



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
CTC- Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de  
Materiais

Roberta Anastácia Palermo Fernandes

**Compósitos de polipropileno/biofibras de sisal para partes leves de  
automóveis**

Rio de Janeiro

2022

Roberta Anastácia Palermo Fernandes

**Compósitos de polipropileno/biofibras de sisal para partes leves de automóveis**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais não metálicos.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Daniele Cruz Bastos

Coorientador: Prof. Dr. Valdir Agostinho de Melo

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/CZO

F363 Fernandes, Roberta Anastácia Palermo

Compósitos de propileno/biofibras de sisal para partes leves de automóveis/ Roberta Anastácia Palermo Fernandes – 2022.  
70 f.

Orientadora: Daniele Cruz Bastos  
Coorientador: Valdir Augustinho de Melo

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais.

1. Compósitos Poliméricos – Teses. 2. Fibra de Sisal – Teses. 3. Análise Estatística – Teses. I. Bastos, Daniele Cruz. II. Melo, Valdir Augustinho de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia. IV. Título.

CDU 620

Bibliotecária: Rosana Maria dos Passos – CRB 7 4908

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.



Assinatura

29/09/2022

Data

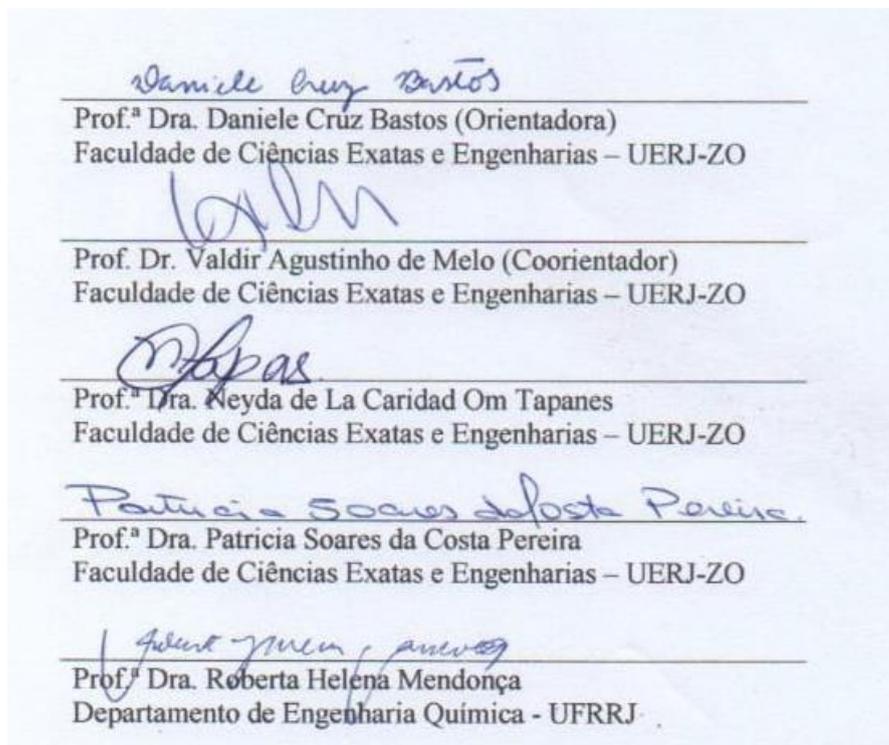
Roberta Anastácia Palermo Fernandes

### **Compósitos de polipropileno/biofibras de sisal para partes leves de automóveis**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais não metálicos.

Aprovada em 29 de setembro de 2022.

Banca Examinadora:



Rio de Janeiro

2022

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que me sustentou e me deu sabedoria para chegar até aqui, e a toda minha família por todo apoio durante o percurso desta jornada acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a minha família, por toda motivação transmitida a minha pessoa, apoio, amor e carinho que me fizeram chegar até aqui. Aos meus pais, João Roberto e Sônia, o meu muito obrigada, que nunca deixaram de acreditar no meu potencial, e sempre investiram constantemente nos meus estudos.

Meu muito obrigada a todos os colegas pesquisadores que me ajudaram de maneira direta ou indireta com os estudos direcionados nesta pesquisa: Beatriz Cruz Bastos (IFRJ); Pedro Henrique Poubel Mendonça da Silveira (IME); professora Neyda de La Caridad Om Tapanes (UERJ-ZO), professora Patrícia Soares da Costa Pereira (UERJ-ZO); professora Renata Antoun Simão (PEMM/COPPE/UFRJ) e professor Sergio Neves Monteiro (IME).

Em especial, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Prof<sup>a</sup> Dra. Daniele Cruz Bastos e Prof. Dr. Valdir Agostinho de Melo, pela disponibilidade em me orientar, por todo direcionamento técnico e científico que me auxiliaram na conclusão deste estudo.

Sem sonhos a vida não tem brilho. Sem metas, os sonhos não têm alicerces. Sem prioridades, os sonhos não se tornam reais.

*Augusto Curry*

## RESUMO

FERNANDES, R.A.P. Compósitos de polipropileno/biofibras de sisal para partes leves de automóveis, 2022. 71f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais), Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Campus Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2022.

Compósitos à base de polipropileno virgem e reciclado (PPv e PPr) e fibra de sisal não tratado (NT) e com tratamento (NaOH, Ultrasson – US e Ultrasson seguido de NaOH – US/NaOH), foram preparados pela técnica de moldagem por compressão em uma estrutura sanduíche de três camadas. As fibras tratadas e não tratadas foram caracterizadas por análises de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e Difração de Raios- X (DRX). O tratamento com NaOH, e também o tratamento US/NaOH, removeram grande parte dos materiais amorfos da superfície das fibras. O tratamento de ultrassom sozinho não causou nenhum efeito significativo na remoção de hemicelulose e pectina. A análise de DRX mostrou uma cristalinidade de 48,55% maior no sisal alcalino em relação ao sisal não tratado. As formulações processadas foram caracterizadas por análises de densidade, dureza, absorção de água e Impacto Izod. A densidade dos materiais variou de 0,892-0,933 g/cm<sup>3</sup> mostrando a possibilidade de uso destes compósitos em partes leves automotivas. O PPr e os compósitos com matriz de PPr apresentam menor dureza que seus equivalentes com matriz de PPv. A absorção de água foi maior nos compósitos com PPr, independentemente do tipo de tratamento realizado. Compósitos com matriz de PPv apresentam maiores valores de resistência ao impacto do que compósitos com matriz reciclada. Diante destes resultados, os compósitos obtidos com matriz virgem foram submetidos a uma análise estatística, que mostrou que o tratamento alcalino foi um fator significativo para a dureza dos compósitos, e que a adição da camada de sisal foi relevante para melhorar a resistência ao impacto. Por fim, foi realizado um estudo de viabilidade econômica, comparando-se os compósitos de sisal com compósitos possivelmente obtidos com manta de vidro, material tradicionalmente empregado. As formulações dos compósitos reforçados com sisal apresentam um custo maior, do que os formulados com manta de vidro, entretanto, pensando de forma circular, o uso da fibra de sisal se justifica.

**Palavras-chave:** Compósitos poliméricos; fibra de sisal; análise estatística.

## ABSTRACT

FERNANDES, R.A.P. Compósitos de polipropileno/biofibra de sisal para partes leves de automóveis, 2022. 71f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais), Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Campus Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2022.

Composites based on virgin and recycled polypropylene (PP and rPP) and sisal fabric, with and without alkali treatment, were prepared by compression molding technique in a mat with a three-layers sandwich structure. The sisal was characterized by Fourier infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray diffraction (XRD). The composites were characterized according to physical and mechanical properties. Also, the factorial experimental design was used to statistically evaluate the behavior of the composition of the composite on mechanical properties. The FTIR spectrum and X-Ray diffraction indicated the partial removal of amorphous materials from the sisal surface after alkali treatment. The composites density results ranged from 0.892 to 0.927 g.cm<sup>-3</sup>, which is important for lightweight automotive component design. A slight decrease in the hardness of the rPP and rPP composites, compared to the PP, was observed. The water absorption was higher in rPP composites, regardless of the chemical treatment. Moreover, the impact resistance of PP and their composites were higher than the values for rPP. Statistical analysis showed that the alkali treatment represents a significant factor for the hardness of the rPP and PP composites and the addition of the sisal layer was relevant to improve the impact resistance of the composites. Because of these results, the composites obtained with virgin matrix were submitted to a statistical analysis, which showed that the alkaline treatment was a significant factor for the hardness of the composites and that the addition of the sisal layer was relevant to improve the impact resistance. Ultimately, an economic feasibility study was carried out, comparing the sisal composites with composites possibly obtained with glass blanket, a material traditionally used. Regardless of the formulations of composites reinforced with sisal present a higher cost than those formulated with glass blankets, environmentally thinking, the use of sisal fiber is justified.

**Keywords:** polymeric composite; sisal fiber; statistical analysis

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Reação de polimerização do Polipropileno .....	20
Figura 2 -	Estrutura isomérica do polipropileno – polipropileno atático (a), polipropileno isotático (b) e polipropileno sindiotático (c) .....	21
Figura 3 -	Classificação hierárquica dos compósitos quanto a geometria .....	27
Figura 4 -	Estrutura da celulose .....	28
Figura 5 -	Estrutura molecular da hemicelulose .....	28
Figura 6 -	Estrutura molecular da lignina .....	29
Figura 7 -	<i>Agave sisalana</i> (Sisal) .....	32
Figura 8 -	Fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho .....	37
Figura 9 -	Tela de Sisal .....	38
Figura 10 -	(a)Tela de sisal tratada com NaOH, (b) Estufa de esterilização e secagem Marconi MA 033/5 .....	39
Figura 11 -	(a)Tela de sisal imersa em banho de ultrassom e (b) Estufa de esterilização e secagem Marconi MA 033/5 .....	40
Figura 12 -	(a)Tela de sisal tratada com US e (b) Tratamento alcalino de Sisal .....	40
Figura 13 -	Polipropileno virgem .....	41
Figura 14 -	Polipropileno reciclado .....	41
Figura 15 -	Prensa quente MARCONI MA 098/C .....	42
Figura 16 -	Prensa fria MARCONI MA 098/A .....	42
Figura 17 -	(a)Polipropileno virgem prensado e (b)Polipropileno reciclado prensado. ....	43
Figura 18 -	Esquema de montagem dos compósitos tipo sanduíche .....	43
Figura 19 -	Densímetro – DSL 910 – GEHAKA .....	44
Figura 20 -	Amostras de 1:1 utilizadas para ensaio de densidade .....	45
Figura 21 -	Durômetro Shore D Bareiss BS61 II .....	45
Figura 22 -	Amostras de (1) PPr; (2) PPr/Sisal NT; (3) PPr/Sisal UV; (4) PPr/Sisal NaOH; (5) PPr/Sisal US + NaOH; (6) PPv; (7) PPv/Sisal NT; (8) PPv/Sisal UV; (9) PPv/Sisal NaOH; (10) PPr/Sisal US + NaOH, imersas em água destilada .....	46
Figura 23 -	Balança analítica da marca Marte, Modelo AY220 .....	47
Figura 24 -	Corpos de prova para ensaio de impacto Izod .....	49

Figura 25 -	Análise de densidade das amostras: 1. PPr; 2. PPr/Sisal NT; 3. PPr/Sisal UV; 4. PPr/Sisal NaOH; 5. PPr/Sisal US + NaOH; 6. PPv; 7. PPv/Sisal NT; 8. PPv/Sisal UV; 9. PPv/Sisal NaOH; 10. PPr/Sisal US + NaOH .....	50
Figura 26 -	Análise de dureza das amostras: 1. PPr; 2. PPr/Sisal NT; 3. PPr/Sisal UV; 4. PPr/Sisal NaOH; 5. PPr/Sisal US + NaOH; 6. PPv; 7. PPv/Sisal NT; 8. PPv/Sisal UV; 9. PPv/Sisal NaOH; 10. PPr/Sisal US + NaOH .....	52
Figura 27 -	Ensaio de absorção de água das formulações processadas .....	53
Figura 28 -	Resultado da análise de FTIR .....	55
Figura 29 -	Resultados para o ensaio de DRX .....	56
Figura 30 -	Gráfico de Pareto padronizado para dureza Shore D .....	60
Figura 31 -	Gráfico de Pareto padronizado para resistência ao impacto Izod .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Comparativo entre as propriedades das fibras naturais e sintéticas mais utilizadas como reforço .....	30
Tabela 2 -	Composição das fibras vegetais: coco, sisal, juta e rami .....	30
Tabela 3 -	Compósitos reforçados com fibra de sisal tratada .....	31
Tabela 4 -	Composição química média e índice de cristalinidade (Ic) ao longo do comprimento da fibra de sisal da variedade <i>Agave sisalana</i> .....	33
Tabela 5 -	Propriedades mecânicas ao longo do comprimento da fibra de sisal da variedade <i>Agave sisalana</i> .....	34
Tabela 6 -	Resultados do ensaio de densidade (g/cm <sup>3</sup> ) das amostras: PPv; PPr; PPv/Sisal NT; PPr/Sisal NT; PPv/Sisal US; PPr/Sisal US; PPv/Sisal NaOH; PPr/Sisal NaOH; PPv/Sisal US+ NaOH; PPr/Sisal US+ NaOH ...	51
Tabela 7 -	Resultados do ensaio de dureza (Shore D) das amostras: PPv; PPr; PPv/Sisal NT; PPr/Sisal NT; PPv/Sisal US; PPr/Sisal US; PPv/Sisal NaOH; PPr/Sisal NaOH; PPv/Sisal US+ NaOH; PPr/Sisal US+ NaOH ...	52
Tabela 8 -	Picos de transmissão FTIR dos constituintes da Fibra de Sisal .....	55
Tabela 9 -	Resultados do ensaio de impacto das formulações processadas .....	57
Tabela 10 -	Matriz experimental e valores das variáveis resposta.....	58
Tabela 11 -	ANOVA do planejamento fatorial para a dureza (H) .....	58
Tabela 12 -	ANOVA do planejamento fatorial para resistência ao Impacto Izod (I) ....	59
Tabela 13 -	ANOVA do planejamento fatorial para medidas de densidade (D) .....	59
Tabela 14 -	Custos das formulações reforçadas com manta de sisal de menor custo ...	62
Tabela 15 -	Custos das formulações reforçadas com manta de sisal de maior custo ....	62
Tabela 16 -	Custos da formulação dos compósitos de manta de vidro .....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DRX	Difração de raios X
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
GEE	Gases de Efeito Estufa
I <sub>c</sub>	Índice de cristalinidade
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PP	Polipropileno
PPr	Polipropileno reciclado
PPv	Polipropileno virgem
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	16
<b>1. OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Objetivos específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Polímeros .....</b>	<b>18</b>
2.1.1 <u>Classificação dos polímeros</u> .....	18
2.1.2 <u>Polipropileno (PP)</u> .....	20
2.1.2.1 <u>Cristalização do Polipropileno</u> .....	21
2.1.2.2 <u>Processamento do Polipropileno</u> .....	22
<b>2.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3 Pandemia da COVID-19 e seu impacto no meio ambiente.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 Compósitos.....</b>	<b>26</b>
2.4.1 <u>Classificação do compósitos</u> .....	26
<b>2.5 Fibras Vegetais .....</b>	<b>27</b>
2.5.1 <u>Fibra de sisal</u> .....	32
2.5.2 <u>Cadeia produtiva do sisal</u> .....	33
2.5.2.1 <u>Propriedades Mecânicas da Fibra de Sisal</u> .....	34
2.5.2.2 <u>Utilização da fibra de sisal na indústria automobilística</u> .....	35
<b>2.6 Viabilidade econômica .....</b>	<b>35</b>
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>37</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Materiais e equipamentos.....</b>	<b>37</b>
3.1.1 <u>Fibra de sisal</u> .....	37
3.1.2 <u>Modificação química</u> .....	38
3.1.3 <u>Tratamento com ultrassom</u> .....	39
3.1.4 <u>Tratamento combinado (US+ NaOH)</u> .....	40
<b>3.2 Processamento dos compósitos.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3 Caracterização dos materiais.....</b>	<b>44</b>
3.3.1 <u>Ensaio de densidade</u> .....	44

3.3.2 <u>Ensaio de dureza</u> .....	45
3.3.3 <u>Ensaio de absorção de água</u> .....	46
3.3.4 <u>Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</u> .....	47
3.3.5 <u>Difração de Raio-X (DRX)</u> .....	49
3.3.6 <u>Ensaio de Impacto Izod</u> .....	48
3.3.7 <u>Análise estatística</u> .....	49
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>49</b>
<b>4.1 Ensaio de densidade</b> .....	<b>49</b>
<b>4.2 Ensaio de dureza</b> .....	<b>52</b>
<b>4.3 Ensaio de absorção de água</b> .....	<b>53</b>
<b>4.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</b> .....	<b>54</b>
<b>4.5 Difração de Raio-X (DRX)</b> .....	<b>56</b>
<b>4.6 Ensaio de Impacto Izod</b> .....	<b>57</b>
<b>4.7 Análise estatística</b> .....	<b>58</b>
<b>4.8 Viabilidade econômica</b> .....	<b>62</b>
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>64</b>
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>64</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>65</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>66</b>

## INTRODUÇÃO

No atual modelo econômico linear, o aumento da população e do consumo resultou no aumento do desperdício e no esgotamento dos recursos naturais, o que exacerbou o problema das mudanças climáticas e a escassez de recursos. Atualmente, o conceito de economia circular tem ganhado importância, visando minimizar os impactos ambientais, reduzindo o consumo de energia, água, produtos químicos, materiais e também, os gases de efeito estufa (TAGHIPOUR *et. al*,2022; RODRIGUES *et.al*,2022).

Materiais leves são vantajosos porque a peça produzida requer menos material em sua fabricação, reduzindo o custo do material e o tempo de ciclo, e em aplicações automotivas reduz a energia necessária para movimentar o veículo. As cargas comuns na indústria automotiva são as fibras de vidro (2,48–2,70 g.cm-3), que são usadas para fornecer resistência, e talco (2,58–2,83 g.cm-3) ou carbonato de cálcio (2,71–2,93 g. cm-3), que são usados para equilibrar custo e rigidez. No entanto, uma oportunidade chave permanece para selecionar materiais de densidade inerentemente mais baixa que permitem peso leve adicional como biofibras (AGARWAL *et.al*, 2019; CHANDGUDE E SALUNKHE, 2021).

Vários tipos de biofibras como juta, linho, cânhamo, sisal e outros são utilizados como reforço em matrizes poliméricas para melhorar as propriedades mecânicas do compósito. No entanto, a biocompatibilidade e a janela de processamento adequada são dois grandes problemas enfrentados, pois há uma mudança de propriedade para cada material. Além disso, é importante desenvolver biocompósitos com técnicas de processamento adequadas para obter propriedades físicas, mecânicas e térmicas superiores (MADHU *et. al*, 2019; TEKLU *et. al*, 2019).

Em vista disto, o presente estudo tem como objetivo obter compósitos, à base de polipropileno virgem e reciclado (PPV e PPR), e tecido de sisal, com e sem tratamento alcalino. As formulações foram preparadas pela técnica de moldagem por compressão em uma esteira com estrutura sanduíche de três camadas: Matriz/Enchimento/Matriz (PP-Sisal-PP e PP-Sisal NaOH-PP; PPr-Sisal-PPr e PPr-Sisal NaOH-PPr ), prensado a quente a 190°C, e 6 toneladas por 5 minutos. O sisal foi caracterizado por espectroscopia de infravermelho de Fourier (FTIR) e difração de raios X (DRX). As formulações processadas foram caracterizadas quanto às propriedades físicas e mecânicas (densidade, absorção de água, dureza e izod de impacto). Além

disso, o planejamento experimental fatorial foi utilizado para avaliar estatisticamente o comportamento da composição do compósito nas propriedades mecânicas.

Os materiais foram formulados, visando sua aplicação na indústria automobilística para confecção de partes leves de automóveis.

## **1 OBJETIVO GERAL**

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo produzir um compósito de matriz polimérica (polipropileno) utilizando como carga resíduo de fibra de sisal em forma de tecido (com e sem modificação química), a fim de minimizar o custo do produto e o impacto ambiental, com possível aplicação para partes leves de automóveis.

### **1.1 Objetivos específicos**

- Modificar quimicamente a fibra de sisal;
- Preparar materiais compósitos por compressão;
- Realizar ensaios com os materiais compósitos para avaliar o efeito do tratamento nas propriedades físicas, mecânicas e morfológicas obtidas;
- Realizar uma análise estatística para comprovação dos experimentos;
- Realizar análise econômica dos compósitos obtidos.

## CAPÍTULO II

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Polímeros

Os polímeros são denominados na literatura como macromoléculas, sendo caracterizadas por suas interações intramoleculares e intermoleculares, estrutura química e tamanho. Suas unidades químicas são repetidas regularmente ao longo da cadeia sendo denominada como “meros” (*mers*), ligadas por covalências. O grau de polimerização de uma cadeia polimérica, é determinado pelo número de meros presentes na mesma (MANO E MENDES,2004).

Os monômeros são a matéria-prima para a produção de um polímero, o que significa uma molécula com uma (mono) unidade de repetição (CANEVAROLO,2002).

##### 2.1.1 Classificação dos polímeros

Segundo Canevarolo (2010), os polímeros podem ser classificados quanto aos seguintes quesitos:

- Quanto a estrutura química: nesta classificação analisa-se a estrutura química do mero, subdividindo os polímeros em polímeros de cadeia carbônica e polímero de cadeia heterogênea;
- Quanto ao método de preparação: este método se divide em duas grandes classes, sendo elas; polímeros de adição, que apresentação normalmente cadeia carbônica e não há perda de massa na forma de compostos de baixo peso molecular, o peso do polímero formado é igual ao peso de monômero adicionado e polímeros de condensação que são originados da reação de dois grupos funcionais reativos com a eliminação de moléculas de baixo peso molecular;
- Quanto ao comportamento mecânico: os polímeros podem ser classificados como plásticos e elastômero.
  - a) **Os Plásticos:** são materiais poliméricos sólidos em temperatura ambiente, e se subdividem em:

**Termoplástico:** com o aumento da temperatura e marginal de pressão amolecem e podem ser moldados, retirada essas condições se solidificam obtendo a forma do molde.

**Termorrígidos:** com aumento da temperatura e marginal de pressão se fundem sendo moldado, reagem quimicamente formando ligações cruzadas entre cadeias e solidificam não tendo mais influência da temperatura e pressão tornando-se insolúvel.

- b) **Elastômeros:** este tipo de polímero pode se deformar em temperatura ambiente seu comprimento inicial em no mínimo duas vezes, retornando ao seu comprimento inicial após o esforço.
- Quanto ao desempenho mecânico: nessa classificação os polímeros são avaliados quanto seu desempenho mecânico quando empregados em um item ou peça.
    - a) **Termoplásticos convencionais (*commodities*):** este polímero apresenta alta facilidade de processamento, alta produtividade, baixo custo e baixo nível de exigência mecânica.
    - b) **Termoplásticos especiais:** nesta classe estão os copolímeros e os homopolímeros, possui preço mais elevado que os polímeros convencionais.
    - c) **Termoplásticos de engenharia (TE):** este tipo de polímero apresenta alta resistência mecânica, boa tenacidade e excelente estabilidade dimensional.
    - d) **Termoplásticos de engenharia especiais:** são polímeros utilizados quando se requer altas faixas de temperatura, apresentam grande quantidade de anéis aromáticos na cadeia principal, o que influi diretamente na estabilidade térmica deste polímero.

Segundo Gafforelli, 2019 o polipropileno é o polímero mais explorado entre os plásticos *commodities*, devido apresentar propriedades vantajosas em relação aos demais termoplásticos, sendo estas:

- Baixa densidade;
- Equilíbrio de rigidez e resistência mecânica;
- Resistência química e térmica;
- Fácil processamento;
- Reciclabilidade.

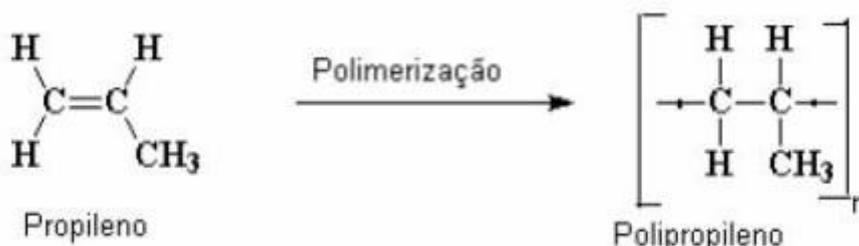
- Bom custo-benefício.

### 2.1.2 Polipropileno (PP)

O polipropileno é um polímero largamente explorado em diversas aplicações, devido sua ótima combinação de propriedades térmicas e mecânicas. Este polímero é classificado como um termoplástico (moldável a determinada temperatura) da classe das poliolefinas, altamente cristalino e substancialmente linear (CANEVALORO, 2006).

A produção de polipropileno é dada pela polimerização do propileno, que é um subproduto gasoso obtido no refino do petróleo, sob condições controlada de pressão e temperatura, na presença de um catalizador (MAIER E CALAFUT, 1998). A figura 1 mostra a reação de polimerização do polipropileno.

Figura 1 - Reação de polimerização do Polipropileno



Fonte: Callister e Retwisch, 2016

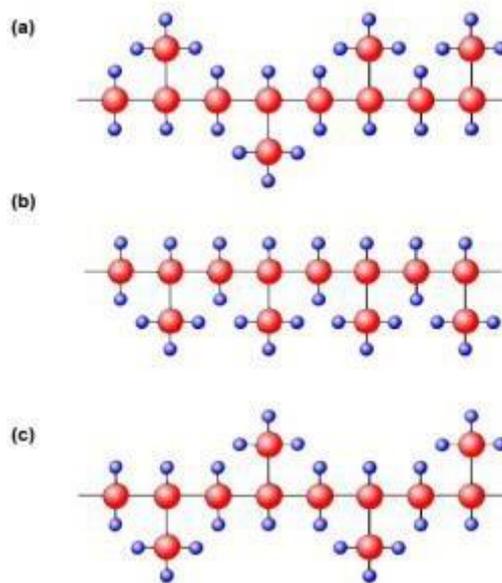
Algumas propriedades do polipropileno, podem ser alteradas por influência direta da taticidade, expressa na cadeia polimérica pela regularidade espacial do grupo metila (CH<sub>3</sub>), pela massa molar e pelas condições de cristalização. As propriedades do produto final, terão influência direta destes parâmetros assim como do método envolvido na cristalização. Outros fatores que também contribuem nestas propriedades, são: o tamanho dos esferulitos, o grau de cristalinidade da região interfacial e amorfa, e sua morfologia (CANEVAROLO, 2006).

Segundo Maier e Calafut (1998), síntese do polipropileno pode ser de três formas, sendo elas:

- Polipropileno isotático (Figura 2 (b)): neste polímero o grupo metila (CH<sub>3</sub>) se apresentam todos do mesmo lado e no mesmo plano da cadeia polimérica.

- Polipropileno sindiotático (Figura 2 (c)): o grupo metila neste polímero apresenta-se de forma alternada, acima e abaixo do plano da cadeia polimérica.
- Polipropileno atático (Figura 2 (a)): neste polímero não há regularidade de disposição.

Figura 2 - Estrutura isomérica do polipropileno - polipropileno atático (a), polipropileno isotático (b) e polipropileno sindiotático (c)



Fonte: Cunha, 2010

Com relação ao ponto de fusão do polipropileno, este polímero apresenta temperatura de fusão superior que a maioria das poliolefinas, essa característica está relacionada a sua rigidez estrutural, ocasionada pela rotação do grupo metil lateral. O PP isotático apresenta ponto de fusão máximo de  $176^{\circ}\text{C}$ , em contrapartida o PP sindiotático tem o limite máximo de ponto de fusão de  $135^{\circ}\text{C}$ . Para ambos os polímeros, o ponto de fusão depende do percentual de fases cristalina presente no mesmo. Em relação ao PP atático, este não apresenta ponto de fusão, pois não cristaliza, sendo assim apresenta somente temperatura de transição vítrea (ROSÁRIO *et al.*, 2011).

#### 2.1.2.1 Cristalização do Polipropileno

A solidificação organizada das cadeias pelo empacotamento, originando uma matriz atômica organizada nos polímeros é denominada cristalização. Quanto mais cristalino um material se apresentar, maior será sua propriedade de rigidez, resistência mecânica e densidade, entretanto a cristalinidade impacta negativamente outros fatores tais como: resistência ao impacto, tenacidade e ductilidade. Por sua vez o polipropileno se apresenta como um material semicristalino, com regiões cristalinas dispersas em uma matriz amorfa, sendo a região amorfa (desordem da cadeia) responsável pelo comportamento visco elástico do material (DALPIAZ, 2006).

Segundo Canevarolo (2006), a cristalinidade do polipropileno tem influência em diversos fatores, sendo estes fatores estruturais, tais como; linearidade de cadeia, taticidade, copolimerização, fatores externos (aditivos) e as condições de processamento.

O processo de cristalização dos polímeros pode ocorrer de duas maneiras, sendo elas: por difusão em temperaturas mais baixas e por nucleação em temperaturas mais elevadas (DALPIAZ, 2006).

O polipropileno pode ser apresentado em diversas formas morfológicas, esse fenômeno é denominado polimorfismo, e tem influência direta da taticidade da resina e das condições de processamento (MOORE, 1996).

#### 2.1.2.2 Processamento do Polipropileno

O polipropileno é usado em larga escala econômica, devido a facilidade de processamento deste polímero (CANEVAROLO, 2006).

Segundo Canevarolo (2006), o polipropileno pode ser conformado utilizando as principais técnicas de processamento:

- Moldagem por injeção: Esse processo é utilizado para fabricação de produtos esterilizados de uso médico, vasilhames fechados. As peças fabricadas por injeção têm grande aplicação na indústria automotiva;
- Filmes: Os filmes de polipropileno são largamente utilizados na confecção de embalagens;
- Termoformagem e extrusão: No processo de termoformagem o PP é muito utilizado na confecção de vasilhames como copos iogurte e potes de margarina. Já no

processo de extrusão a principal aplicação do PP é para confecção de tubos e copos descartáveis.

- Moldagem por sopro: Esse processo é muito utilizado para confecção de embalagens de detergente e outros produtos, que possuem boa propriedade de barreira e alta transparência.

## 2.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída pela lei 12.305/10, e possui instrumentos legais que auxiliam na tratativa de problemas ambientais, sociais e econômicos diretamente ligados ao manejo inadequado de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

A Lei 12.305/10 abrange em seu escopo princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes que desrespeitam a gestão integrada de resíduos sólidos, assim como a responsabilidades dos geradores e do poder público quanto aos instrumentos aplicáveis (BRASIL, 2010).

A PNRS tem como pilar central o consumo sustentável e a destinação adequada de resíduos sólidos. Além disto, conta com instrumentos que auxiliam a população e as empresas em geral na reciclagem e na reutilização dos resíduos gerados. Vale ressaltar que os princípios previstos nesses instrumentos não se aplicam a rejeitos radioativos, pois estes apresentam uma legislação específica para sua regulamentação (BRASIL, 2010).

Dentre as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), está a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, que deve seguir a seguinte prioridade: não geração de resíduos sólidos, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição ambientalmente correta destes resíduos. Com base na Lei 12.305/10, os resíduos sólidos podem apresentar a seguinte classificação:

### I. Com relação à origem:

Os resíduos sólidos podem ser domiciliares, de limpeza urbana; sólidos urbanos, de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, dos serviços públicos de saneamento básico, industriais, do setor da saúde; de construção civil, agrossilvopastories, de serviço de transporte e de mineração.

### II. Com relação a periculosidade:

Os resíduos são classificados quanto ao seu grau de periculosidade como resíduos perigosos e não perigosos.

Um fator de suma importância na PNRS é quanto a responsabilidade atribuída ao manejo e disposição dos resíduos sólidos, que é tratada no Art.30 da lei 12.305/10, onde relata que a responsabilidade do ciclo de vida dos produtos é compartilhada e deve ser implementada de forma individual e encadeada, ou seja, é de responsabilidade de todos os envolvidos sendo estes fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e a todo setor público de limpeza urbana. Segundo a PNRS (BRASIL, 2010) a responsabilidade compartilhada do ciclo de vida dos produtos objetiva:

- Desenvolver estratégias sustentáveis a fim de, compatibilizar agentes econômicos sociais, gestão mercadológica e empresarial a gestão ambiental;
- Reaproveitamento de resíduos sólidos, através da reinserção a sua cadeia produtiva ou como matéria prima de novos processos;
- Redução de resíduos sólidos, a partir da inclusão de práticas que minimize os desperdícios de materiais, a poluição e os impactos ambientais;
- Disseminar práticas de utilização de insumos de maior sustentabilidade e menor impacto ambiental;
- Impulsionar o mercado de produtos oriundos de materiais reciclado ou recicláveis;
- Alavancar as atividades produtivas, para que as mesmas alcancem sustentabilidade e eficiência;
- Estimular as práticas de responsabilidade ambiental.

Outro fator relevante dentro da PNRS, é quanto ao fator econômico, o poder público tem como responsabilidade a instituição de medidas e linhas de investimento que abranja alguns fatores principais como a prevenção e redução de resíduos sólidos em processos produtivos, o desenvolvimento de produtos de menores impactos, estruturação da logística reversa de resíduos, entre outros fatores (BRASIL, 2010).

A Política Nacional de resíduos sólidos apresenta algumas proibições quanto a forma de destinação ou disposição de resíduos sólidos que valem ser mencionadas, sendo assim é proibido o lançamento de resíduos nos corpos hídricos, lançamento in natura dos resíduos de mineração, queima a céu aberto exceto em tempos emergência sanitária, desde que autorizada e acompanhada pelo Sisnama, do SNVS ou do Suasa (BRASIL, 2010).

### 2.3 Pandemia da COVID-19 e seu impacto no meio ambiente

O surto pandêmico do novo Corona vírus, mudou mundialmente as relações globais entre a população e os diversos setores; tais como o de saúde pública e o econômico (SOUZA, 2020).

A rápida propagação do vírus, levou as autoridades governamentais a decretar medidas restritivas, com a suspensão de serviços considerados não essenciais a vida humana, além da imposição do isolamento social. Tais medidas tiveram consequências diretas nos diversos setores sociais, como o ambiental e o econômico (BRAUN, 2020).

Segundo a EcoDebate (2020), as novas medidas de contenção do novo Corona vírus influenciaram na melhoria da qualidade ambiental, visto que a relação econômica e ambiental é inversamente proporcional. O freio econômico resultou no meio ambiente aparentemente positivo, como pode ser observado através da redução de gases de efeito estufa (GEE), poluição do ar exterior e nível de ruído ambiental.

Em contrapartida, no Brasil teve um aumento do desmatamento da floresta Amazônica devido ao afrouxamento das fiscalizações e o enfraquecimento das políticas de proteção ambiental (OLIVEIRA E MATOS, 2020).

Segundo uma pesquisa realizada pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), publicada no *United Nations Environment Programme* (2020), outro problema recorrente ao desmatamento, é o surgimento de doenças infecciosas emergentes, que são zoonóticas e estão ligadas à saúde dos ecossistemas, já que com o desmatamento há a invasão de habitats naturais de hospedeiros e patógenos.

Embora a pandemia do Covid-19 demonstre alguns impactos positivos no meio ambiente referentes a uma atividade antropogênica prorrogada, seus efeitos negativos serão evidenciados após o surto pandêmico, principalmente pela má gestão de resíduos sólidos e o aumento do uso de materiais plásticos (SILVA *et al.* 2020).

A crescente demanda de material plástico presente no resíduo global, se dar principalmente pelo aumento do lixo hospitalar, que é constituído em sua maior parte por materiais feito de plásticos e necessitam ser incinerados sobre altas temperatura para que não comprometa as questões de saúde pública da população local. O grande problema de tal prática é a liberação de GEE, e outros compostos potencialmente perigosos, como dioxina e metais pesados (HEIDARI; GARNAIK; DUTRA, 2019).

## 2.4 Compósitos

Os materiais compósitos surgiram da necessidade de combinar as propriedades de dois ou mais materiais, a fim de se obter um produto com características singular, que se diferencie dos seus constituintes originais. A escolha dos materiais para a formação de um compósito, está baseada na combinação incomum de algumas propriedades tais como, resistência mecânica, dureza, resistência a corrosão, entre outras. Um compósito é formado por duas fases de grau macroscópico, sendo elas matriz e o reforço. A matriz tem como principal função a distribuição de carga por todo compósito, sendo responsável por estruturar o compósito. Além disto a matriz tem como finalidade a proteção do reforço contra abrasão, químicos, calor e umidade (ASKELAND & WRIGHT, 2014).

As matrizes poliméricas podem ser de dois tipos: termoplástica ou termorrígidas. A utilização de matrizes poliméricas termoplásticas na formação de compósitos apresenta vantagens, pois apresentam boa capacidade de processamento e reprocessamento em maior volume, reprodutibilidade na moldagem de peças e melhor resistência a impacto (FREIRE; MONTEIRO; CYRINO,1994).

Com relação ao reforço também chamado de fase dispersa, tem como função a melhoria das propriedades mecânicas do material, sendo o responsável por resistir aos esforços, que o material é submetido (LEVY NETO; PARDINI,2006).

### 2.4.1 Classificação dos Compósitos

Segundo Matthews e Rawlings (1994), os compósitos podem ser classificados com base em duas vertentes, que são elas: o tipo de matriz e em relação a natureza e geometria do reforço.

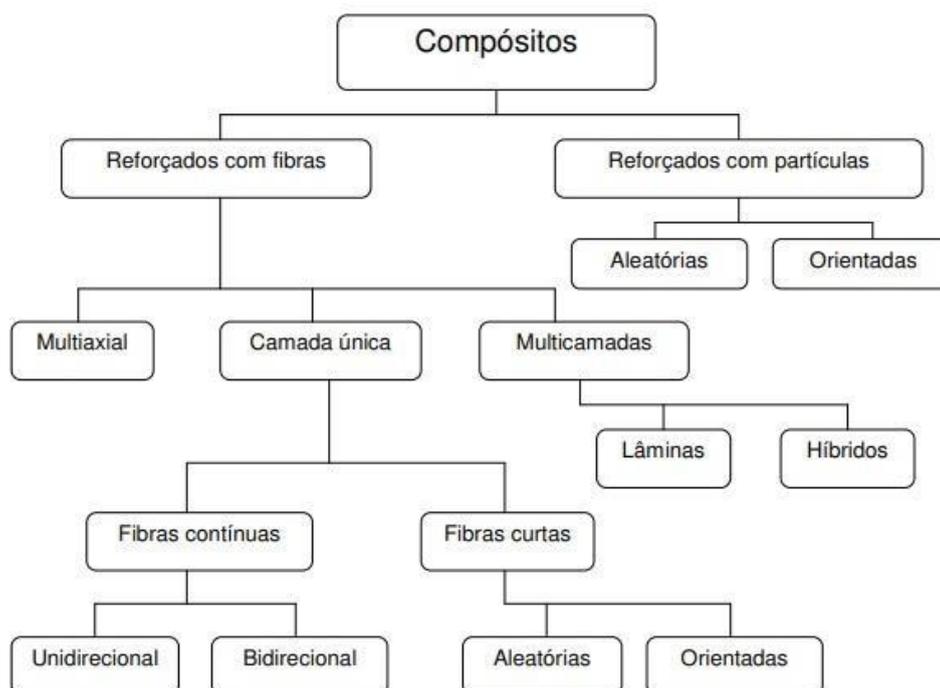
Com base na matriz os compósitos seguem as seguintes classificações:

- Compósito de Matriz metálica: Alta gama de aplicação, pois podem ser submetidos à temperatura mais elevada do que os metais-base análogos, sendo constituído pelas superligas tais como alumínio, magnésio, titânio e cobre (CALLISTER, 2002).
- Compósito de matriz cerâmica: São utilizados, quando tem a pretensão de obter um material com resistência a oxidação e a deterioração em altas temperaturas (HERAKOVICH, 1998).

- Compósito de matriz polimérica: São altamente utilizados em projetos que buscam flexibilidade de formas, redução de peso, resistência química e elevada resistência mecânica e a rigidez. (MARINUCC,2011).

A classificação quanto a geometria da fase descontínua pode ser observada na figura 3.

Figura 3 - Classificação hierárquica dos compósitos quanto a geometria



Fonte: Levy Neto; Pardini, 2006.

## 2.5 Fibras Vegetais

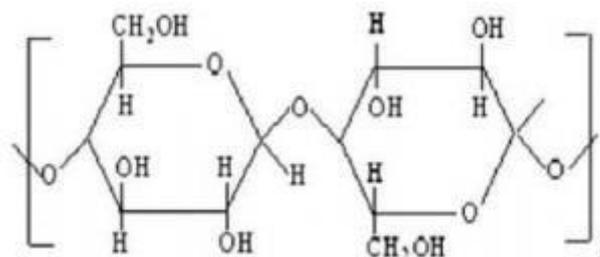
Para a ciência e engenharia de materiais, a utilização de fibras vegetais como reforço de compósitos poliméricos, objetiva o aumento da resistência a tração e o módulo de elasticidade do polímero de ser utilizado como matriz (NETO *et al*, 2015).

As fibras vegetais são compostas principalmente de:

- Celulose: É um polímero natural, composta por moléculas  $\beta$  – D-glicose, estruturada em unidades de celobiose, interligadas a partir de ligações glicosídica  $\beta$ - 1,4, que compreende

40 a 60% da biomassa vegetal. A figura 4 apresenta a estrutura da celulose (HENRIKSSON; LENHOLM, 2009).

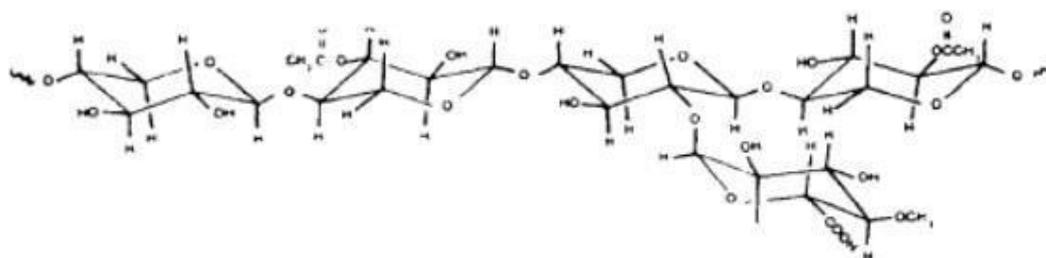
Figura 4 - Estrutura da Celulose



Fonte: Bledzki; Gassan, 1999

- Hemiceluloses: São compostos macromoleculares amorfos, formada por uma grande variedade de açúcares, nos quais as pentoses (D- xilose, L- arabinose e L- ramnose) são os constituintes principais. Além destes sua estrutura também apresenta, hexoses (D – glicose, D – manose e D – galactose) e ácidos urônicos (ácidos 4-O-metil-D-glucurônico e D-galacturônico) (SJOSTROM, 2013). A figura 5 apresenta estrutura molecular da hemicelulose.

Figura 5 - Estrutura molecular da hemicelulose



Fonte: Bledzki; Gassan, 1999

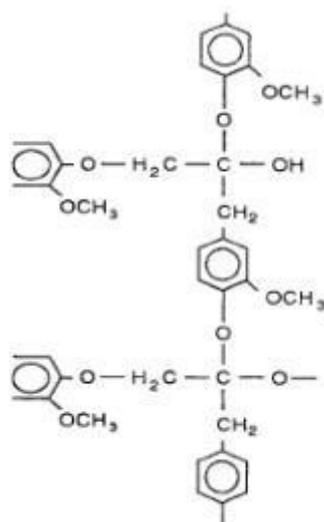
- Pectina: São compostos hidrocolóides, que formam um grupo heteromolecular de polissacarídeos estruturais. Este composto contribui para firmeza, resistência mecânica e adesão entre as células vegetais (VORAGEN *et. al.*,2009).
- Lignina: É um composto polifenólico, formada pela polimerização de três monômeros sendo estes: o álcool coniferílico, o álcool sinapílico e álcool p-cumarílico,

que quando polimerizados confere a este vegetal boa resistência química, mecânica, além de proteção contra fungos e bactérias (HENRIKSSON; LENHOLM, 2009).

As fibras vegetais ricas em lignina são muito utilizadas para confecção de compósitos de matriz polimérica devido à alta compatibilização do vegetal com esse tipo de matriz, conferindo ao material melhores propriedades mecânicas e estruturais (MILÉO, 2015).

A figura 6 a seguir apresenta a estrutura molecular da lignina.

Figura 6 - Estrutura molecular da lignina



Fonte: Bledzki; Gassan, 1999

Com relação às características principais dessas fibras pode-se elencar: baixo consumo de energia de processamento, baixa massa específica, biodegradabilidade, baixo custo, abrasividade reduzida e baixo nível de toxicidade (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Um dos fatores limitantes da utilização de fibras vegetais para reforço de matriz polimérica, é a temperatura que os vegetais suportam sem degradação termo-oxidativa sem comprometer as características mecânicas do compósito a ser desenvolvido. Essas fibras podem suportar a uma temperatura de até 200°C sem perdas significativas de suas propriedades mecânicas (FAHIM e ELHAGGAR, 2012).

Apesar das limitações de processamento, os compósitos fibras naturais possuem grande destaque em vista dos compósitos convencionais, como por exemplo a fibra de vidro, pois são mais baratos, menos abrasivos aos equipamentos e de menor susceptibilidade a quebra durante

seu processamento (BLEDZKI; GASSAN,1999). A Tabela 1 mostra um comparativo entre as propriedades das fibras naturais com as fibras sintéticas mais usadas.

Tabela 1 - Comparativo entre as propriedades das fibras naturais e sintéticas mais utilizadas como reforço.

Fonte: Levy Neto; Pardini, 2006.

Segundo Neto (2015), as propriedades mecânicas das fibras vegetais estão diretamente relacionadas com seus parâmetros estruturais, esta relação pode ser observada quando se reduz a seção transversal de uma fibra vegetal, geralmente esta ação ocasionará o aumento do módulo de elasticidade e a resistência a tração deste material. Estas propriedades também sofrem inferência de outros fatores, como por exemplo o teor de celulose.

Brahmakumar *et. al.* (2005), relata que as fibras ricas em celulose apresentam maior resistência a tração, já a fibras ricas em lignina possuem maior durabilidade. Além disto, a lignina confere a fibra vegetal alta capacidade a deformação. A Tabela 2 apresenta a composição das principais fibras vegetais.

Tabela 2 - Composição das fibras vegetais: coco, sisal, juta e rami

Componentes	Coco	Sisal	Juta	Rami
Celulose	23 – 43,4 %	65,8 %	64,4 %	68,6 %
Hemicelulose	12 – 14,7 %	12,0 %	12,0 %	13,1 %
Lignina	35 – 45 %	9,9 %	11,8 %	0,6 %
Umidade	10,5 %	10,0 %	10,0 %	10,0 %

Fonte: Adaptado de Bledzki; Gassan, 1999.

Apesar da grande empregabilidade de fibras vegetais como reforço de matriz polimérica, a diferença de polaridade entre esses materiais e o caráter hidrofílico das fibras, geram problemas no processamento. Além disto, essas fibras tendem a formar ligações com hidrogênio entre si, o que faz que está se aglomere de forma irregular sobre a matriz polimérica (XIE *et.al.*, 2010).

Outro fator importante a ser mencionado, relacionado a natureza hidrofílica das fibras, é que o compósito formado tende absorver umidade e propagar fungos pelo material quando exposta ao ar livre, o que compromete a adesão entre a fibra e a matriz e a estabilidade dimensional do compósito (SINGH *et.al.*,1996). Uma solução viável na resolução deste problema é o tratamento da fibra, para reduzir sua absorção de umidade, o molhamento da fibra vegetal pela matriz polimérica e aumentar a adesão entre as fases (XIE *et.al.*,2010).

Os tratamentos químicos em fibras vegetais, tem como objetivo reduzir a natureza hidrofílica da fibra através da quebra da hidroxila e da carboxila presente na superfície da fibra, gerando um ganho em propriedades mecânicas. A Tabela 3 ilustra os ganhos relacionadas a diversos tratamentos feitos em fibra sisal.

Tabela 3 - Compósitos reforçados com fibra de sisal tratada

Autor	Compósito	Técnica de modificação	Principais Resultados
Faruk <i>et. al</i> (2012)	Sisal/Epóxi	Merceirização	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Aumento da rigidez;</li> <li>· Menor porosidade;</li> <li>· Maior densidade;</li> <li>· Melhor adesão</li> </ul>
	Sisal/Epóxi	Silano	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Aumento da resistência mecânica;</li> <li>· Aumento da resistência a humidade</li> </ul>
Naveen, J. <i>et. al.</i> (2019)	Sisal/ Polietileno	Tratamento alcalino	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Resistência ao cisalhamento interfacial</li> </ul>
	Sisal/ Poliestireno	Benzoilação	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Resistência a Tração</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Faruk *et al*; Navee J. *et al*

A partir da Tabela 3, pode-se concluir que as técnicas de modificação química atuam, não somente na melhoria das propriedades químicas das fibras submetidas a esse tratamento, mas também melhora suas propriedades mecânica, como pode ser observado por exemplo no

Sisal/Epóxi modificado por merceirização, onde houve um aumento da rigidez, densidade, menor porosidade e melhor adesão interfacial.

### 2.5.1 Fibra de Sisal

O sisal é uma planta originária do México, tendo sua nomenclatura oriunda de uma erva nativa chamada Zizal-xiu. As fibras de sisal são extraídas das folhas de *Agave sisalana Perrine*, estas folhas apresentam de 8 a 10 cm de largura e de 150 a 200 cm de comprimento. A partir das folhas se obtém de 3 a 5% do seu peso em fibra, já o restante do seu peso é denominado resíduo de beneficiamento, que é amplamente utilizado como adubo orgânico, além de apresentar outras aplicações na indústria farmacêutica (MARTIN *et.al.*, 2009). A figura 7 ilustra a *Agave Sisalana* (Sisal).

Figura 7 - *Agave Sisalana* (Sisal)



Fonte: Silva, 2008

Com relação a estrutura das fibras de sisal, estas são constituídas de fibras elementares ou fibrilas de 1,5 a 4 mm de comprimento, diâmetro de 10 a 30 $\mu$ m e parede celular variando de 6 a 9  $\mu$ m. A parede celular destas fibras, apresentem diversas camadas que se diferem com base na sua estrutura e composição química (MARTIN; MATTOSO; SILVA, 2009).

As fibras de sisal trata-se de um material lignocelulósico, onde suas propriedades mecânicas são dependentes do seu índice de cristalinidade (MOHARIR e KIEKENS, 1998). A Tabela 4 apresenta a relação entre a composição química e o índice de cristalinidade ( $I_c$ ) ao longo da fibra de sisal.

Tabela 4 - Composição química média e índice de cristalinidade (Ic) ao longo do comprimento da fibra de sisal da variedade *Agave sisalana*.

Comprimento da fibra	Lignina (%)	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Ic
0-30 cm (parte basal)	11,4 ± 0,6	10,3 ± 0,3	77,3 ± 0,1	0,81
30-60 cm	10,7 ± 0,8	9,9 ± 0,5	79,6 ± 0,2	0,84
60-90 cm	8,1 ± 0,8	8,0 ± 0,2	83,0 ± 0,9	0,85
90-120 cm (parte apical)	7,4 ± 0,4	6,9 ± 0,3	84,4 ± 0,8	0,91

Fonte: Adaptado de Martin; Mattoso; Silva, 2009.

A partir da Tabela 4 pode-se observar que Ic aumenta ao longo da fibra da parte basal para apical, conforme há o aumento de celulose e a diminuição de hemicelulose e lignina (MARTIN; MATTOSO; SILVA, 2009).

Segundo Rowell *et. al.* (1997), grande parte da celulose presente nas plantas são altamente cristalina, totalizando assim 80% de regiões cristalinas.

A partir desta análise, observa-se que o índice de cristalinidade (Ic) está relacionado com o aumento da quantidade de celulose presente ao longo da fibra como foi observado na Tabela 9 (MARTIN; MATTOSO; SILVA, 2009).

Rowell *et. al.* (1997), descrevem em seus estudos que as propriedades das fibras lignocelulósicas são diretamente influenciadas por sua composição química, onde pode-se relacionar a resistência a tração dessas fibras ao conteúdo de lignina e hemicelulose presente nas mesmas.

Bisanda e Ansell (1991), relaciona a rigidez das fibras de sisal, a quantidade de celulose que essas fibras apresentam e também ao ângulo espiral que as microfibrilas da parede celular secundária interna fazem com eixo da fibra.

### 2.5.2 Cadeia produtiva do sisal

O sisal se apresenta em abundância nas regiões semiáridas do nordeste brasileiro. Sua cadeia produtiva é responsável por gerar mais de meio milhão de empregos, que englobam as atividades: manutenção de lavouras, colheita, desfibramento e beneficiamento da fibra, finda seu processo produtivo na industrialização e confecção de artesanato (SILVA, 2010).

Segundo Silva 2010, apesar do grande número de trabalhadores envolvidos processo produtivo e industrial do sisal, esta fibra apresenta preço atrativo no mercado internacional

frente as fibras sintéticas, devido apresentar baixo custo de produção, aproveitamento de subprodutos do desfibramento e maior eficiência no processo de descorticação.

Em relação ao cultivo da espécie no nordeste brasileiro, a época mais propícia para seu plantio é entre dezembro e fevereiro, para que seu enraizamento ocorra mais rápido. A colheita do sisal é feita, aproximadamente 36 meses após o plantio. Após a colheita, a folha da *Agave* é submetida ao processo de desfibramento, onde se elimina a polpa que envolve a folha, através de raspagem mecânica. Em seguida a fibra obtida é lavada, por imersão durante 08 a 12 horas. Após a lavagem são expostas ao sol de 8 a 10 horas para sua secagem. Por fim as fibras são batidas em máquinas bateadeiras para remoção de pó, e posteriormente encaminhadas para indústria (SILVA, 1994).

#### 2.5.2.1 Propriedades Mecânicas da Fibra de Sisal

Segundo Moharir e Kiekens (1998), as propriedades mecânicas da fibra de sisal é diretamente influenciada pelo seu índice de cristalinidade ao longo do comprimento da fibra, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas ao longo do comprimento da fibra de sisal da variedade *Agave sisalana*.

Fonte: Adaptado de Martin; Mattoso; Silva, 2009.

Em relação as propriedades de resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento, pode-se observar na Tabela 5 que a resistência a tração e o módulo de elasticidade são mais baixa nas partes basal e apical da espécie *Agave*, enquanto a deformação é alta. Outra observação que pode ser feita é quanto à parte intermediária da fibra, onde se encontra maior resistência e rigidez (MATIN; MATTOSO; SILVA, 2009).

Através dos resultados obtidos das propriedades mecânicas ao longo do comprimento da fibra de sisal, estes demonstram que estas propriedades são satisfatórias para o reforço de

compósitos poliméricos, além de outras aplicações industriais (MATIN; MATTOSO; SILVA, 2009).

### **2.5.2.2 Utilização da fibra de sisal na indústria automobilística**

Segundo Silva 2010, a indústria automobilista apresenta largo interesse na utilização de fibras vegetais, devido suas vantagens na substituição de fibras sintéticas como a fibra de vidro, que é amplamente explorada industrialmente na formulação de resinas plásticas e borrachas.

Diversos fornecedores de componentes plásticos para montagem de automóveis, já utilizam fibra de sisal na sua formulação, como as empresas Ford, Chrysler e DLR.

Segundo Silva, 2010 as novas aplicações abrangem:

- Forro do teto;
- Coluna lateral;
- Painel central;
- Painel frontal;
- Para-choque;
- Calotas;
- Bancos e assentos.

A ampla utilização das fibras vegetais na indústria automobilística se destaca principalmente pelo custo da disposição final dos produtos que utilizam fibras sintéticas. A utilização de fibras vegetais além de reduzir os impactos ambientais do descarte de produtos acabados, possibilita o reaproveitamento e a reciclagem de resíduos (SILVA, 2010).

Após o fim da vida útil de peças de acabamento interno de veículos, compostas por polipropileno, fibra de vidro e  $\text{CaCO}_2$ , passam por um processo de reciclagem, porém a matéria prima obtida no fim deste processo, perde suas especificações técnicas, não sendo possível seu aproveitamento. Em contrapartida, peças compostas de polipropileno e fibra de sisal não necessitam de descarte, sendo 100% recicláveis e reutilizáveis na produção de peças plástica similar, com as mesmas característica que o produto primário (SILVA, 2010).

## **2.6 Viabilidade econômica**

Segundo Peinado e Graeml (2007), a análise econômica de um determinado produto tem como objetivo, apresentar uma visão geral dos custos que afetam diretamente a produção de um determinado produto. A partir da análise econômica de um produto é possível realizar a avaliação e planejamento dos custos de produção, auxiliando os gestores na tomada de decisão.

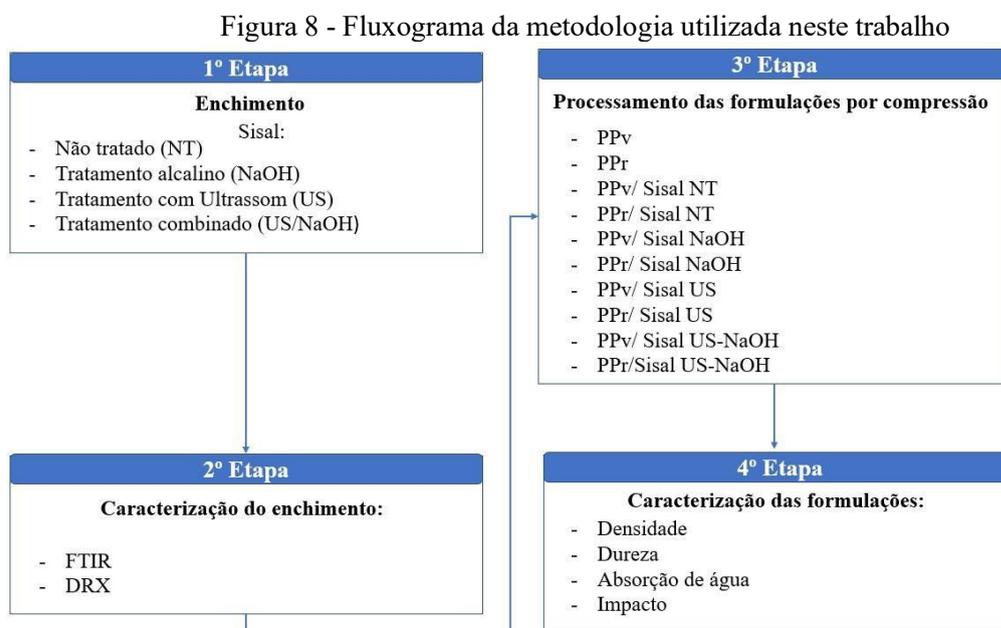
Em vista disto, quando se aborda a análise econômica de produção de bens, busca identificar:

- Custos fixos: são os gastos, independentes da quantidade de produtos (bem e serviço) que se mantem constante. Esses custos incluem alugueis, depreciação, seguros, salários entre outras variáveis.
- Custos variáveis: são custos que variam de acordo com a quantidade produzida. A matéria-prima é um exemplo de custo variável dentro do ambiente produtivo.
- Análise CLV (Custo x Lucro x Volume): A análise custo lucro volume, estuda o relacionamento entre os custos incorridos, volume de produção ou nível de atividade e receitas auferidas em um determinado período, a fim de medir sua influência sobre o lucro.
- Ponto de equilíbrio: É a representação da quantidade de produtos produzidos e vendidos ou nível de atividade organizacional onde os gastos (custos e despesas) se igualam a receita, estabelecendo assim uma relação de equilíbrio, ou seja, não tendo lucro nem prejuízo.
- Margem de contribuição: É a referência do quanto cada unidade vendida contribui para cobri os custos e as despesas fixas da organização.
- Alavancagem operacional: É uma análise que avalia os efeitos da mudança de custos fixos e variáveis, para auxilia na tomada de decisão.

## CAPÍTULO III

### 3 METODOLOGIA

Este tópico apresenta os materiais e equipamentos utilizados na formulação dos compósitos, assim como os procedimentos utilizados para caracterização e realização dos ensaios para análise das propriedades, físicas, químicas e mecânicas dos compósitos de fibra de sisal (com ou sem tratamento) e polipropileno (virgem e reciclado) proposto no estudo deste trabalho. O fluxograma da figura 8, apresenta de maneira esquematizada as etapas realizadas ao longo desse estudo.



Fonte: Autora, 2022

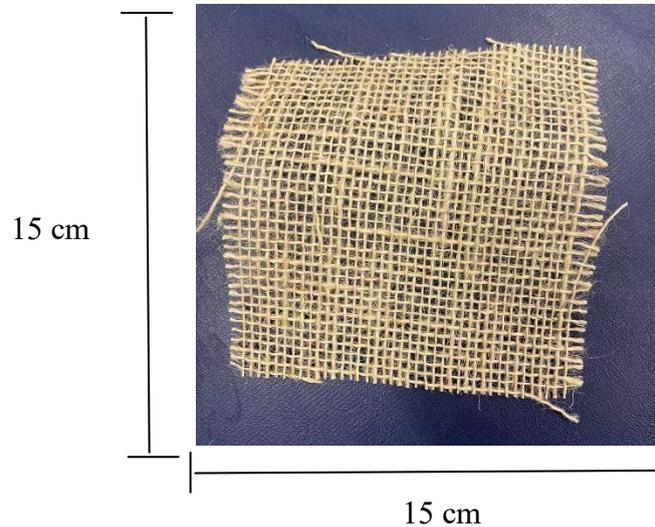
### 3.1 Materiais e Equipamentos

#### 3.1.1 Fibra de sisal

A fibra de sisal foi adquirida na forma de tecido de sisal, comprado em mercado secular, obtido a partir de resíduos de sisal. Utilizou-se recortes de 15 cm x 15 cm da tela para processar o material. A figura 9 ilustra a tela de sisal utilizada na confecção dos compósitos. Os tecidos

foram submetidos a modificações químicas, objetivando a melhor aderência entre a matriz (polipropileno) e a carga (sisal).

Figura 9 - Tela de Sisal



Fonte: Autora, 2022

### 3.1.2 Modificação química

Parte dos recortes de sisal de 15 cm x 15 cm passaram por um tratamento alcalino, realizado aplicando-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10% m/v, à temperatura ambiente, no Laboratório didático e pesquisa de processamento de materiais, UERJ-ZO. Os tecidos de sisal permaneceram imersos na solução de NaOH por 1 hora. Posteriormente os tecidos foram lavados com água destilada até pH neutro e colocados em estufa a 80° C até a secagem. A figura 11 (a e b) apresenta o tratamento realizado.

Figura 10 - (a)Tela de sisal tratada com NaOH (b) Estufa de esterilização e secagem Marconi MA 033/5



(a)

(b)

Fonte: Autora, 2022

### 3.1.3 Tratamento com ultrasson

O tratamento com ultrasson (US) foi realizado em um aparelho Modelo: USC-1400<sup>a</sup> com frequência de 40 kHz. O tratamento foi realizado submetendo o tecido de sisal (15 cm x 15 cm) por 30 minutos ao banho de ultrasson em água destilada, e posteriormente secos em estufa a 80° C até a secagem. A Figura 12 (a e b) ilustra os equipamentos utilizados.

Figura 11 - (a) Tela de sisal imersa em banho de ultrassom e (b) Estufa esterilização de secagem Marconi MA 033/5



(a)

(b)

Fonte: Autora, 2022

### 3.1.4 Tratamento combinado (US + NaOH)

Os tecidos de sisal (15 cm x 15 cm) foram submetidos a tratamento combinado, primeiro com ultrassom e, em seguida com NaOH (US+NaOH) como ilustra a Figura 13 (a e b), sendo tratados por ultrassom por 30 minutos e em seguidas submersos por 1 hora em solução a 10% m/v de hidróxido de sódio (NaOH), e posteriormente colocados em estufa a 80° C até a secagem

Figura 12 - (a) Tela de sisal tratada com US (b) Tratamento alcalino da tela de sisal.



(a)

(b)

Fonte: Autora, 2022

### 3.2 Processamento dos Compósitos

O PP virgem (PP) utilizado neste trabalho foi adquirido da Braskem S/A (densidade: 0,905 g.cm<sup>-3</sup> e índice de fluidez: 3,5 g/10 min a 230°C/2,16 Kg) e o polipropileno reciclado (PPr) foi doado pela Polialbino Termplásticos (SP, Brasil).

Foi realizada a pesagem do polipropileno na proporção de 15 g virgem (figura 14) e 15 g de PP reciclado (figura 15).

Figura 13 - Polipropileno Virgem



Fonte: Autora, 2022

Figura 14 - Polipropileno Reciclado



Fonte: Autora, 2022

Posteriormente o polímero foi prensado com auxílio de uma prensa a quente MARCONI MA 098/C (figura 16) a 6 toneladas por 5 minutos a 190°C e posteriormente a 6 toneladas por 3 minutos na prensa a frio MARCONI MA 098/A (figura 17). Todo processamento foi realizado no laboratório didático de pesquisa de processamento de materiais, UERJ-ZO

Figura 15 - Prensa à quente MARCONI MA 098/C



Fonte: Autora, 2022

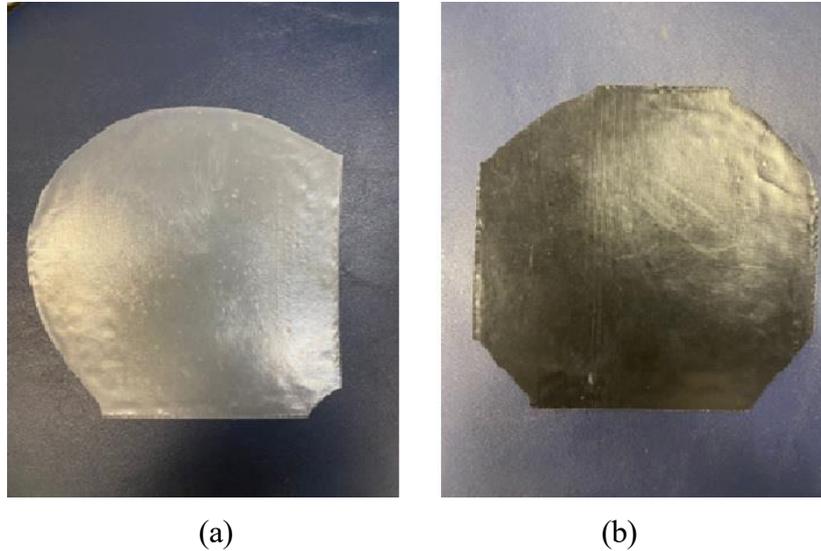
Figura 16 - Prensa à frio MARCONI MA 098/A



Fonte: Autora, 2022

No fim do processo de prensagem, foram obtidos filmes planos de polipropileno virgem e reciclado, como mostra a figura 18 (a) e (b) abaixo.

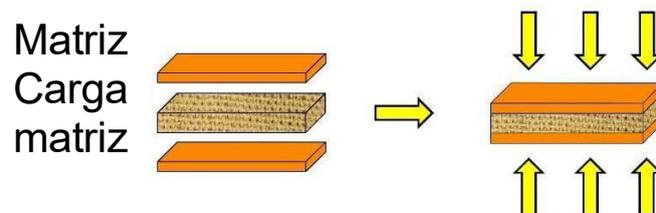
Figura 17 - (a) Polipropileno virgem prensado (b) Polipropileno reciclado prensado



Fonte: Autora, 2022

Os compósitos foram preparados por moldagem por compressão, em uma estrutura tipo sanduíche de três camadas (PP-Sisal *in natura*-PP; PP-Sisal NaOH-PP; PP-Sisal US-PP; PP-Sisal-US-NaOH-PP) (Figura 19). O sanduíche foi montado entre duas placas de aço de 1,36 mm de espessura e, em seguida, prensados a quente a 190 °C e 6 ton. por 5 min. Após a prensagem a quente, o sanduíche foi prensado à frio até a temperatura ambiente por 4 min e 6 ton. O PPv, PPr e os sanduíches com PP foram preparados com as mesmas condições de processo, formando um compósito PP/Sisal (85/15%)

Figura 18 - Esquema de montagem dos compósitos tipo sanduíche.



Fonte: Autora, 2022

### 3.3 Caracterização dos materiais

#### 3.3.1 Ensaio de densidade

As análises de densidade foram realizadas com base nos métodos de teste padrão de densidade e gravidade específica de plástico por deslocamento, pautados na norma ASTM D792:2013. O método utilizado foi o teste A, aplicado a plásticos sólidos em água.

A caracterização dos materiais foi realizada com auxílio de um densímetro modelo DSL 910 – GEHAKA.

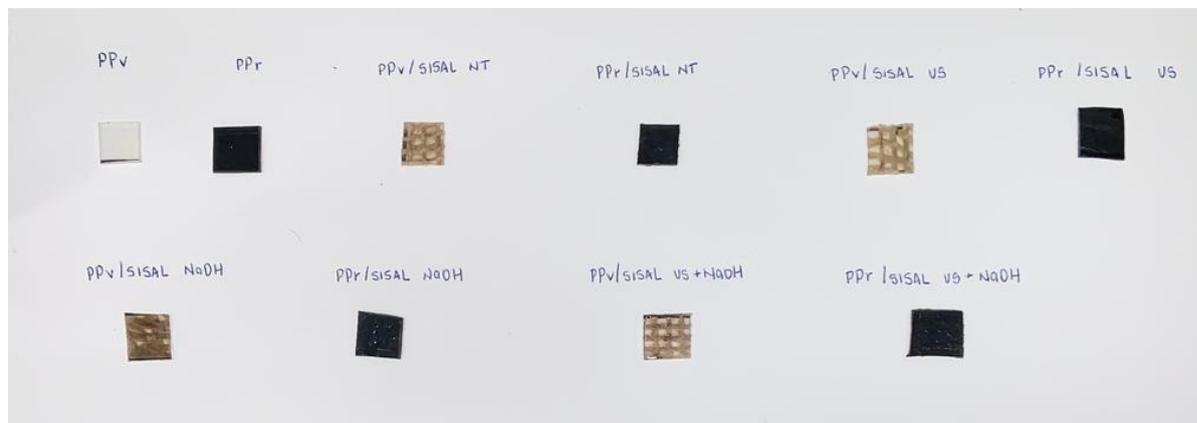
Foram preparados corpos de prova de dimensão  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ , para ser ensaiado. O sistema do densímetro foi montado como mostra a Figura 19 a seguir, onde um recipiente de vidro é completado com água destilada até a marcação da vidraria. Após o sistema montado, é realizado um teste para escolha do cesto que será utilizado nas medições, a escolha é feita com base no comportamento da amostra submersa em água, ou seja, se a amostra afundar, isso significa que a mesma possui densidade maior que a água ( $1 \text{ g/cm}^3$ ), caso a amostra flutue, esta possui densidade menor que água. Foram utilizados 5 corpos de prova de cada formulação de polímero e fibra com e sem tratamento, eliminando-se o valor mais alto e mais baixo, sendo calculada a média aritmética dos valores obtidos. A figura 19 a seguir ilustra os corpos de prova ensaiados.

Figura 19 - Densímetro -DSL 910 – GEHAKA.



Fonte: Autora, 2022

Figura 20 - Amostras de 1:1 utilizadas para ensaio de densidade



Fonte: Autora, 2022

### 3.3.2 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados a partir da norma ASTM D2240:2010. Diversas escalas podem ser utilizadas na análise de materiais com propriedades diferentes, porém as mais comuns são A e D, onde a A é utilizada em plásticos macios e a D em plásticos rígidos. Para análise de dureza do material em estudo, foi utilizado o método SHORE D, conforme ilustrado na figura 22.

Figura 21 - Durômetro Shore D Bareiss BS61 II

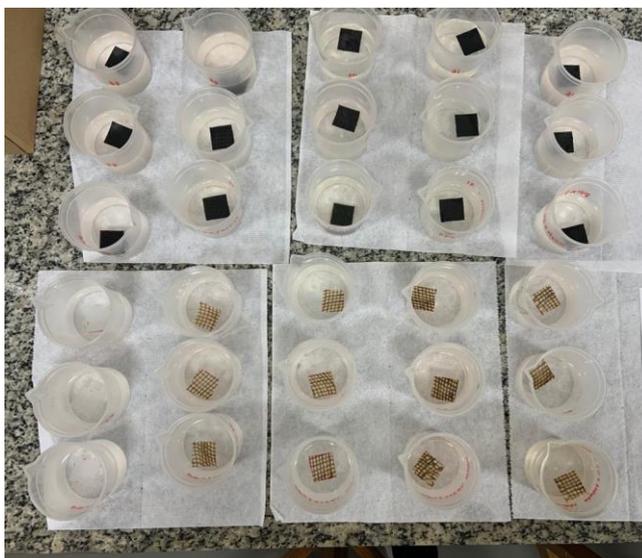


Fonte: Autora, 2022

### 3.3.3 Ensaio de Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ASTM D-570 (2018). O ensaio foi realizado em corpos-de-prova com dimensões 2 x 2 cm<sup>2</sup>. Após 2h e 4h, 7 e 14 dias, e após 21 dias os corpos de prova foram removidos da água, secos superficialmente em pano limpo e, em seguida pesados imediatamente em uma balança analítica da marca Marte, Modelo AY220, com precisão de 0,001g (Figura 23), a fim de se verificar se houve aumento de massa e espessura.

Figura 22 - Amostras de (1) PPr ; (2) PPr/Sisal NT ; (3) PPr/Sisal US ; (4) PPr/Sisal NaOH ; (5) PPr/Sisal US+NaOH ; (6) PPv ; (7) PPv/Sisal NT ; (8) PPv/Sisal US ; (9) PPv/Sisal NaOH ; (10) PPv/Sisal US+NaOH imersas em água destilada.



Fonte: Autora, 2022

Figura 23 - Balança analítica da marca Marte, Modelo AY220



Fonte: Autora, 2022

O percentual de aumento de massa (absorção de água), foi calculado a partir da Equação (1):

$$\text{Aumento de massa (\%)} = \frac{(M_{\text{úmido}} - M_{\text{seco}})}{M_{\text{seco}}} \times 100$$

Onde:

$M_{\text{seco}}$  = massa da amostra seca (g)

$M_{\text{úmido}}$  = massa da amostra úmida (g)

### 3.3.4 Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier é um método baseado na caracterização química, que busca analisar qualitativamente e determinar a quantidade de traços de elementos. Esta análise é possível, pois os átomos que formam as moléculas possuem frequências específicas de vibração, que podem variar de acordo com a composição, estrutura e o modo de vibração da amostra (LEÃO, 2013). Para caracterizar mudanças na estrutura química das amostras, foram realizadas análises de FTIR (FTIR -modelo Nicolet 6700 da Thermo Scientific –Figura 18) no modo ATR, utilizando cristal de ZnSe, na faixa de número de ondas de 4000-650  $\text{cm}^{-1}$ , com 120 varreduras e resolução de 4.182  $\text{cm}^{-1}$ .

### 3.3.5 Difração de Raio-X (DRX)

O objetivo do ensaio de difração de raio X é identificar a presença de compostos cristalinos, sejam eles orgânicos ou inorgânicos. As substâncias cristalinas, apresentam os planos de difração e suas respectivas distâncias interplanares, assim como as densidades de átomos ao longo do plano cristalino, como característica única e específica. Da mesma forma que o padrão difratométrico gerado por elas. Com base nisto, usando um banco de dados contendo informações cristalográficas básicas, e algumas propriedades de compostos cristalinos, é possível identificá-los facilmente (GERARDO, 2020).

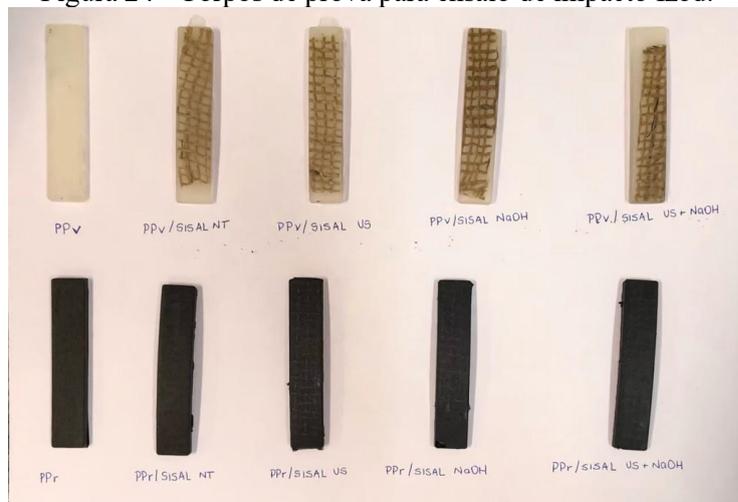
A análise de difração de raios-X (DRX) do Sisal e Sisal NaOH foi realizada em um Difratômetro Shimadzu XRD-6000 (Tóquio, Japão) com radiação  $\text{CuK}\alpha$ , potência de 1200 watts ( $40 \text{ kV} \times 30 \text{ mA}$ ), com uma varredura de  $2\theta$  de  $5^\circ$  a  $40^\circ$ . O índice de cristalinidade (CI) foi calculado com base na metodologia apresentada por Segal *et al.* (1959), em que é utilizada a intensidade da fase amorfa da fibra e a intensidade da fase cristalina, referente ao plano 002. A equação para o cálculo do índice de cristalinidade é apresentada a seguir:

$$IC = \frac{I_{002} - I_{amorfo}}{I_{002}} \quad \text{Equação 1}$$

### 3.3.6 Ensaio de Impacto Izod

O ensaio de impacto Izod objetiva a determinação da quantidade de energia que o material ensaiado tem a capacidade de absorver, aferindo assim a transição de ductibilidade/fragilidade do material em questão. Os ensaios de resistência ao impacto Izod foram realizados conforme a norma ASTM D-256, em um equipamento analógico, operando com pêndulo de 2,7 J de energia nominal. Para cada formulação, foram confeccionados 5 corpos de prova para ensaios de resistência ao impacto izod (conforme a norma ASTM D 256 e ISO 179 A). Os resultados foram obtidos a partir de uma média dos 5 corpos de prova para cada formulação, na temperatura de  $23 \pm 0,3^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $70 \pm 0,5\%$ . Com auxílio de um molde metálico nas dimensões especificadas pela norma, os corpos de prova foram moldados por compressão em prensa hidráulica (Marconi) à temperatura de  $190^\circ\text{C}$ , a 6 ton por 5 min, e em seguida, submetidos à prensagem a frio por 3 min e 6 ton. A Figura 24 mostra os corpos de prova para o ensaio Izod.

Figura 24 - Corpos de prova para ensaio de impacto Izod.



Fonte: Autora, 2022

### 3.3.7 Análise estatística

As amostras PP; PP/Sisal e PP/Sisal NaOH, foram selecionadas para realização de uma análise estatística. Este estudo utilizou regressão linear múltipla para obter modelos matemáticos que relacionam as propriedades mecânicas dos compósitos de PP virgem e sisal.

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para avaliar os modelos, e a superfície de resposta, através da metodologia (RSM), que foi aplicada para otimização. do número de camadas de sisal (SS) e a concentração de solução alcalina para tratamento do compósito (AT) foram usados como variáveis, também chamadas de fatores. Os níveis mínimo e máximo de SS e AT foram considerado 0–1 e 0–15% p/v, respectivamente. Também usamos uma variável fictícia para o PP matriz, de  $M = 1$  para PP virgem e  $M = 2$  para PP reciclado.

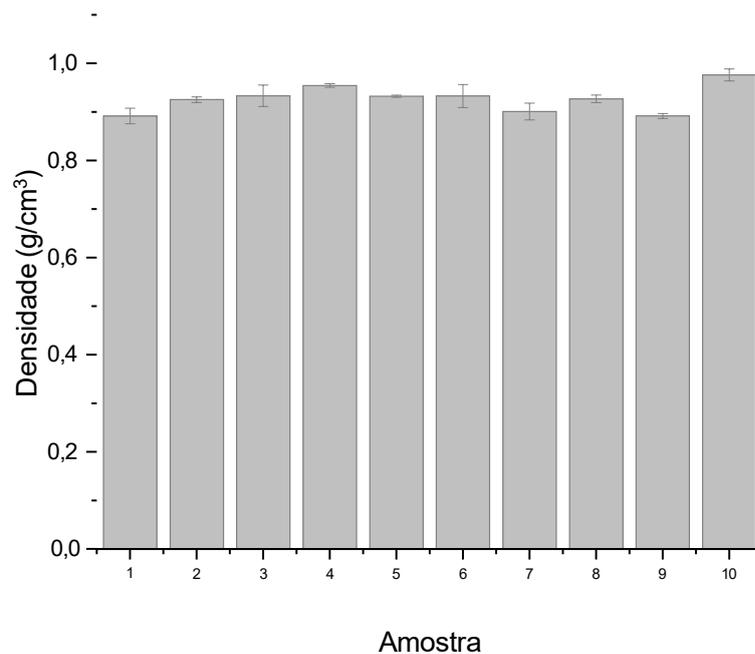
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ensaio de Densidade

A Figura 26 e a Tabela 6 mostram os resultados dos ensaios de densidade para as formulações processadas. A densidade dos materiais variou de 0,892-0,933 g/cm<sup>3</sup> mostrando a possibilidade de uso destes compósitos em partes leves automotivas.

Pode-se inferir que a densidade dos materiais não varia de forma significativa após a adição da carga, ou com o tipo de tratamento realizado, apresentando valores próximos aos do PPv. A amostra PPr/Sisal US+NaOH, com maior densidade, apresenta um aumento de densidade de 9% em relação ao PPv. Este resultado mostra uma boa interação fibra matriz. Resultados semelhantes foram encontrados nos trabalhos de Bastos *et al.* (2018) e Lima *et al.* (2021), ambos utilizando polipropileno como matriz.

Figura 25 - Análise de densidade das amostras: 1. PPv ; 2. PPr ; 3. PPv/Sisal NT ; 4. PPr/Sisal NT; 5. PPv/Sisal US; 6. PPr/Sisal US; 7. PPv/Sisal NaOH; 8. PPr/Sisal NaOH; 9. PPv/Sisal US+NaOH; 10. PPr/Sisal US+NaOH.



Fonte: Autora, 2022

Tabela 6 - Resultados do ensaio de densidade ( $\text{g/cm}^3$ ) das amostras: PPv; PPr; PPv/Sisal NT; PPr/Sisal NT; PPv/Sisal US; PPr/Sisal US; PPv/Sisal NaOH; PPr/Sisal NaOH; PPv/Sisal US+NaOH; PPr/Sisal US+NaOH.

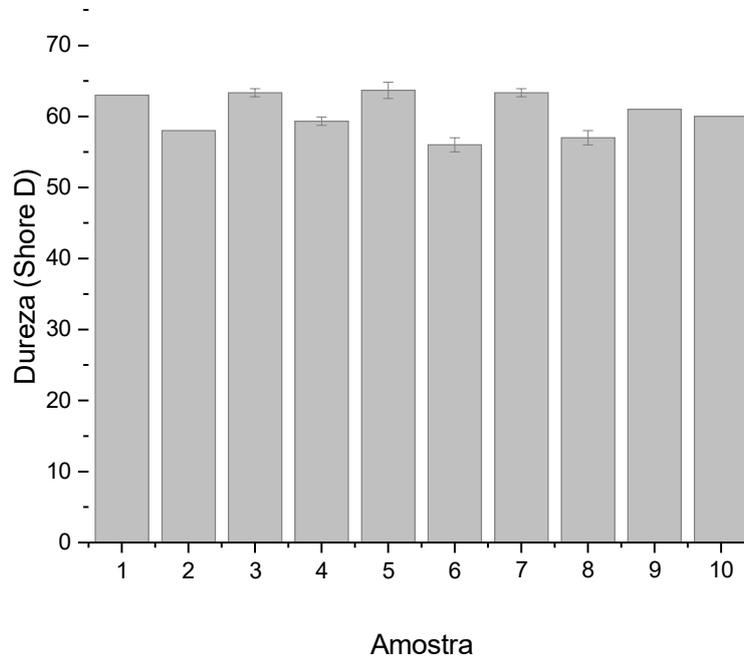
Amostra	Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )
PPv	0,892±0,016
PPr	0,925±0,006
PPv/Sisal NT	0,933±0,022
PPr/Sisal NT	0,954±0,003
PPv/Sisal US	0,932±0,002
PPr/Sisal US	0,933±0,024
PPv/Sisal NaOH	0,901±0,017
PPr/Sisal NaOH	0,927±0,008
PPv/Sisal US+NaOH	0,892±0,005
PPr/Sisal US+NaOH	0,976±0,012

Fonte: Autora, 2022

## 4.2 Ensaio de Dureza

A Figura 27 e a Tabela 7 mostram os resultados do ensaio de dureza. O PPr e os compósitos com matriz de PPr apresentam menor dureza que seus equivalentes com matriz virgem de PP. Isso se deve ao fato do PP reciclado conter em sua formulação alguns aditivos para melhorar o seu processamento, como descrito por Martins *et al.* (2019), que podem atuar como plastificantes, reduzindo a resistência do material final. O tipo de tratamento não influenciou esta propriedade.

Figura 26 - Análise de Dureza das amostras: 1. PPv ; 2. PPr ; 3. PPv/Sisal NT ; 4. PPr/Sisal NT; 5. PPv/Sisal US ; 6. PPr/Sisal US ; 7. PPv/Sisal NaOH ; 8. PPr/Sisal NaOH ; 9. PPv/Sisal US+NaOH ; 10. PPr/Sisal US+NaOH.



Fonte: Autora, 2022

Tabela 7 - Resultados do ensaio de dureza (Shore D) das amostras: PPv; PPr; PPv/Sisal NT; PPr/Sisal NT; PPv/Sisal US; PPr/Sisal US; PPv/Sisal NaOH; PPr/Sisal NaOH; PPv/Sisal US+NaOH; PPr/Sisal US+NaOH

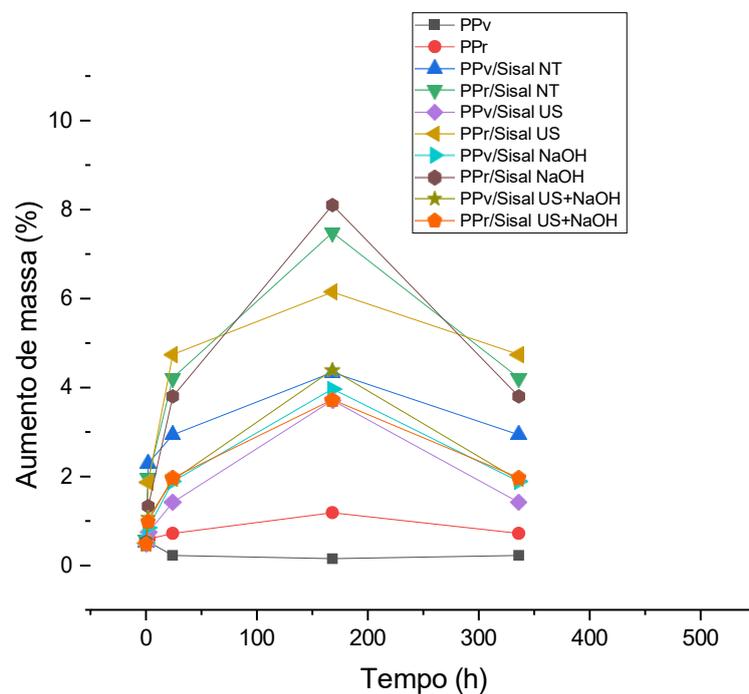
Amostras	Dureza (Shore-D)
PPv	63,00±0,00
PPr	58,00±0,00
PPv/Sisal NT	63,33±0,58
PPr/Sisal NT	59,33±0,58
PPv/Sisal US	63,67±0,58
PPr/Sisal US	56,00±1,00
PPv/Sisal NaOH	63,33±1,00
PPr/Sisal NaOH	57,00±1,00
PPv/Sisal US+NaOH	61,00±0,00
PPr/Sisal US+NaOH	60,00±0,00

Fonte: Autora, 2022

### 4.3 Ensaio de absorção de água

A Figura 28 mostra os resultados do ensaio de absorção de água das formulações processadas. Percebe-se uma tendência de aumento de massa até a terceira semana de ensaio e após esse tempo ocorre a estabilização ou queda nos valores indicando a saturação do sistema. A maior absorção de água se deu no compósito PPr/Sisal NaOH, seguida pelo compósito PPr/Sisal NT e PPr/Sisal US. A absorção de água está relacionada à interação fibra matriz. Pode-se inferir que a interação fibra-matriz foi melhor nos compósitos com o PPv (LIMA *et al.*, 2021), corroborando os resultados de dureza.

Figura 27 - Ensaio de absorção de água das formulações processadas.



Fonte: Autora, 2022

#### 4.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

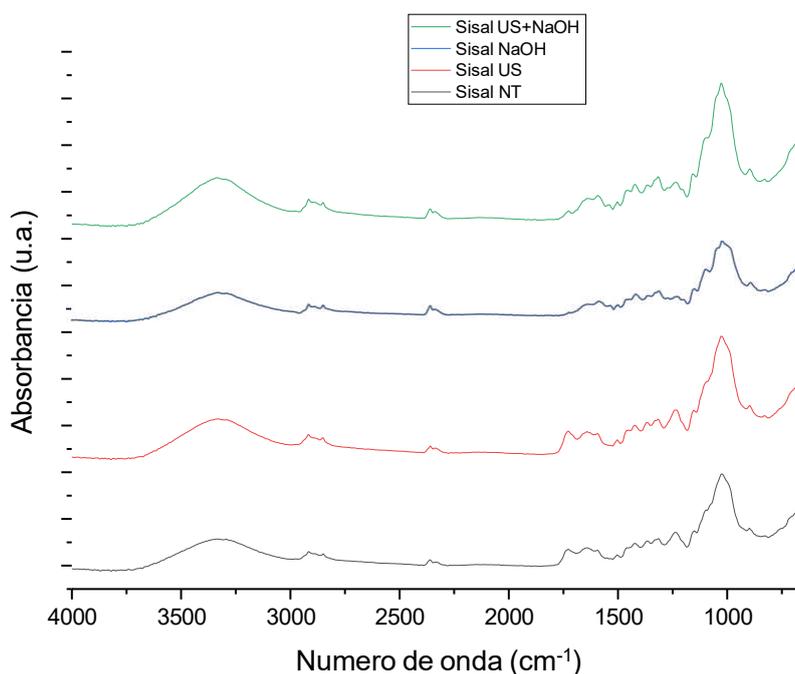
A Figura 29 mostra os resultados da análise de FTIR para as fibras de sisal não tratadas, tratadas com ultrassom, tratadas com NaOH e das fibras submetidas ao tratamento combinado (US+NaOH). Os grupos funcionais de celulose, hemicelulose, pectina e lignina presentes nestas fibras e suas respectivas bandas de IR estão listados na Tabela 8. O espectro FTIR é útil para investigar os grupos funcionais deslocados dentro dos constituintes da fibra

após serem submetidos a tratamentos de superfície (CHEN *et al.*, 2011; CAI *et al.*, 2015; KRISHNAIAH *et al.*, 2017).

As bandas em  $3431\text{ cm}^{-1}$  e em  $3434\text{ cm}^{-1}$  são atribuídas aos grupos hidroxila da celulose e da hemicelulose. Nas fibras não tratadas, a banda em  $2916\text{ cm}^{-1}$  indica o estiramento C-H da lignina que se deslocou para  $2893\text{ cm}^{-1}$  com o tratamento de ultrassom, álcali e a combinação de ultrassom e tratamento alcalino nas fibras de sisal, o que indica claramente a remoção de lignina. Nas fibras não tratadas, a banda que aparece em  $1742\text{ cm}^{-1}$  indica os grupos C=O de hemicelulose e pectina que desapareceram com o tratamento alcalino. No entanto, com o tratamento com ultrassom as fibras de sisal ainda indicam o pico em  $1742\text{ cm}^{-1}$ , o que confirma que o tratamento com ultrassom sozinho não é eficaz na remoção de hemicelulose e lignina da superfície das fibras. Da mesma forma, o pico correspondente ao alongamento C-O dos grupos acetil da lignina em  $1261\text{ cm}^{-1}$  não aparece mais com o tratamento de álcali e diminui de intensidade no tratamento combinado (CHEN *et al.*, 2011; CAI *et al.*, 2015; KRISHNAIAH *et al.*, 2017).

A estrutura molecular da celulose não foi alterada com nenhum dos tratamentos acima. Assim, o álcali, seguido do tratamento combinado, removeram grande parte dos materiais amorfos, como hemicelulose, lignina e pectina, da superfície das fibras de sisal. O tratamento de ultrassom sozinho não causou nenhum efeito significativo na remoção de hemicelulose e pectina (CHEN *et al.*, 2011; CAI *et al.*, 2015; KRISHNAIAH *et al.*, 2017).

Figura 28 - Resultados da análise de FTIR



Fonte: Autora, 2022

Tabela 8 - Picos de transmissão FTIR dos constituintes da Fibra de Sisal

Número de Onda (cm <sup>-1</sup> )	Grupo Funcional	Atribuições Possíveis
3431, 3434	-OH	Celulose, Hemicelulose e lignina
2916, 2921, 2893	C-H	Lignina, hemicelulose e celulose
1742	C=O	
1636	-OH	Presença de água na hemicelulose
1376	C-H bending (pêndulo) and C-O stretching (valência)	Hemicelulose
1261	C-O stretching	Grupo acetil da lignina
10,531,060	C-O stretching	Lignina e Celulose

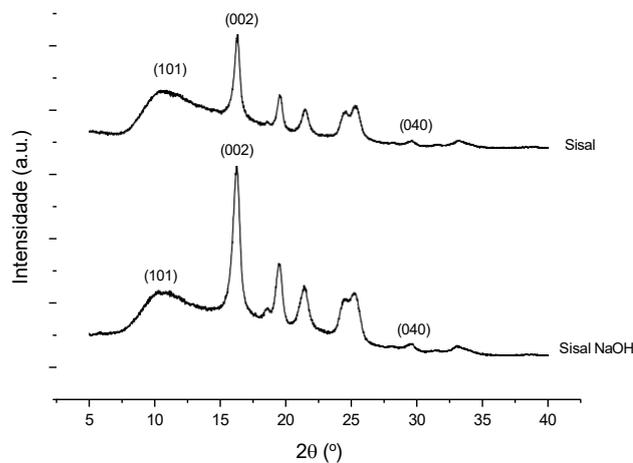
Fonte: Adaptado de Krishnaiah *et al.*, 2017

#### 4.5 Difração de Raio-X (DRX)

Os resultados para o ensaio de DRX para as amostras Sisal e Sinal NaOH estão apresentados na figura 30. O difratograma do Sisal NT mostra um padrão bastante semelhante aos quatro picos característicos da celulose nativa (celulose I). Esses picos estão localizados

quase em  $2\theta=10,51^\circ$ ,  $16,30^\circ$  e  $29,4^\circ$ , que são as posições das reflexões do plano cristalográfico (101), (002) e (040), respectivamente. A cristalinidade aumentou com o tratamento alcalino de 22,93% (m/m) até 71,48% (m/m) e resultou em uma cristalinidade cerca de 48,55% (m/m) maior do que o sisal não tratado (KRISHNAIAH *et al.*, 2017). Isso indica a remoção parcial de materiais amorfos da superfície das fibras de sisal, corroborando com a análise de FTIR.

Figura 29 - Resultados para o ensaio de DRX



Fonte: Autora, 2022

#### 4.6 Ensaio de Impacto Izod

Resultados do ensaio de Impacto estão apresentados na Tabela 9. Em relação a matriz utilizada, compósitos com matriz de PPv apresentam maiores valores de resistência ao impacto do que compósitos com matriz reciclada, o que corrobora com as análises de absorção de água. O tipo de tratamento utilizado não influenciou de forma significativa a propriedade de impacto. Já na matriz reciclada a resistência ao impacto diminuiu com o tratamento da fibra, mostrando algum tipo de incompatibilidade fibra-matriz, que culminou em maior absorção de água e menor resistência mecânica.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de impacto das formulações processadas.

Amostras	Resistência ao impacto (kJ/m <sup>2</sup> )
PP virgem	21,497±0,246
PP reciclado	8,480±0,082
PPv/Sisal NT	9,219±0,018
PPr/Sisal NT	6,820±0,059
PPv/Sisal NaOH	9,142±0,069
PPr/Sisal NaOH	5,628±0,051
PPv/Sisal US NaOH	9,906±0,006
PPr/Sisal US NaOH	4,428±0,039

Fonte: Autora, 2022

#### 4.7 Análise estatística

A matriz experimental realizada a partir das respostas medidas para dureza (H), a resistência ao impacto Izod (I) e a densidade (D) são representadas na Tabela 10. A análise de cálculos de variância (ANOVA) para os três testes, são apresentados nas Tabelas 11-13. A ANOVA foi usada para detectar os fatores e suas interações que influenciaram o desempenho mecânico dos compósitos.

As interações de segundo grau consideradas no estudo são M-AT, M-SS e AT-SSL.

Tabela 10 - Matriz experimental e valores das variáveis resposta

Experimento	M	AT	SS	H	I	D
1	1	0	0	63	0.893	18,614
2	1	0	0	63	0.875	17,853
3	1	0	0	63	0.907	28,025
4	1	0	1	63	0.955	9,641
5	1	0	1	64	0.911	8,788
6	1	0	1	63	0.934	9,226
7	1	15	1	63	0.891	7,911
8	1	15	1	63	0.921	8,557
9	1	15	1	64	0.891	10,956
10	2	0	0	58	0.932	10,426
11	2	0	0	58	0.921	6,620
12	2	0	0	58	0.923	8,396
13	2	0	1	60	0.956	8,004
14	2	0	1	59	0.957	5,305
15	2	0	1	59	0.95	7,150
16	2	15	1	58	0.931	6,389
17	2	15	1	57	0.918	6,228
18	2	15	1	56	0.932	4,267

Fonte: Autora, 2022

Tabela 11 - ANOVA do planejamento fatorial para a dureza (H)

Fonte de variação	Grau de Liberdade (D.F)	Soma quadrática (SQ)	Média quadrática (MQ)	F	Significância de F
Regressão	6	126	21	75,6	2.68E-08
Resíduo	12	4	0.3333		
Total	18	130			

Termo	Coefficientes	Desvio padrão	Estatística t	Valor-P
Intercept	68	0.7454	91.2316	2.01E-18
M	-5	0.4714	-10.6066	1.89E-07
AT	0.1556	0.0703	2.2136	0.0469
SS	-0.6667	1.0541	-0.6325	0.5389
M-AT	-0.1556	0.0444	-3.5	0.0044
M-SS	1	0.6667	1.5	0.1595

S = 0.5775

R-sq = 96.92%

R-sq (adj) = 87.31%

Fonte: Autora, 2022

Tabela 12 - ANOVA do planejamento fatorial para resistência ao impacto Izod (I)

Fonte de variação	Grau de liberdade (D.F)	Soma de quadrados (SQ)	Média quadrática (MQ)	F	Significância de F
Regressão	6	494.8954	82.4826	14	1.30E-04
Resíduo	12	83.5634	69636		
Total	18	5784588			
Termo	Coeficientes	Desvio padrão	Estatística t		Valor-P
intercept	34.5137	3.4068	10.1309		3.11×10 <sup>-7</sup>
M	-13.0166	2.1546	-6.0413		5.84×10 <sup>-5</sup>
AT	0.0692	0.3212	0.2154		0.833
SS	-22.8964	4.8179	-4.7524		0.0005
M-AT	-0.0743	0.2031	-0.3659		0.7208
M-SS	10.6178	3.0471	3.4846		0.0045
S = 2.6388		R-sq= 85.55%	R-sq (adj) = 71.20%		

Fonte: Autora, 2022

Tabela 13 - ANOVA do planejamento fatorial para medidas de densidade (D).

Fonte de variação	Graus de Liberdade (D.F)	Soma quadrática (SQ)	Média quadrática (MQ)	F	Significância de F
Regressão	3	0.0076	0.0025	15	1.36E-04
Resíduo	14	0.0024	0.0002		
Total	17	0.01			
Termo	Coeficientes	Erro Padrão	Estatística t		Valor-P
intercept	0.8682	0.0107	80.7936		4.31E-20
M	0.0269	0.0062	4.3342		6.87E-04
AT	-0.002	0.0005	-3.9264		0.00152
SS	0.0353	0.0076	4.6502		0.000375
S = 0.0132		R-sq= 75.79%	R-sq (adj) = 70.60%		

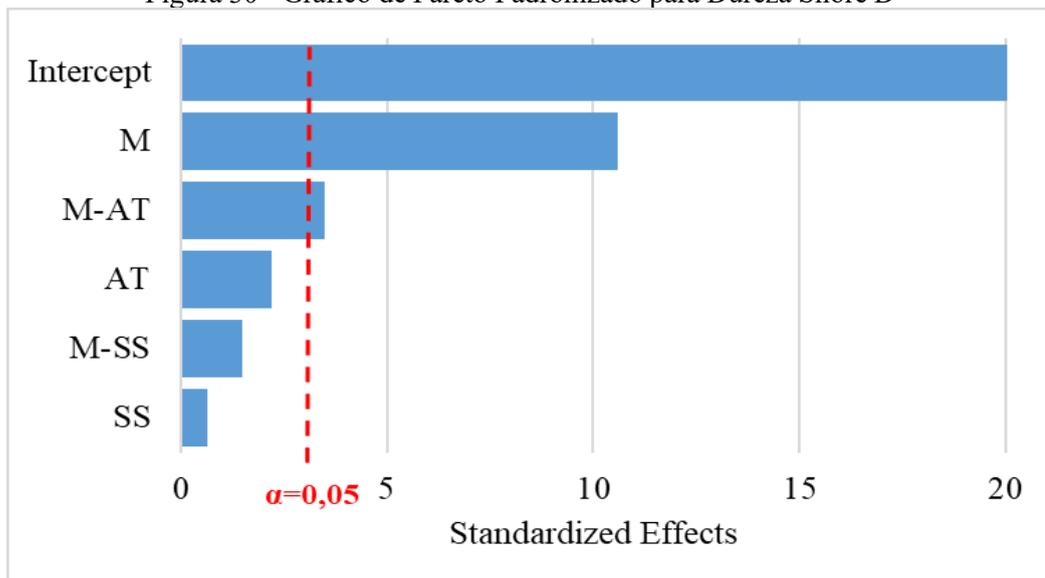
Fonte: Autora, 2022

Os valores de p para os fatores (M, AT e SS) e interações (M-AT, M-SS e AT-SS) estão mostrados nas Tabelas 11-13 e indicam a influência nas variáveis de resposta (H, I e D). Quando o nível de confiança for 95%, e o valor de p do fator ou da interação for menor ou igual ao grau de risco (0,05 ou 5%), corresponde que houve uma correlação significativa entre as variáveis

de resposta e o fator, enquanto valores de p superiores a 0,05, indicaram a ausência de correlação. Os resultados ilustrados na Tabela 10 mostram que o fator AT e a interação M-AT tiveram significância estatística na variável resposta H, confirmando a influência relevante do tratamento alcalino na dureza do compósito. Em contraste, os resultados da regressão mostraram que a resposta de resistência ao impacto não foi influenciada pelo fator AT (Tabela 11). Pode-se observar também que a adição de camada de sisal aos compósitos PPr ou PP foram relevantes para a resistência ao impacto, recomendando assim seu uso.

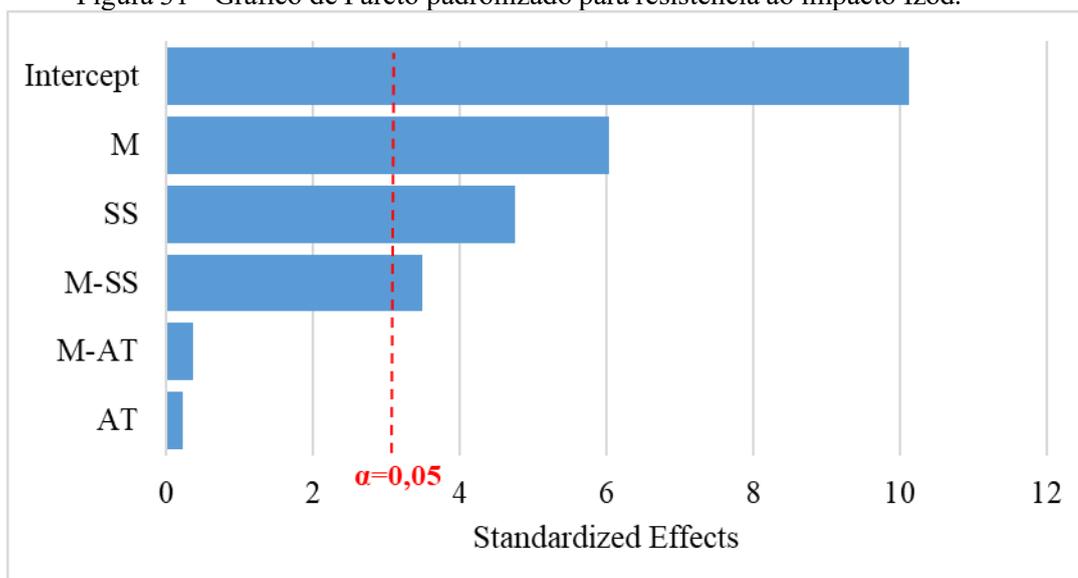
A variável M representa o fator mais significativo em todas as análises, resultado corroborado nos diagramas de Pareto, figuras 31 e 32. A linha de referência nos gráficos indica quais efeitos são significativos. Neste estudo, o método de Lenth foi usado para traçar a linha de referência. Os termos com efeitos à direita da linha representam parâmetros significativos.

Figura 30 - Gráfico de Pareto Padronizado para Dureza Shore D



Fonte: Autora, 2022

Figura 31 - Gráfico de Pareto padronizado para resistência ao impacto Izod.



Fonte: Autora, 2022

Os valores de R-Sq (adj) ajustados para os modelos de regressão das respostas H, I e D são 87,31%, 71,20% e 70,60%, respectivamente. Esses coeficientes apresentaram níveis acima de 70%, o que implica que os modelos tiveram boa previsibilidade. A análise residual foi realizada para verificar os pressupostos da ANOVA e validar os modelos de regressão. O modelo H, I e as respostas D foram determinadas pelas Equações (3)–(5).

$$H = 68,0 - 5,0 \cdot M + 0,156 \cdot AT - 0,156 \cdot M - AT \pm 0,577 \quad (3)$$

$$I = 34,514 - 13,017 \cdot M - 22,896 \cdot SS + 10,618 \cdot M - SS \pm 2,639 \quad (4)$$

$$D = 0,868 + 0,027 M - 0,002 \cdot AT + 0,035 \cdot SS \pm 0,13 \quad (5)$$

#### 4.8 Viabilidade econômica

Os custos da formulação de cada compósito foram levantados, assim como os custos de formulação para compósitos de manta de vidro estão dispostos nas Tabelas 14-16 a abaixo.

Vale ressaltar que o estudo de análise econômica aplicada a esta pesquisa, possui limitações, devido a matéria prima (sisal) renovável usada para desenvolver o compósito estudado não passar pelo processo de beneficiamento, dificultando o levantamento bibliográfico, para possível análise econômica. A demais, não foram encontrados produtos análogos que respaldassem este estudo.

Apesar das limitações encontradas neste estudo, pode-se afirmar que o material formulado é viável economicamente, pois a matriz polimérica tem como reforço uma fibra vegetal (sisal), o que confere ao compósito um baixo custo, comparado a compósitos reforçados com fibras sintéticas, já que material em questão é um recurso renovável.

Tabela 14 - Custos das formulações reforçadas com manta de sisal de menor custo

Compósito	Formulação	Custo da composição	Custo Total
PPv/Sisal	Polipropileno Virgem (0,015 Kg)	\$ 0,045	\$ 0,24
	Tela de Sisal trançada artesanal (0,0225 m <sup>2</sup> )	\$ 0,19	
PPr/Sisal	Polipropileno reciclado (0,015 Kg)	\$ 0,019	\$ 0,21
	Tela de Sisal trançada artesanal (0,0225 m <sup>2</sup> )	\$ 0,19	
PPv/Sisal/NaOH	Polipropileno virgem (0,015 Kg)	\$ 0,045	\$ 0,39
	Tela de Sisal trançada artesanal (0,0225 m <sup>2</sup> )	\$ 0,19	
	Tratamento hidróxido de sódio (0,005 Kg)	\$ 0,15	
PPr/Sisal/NaOH	Polipropileno reciclado (0,015 Kg)	\$ 0,019	\$ 0,36
	Tela de Sisal trançada artesanal (0,0225 m <sup>2</sup> )	\$ 0,19	
	Tratamento hidróxido de sódio (0,005 Kg)	\$ 0,15	

Fonte: Autora, 2022

Tabela 15 - Custos das formulações reforçadas com manta de sisal de maior custo

Compósito	Formulação	Custo da composição	Custo Total
PPv/Sisal/US	Polipropileno Virgem (0,015 Kg)	\$ 0,045	\$ 2,81
	Manta Fibra de Vidro laminação (0,0225 m <sup>2</sup> )	\$ 0,19	
	Tratamento US - Água destilada (3,8 l)	\$ 2,58	
PPv/Sisal/US/NAOH	Polipropileno virgem (0,015 Kg)	\$ 0,045	\$ 2,97
	Tela de Sisal trançada artesanal (0,0225 m <sup>2</sup> )	\$ 0,19	
	Tratamento US - Água destilada (3,8 l)	\$ 2,58	
	Tratamento hidróxido de sódio (0,005 Kg)	\$ 0,15	
PPr/Sisal/US	Polipropileno reciclado (0,015 Kg)	\$ 0,019	\$ 2,79
	Tela de Sisal trançada artesanal (0,0225 m <sup>2</sup> )	\$ 0,19	
	Tratamento US - Água destilada (3,8 l)	\$ 2,58	
PPr/Sisal/US/NAOH	Polipropileno reciclado (0,015 Kg)	\$ 0,019	\$ 2,94
	Tela de Sisal trançada artesanal (0,0225 m <sup>2</sup> )	\$ 0,19	
	Tratamento US - Água destilada (3,8 l)	\$ 2,58	
	Tratamento hidróxido de sódio (0,005 Kg)	\$ 0,15	

Fonte: Autora, 2022

Tabela 16 - Custos da formulação dos compósitos de manta de vidro

Compósito	Formulação	Custo da composição	Custo Total
PPv/Manta de vidro	Polipropileno Virgem (0,015 Kg)	\$ 0,045	\$ 0,19
	Manta Fibra de Vidro laminação (0,0225 m <sup>2</sup> )	\$ 0,15	
PPr/Manta de vidro	Polipropileno reciclado (0,015 Kg)	\$ 0,019	\$ 0,17
	Manta Fibra de Vidro laminação (0,0225 m <sup>2</sup> )	\$ 0,15	

Fonte: Autora, 2022

Analisando as Tabelas 14 e 16 pode-se observar que as formulações dos compósitos reforçados com sisal, apresentam um custo maior, do que os formulados com manta de vidro. Levando em consideração o seu custo/benefício, os valores mais altos apresentados se justificam, pois, se trata de um reforço (sisal) biodegradável e mais leve. Além disto, compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra natural, apresentam vantagens além das ambientais em relação aos compósitos reforçados com fibras sintéticas, sendo o principal benefício, a sua reinserção no ciclo produtivo para mesma finalidade primária após reciclado, o que auxilia na sua escalabilidade produtiva, ou seja, permitirá um aumento no volume nas atividades de produção, mas sem a ampliação dos custos do negócio. Isso não acontece nos compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro que, após reciclados não servem para serem reutilizados na mesma aplicação, devendo ser descartados, pois a fibra de vidro envolve fusão de reagentes boráx, sílica volatilizada, caulim, dolomita e soda em pó, em geral, na forma de óxidos e carbonatos.

Em relação as composições apresentadas na Tabela 15, todas foram descartadas para esta parte do estudo, devido aos altos custos das mesmas, comparadas aos compósitos formulados com manta de vidro.

Considerando o desempenho mecânico e químico, o compósito mais indicado para fabricação de partes leves de automóveis é o formulado PPv/Sisal NaOH, como apresentado nas análises experimentais realizadas neste estudo. Mesmo que o compósito PPv/Sisal NaOH, tenha sua formulação custando o dobro do compósito PPv/ Manta de Vidro, este custo se justifica, pelos benefícios já citados anteriormente.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSÃO

Neste trabalho, compósitos tipo sanduíche foram obtidos por moldagem à compressão, variando-se o tipo de matriz (PPv e PPr) e o tipo de tratamento em fibra de sisal, tipo tecido. Os resultados encontrados foram:

- Análise de FTIR do sisal: O tratamento com NaOH, e também o tratamento US/NaOH, removeram grande parte dos materiais amorfos, como hemicelulose, lignina e pectina, da superfície das fibras de sisal. O tratamento de ultrassom sozinho não causou nenhum efeito significativo na remoção de hemicelulose e pectina.
- A análise de difração de raios-X no Sisal NT e no Sisal NaOH mostrou que a cristalinidade aumentou com o tratamento alcalino de 22,93% (m/m) até 71,48% (m/m) e resultou em uma cristalinidade cerca de 48,55% (m/m) maior do que o sisal não tratado, corroborando as análises de FTIR.
- A densidade dos materiais variou de 0,892-0,933 g/cm<sup>3</sup> mostrando a possibilidade de uso destes compósitos em partes leves automotivas.
- O PPr e os compósitos com matriz de PPr apresentam menor dureza que seus equivalentes com matriz de PP virgem.
- A absorção de água foi maior nos compósitos com PP reciclado, independente do tipo de tratamento realizado.
- Compósitos com matriz de PPv apresentam maiores valores de resistência ao impacto do que compósitos com matriz reciclada, o que corrobora com as análises de absorção de água e dureza.
- O modelo de regressão e os diagramas de Pareto mostraram que o tratamento alcalino foi um fator significativo para a dureza dos compósitos de PPr e PPv, e que a adição de uma camada de sisal foi relevante para melhorar a resistência ao impacto dos compósitos.
- A análise econômica mostrou que apesar dos custos das formulações dos compósitos reforçados com manta serem mais altos, que os reforçados com manta de vidro, este valor se justifica para as formulações até o dobro do curso da manta de vidro, devido a possibilidade de reinserção desses materiais para mesma finalidade primária após reciclados, o que auxilia na sua escalabilidade produtiva.

Para fabricação de componentes internos de automóveis indica-se a matriz de PP virgem e o tratamento alcalino da fibra.

### **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Variar o tempo de tratamento das fibras com NaOH.
- Realizar modificação por plasma nas fibras, que é uma tecnologia mais limpa e não gera resíduos.
- Variar o tipo de fibra natural utilizada.
- Testar matrizes biodegradáveis.
- Testar outros tipos de processamento nos compósitos: extrusão e injeção.

## REFERENCIAS

AGARWAL, J., SAHOO, S. MOHANTY, S., NAYAK, S.K. **Progress of novel techniques for lightweight automobile applications through innovative eco-friendly composite materials: a review.** *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 2019, 33 (7), 978–1013. DOI:10.1177/0892705718815530

ASKELAND, D.R., WRIGHT, W.J. **Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: Cengage Learnin, 3ª Edição, 2014.

BASTOS, D.C., LEÃO, A.G., PEREIRA, P.S.C. Characterization of Polypropylene post-consume/banana fiber composites. **AS&T**, volume 6 (1), p.19-22, 2018. ISSN: 2317-8957.

BISANDA, E. T. N. e ANSELL, M. P. **The effect of silane treatment on the mechanical and physical properties of sisal-epoxy composites.** *Composites Sci. Technol.*, v. 41, p.165,1991.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v. 24, p. 221-274, 1999.

BRAHMAKUMAR, M.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, R. M. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. **Composites Science and Technology**, v. 65, p. 563-569, 2005.

BRASIL. Lei Federal nº. 12.305 de 2 de Agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei nº. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm)>  
Acesso em: 15 de abril, 2020.

CHANDGUDE, S., SALUNKHE, S. **In state of art: Mechanical behavior of natural fiber-based hybrid polymeric composites for application of automobile components.** *Polym. Compos.*, 2021, 42, 2678–2703. DOI:10.1002/pc.26045

CALLISTER JR., RETWISCH, D.G. **Ciência e engenharia dos Materiais - Uma Introdução.** 9ª Edição, 2016.

CALLISTER JR. W.D.; RETHWISH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução.** 8ª Edição, Rio de Janeiro, RJ: LTC Editora, 2012.

CALLISTER JR., W. D., **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**, 1ª Edição, Rio de Janeiro, LTC, 2002.

CANEVALORO JR., S.V. **Ciência básica dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** São Paulo: Editora Artliber, 1ª Edição, 2002.

CANEVALORO JR., S.V. **Ciência básica dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** São Paulo: Editora Artliber, 2ª Edição, 2006.

CANEVALORO JR., S.V. **Ciência básica dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Editora Artliber, 3ª Edição, 2010.

CHEN, W., YU, H., LIU, Y., CHEN, P., ZHANG, M., HAI, Y. Individualization of cellulose nanofibers from wood using high-intensity ultrasonication combined with chemical pretreatments. **Carbohydr. Polym.**, v.83, p.1804–1811, 2011.

CUNHA, F. R. **Modelos para a predição de propriedades finais de polímeros a partir de variáveis operacionais**, 2010, 380 p. Tese de Doutorado – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2010.

DALPIAZ, G. **Estudo do efeito de cargas minerais em compósitos poliméricos particulados em matriz de polipropileno**, 2006, 170 p. Tese de Doutorado – Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2006.

ECODEBATE. **O crescimento da pandemia de coronavírus e a redução da poluição ambiental**, artigo de José Eustáquio Diniz Alves, 2020, ISSN 2446-9394. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2020/03/24/o-crescimento-da-pandemia-de-coronavirus-e-a-reducao-da-poluicao-ambiental-artigo-de-jose-eustaquio-diniz-alves/>. Acesso em: 14/03/2021

FAHIM, I.S., ELHAGGAR, S.M. Reinforcement of Plastic Waste with Treated Natural Fibers. **Natural Resources**, v.3(1), 2012.

FREIRE, E., MONTEIRO, E.C, CYRINO, J.R. Propriedades Mecânicas de Compósitos de Polipropileno com Fibra de Vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol.4, n3, p. 25 - 32, 1994.

FARUK *et al* (2012) **Biocomposites reinforced with natural fibers**: 200-2010. Prog. Polym. Sci. 37: 1552-1596

GATENHOLM, P., e FELIX, J. (1993). **Methods for improvement of properties of cellulose-polymer composites**. In M. P. Wolcott. Wood fiber/polymer composites: fundamental concepts, process, and material options (pp. 57-62). Madison: Forest Product Society, 1993.

HEIDARI, M., GARNAIK, P.P, DUTTA, A., 11 - **The Valorization of Plastic Via Thermal Means: Industrial Scale Combustion Methods**, *in*: S.M. Al-Salem (Ed.), *Plastics to Energy*, William Andrew Publishing, 2019: pp. 295–312. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813140-4.00011-X>.

HENRIKSSON, G.; LENNHOLM, H. **Cellulose and Carbohydrate Chemistry**. In EK, M.; GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G. *Wood chemistry and wood biotechnology*. Berlin: Walter de Gruyter, v. 1, p. 71-100, 2009.

HERAKOVICH C.T. **Mechanics of fibrous composites**. New York: John Wiley; 1998.

JOSHI, S. V., DRZAL, L. T., MOHANTY, A. K., & ARORA, S., 2004. A natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites. **Composites. Part**

**A, Applied Science and Manufacturing**, 35(3), 371-376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>.

CAI, M., TAKAGI, H., NAKAGAITO, A.N., KATOH, M., UEKI, T., WATERHOUSE, G.I.N., Li, Y. Influence of alkali treatment on internal microstructure and tensile properties of abaca fibers, **Ind. Crops Prod.** 65 (2015) 27–35.

KRISHNAIAH, P., RATNAM, C. T., & MANICKAM, S. Enhancements in crystallinity, thermal stability, tensile modulus and strength of sisal fibres and their PP composites induced by the synergistic effects of alkali and high intensity ultrasound (HIU) treatments. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.34, p. 729–742, 2017. doi:10.1016/j.ultsonch.2016.07.008

LEVY NETO, F., PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. São Paulo: Edgard Blucher Editora, 2006.

LIMA, A.M., SANTOS, M.C.C., BASTOS, D.C., LIBANO, E.V.D.G., PEREIRA, P.S.C. Polypropylene/Sugarcane Bagasse: influence of processing. **Brazilian Journal of Development**, v.7(2), p.110053-110065, 2021.

MAIER, C.; CALAFUT, T. **Polypropylene: the definitive user's guide and databook**. New York: Plastic Design Library, 432 p., 1998.

MADHU, P., SANJAY, M.R., PRADEEP, S., SUBRAHMANYA Bhat, K., YOGESHA, B., SIENGCHIN, S. **Characterization of cellulosic fibre from Phoenix pusilla leaves as potential reinforcement for polymeric composites**. *J. Mater. Res. Technol.*, 2019, 8, 2597e2604. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.03.006

MANO, E.B., MENDES, L.C. **Introdução a Polímeros**. São Paulo: 2ª Edição Edgar Blücher, 2004.

MARTIN, A. R.; MARTINS, M.A.; MATTOSO, L.H. C.; SILVA, O. R. R. F. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19(1), p. 40-46, 2009. ISSN: 0104-1428.

MARTINS, M. A. - **Fibra de Sisal: Mercerização, Acetilação e Aplicação em Compósitos de Borracha de Pneu Triturado**, 2001, 141p. Tese de Doutorado- Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Brasil ,2001.

MARTINS S., BARROS M.M., PEREIRA P.S.C., BASTOS D.C. Use of manufacture residue of fluidized-bed catalyst-cracking catalysers as flame retardant in recycled high-density polyethylene. **J. Mater. Res. Technol.**, v. 8(2), p. 2386-2394, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.11.015>

MATTHEWS, F. L, RAWLINGS, R. D. **Composite Materials: Engineering And Science**. Chapman and Hall, UK, 1994.

MILÉO, P.C. **Estudo do uso de ligninas como agente compatibilizante em compósitos de polipropileno reforçados com celulose de bagaço e palha de cana-de-açúcar**, 2015, 199 p.

Tese Doutorado em Ciências - Biotecnologia Industrial. Escola de Engenharia de Lorena - EEL - USP, 2015.

MOHARIR, A.V. e KIEKENS, P. - *J. Appl. Polym. Sci.*, 68, p.2107,1998.

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P.D. **Ensaio em Compósitos Poliméricos reforçados com Fibras**. p. 871-879. 62º Congresso Anual da ABM / 62nd ABM International Annual Congress. Vitória – ES, 2007.

MOORE JR., E. P. **Polypropylene Handbook: polymerization, characterization, properties, proccessing, applications**. New York: Hansen Publishers, 419 p., 1996.

NAVEEN, J. et al (2019).**Mechanical and physical properties of sisal and hybrid sisal fiber-reinforced polymer composites**. Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering 427-440

NETO, J. L. B. **Estudo do Comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica com fibra de vidro contendo descontinuidades geométricas**, 2015, 96 p. Dissertação de mestrado- Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2015.

NUÑEZ, A. J., STURM, P. C., KENNY, J. M., ARANGUREN, M. I., MARCOVICH, N. E., REBOREDO, M. M. Mechanical characterization of polypropylene-wood flour composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 88(6), p. 1420-428, 2003. <http://dx.doi.org/10.1002/app.11738>.

RODRIGUES, I., MATA, T.M., MARTINS, A.A. **Environmental analysis of a bio-based coating material for automobile interiors**. *J. Cleaner Prod.*, **2022**, 367, 133011. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133011

ROSÁRIO, F., PACHEKOSKI, W.M., SILVEIRA, A.P.J, JUNIOR, S.F.H, CASARIN, S.A. Resíduos de Sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. **Polímeros**, v. 21(2), p. 90-97, 2011. DOI: 10.1590/S0104-14282011005000021.

ROWELL, R. M.; YOUNG, R. A. e ROWELL, J. K. **Paper and Composites from Agro-Based Resources**, Lewis Publishers, New York ,1997.

SEGAL, L.; CREELY, J.J.; MARTIN, A., JR.; CONRAD, C. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Text. Res. J.**, v. 29, p. 786–794, 1959.

SILVA, A. P, PRATA, J.C, WALKER, T.R, DUARTE, A.C, OUYANG, W., BARCELÒ, D., SANTOS, T.R. Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. **Chemical Engineering Journal**, v. 405, p.126683, 2021.

SILVA, C. A. D, **Compósitos de polipropileno reforçados com fibra de sisal para uso na indústria automobilística**, 2010, 86 p. Dissertação de mestrado-Engenharia Automotiva, Universidade de São Paulo, São Paulo- SP, 2010.

SJOSTROM, E. **Wood Chemistry: fundamental and applications**. Elsevier, 2013.

SOUZA, L.P. A pandemia da COVID-19 e os reflexos na relação com meio ambiente e sociedade. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.8(4), p. 68-73, 2020. ISSN: 2595 – 4431.

TAGHIPOUR, A., AKKALATHAM, W., EAKNARAJINDAWAT, N., STEFANAKIS, A.I. **The impact of government policies and steel recycling companies' performance on sustainable management in a circular economy**. *Resour. Policy*, **2022**, *77*, 102663. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102663

TEKLU, T., WANGATIA, L.M., ALEMAYEHU, E. **Effect of surface modification of sisal fibers on water absorption and mechanical properties of polyaniline composite**. *Polym. Compos.*, **2019**, *40*, E46eE52. DOI:10.1002/pc.24462

VORAGEN, A.G.J.; COENEN, G.J.; VERHOEF, R.P.; Schols, H.A. Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls. **Structural Chemistry**, v.20, p. 263-275, 2009.

WOLLERDORFER, M.; BADER, H. Influence of natural fibers properties of biodegradable Polymers. **Industrial Crops and Products**, v. 8, n.2, p.105-112, 1998.

XIE, Y. et al. Silane Coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. **Composites: Part A**, v. 41, p. 806-819, 2010.