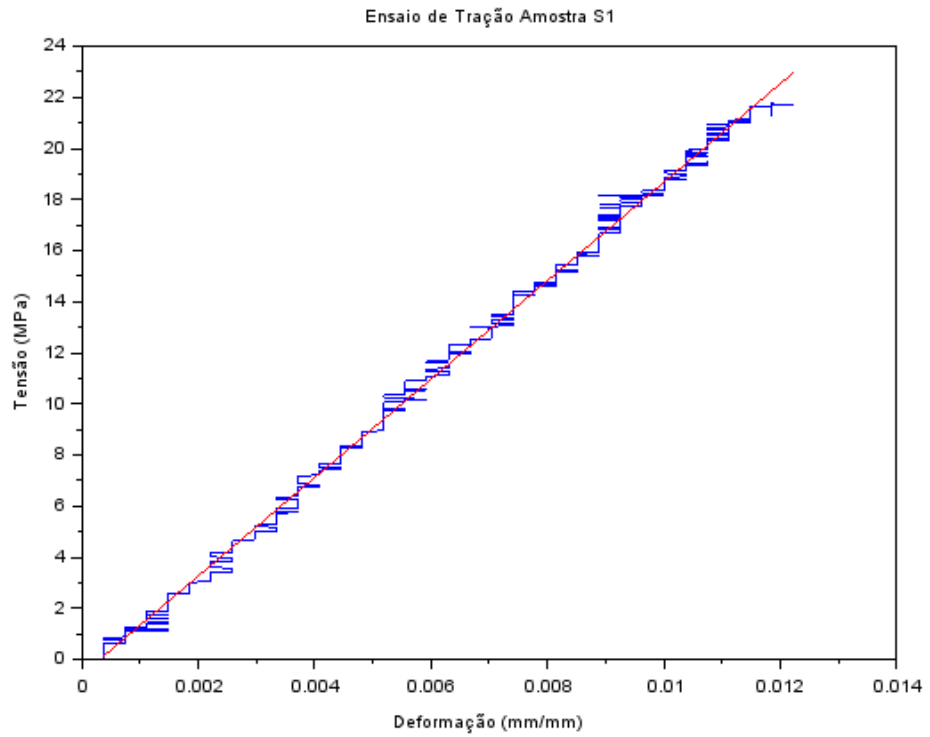
- FOWLER, P. A.; HUGHES, J. M.; ELIAS, R. M. Bicomposites: technology, environmental credentials and market forces. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, lugar, v. 86, n. 9, jul. 2006. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.469.2236&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 11 set. 2020.
- FRIEDRICH, J. *The Plasma Chemistry of Polymer Surfaces*. 1. ed. Weinheim: WILEYVCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012.
- FUENTES, C. *et al.* Wetting behaviour and surface properties of technical bamboo fibres. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Elsevier, v. 380, n. 1-3, p. 89–99, 2011.
- GARCIA, Tsai; BITTENCOURT, Edison; JOVA, Zaida Aguilar. Estudo do efeito do plasma de Argônio, Oxigênio e misturas na limpeza da superfície do alumínio por análise goniométrico. *Revista Ciência e Tecnologia*, [S.l.], v. 13, n. 22/23, mar. 2011. ISSN 2236-6733. Disponível em: <<http://www.revista.unisal.br/sj/index.php/123/article/view/136>>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- GOMES, Thiago S.; VISCONTE, Leila L. Y.; PACHECO, Elen B. A. V. Substituição da fibra de vidro por fibra de bananeira em compósitos de polietileno de alta densidade: parte 1. Avaliação mecânica e térmica. *Polímeros*, São Carlos, v. 23, n. 2, p. 206-211, 2013.
- GORNI, A. A. Introdução aos Plásticos. *Revista Plástico Industrial*. 2003. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/intropol.html>>. Acesso em 22/06/2020.
- GINÉ-ROSIAS, Maria Fernanda Espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente. (ICP-AES), / Maria Fernanda Giné-Rosias. - - Piracicaba: CENA, 1998, 148P.:il. (Série Didática, v.3)
- GUIMARÃES, B. M. R. *Tratamento químico de partículas de pseudocaule da bananeira visando a produção de painéis aglomerados*. 2012, 93 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG.
- HARRY, J. *Introduction to Plasma Technology: Science, Engineering and Applications*. 1. ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção Agrícola Municipal - PAM*. Rio de Janeiro. 2018.
- JOSHI, S. V.; DRZAL, L.T.; MOHANTY, A. K.; ARORA, S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: applied science and manufacturing*, p 371-376, 2004.

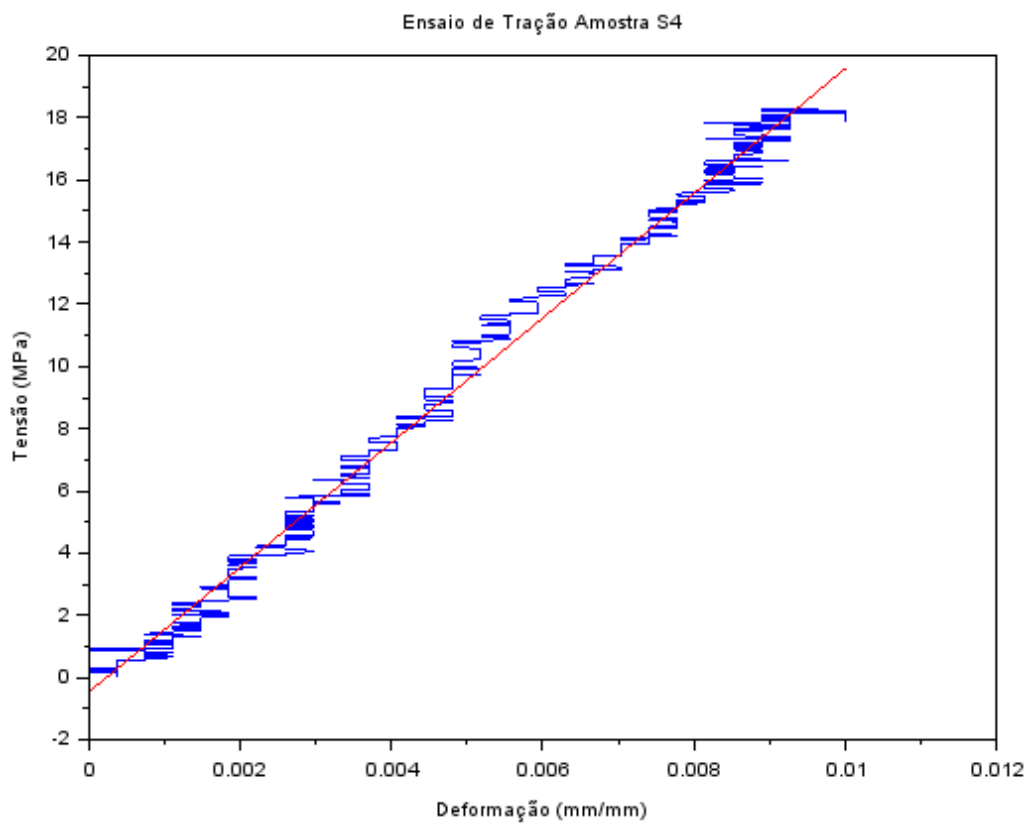
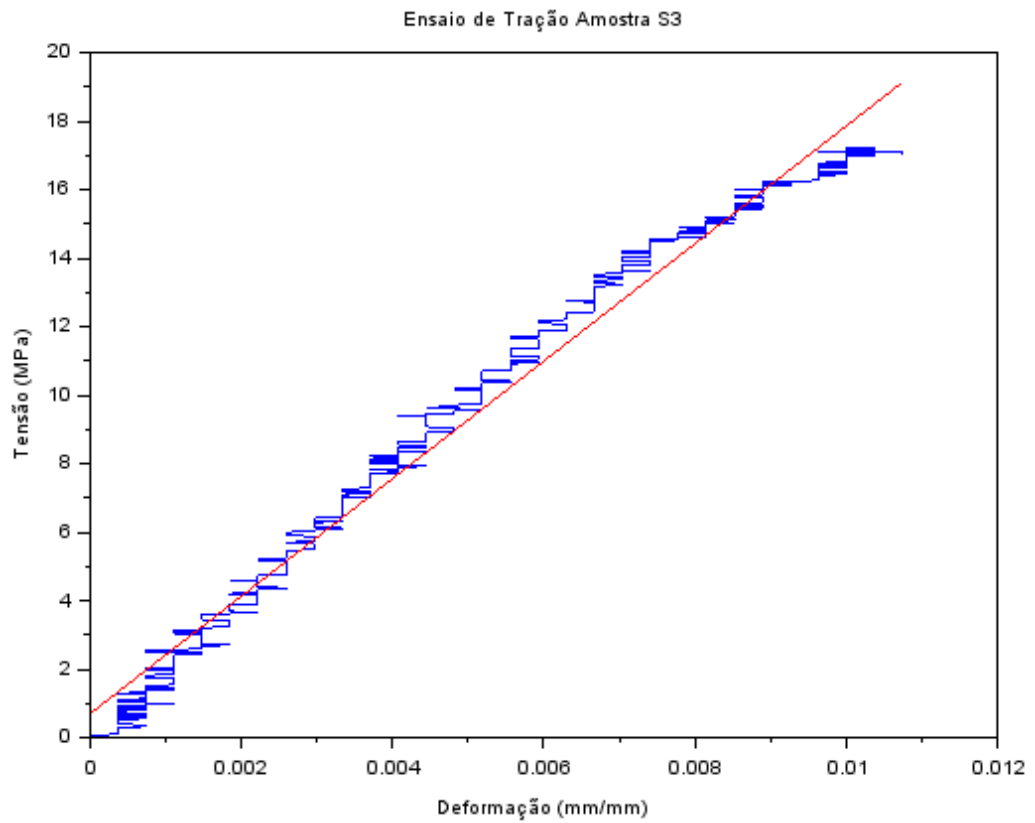
- KHAN, G. M. A.; SHAMS, M. S. A.; KABIR, M. R.; GAFUR, M. A.; TERANO, M.; ALAM, M. S. Influence of chemical treatment on the properties of banana stem fiber and banana stem fiber / coir hybrid fiber reinforced maleic anhydride grafted polypropylene / low-density. *Polyethylene Composites* 2013, 1020.
- LEE, J. Biological Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol. *Journal of Biotechnology*. v. 56, p. 1-24. 1997.
- LIEBERMAN, M. A.; LICHTENBERG, A. J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. 2. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- LOOS, M.; NAHORNY, J.; FONTANA, L. Plasma Modification of Carbon Nanotubes. *Current Organic Chemistry*, v. 17, p. 1880–1893, 1 jul. 2013.
- LUNA, P.; LIZARAZO-MARRIAGA, J.; MARIÑO, A. Guadua angustifolia bamboo fibers as reinforcement of polymeric matrices: An exploratory study. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 116, p. 93–97, 2016.
- MARINUCCI, G. *Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia*. São Paulo: Artliber Editora, 2011.
- MENDONÇA, P. T. R. *Materiais Compostos & Estruturas – Sanduíche: Projeto e Análise*. Edição 1. Barueri - SP: Editora Manole Ltda, 2003.
- MENDONÇA, P. d. T. R. D. *Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise*. [S.l.]: Manole, 2005.
- MOTA, R. C. S. *Análise de viabilidade técnica de utilização da fibra de bananeira com resina sintética em compósitos*. 2010, 108 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- MUKHOPADHYAY, S.; FANGUEIRO, R. Physical Modification of Natural Fibers and Thermoplastic Films for Composites - A Review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2009, 22, 135.
- MUNTER, R. Advanced Oxidation Processes - Current Status and Prospect. *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem.*, v. 50, n. 2, p. 59–80, 2001.
- NERY, T. B. R.; JOSÉ, N. M. Estudo das Fibras de Bananeira Pré-tratadas e in natura como Possível Matéria-prima para Reforço em Compósitos Poliméricos. *Revista Vitural de Química*, Salvador, v. 10, n. 2, fev. 2018. Disponível em: < <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v10n2a08.pdf> >. Acesso em: 25 jun. 2020.
- NOSSA, T. S. *Estudo comparativo das tensões na interface de compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de carbono, aramida e vidro*. 2011, 62 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba - SP.

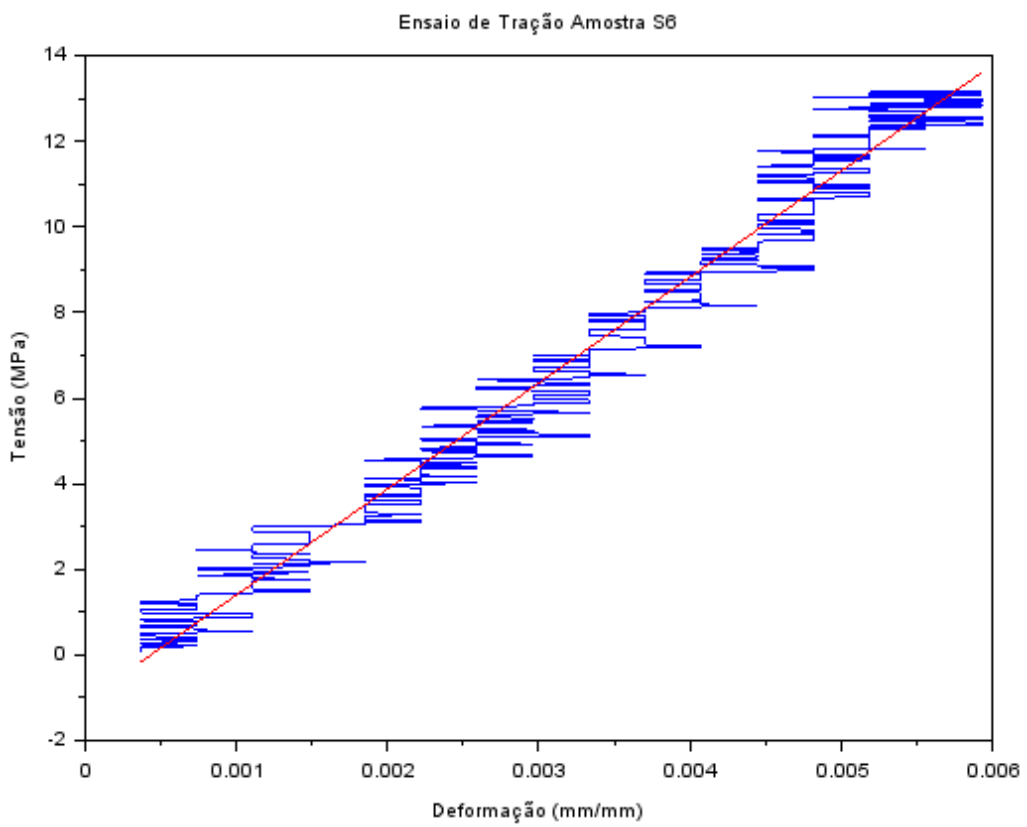
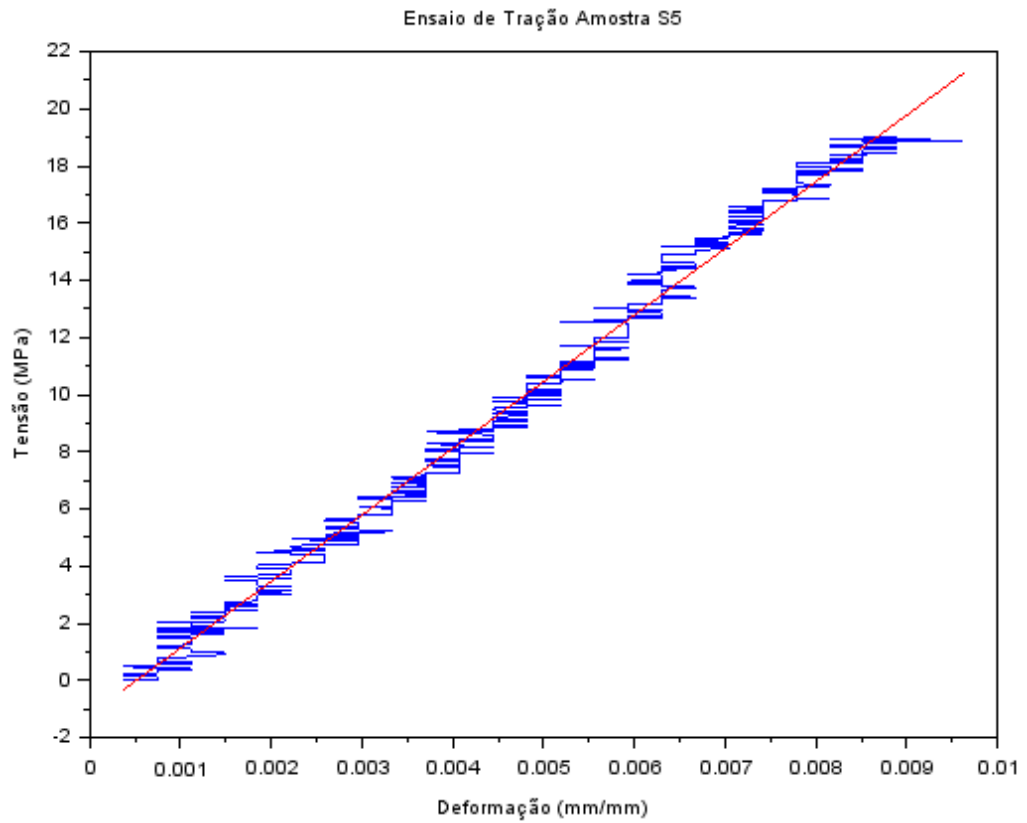
- OSORIO, L. *et al.* The relation between bamboo fibre microstructure and mechanical properties. In: 14TH European Conference on Composite Materials. Paper ID. [S.l.: s.n.], 2010.
- OZONE FACT SHEET. 2 - H<sub>2</sub>O (Revised 10/26/03). 2003. Disponível em: <<http://healingtools.tripod.com/ofs2h.html>>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- PEREIRA, J. C. Curso de projeto estrutural com materiais compósitos. 126p. 2003. Apostila de curso. Universidade Federal de Santa Catarina.
- PHAN, Lan Thi; YOON, Sun Mi; MOON, Myoung-Woon. Plasma-based nanostructuring of polymers: a review. *Polymers*, v. 9, n. 24, p. 427, set. 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/9/9/417/htm>>. Acesso em: 6 out. 2020.
- RANA, S.; FANGUEIRO, R. Fibrous and textile materials for composite applications. [S.l.]: Springer, 2016.
- RAZERA, I. A. T. *Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica*. 2006, 189 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo.
- SILVA, L. J. *Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos laminados com fibras vegetais*. 2011, 141 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei – MG.
- SILVA, Rosana V. da. Compósito de resina poliuretano derivada do óleo de mamona e fibra vegetais. 2003. 157 f. Tese (Doutorado Engenharia de Materiais). Universidade do Estado de São Paulo – USP, São Carlos.
- TALREJA, R.; VARNA, J. Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials. [S.l.]: Elsevier, 2015.
- TIWARI, S.; BIJWE, J. Surface Treatment of Carbon Fibers - A Review. *Procedia Technology*, v. 14, p. 505–512, 2014.
- VENKATESHWARAN, N.; ELAYAPERUMAL, A. Banana Fiber Reinforced Polymer Composites - A Review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2010, 29, 2387
- YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 2007, 86, 1781

## Anexo A

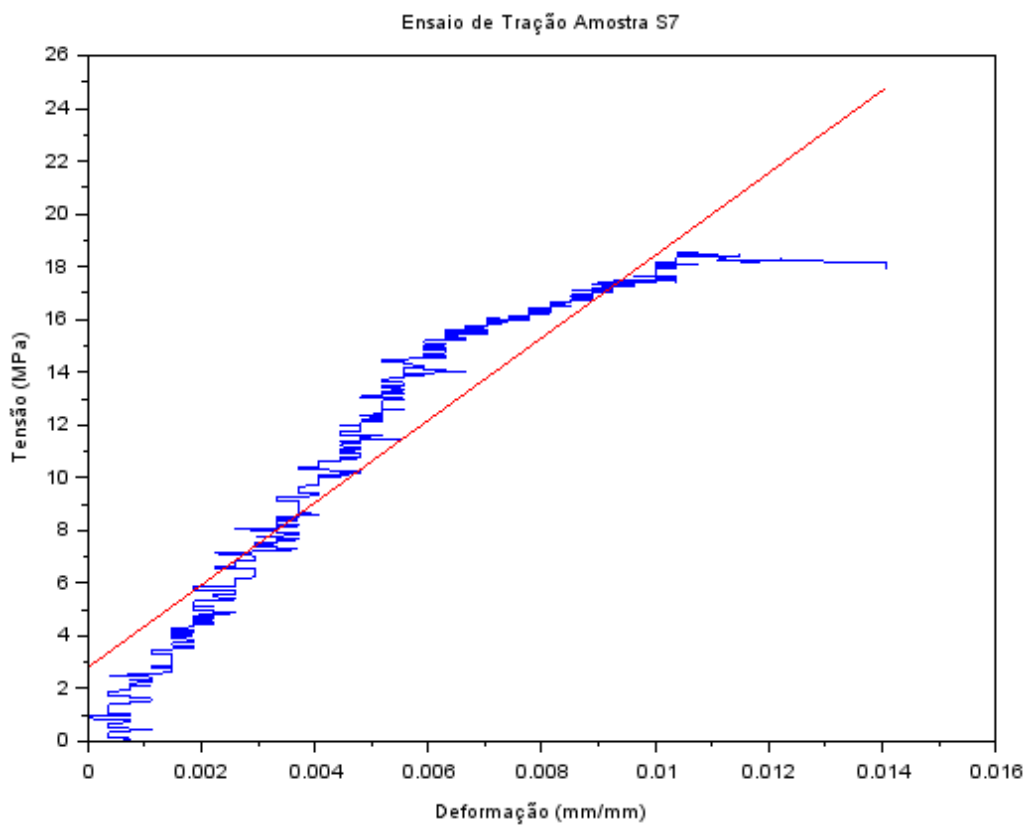
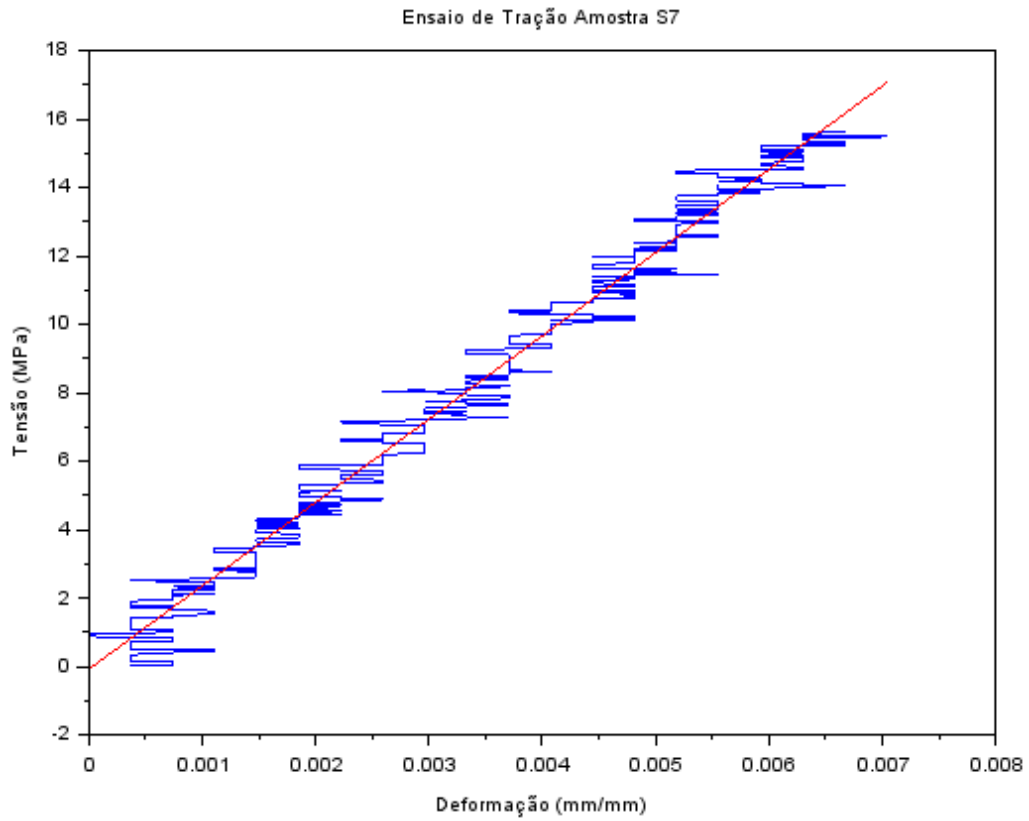
Gráficos de tensão por deformação da amostra FST. Em alguns gráficos utilizou-se apenas a região mais linear dos dados para calcular o módulo de elasticidade.











Gráficos de tensão deformação da amostra FCT.

