



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias

Albertran Dias Faria

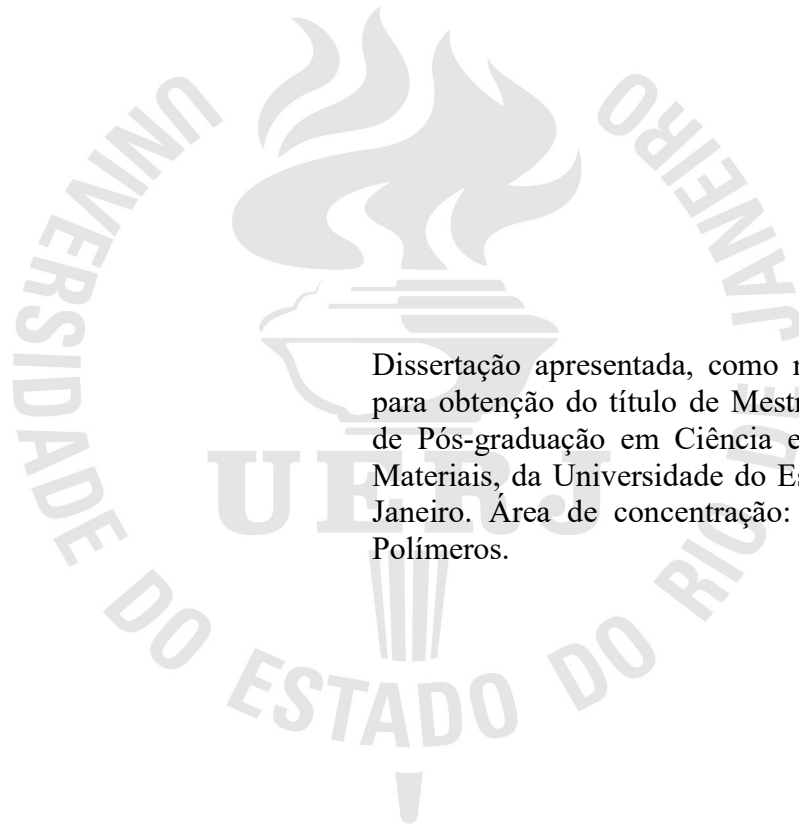
**Influência da granulometria da fibra de sisal no desempenho de compósitos  
híbridos de PEADr/argila bentonita/sisal**

Rio de Janeiro

2024

Albertran Dias Faria

**Influência da granulometria da fibra de sisal no desempenho de compósitos híbridos de  
PEADr/argila bentonita/sisal**



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

Orientadora: Prof.a Dra. Elaine Vidal Dias Gomes Libano

Coorientadora: Prof.a Dra. Patricia Soares da Costa Pereira

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CZO

F224 Faria, Albertran Dias

Influência da granulometria da fibra de sisal no desempenho de compósitos híbridos de PEADr/argila bentonita/sisal / Albertran Dias Faria - 2024.  
76 f.

Orientadora: Elaine Vidal Dias Gomes Libano  
Coorientadora: Patricia Soares da Costa Pereira

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. Ciência e Tecnologia de Materiais - Teses. 2. Argila Bentonita - Teses. 3. Compósitos - Teses. 4. Polietileno de alta densidade – Teses. 5. Fibras de sisal – Teses. I. Libano, Elaine Vidal Dias Gomes. II. Pereira, Patricia Soares da Costa. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias. IV. Título.

CDU 620

Bibliotecária: Joice Soltosky Cunha – CRB 7 5946

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

---

Assinatura

---

Data

Albertran Dias Faria

**Influência da granulometria da fibra de sisal no desempenho de compósitos híbridos de  
PEADr/argila bentonita/sisal**

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

Aprovada em 07 de novembro de 2024.

Banca Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Elaine Vidal Dias Gomes Libano (Orientadora)

Faculdade de Ciência Exatas e Engenharias - UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Patricia Soares da Costa Pereira (Coorientadora)

Faculdade de Ciência Exatas e Engenharias - UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Florêncio Gomes de Ramos Filho

Faculdade de Ciência Exatas e Engenharias - UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Shirleny Fontes Santos

Faculdade de Ciência Exatas e Engenharias - UERJ

---

Dra. Marcell do Nascimento da Conceição

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2024

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por essa oportunidade que me foi dada e por ter sido o meu alicerce durante todo esse tempo.

Agradeço a minha orientadora Elaine Vidal Dias Gomes Líbano e a minha coorientadora Patricia Soares da Costa Pereira pelo maravilhoso trabalho de orientação, e por toda ajuda, conselho, dicas, e por estar sempre disponível compartilhando todo conhecimento e experiência que carregam. Dedico a elas, todo o meu carinho e admiração.

Agradeço também a Mônica Cristina Celestino dos Santos, técnica de laboratório, pelo apoio e por compartilhar a sua experiência com muita dedicação e carinho, fazendo com que eu pudesse agregar muito conhecimento.

E agradeço também a Gabriela de Oliveira da Silva, graduanda em Engenharia de Materiais, pelo apoio e auxílio no laboratório.

## RESUMO

FARIA, Albertran Dias. *Influência da granulometria da fibra de sisal no desempenho de compósitos híbridos de PEADr/argila bentonita/sisal*. 2024. 76 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A indústria de polímeros termoplásticos tem avançado muito nos últimos anos no sentido de se buscar alternativas para minimizar os problemas ambientais gerados pelos mesmos. Uma das alternativas é a produção de materiais compósitos a partir de polímeros reciclados e fibras vegetais. O Polietileno é um dos materiais que constitui um grande volume de resíduos poliméricos, enquanto a fibra de sisal vem sendo muito empregada como reforço em plásticos nos últimos tempos. Desta maneira, nesse trabalho foram obtidos compósitos híbridos de matriz polimérica reciclada (PEAD), argila bentonita e fibras de sisal em diferentes tamanhos. Foi realizado o beneficiamento da fibra de sisal, compreendendo a moagem e o peneiramento, para a obtenção de algumas distribuições granulométricas, sendo utilizadas 4 variações: 2,000mm, 0,840mm, 0,590mm e 0,180mm. Todos os materiais (PEADr/Bentonita/Sisal) foram secos em estufa antes de serem utilizados no processamento. Os materiais compósitos de PEADr/Bentonita/Sisal foram processados em extrusora de dupla-rosca e posteriormente foram caracterizados pelas técnicas de Densidade, Dureza Shore D, Absorção de água, Impacto, VICAT e HDT. A porcentagem dos materiais compósitos utilizados no processamento foram na proporção de: 70% de PEAD reciclado, 10% de argila bentonita e 20% sisal. De forma geral, a presença da fibra de sisal causou uma redução na resistência ao impacto de todos os compósitos obtidos. Por outro lado, a presença da fibra de sisal proporcionou um aumento na dureza, na densidade e na absorção de água de todos os compósitos obtidos quando comparados ao PEADr. A presença da fibra de sisal e da argila não influenciaram na temperatura de amolecimento (VICAT), tão pouco na temperatura de deflexão térmica (HDT) dos compósitos, pois os resultados encontrados destes dois testes mostraram valores muito próximos ao do PEADr, não havendo diferença significativa entre os materiais estudados.

Palavras-chave: Argila Bentonita. Compósitos. Polietileno de Alta Densidade. Fibras de Sisal.

## ABSTRACT

FARIA, Albertran Dias. *Influence of sisal fiber granulometry on the performance of HDPE/bentonite clay/sisal hybrid composites*. 2024. 76 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The thermoplastic polymer industry has made significant progress in recent years in seeking alternatives to minimize the environmental problems generated by these materials. One of the alternatives is the production of composite materials from recycled polymers and plant fibers. Polyethylene is one of the materials that constitutes a large volume of polymeric waste, while sisal fiber has been widely used as reinforcement in plastics in recent times. Thus, in this study, hybrid composites of recycled polymer matrix (HDPE), bentonite clay and sisal fibers in different sizes were obtained. The sisal fiber was processed, including grinding and sieving, to obtain some particle size distributions, with four variations being used: 2.000mm, 0.840mm, 0.590mm and 0.180mm. All materials (HDPE/Bentonite/Sisal) were oven dried before being used in the processing. The HDPE/Bentonite/Sisal composite materials were processed in a twin-screw extruder and were subsequently characterized by the techniques of Density, Shore D Hardness, Water Absorption, Impact, VICAT and HDT. The percentage of composite materials used in processing was in the proportion of: 70% recycled HDPE, 10% bentonite clay and 20% sisal. In general, the presence of sisal fiber caused a reduction in the impact resistance of all composites obtained. On the other hand, the presence of sisal fiber provided an increase in hardness, density and water absorption of all composites obtained when compared to HDPEr. The presence of sisal fiber and clay did not influence the softening temperature (VICAT), nor the heat deflection temperature (HDT) of the composites, as the results found from these two tests showed values very close to those of PEADr, with no difference significant among the materials studied.

Keywords: Bentonite Clay. Composites. High Density Polyethylene. Sisal Fibers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Resinas termoplásticas consumidas no Brasil em 2022 (%).....	14
Figura 2 –	Exemplos de aplicações do PEAD.....	17
Figura 3 –	Tipos de fibras, com foco no sisal.....	18
Figura 4 –	Espécie de sisal (Agave Sisalana) da qual se extraem as fibras.....	20
Figura 5 –	Área e produção de sisal no Brasil.....	20
Figura 6 –	Microestrutura da fibra de sisal mostrando (a) seção transversal e (b) ampliação contendo os detalhes dos lumen e das células.....	21
Figura 7 –	Estrutura das fibras naturais.....	22
Figura 8 –	Conformação estrutural da montmorilonita.....	25
Figura 9 –	Representação de um material compósitos.....	27
Figura 10 –	Orientações de fibras nos compósitos, contínuas e alinhadas (a), descontínuas e alinhadas (b) e descontínuas aleatórias (c).....	27
Figura 11 –	Extrusora de dupla rosca.....	29
Figura 12 –	PEADr, Sisal e Argila, respectivamente.....	40
Figura 13 –	Prensa hidráulica de aquecimento.....	43
Figura 14 –	Amostras obtidas por prensagem.....	43
Figura 15 –	Densímetro DSL910 – GEHAKA.....	44
Figura 16 –	Durômetro Shore D - GS702.....	45
Figura 17 –	Amostras imersas em água destilada.....	46
Figura 18 –	Equipamento do Teste de Impacto.....	47
Figura 19 –	Equipamento do Teste de VICAT.....	47
Figura 20 –	Equipamento do Teste de HDT.....	48



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Propriedades físicas e mecânicas típicas de fibras naturais e sintéticas.....	23
Tabela 2 –	Porcentagem em massa dos materiais utilizados.....	42
Tabela 3 –	Quantidade em gramas dos materiais processados.....	42
Tabela 4 –	Densidade do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.....	49
Tabela 5 –	Dureza do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.....	50
Tabela 6 –	Porcentagem de água absorvida do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal, após 24 horas, 1ª semana, 2ª semana, 3ª semana, 4ª semana, 5ª semana e 6ª semana.....	52
Tabela 7 –	Resistência ao impacto do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.....	54
Tabela 8 –	Temperatura de Amolecimento do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.....	56
Tabela 9 –	Temperatura de Deflexão Térmica do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.....	57

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1–	Densidade do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.....	49
Gráfico 2–	Dureza do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.....	51
Gráfico 3–	Absorção de água do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal, após 24 horas, 1ª semana, 2ª semana, 3ª semana, 4ª semana, 5ª semana e 6ª semana...	52
Gráfico 4–	Resistência ao impacto do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.....	54
Gráfico 5–	Temperatura de Amolecimento do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.....	56
Gráfico 6–	Temperatura de Deflexão Térmica do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing Materials</i>
BENTO	Bentonita organofílica
DRX	<i>Difração de raios X</i>
FTIR	<i>Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier</i>
HDT	<i>Temperatura de Deflexão Térmica</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MFI	<i>Índice de Fluides</i>
MMT	Argila Montmorilonita
PE	Poliétileno
PEAD	Poliétileno de Alta Densidade
PEADr	Poliétileno de Alta Densidade reciclado
PEBD	Poliétileno de Baixa Densidade
PET	Poli Tereftalato de Etileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinila
TGA	<i>Análise Termogravimétrica</i>
VICAT	<i>Temperatura de Amolecimento</i>

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	12
1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	12
1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	12
2	<b>REFERENCIAL TEORICO</b> .....	13
2.1	<b>Polietileno de Alta Densidade (PEAD)</b> .....	13
2.1.1	<u>Consumo e Reciclagem de Termoplásticos</u> .....	13
2.1.2	<u>Propriedades do PEAD</u> .....	15
2.1.3	<u>Uso industrial</u> .....	15
2.2	<b>Fibras</b> .....	17
2.2.1	<u>Fibras Naturais</u> .....	17
2.2.2	<u>Fibras vegetais</u> .....	18
2.2.3	<u>Fibras de Sisal</u> .....	19
2.3	<b>Argila Bentonita</b> .....	24
2.4	<b>Materiais Compósitos</b> .....	26
2.4.1	<u>Processos de fabricação de compósitos</u> .....	28
2.4.2	<u>Aplicação de compósitos</u> .....	29
2.5	<b>Compósitos termoplásticos reforçados com fibras de sisal</b> .....	30
2.6	<b>Compósitos termoplásticos reforçados com argila</b> .....	33
2.7	<b>Compósitos híbridos</b> .....	36
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	40
3.1	<b>Materiais</b> .....	40
3.2	<b>Equipamentos</b> .....	41
3.3	<b>Métodos</b> .....	41
3.3.1	<u>Preparação dos compósitos</u> .....	41
3.3.2	<u>Preparação dos corpos de prova</u> .....	43
3.4	<b>Caracterização</b> .....	44
3.4.1	<u>Ensaio de Densidade</u> .....	44
3.4.2	<u>Ensaio de Dureza</u> .....	44
3.4.3	<u>Absorção de água</u> .....	45
3.4.4	<u>Ensaio de Impacto</u> .....	46
3.4.5	<u>VICAT</u> .....	47

3.4.6	<u>Temperatura de Deflexão Térmica - HDT</u> .....	48
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	49
4.1	<b>Ensaio de Densidade</b> .....	49
4.2	<b>Ensaio de Dureza</b> .....	50
4.3	<b>Absorção de água</b> .....	52
4.4	<b>Ensaio de Impacto</b> .....	53
4.5	<b>Temperatura de Amolecimento - VICAT</b> .....	55
4.6	<b>Temperatura de Deflexão Térmica - HDT</b> .....	57
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	59
	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	60
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	61

## INTRODUÇÃO

Os plásticos são materiais utilizados em larga escala pelo mundo, com aplicações em diversas indústrias diferentes com as mais variadas utilizações (OWEN *et al.*, 2023; SATHISH *et al.*, 2023). Os polímeros termoplásticos têm conquistado espaço como material de grande relevância para a sociedade atual, entretanto seu descarte ainda é um grande problema. Os materiais poliméricos como polietileno de alta densidade (PEAD), são termoplásticos amplamente utilizados e consumidos como embalagem de materiais (garrafas, recipientes, filmes, etc.) e estão disponíveis em grandes quantidades a partir do descarte doméstico, gerando muitos resíduos plásticos pós-consumo, em especial, no setor de embalagens (JASSIM, 2017; TANAKA *et al.*, 2018).

Os polímeros sintéticos convencionais possuem muitas propriedades interessantes, são leves, resistentes, produzidos a baixo custo e facilmente moldáveis, porém, esses materiais levam em média 100 anos para serem degradados, aumentando assim a quantidade de lixo plástico descartado no meio ambiente. Nesse sentido, estão sendo buscadas alternativas para o desenvolvimento de novos materiais que causem baixo impacto ambiental, tais como a produção de materiais compósitos a partir de polímeros reciclados e fibras vegetais (CESTARI *et al.*, 2018; COELHO *et al.*, 2020; VÄISÄNEN *et al.*, 2017; ELFALEH *et al.*, 2023).

As fibras naturais são adicionadas a matriz polimérica visando melhorar suas propriedades e reduzir custos da composição polimérica e/ou a geração de efluentes. A utilização das fibras vegetais como reforço em comparação as cargas inorgânicas, possuem muitas vantagens, tais como: obtenção de materiais de baixa densidade, menor abrasão durante o processamento, altos níveis de preenchimento que resultam em aumento na rigidez, elevado módulo específico e aumento na durabilidade. Além disso, as fibras naturais são biodegradáveis, renováveis, de grande disponibilidade, baixo custo, podem ser incineradas e facilmente modificadas por agentes químicos (FURTADO *et al.*, 2020; GOWDA *et al.*, 2018).

Dentre as fibras vegetais utilizadas como reforço em compósitos uma das mais citadas na literatura é o sisal (*Agave Sisalana*). O sisal é uma fibra leve, que apresenta alto módulo de elasticidade, alta resistência específica, resistência à abrasão e baixo custo. Entre outras vantagens do sisal podem-se citar a facilidade de modificação superficial, sua abundância no Brasil, facilidade de cultivo e boas propriedades como isolante térmico e acústico (CAMPOS *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2011; NAVEEN *et al.*, 2018).

A argila bentonita é atualmente utilizada como agente compatibilizante interfacial em misturas de polímeros imiscíveis por melhorar propriedades mecânicas, de barreira, óptica, elétrica (TANAKA *et al.*, 2018), reduzindo a permeabilidade em relação à matriz polimérica causada pela presença de camadas esfoliadas de argilas levando à possibilidade de novas aplicações ou mesmo à redução de espessura objetivando redução de custo econômico e ambiental do produto (MORALES, 2010).

Diante deste contexto, o presente trabalho visou produzir e caracterizar compósitos híbridos de PEAD reciclado, fibras de sisal e argila bentonita.

## **1 OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho teve como objetivo produzir compósitos híbridos de matriz polimérica reciclada (PEAD), argila bentonita e fibras de sisal em diferentes tamanhos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Beneficiar a fibra de sisal e realizar a separação por tamanhos;
- Processar os materiais compósitos híbridos utilizando o PEAD reciclado, na proporção 70% de PEAD, 10% de argila bentonita e 20% sisal;
- Caracterizar os compósitos obtidos por técnicas físicas, mecânicas e termomecânicas para evidenciar seu potencial de utilização.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

#### 2.1.1 Consumo e Reciclagem de Termoplásticos

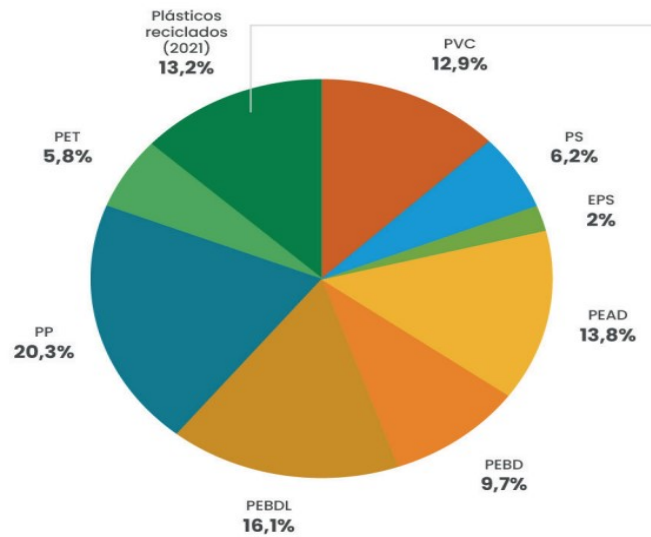
De acordo com o relatório anual do Fundo Mundial para a Natureza (WWF) do ano 2019, constatou-se que aproximadamente 37% de todo o lixo plástico mundial não está sendo tratado de forma eficiente, de modo que há uma preocupação eminente com a má gestão desses resíduos plásticos, sendo provável que esses resíduos virem poluição (WIT, 2019).

Com o constante crescimento do uso do plástico, a emissão de gases do efeito estufa será responsável por 15% de toda produção anual de carbono no mundo. Os primeiros relatos de contaminação ambiental por plásticos datam por volta de 1960, quando foram encontradas carcaças de aves marinhas contendo pedaços de plástico na costa da Nova Zelândia. Mais de 260 espécies distintas já foram encontradas engasgadas, sufocadas, presas e imobilizadas por resíduos plásticos, tais resíduos também foram encontrados em estômagos de outros animais. Entre as espécies encontram-se invertebrados, aves marinhas, peixes, mamíferos e tartarugas (DIAS, 2016).

No ano de 2021, no mundo todo foram produzidos 390,7 milhões de toneladas de plástico, com o Brasil retendo 2% deste número. Tais dados trazem uma preocupação crescente com a destinação desse material após seu ciclo de vida, principalmente porque uma boa parte desses materiais possuem um ciclo de vida curto (ABIPLAST, 2023).

Conforme o anuário de 2022 elaborado pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), e também ilustrado na Figura 1, de todo o volume de plástico produzido no Brasil, apenas o PEAD retém 13,8% da produção, conseqüentemente gerando muitos resíduos deste tipo de plástico. Deste modo, acaba sendo visado a reciclagem do mesmo e suas futuras aplicações (ABIPLAST, 2023; BHUIYAN *et al.*, 2023; KILIÇ *et al.*, 2024; TESFAW *et al.*, 2022).

Figura 1 - Resinas termoplásticas consumidas no Brasil em 2022 (%).



Fonte: ABIPLAST, 2023.

A reciclagem dessa classe de materiais é uma questão ambiental muito importante, pois são resíduos que levam muitos anos para se decompor. O PEAD e o PET podem levar até 200 anos e o seu descarte inadequado é uma grande ameaça para o meio ambiente. Além disso, a reciclagem de plásticos pode reduzir os custos de produção economizando recursos como energia e transporte. Por isso muitas aplicações distintas estão sendo estudadas a todo tempo, uma muito interessante tem sido para indústrias eletrônicas. Os chamados plásticos tecnológicos podem ser usados em produtos elétricos e eletrônicos. Mas para isso é necessário utilizar um retardante de chama eficaz que atualmente é caro e causa perda de propriedades mecânicas, sendo essa a maior dificuldade para sua aplicação (RONKAY *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2014).

Segundo a Sociedade Americana de Ensaio e Materiais (ASTM), os tipos de reciclagem de materiais poliméricos englobam a divisão de reciclagem primária, reciclagem secundária, reciclagem terciária e reciclagem quaternária (FRAGA, 2014). E elas estão delimitadas abaixo, segundo SPINACÉ e PAOLI (2005, p.66):

**Reciclagem primária:** consiste na conversão dos resíduos poliméricos industriais por métodos de processamento padrão em resíduos gerados no processo produtivo da própria empresa; por exemplo, aparas que são novamente introduzidas no processamento. **Reciclagem secundária:** conversão dos resíduos poliméricos provenientes dos resíduos sólidos urbanos por um processo ou uma combinação de processos em produtos que tenham menor exigência do que o produto obtido com polímero virgem, por exemplo, reciclagem de embalagens de PP para obtenção de

sacos de lixo. **Reciclagem terciária:** processo tecnológico de produção de insumos químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos. **Reciclagem quaternária:** processo tecnológico de recuperação de energia de resíduos poliméricos por incineração controlada.

A primeira e segunda classificação se referem à reciclagem mecânica, enquanto a terceira se refere a reciclagem química e, a quarta remete a reciclagem energética.

Dentre os diversos tipos de polietileno desenvolvidos com o avanço dos anos e tecnologias, está o polietileno de alta densidade, representado pela sigla PEAD (ou HDPE, proveniente de *high density polyethylene*, seu nome em inglês). Ele é um material versátil e utilizado para produzir produtos para setores como embalagens, tubulações, equipamentos esportivos, brinquedos, componentes automotivos, etc (PEACOCK, 2000; DUARTE-POVEDA *et al.*, 2019; BORBA *et al.*, 2024).

### 2.1.2 Propriedades do PEAD

O PEAD é um importante termoplástico semicristalino com uma vasta gama de aplicações devido à sua combinação atrativa de alta processabilidade, boas propriedades mecânicas, excelente biocompatibilidade, boa resistência química, reciclabilidade e baixo custo. Geralmente presentes em brinquedos, garrafas de produtos de limpeza e de higiene e vários itens de utilidades domésticas (SAVINI, 2020; BORBA *et al.*, 2024).

A linearidade das cadeias e, conseqüentemente, a maior densidade do PEAD faz com que a orientação, o alinhamento e o empacotamento das cadeias sejam mais eficientes do que as de um polímero mais ramificado, como é o caso do PEBD. As forças intermoleculares de Van der Waals podem agir mais intensamente, e, como conseqüência, a cristalinidade é maior em relação ao PEBD, elevando a sua temperatura de fusão. Com relação às propriedades elétricas estas são pouco afetadas pela densidade e pelo peso molecular do polímero, ao contrário das propriedades mecânicas que sofrem uma grande influência tanto do peso molecular, como também do teor de ramificações, da estrutura morfológica e da orientação molecular. A rigidez e a resistência a tração aumentam caso aumentem a densidade e o peso molecular, assim como a viscosidade e a contração também aumentam com o aumento da densidade e do peso molecular (PEACOCK, 2000).

Para a resistência ao impacto, o aumento da densidade e o peso molecular alto têm efeitos contrários nessa propriedade, o aumento da densidade causa uma diminuição na resistência ao impacto e o aumento do peso molecular causa um aumento na resistência ao impacto. A orientação das cadeias poliméricas exerce um forte efeito sobre as propriedades mecânicas do polímero, materiais fabricados com PEAD altamente orientado são aproximadamente dez vezes mais resistentes do que os fabricados a partir do polímero não orientado, pois a orientação aumenta o empacotamento das cadeias e conseqüentemente aumenta a rigidez do polímero (COUTINHO, 2003; MACHINI, 2006).

### 2.1.3 Uso Industrial

A natureza linear do PEAD, permite o desenvolvimento de grau de cristalinidade, maior rigidez e menor permeabilidade, esta combinação o torna adequado para muitas aplicações, tais como garrafas de detergente, baldes, tambores e tanques de armazenamento de produto químico. Sua baixa permeabilidade, resistência a corrosão são atributos desejáveis para tubos de água, esgotos e transporte de gás natural. Pelo processo de injeção, o PEAD é utilizado para a confecção de bandejas para pintura, banheiras infantis, brinquedos, contagotas para bebidas, jarros d'água, potes para alimentos, assentos sanitários, bandejas, tampas para garrafas e potes, engradados, bóias para raias de piscina, caixas d'água, entre outros. Na extrusão a sopro, o PEAD é utilizado para a confecção de bombonas, tanques e tambores de 60 a 250 litros, nestas aplicações são exigidas principalmente resistência à queda, ao empilhamento e a produtos químicos. No processo de extrusão é aplicado em isolamento de fios telefônicos, sacos para congelados, revestimento de tubulações metálicas, barbantes de costura, redes para embalagem de frutas, fitas decorativas, sacos para lixo e sacolas de supermercados (PEACOCK, 2000; NAPOLI, 2022).

O desenvolvimento de novas tecnologias envolvendo o PEAD pode resultar em materiais avançados, com propriedades superiores ao polímero puro, favorecendo a expansão de seu uso e a competição com outros polímeros de maior valor agregado. A Figura 2 mostra exemplos de aplicações do PEAD.

Figura 2 - Exemplos de aplicações do PEAD.



Fonte: BMIMACHINES, 2022.

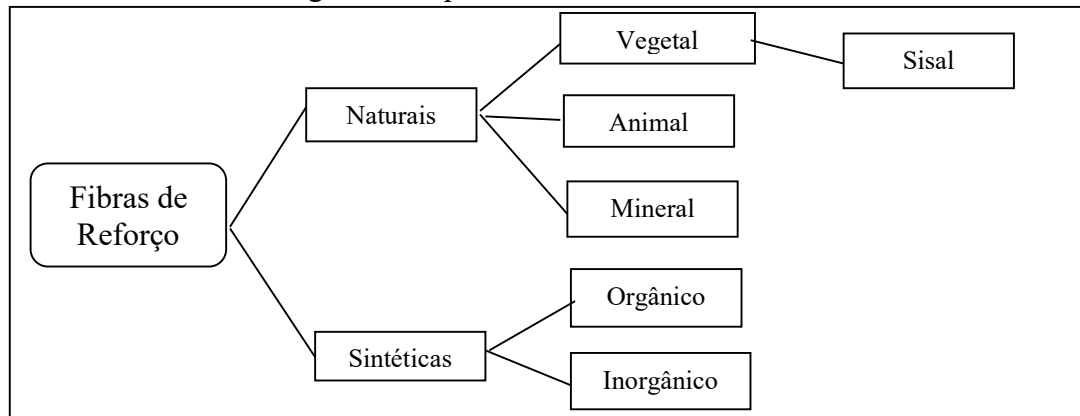
## 2.2 Fibras

Muitas pesquisas acadêmicas e desenvolvimento industrial exploram novas maneiras de criar produtos ecológicos e materiais mais amigáveis ao meio ambiente, para uma variedade de aplicações. As fibras podem ser classificadas em dois grupos principais: naturais e sintéticas. As fibras naturais oferecem o potencial para fornecer maior valor agregado, sustentabilidade, renovabilidade e custos mais baixos, especialmente na indústria automotiva (BISMARCK *et al.*, 2006).

### 2.2.1 Fibras Naturais

Fibras de reforço pertencem a duas grandes famílias, as fibras sintéticas e naturais, dentro destas famílias é possível subdividi-los novamente, como visto na Figura 3. As fibras sintéticas apresentam uma excelente relação peso/resistência, quando comparado com elementos metálicos. De acordo com PICKERING *et al.*, (2016), das fibras naturais, as de origem vegetal são mais interessantes devido a sua baixa toxicidade e boa relação peso por resistência. As fibras animais apresentam propriedades mecânicas mais baixas que as encontradas nas fibras vegetais. As fibras minerais, em sua maioria, foram banidas de muitos países por serem cancerígenas.

Figura 3 - Tipos de fibras, com foco no sisal.



Fonte: Autor, 2024.

### 2.2.2 Fibras Vegetais

Segundo SALEM (2010) “as fibras de origem vegetal são essencialmente constituídas de celulose, a qual se encontra sempre na natureza em combinação com outras substâncias, sendo a mais comum a lignina”, outros compostos encontrados são a hemicelulose, pectinas, proteínas, gorduras, ceras, óleos e pigmentos (IMMICH *et al.*, 2022).

De acordo com CARVALHO e CAVALCANTI (2006), as fibras vegetais são classificadas em:

- a) Fibras de gramínea – ex: bambu, bagaço de cana-de-açúcar, junco;
- b) Fibras de folhas – ex: abacá, abacaxi, sisal, banana;
- c) Fibras de caule – ex: juta, rami, linho;
- d) Fibras de fruto - ex: coco;
- e) Fibras de semente - ex: algodão, sumaúma;
- f) Fibras de raiz – ex: zacatão;
- g) Fibras de madeira – ex: eucalipto, pinho.

As fibras vegetais, por serem compostas principalmente de celulose, são também chamadas de fibras celulósicas; sendo a lignina um componente secundário, mas essencial, o termo lignocelulósicas é também utilizado. As propriedades apresentadas pelas fibras vegetais são dependentes da idade da planta, tipo de solo, condições climáticas, do local e das condições de processamento, bem como de sua estrutura e composição química (CARVALHO, 1997; SMOLE, *et al.*, 2013). No entanto, em geral, as fibras vegetais

originadas do caule de suas plantas tendem a exibir melhores propriedades mecânicas (CAMPILHO, 2015).

Tradicionalmente, estas fibras são utilizadas em cordas, produtos têxteis e produtos artesanais, ou seja, em aplicações com baixo valor agregado. O conjunto de propriedades mecânicas destas fibras, no entanto, permite o seu uso como elemento de reforço em matrizes poliméricas para gerar compósitos que podem ser empregados em outros setores como no automobilístico e na construção civil, expandindo o escopo de utilização e o valor agregado das fibras vegetais (BURGUEÑO *et al.*, 2004).

As fibras vegetais apresentam como vantagens o baixo custo, baixa densidade, são recursos renováveis e biodegradáveis, possuem baixa abrasividade e apresentam boa resistência à quebra durante o processamento. Além disso, o módulo elástico e a resistência destas fibras as tornam viáveis para reforço em matrizes poliméricas. As desvantagens observadas no uso das fibras vegetais em compósitos poliméricos estão relacionadas à elevada suscetibilidade ao ataque por fungos, baixa resistência em meios alcalino e ácido e à alta absorção de água. A absorção de umidade pode resultar em inchamento das fibras e o interesse na estabilidade dimensional dos reforços em compósitos não pode ser ignorado. No compósito, a absorção de umidade é minimizada devido ao recobrimento da fibra pelo polímero (ROWELL *et al.*, 1996; CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

As fibras naturais são importantes para o Brasil, sendo ele um dos grandes produtores deste tipo de fibra do mundo. Dentre as fibras naturais mais comuns no mercado podemos citar a juta, rami, sisal e curauá. Estas fibras apresentam boa relação de resistência, peso e preço (MARINELLI *et al.*, 2008).

### 2.2.3 Fibras de Sisal

O sisal (*Agave Sisalana*) é uma planta oriunda do México e que tem vasta aplicação, principalmente no que se refere ao uso de suas fibras (Figura 4). Chegou ao Brasil no início do século XX através do estado da Bahia. É considerada a fibra dura mais comercializada no mundo, sendo o Brasil um dos maiores exportadores. Além disso, é responsável por manter a economia local de diversos lugares devido ao processo de beneficiamento, que se inicia desde o cultivo da planta e se estende até a comercialização da fibra (MARTIN *et al.*, 2009; ZHOU

*et al.*, 2014). O Brasil é o maior produtor mundial de sisal, sendo responsável por 47% da fibra disponibilizada no mercado anualmente (FAO, 2022).

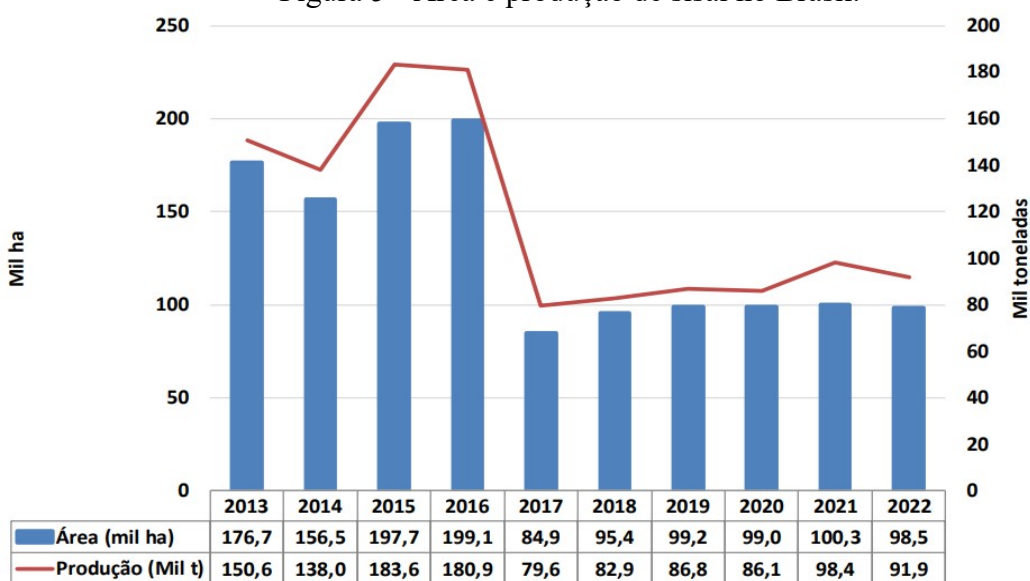
Figura 4 - Espécie de sisal (*Agave Sisalana*) da qual se extraem as fibras.



Fonte: EMBRAPA, 2016.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2023), a produção de sisal em 2022 foi de 91,9 mil toneladas (Figura 5). A Bahia tem amplo domínio na produção de sisal no país, concentrando cerca de 95,6% da produção nacional em 2022, seguido pela Paraíba com 4,3% e Ceará com 0,1%.

Figura 5 - Área e produção de sisal no Brasil.



Fonte: IBGE, 2023.



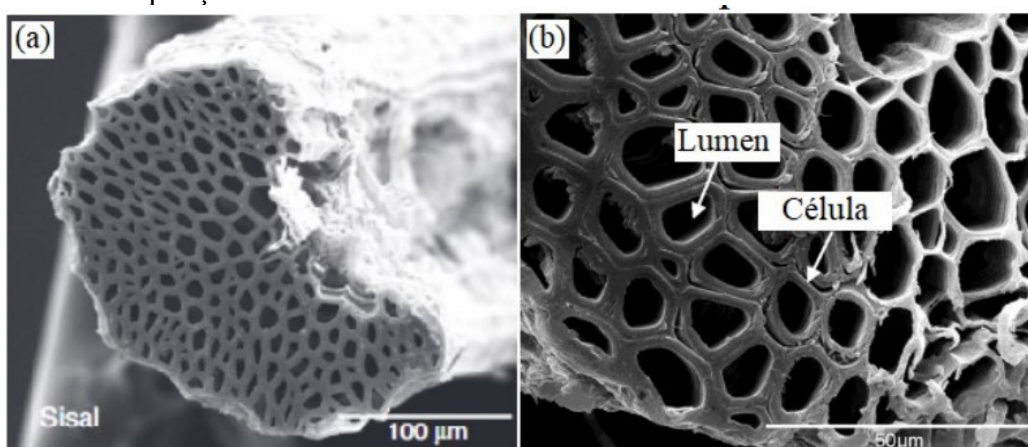
Em 2016, o valor mínimo que o Governo Federal estabelecia era de R\$ 1,73/kg. Atualmente, de acordo com os dados obtidos em consulta no site do Ministério da Agricultura e Pecuária, o valor mínimo da fibra bruta passou a ser R\$ 3,36/kg. Esse valor foi estabelecido em portaria regulamentada pelo próprio Ministério, e vigoraram entre julho de 2023 e julho de 2024 (BRASIL, 2023).

Dentre as fibras vegetais, o uso do sisal é particularmente interessante já que seus compósitos possuem elevada resistência ao impacto além de moderada à tração e em flexão quando comparados a compósitos reforçados por outras fibras vegetais. O sisal é uma das fibras vegetais mais utilizadas e é responsável por metade da produção total de fibras têxteis.

As fibras de sisal, assim como as fibras vegetais em geral, constituem-se, basicamente, de celulose, hemicelulose e lignina sendo, por isso, chamadas de fibras lignocelulósicas. Esses constituintes, por sua vez, são polímeros naturais de constituição e propriedades similares às dos plásticos sintéticos (ALVAREZ & VÁZQUEZ, 2006).

As fibras naturais apresentam morfologia semelhante, mas diferem por alguns fatores como a área interna dos lúmens, o número de lúmens, o número e tamanho das fibras celulares e área transversal. Com isso cada fibra possui sua morfologia característica (FIDELIS, 2013). A Figura 6 mostra as imagens da fibra de sisal obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

Figura 6 - Microestrutura da fibra de sisal mostrando (a) seção transversal e (b) ampliação contendo os detalhes dos lumen e das células.

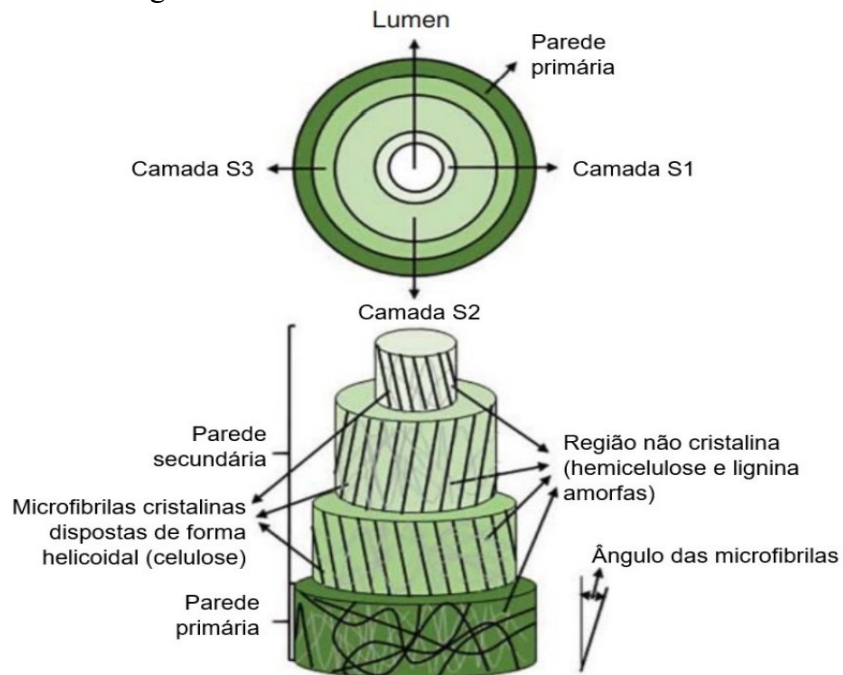


Fonte: Adaptado de FIDELIS, 2013.

A composição química das fibras vegetais é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina; e em menor quantidade por pectina, amido, extrativos, proteínas, sais inorgânicos e água de constituição (GHOLAMPOUR, 2020).

Na estrutura das fibras vegetais, existe uma parede celular primária e várias camadas de paredes celulares secundárias promovem o reforço estrutural da planta. A parede celular primária é fina e circunda as paredes secundárias, que, por sua vez, está composta por três camadas: externa (S1), intermediária (S2) e interna (S3), como indicado na Figura 7 (BOURMAUD *et al.*, 2013; CÉLINO *et al.*, 2014; GHOLAMPOUR, 2020; THOMAS *et al.*, 2011). A Figura 7 apresenta uma estrutura típica das fibras naturais.

Figura 7 - Estrutura das fibras naturais.



Fonte: Adaptado de PARAMESWARANPILLAI *et al.*, 2021.

A maior utilização do sisal, até a década de 60, era quase que exclusivamente na fabricação de cordas, barbantes grossos, redes de dormir, chapéus, tapetes, capachos e objetos de artesanato. A partir de então, as fibras vegetais, como o sisal, vêm sendo pesquisadas visando sua utilização em aplicações avançadas como em compósitos, principalmente pela indústria automobilística (QUIRINO, 1997). O sisal pode ser utilizado de maneira bastante satisfatória para o reforço de peças plásticas com diferentes aplicações na indústria automobilística. Várias indústrias fornecedoras de peças plásticas para as montadoras de

automóveis, desde então, já vêm utilizando fibras vegetais em suas formulações. As aplicações destas fibras vegetais destacam-se nas seguintes peças dos automóveis: revestimento interno da cabina (teto, parede traseira e portas), apoio de cabeça e encosto de banco, para-sol externo, painel de instrumentos, bolsa de ferramentas, encapsulamento de cabina/motor e para-choque (SILVA e BELTRÃO, 1999; NWABUNMA e KYU, 2007).

A Alemanha é líder no uso de compósitos de fibras naturais. Os fabricantes de automóveis alemães Mercedes, BMW, Audi e Volkswagen foram os pioneiros em utilizar compósitos de fibra natural em suas linhas de produção. O primeiro exemplo comercial é o painel interno da porta do Mercedes-Benz 1999 S-Class, fabricado na Alemanha, com 35% de elastômero Baypreg F semi-rígido (PUR) da Bayer e 65% de uma mistura de linho, cânhamo e sisal (SANJAY *et al.*, 2016).

Portanto, fica evidenciado que o desenvolvimento de novos materiais compósitos com propriedades avançadas para aplicação neste segmento industrial é amplamente justificável, uma vez que vários produtos já estão disponíveis no mercado de peças para a indústria automobilística.

Dentre as propriedades mais interessantes para a aplicação de fibras naturais nos materiais compósitos está a densidade, o limite de resistência à tração e o módulo de elasticidade. A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas e mecânicas típicas de fibras naturais e sintéticas aplicadas em materiais compósitos.

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas típicas de fibras naturais e sintéticas.

Fibra	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Comprimento (mm)	Diâmetro (µm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Tração (GPa)	Módulo Específico (aproxim.)
<i>E-glass</i>	2,5-2,59	–	<17	2000-3500	70-76	29
Abacá	1,5	–	–	400-980	6,2-20	9
Alfa	0,89	–	–	35	22	25
Bagaço	1,25	10-300	10-34	222-290	17-27,1	18
Bambu	0,6-1,1	1,5-4	25-40	140-800	11-32	25
Rami	1,0-1,55	900-1200	20-80	400-1000	24,5-128	60
Sisal	1,33-1,5	900	8-200	363-700	9,0-38	17

Fonte: Adaptado de CAMPILHO, 2015

### 2.3 Argila Bentonita

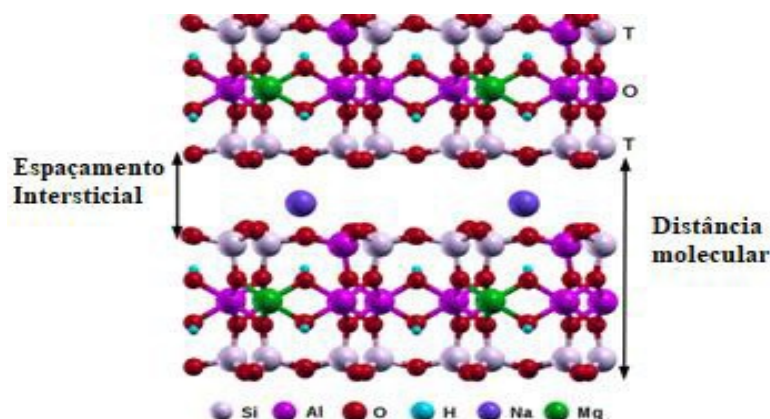
Segundo BRANCO (2014), a argila é um tipo de mineral sedimentar argiloso, de um complexo grupo com pelo menos 41 silicatos, principalmente alumínio, podendo conter magnésio e ferro. Por conta de tais características e composição, a argila vem sendo base de estudo em muitos projetos, sendo utilizada no campo da medicina (SANTOS, 2009), setor de construção civil (MORAVIA, 2004), entre outros.

As argilas são definidas como material sedimentar constituído por granulações finas, e quando é umedecido com água, obtém uma plasticidade que se designa então o nome de “argila” (DÍAZ, 2005; DEBACHER e MELLO, 2004). São subdivididas em argilas primárias e secundárias. As primárias são encontradas na forma de pó, decorrentes da diminuição da água do solo, já as argilas secundárias, encontram-se na forma de lama (água mais argila), originadas através do transporte de chuvas e ventos (DORNELLAS e MARTINS, 2009). Os principais elementos encontrados nas argilas são: Oxigênio, Sílicio, Alumínio, Ferro, Magnésio, Potássio e Sódio.

As argilas também podem ser definidas como, materiais naturais resultado do intemperismo, da ação hidrotérmica ou que se depositaram como sedimentos fluviais, marinhos, dentre outros (SANTOS, 1989). É bem conhecido que as argilas possuem um campo industrial plenamente estabelecido devido à vantagens como, por exemplo, serem abundantes, de baixo custo e de uso ambientalmente amigável. Neste contexto, pode-se destacar as bentonitas, que são rochas encontradas em depósito Ordoviciano, mas que geralmente sucedem de depósitos cretáceos e terciários (SANTOS, 1989). A sua denominação deu-se em decorrência do seu primeiro registro em Fort Benton, Montana (BARBIERI *et al.*, 2022).

A argila bentonita é uma argila com alto teor de montmorilonita (MMT), produzida a partir do processo de desvitrificação. Este silicato apresenta uma alta capacidade calorífica e age como uma barreira de impermeabilização, devido principalmente, à sua estrutura, mostrada na Figura 8.

Figura 8 - Conformação estrutural da montmorilonita.



Fonte: Adaptado de FONSECA, 2016.

A bentonita possui diversas utilidades, como o uso medicinal para tratamento de pele, fortalecimento do sistema imunológico e no tratamento de psoríase. No setor industrial há uma série de usos para este tipo de argila, como o uso no aditivo de concreto, como agente tixotrópico em perfurações de poços de petróleo (LUZ, 2008).

Por conta da organização estrutural, a bentonita apresenta hidrofobia, tal rejeição se dá por conta de uma expansão no volume na presença de água, levando a formação de géis tixotrópicos. Dependendo de qual cátion está mais presente na bentonita pode-se haver uma ruptura das camadas do cristal, levando a uma separação em células unitárias, esse efeito se dá com maior intensidade na presença do sódio (LUZ, 2008).

Segundo PAIVA *et al.* (2008), a argila bentonita é proveniente das alterações e cinzas vulcânicas ácidas, com granulometria muito fina que geralmente aumenta o volume substancial em meio aquoso. É muito utilizado atualmente na indústria, entretanto seus primeiros usos foram como lama de sondagem nos furos nas indústrias de petróleo. A seguir estão as principais propriedades e características das argilas bentonitas:

- Moderada carga superficial;
- Elevada capacidade de troca de cátions – 80 a 150 meq/100g;
- Elevada área específica – 800 m<sup>2</sup>/g;
- Elevada capacidade de inchamento em meio aquoso – até 20x do seu volume inicial;
- Propriedades de intercalação de outros componentes entre suas camadas;
- Resistência à temperatura e solventes;
- Baixo custo se tiver origem natural.

A argila bentonita é uma das argilas mais conhecidas no ramo cosmético e tem sido cada vez mais empregada em virtude das diferentes propriedades que a caracterizam. Sua gama de utilização é ampla. Ela apresenta também uma significativa capacidade de absorver e remover toxinas, metais pesados e impurezas, ao mesmo tempo que transfere para a pele e para os organismos diversos minerais e nutrientes benéficos (RAUTUREAU, GOMES, LIEWIG & KATOUZIAN-SAFADI, 2017).

As explicações para o reforço provocado pela argila modificada organicamente (organofílicas) são baseadas nas propriedades interfaciais e na mobilidade restrita das cadeias poliméricas em contato com as lamelas. A melhoria nas propriedades de resistência à tração, compressão, fratura e o aumento do módulo de Young tem sido relacionado com a dispersão; o grau de delaminação; o fator de forma da argila; a densidade de carga lamelar e as interações interfaciais polímero-argila (KORNMANN, 1999). Sendo assim, fica evidenciado que a incorporação de cargas minerais além de representar uma alternativa a mais, para reduzir o custo dos materiais, também melhora as suas propriedades, possibilitando assim a obtenção de compósitos mais competitivos no mercado.

## **2.4 Materiais compósitos**

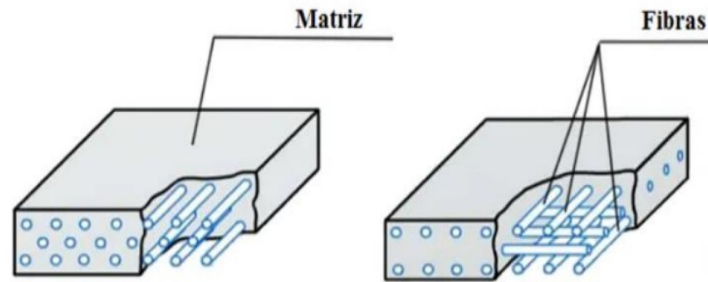
Os compósitos, por definição, são a união de dois ou mais materiais com o intuito de obter um produto final de melhor qualidade. JAUHARIA *et al.* (2015), referem que compósitos são materiais com dois ou mais elementos diferentes, tanto fisicamente quanto quimicamente, compondo uma estrutura macro, onde uma das partes age como agente de união e transição das solicitações para os componentes reforço. Essa união confere ao produto final propriedades mecânicas superiores as encontradas nos materiais que lhe constituem.

De acordo com CALLISTER (2008), muitos materiais compósitos são formados por apenas duas fases: uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve outra fase, com frequência chamada de fase dispersa. A matriz possui várias funções, a saber: (a) interligar a fibra; (b) atuar como meio transmissor e distribuidor das tensões externas aplicadas para as fibras; (c) proteger as fibras individuais contra danos superficiais.

A matriz pode ser polimérica, metálica ou cerâmica. A maioria dos materiais compósitos foi criada para que se combine determinadas características mecânicas, tais como a rigidez e a tenacidade (CALLISTER 2008).

Na Figura 9 encontra-se representada a matriz e o reforço (fibras) de um material compósito.

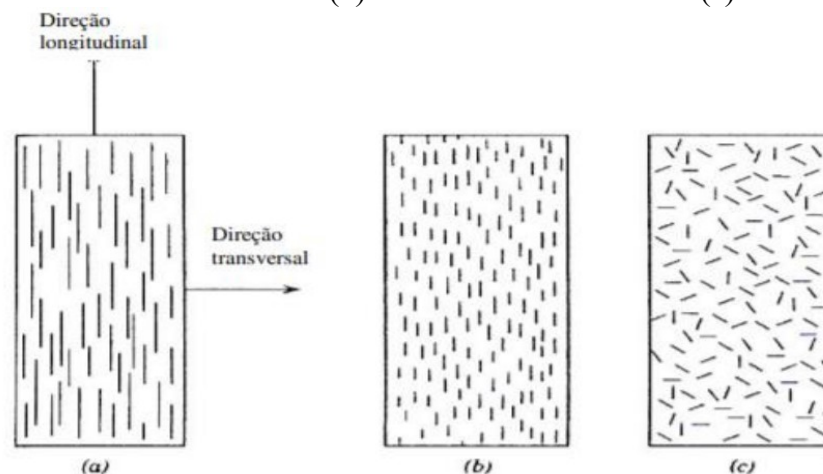
Figura 9 - Representação de um material compósito.



Fonte: Adaptado de BISCAINHO, 2017.

As fibras podem estar orientadas na matriz de uma maneira alinhada ou totalmente aleatória. Esse arranjo, juntamente com a concentração e distribuição das fibras influenciam significativamente nas propriedades dos compósitos. É observado que quando a distribuição das fibras é uniforme, melhores propriedades são atingidas (CALLISTER, 2008). A Figura 10 é uma representação de compósitos reforçados com fibras.

Figura 10 - Orientações de fibras nos compósitos, contínuas e alinhadas (a), descontínuas e alinhadas (b) e descontínuas aleatórias (c).



Fonte: CALLISTER, 2008.

As matrizes poliméricas dividem-se em dois grupos: as termoplásticas e as termoendurecíveis. Ao contrário dos termoendurecíveis, os polímeros termoplásticos amolecem quando aquecidos. O aumento da temperatura quebra temporariamente as ligações intermoleculares, o que confere mobilidade às moléculas, e estas ao arrefecerem estabelecem novas ligações químicas adquirindo rigidez. Para além de resistirem a temperaturas mais elevadas do que os polímeros termoendurecíveis, os polímeros termoplásticos geralmente são mais tenazes (BISCAINHO, 2017).

As fibras constituem uma classe importante de reforço uma vez que proporcionam o aumento da resistência da matriz, e conseqüentemente influenciam e destacam as propriedades pretendidas das duas fases. Contudo, estas podem apresentar um desempenho reduzido devido a vários fatores. A performance do compósito reforçado com fibras é avaliada pelo comprimento, forma, orientação, e composição das fibras bem como pelas propriedades mecânicas da matriz. O arranjo das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e a sua distribuição influenciam significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras.

Os reforços são adicionados para controlar a maioria das propriedades físicas e mecânicas do compósito. As principais funções em um compósito são: carregar a carga; fornecer rigidez, resistência, estabilidade térmica e outras propriedades estruturais nos compósitos; fornecer condutividade ou isolamento elétrico. Além de aumentar o módulo de elasticidade e reduzir o coeficiente de expansão térmica. A seleção do reforço leva sempre em conta aspectos que variam desde o custo desses materiais até o desempenho pretendido e a técnica de fabricação empregada (MARINUCCI, 2011).

#### 2.4.1 Processos de fabricação de compósitos

Em relação ao processamento de materiais compósitos, uma variedade de técnicas é empregada dependendo da composição, propriedades e da forma desejada. Dentre elas estão processos de moldagem manual, aspersão, moldagem à vácuo, compressão, pultrusão, transferência, injeção, extrusão, centrifugação, dentre outros (NAGAVALLY, 2016; DIVYA, *et al.*, 2016).

Em se tratando de compósitos de matriz termoplástica o processo de extrusão vem sendo o mais reportado em artigos científicos e utilizado industrialmente. As extrusoras



podem ser constituídas de uma ou múltiplas roscas (STEVENS e COVAS, 1995). As extrusoras de rosca única (mono-rosca) apresentam as vantagens de possuir baixo custo de instalação e manutenção do equipamento e operação simples. São adequadas para trabalhos mais simples como: fusão, plastificação e descarregamento do fundido para a produção de cabos, chapas, mangueiras, filmes, tubos, etc. A extrusora dupla-rosca é mais adequada para a produção de materiais multicomponentes tais como blendas e compósitos devido ao maior cisalhamento gerado e por promover uma melhor mistura entre os componentes presentes na formulação. A Figura 11 mostra o exemplo de uma extrusora de dupla rosca.

Figura 11 - Extrusora de dupla rosca.



Fonte: REOTERM, 2024.

O processo de extrusão consiste basicamente numa conversão de matéria-prima apropriada em um determinado produto com produção de forma semi-contínua onde o material é forçado através de uma matriz adquirindo assim forma pré-determinada sob condições controladas. A extrusora é um equipamento capaz de fornecer pressão contínua e uniforme ao material extrudado e também pode possuir várias zonas de aquecimento (MULINARI *et al.*, 2009; GUIMARÃES *et al.*, 2010).

#### 2.4.2 Aplicação de compósitos

Os materiais compósitos são utilizados em uma gama de aplicações, em especial podemos citar as indústrias navais, aeronáuticas, bélicas, automotivas, civil e esportes,

tornando-se parte de nossas vidas. Das indústrias citadas a que mais tem investido nessa tecnologia é a aeronáutica, seguida da automotiva (GIBSON, 2011). A indústria aeronáutica depende desses materiais para desenvolver veículos mais eficientes e eficazes. A necessidade de um veículo leve e com superfícies lisas (a fim de se reduzir arrasto) empurrou o desenvolvimento e a utilização desses materiais, em especial pela aviação militar. O uso inicial se limitou a superfícies pequenas e não estruturais, mas com o avanço da tecnologia de materiais e anos de estudo os compósitos já compõem mais de 50% de aeronaves comerciais (GIBSON, 2011; GIURGIUTIU, 2022).

Os compósitos também têm sido amplamente utilizados em equipamentos esportivos. Segundo PICKERING (2016), em competições de alto desempenho utilizam-se os compósitos em:

- Equipamentos de proteção - Como capacetes, joelheiras, ombreiras e caneleiras.
- Equipamentos de competição – Como barcos a vela e motorizados, bicicletas leves para corridas, skis, raquete de diversos esportes, tacos de golfe, tiro olímpico, varas para salto e etc.

Esses setores sempre buscaram materiais leves e duráveis. Mas nos últimos anos criou-se um movimento para materiais que também sejam renováveis ou recicláveis. Sendo assim o uso de novos compósitos com fibras naturais se faz de grande interesse para as indústrias do futuro (PICKERING, 2016).

Dentre os usos já citados, os compósitos têm grande aplicabilidade em todos os setores industriais. Eles já têm sido usados na indústria civil como elementos de reforço em estruturas de concreto e elemento de reparo, e na indústria automotiva como painéis internos e elementos não estruturais (PANTHAPULAKKAL *et al.*, 2005).

## **2.5 Compósitos termoplásticos reforçados com fibras de sisal**

Apesar dos polímeros termorrígidos possuírem uma gama maior de matrizes para compósitos, os termoplásticos são continuamente utilizados devido à maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto e maior tolerância a danos. Compósitos com matriz termoplástica de poliamidas ou polipropileno já vêm sendo utilizados há algum tempo no setor automobilístico. O interesse em obter matrizes termoplásticas de melhor desempenho

estrutural e térmico tem sido objeto de pesquisa no sentido também da busca de alternativas a esses materiais em uso corrente (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

CHOW *et al.* (2007) investigaram as características de absorção de água e o seu efeito nas propriedades de tração e impacto dos compósitos de polipropileno reforçados com fibras de sisal. Segundo o estudo dos autores, tanto o módulo de tração quanto a resistência à tração dos compósitos PP/Sisal diminuíram continuamente com o aumento do tempo de imersão em água. Já a resistência ao impacto Izod aumentou inicialmente com o tratamento de imersão. Depois de atingir a resistência máxima ao impacto, descobriu-se que a resistência ao impacto diminuiu com o aumento adicional no tempo de imersão.

CHOUDHURY (2008) investigou as propriedades mecânicas de tração, flexão e impacto de compósitos de PEAD reforçados com fibras de sisal em diferentes teores. Foi utilizado também um ionômero (Surlyn) como agente acoplador. De acordo com os resultados apresentados pelo estudo, conforme aumentou-se o teor de fibras (de 5% a 20% do peso do compósito), houve aproximadamente um aumento de 16% na resistência à tração e de 17% na resistência à flexão do compósito, e um aumento aproximado de 28% no módulo de elasticidade à tração e de 30% no módulo de elasticidade na flexão dos mesmos.

AHMAD e LUYT (2012) estudaram o PEAD, o Polietileno de Baixa Densidade - PEBD e o Polietileno Linear de Baixa Densidade - PELBD como matrizes de compósitos reforçados com fibras de sisal, sem tratamento e com a uso de peróxido de dicumila. O compósito de PEAD com as fibras de sisal tratadas obtiveram menores módulos de elasticidade, e resistência à tração foi menor do que no compósito com as fibras sem tratamento. Os autores relataram que o tratamento reduziu a cristalinidade do PEAD, o que influenciou negativamente na adesão entre a matriz e a fibra.

MOKHENA e LUYT (2014) utilizaram *nanowhiskers* de sisal (com comprimento de 197 nm e diâmetro de 12 nm) como material de reforço para o PEAD e o PEBD. Os nanocompósitos foram fabricados por moldagem em uma solução de tolueno, onde foram fundidos e prensados. Além disso, usou-se vinil-trietoxissilano na superfície dos *nanowhiskers* de sisal, a fim de melhorar a dispersibilidade e a compatibilidade dos mesmos entre a matriz. A presença dos *nanowhiskers* influenciou claramente o módulo de armazenamento do PEBD, o que não ocorreu com o PEAD. A cristalinidade dos polímeros no processo de manufatura foi muito dependente de suas morfologias. Dentre os resultados de ensaios mecânicos de tração, destaca-se uma maior deformação na ruptura no caso dos compósitos com PEAD.

HONG *et al.* (2015) utilizaram copolímeros graftizados de polietileno em compósitos de polietileno reciclado reforçados com fibras de sisal, a fim de melhorar a adesão interfacial

desses materiais. Ensaios mecânicos foram realizados pelos pesquisadores para verificar a influência desses compatibilizantes, nos quais foram constatados aumento de 153% na resistência à tração desses compósitos com 7% (por peso de PE) de compatibilizantes nos compósitos, e também um aumento de 65% na resistência à flexão dos mesmos com o uso de 9% (por peso de PE) de compatibilizantes.

PEREIRA *et al.* (2017) estudaram a resistência à tração e flexão de compósitos de matriz de policarbonato reforçado com fibra natural de sisal com proporção de 20 % em volume. E concluíram que o uso da fibra de sisal no compósito não apresentou desempenho satisfatório, apresentando degradação da fibra, além de surgimento de bolhas, ocasionando fragilidade nos corpos de prova.

OLIVEIRA FILHO *et al.* (2019) fizeram uma avaliação do comportamento mecânico de compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal descontínuas e orientadas aleatoriamente, nos comprimentos de 5, 10, 15 mm, com e sem tratamento químico. E observaram que o compósito reforçado com sisal (*in natura*) no comprimento de 10 mm apresentou maior resistência à tração, com aumento de 18,71 % em comparação à matriz pura. Ainda sobre o reforço de 10 mm, o compósito com tratamento térmico apresentou aumento de 11,12 % e 19,95 % da resistência à tração em relação ao *in natura* e à matriz plena, respectivamente.

MATEUS *et al.* (2020) analisaram a fibra de sisal como agente reforçador de compósitos preparados a partir de PEAD pós-consumo como matriz polimérica, na tentativa de agregar valor às fibras lignocelulósicas e ao PEAD reciclado. Os autores realizaram ensaios com o objetivo de avaliar o comportamento físico-mecânico, estrutural, térmico e morfológico dos compósitos sem e com compatibilizante. Com os resultados foi constatado que a presença do compatibilizante não altera a densidade dos materiais obtidos, porém provocou uma diminuição na Dureza e no MFI do compósito com maior teor de carga. O compósito com maior quantidade de fibra e na presença de compatibilizante mostrou menor valor de absorção de água e melhor estabilidade térmica. A análise de espectroscopia na região do infravermelho demonstrou a existência de interação física entre os componentes. Na microscopia eletrônica de varredura foi observado que a presença do compatibilizante melhorou a aderência fibra-matriz.

MORITA (2020), realizou um estudo sobre a incorporação de fibras de sisal em uma matriz de PEAD, para avaliar algumas propriedades mecânicas dos compósitos obtidos. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram que a incorporação de fibras de sisal na matriz de PEAD aumentou o módulo de elasticidade e conseqüentemente a rigidez do

material, sendo esse aumento muito mais evidenciado no compósito com 10% de fibra. Por outro lado, a tenacidade e o alongamento dos compósitos foram bem menores que o polímero puro. As resistências máximas à tração e ao impacto não sofreram variações consideráveis.

FARIA *et al.* (2023) produziram e caracterizaram compósitos a partir de PEAD reciclado e fibra de sisal. Os compósitos formulados pelos autores, foram avaliados por técnicas físicas, mecânica, estrutural, térmica e morfológica. Os resultados mostraram que a granulometria da fibra de sisal influenciou as propriedades físico-mecânicas, morfológicas e estruturais dos compósitos de PEAD reciclado. Houve uma redução na densidade e na cristalinidade dos compósitos obtidos. A superfície dos compósitos se tornaram menos rugosa. O MFI, Dureza e VICAT apresentaram um aumento em seus valores tendo o compósito PEAD/SI-125 o aumento mais pronunciado. A adição da fibra de sisal não foi relevante para melhorar a resistência ao impacto dos compósitos. Os resultados também mostraram que, a viabilidade para o uso da fibra de sisal como carga para o PEAD reciclado, em concentrações até 5% em massa de sisal, é favorável e positiva para a indústria de reciclagem plástico.

## **2.6 Compósitos termoplásticos reforçados com argila**

Um teor de argila de 2 a 10 % em compósitos, apresentam melhorias significativas como: resistência à tração, permeabilidade, resistência a solventes, melhores propriedades ópticas, juntamente com um aumento no módulo de flexão. Esse teor baixo de argila nos compósitos implica em contribuir para produzir componentes mais leves, fator que é importante para diversas aplicações, especialmente em transportes onde a eficiência de uso de combustível é bastante importante. Além disso, também são importantes para aplicações onde são admitidas pequenas perdas nas propriedades das matrizes, como a ductilidade e resistência ao impacto (FORNES, 2003; KUGEL, 2000).

BARBER *et al.* (2005) realizou um estudo com a preparação de nanocompósitos de ionômeros PET/montmorilonita modificada organicamente via extrusão. Foram utilizados dois tipos de argila, para realização deste estudo (Cloisite 10A e Cloisite 15A). Foi observado que a incorporação de grupos funcionais iônicos aumentou as interações entre a matriz de PET e argila, obtendo nanocompósitos com características esfoliadas. A morfologia do material obtido, foi correlacionada com as propriedades mecânicas. Foi visto que a

incorporação de argila reduziu o grau de cristalização e melhorou as propriedades mecânicas do sistema.

LEITE (2006), realizou um estudo com finalidade de avaliar o efeito da incorporação de dois tipos de bentonitas organofílicas, uma com o sal brometo de cetil trimetil amônio e uma outra comercialmente conhecida como Cloisite 30b em uma matriz de PET. Foi utilizada uma extrusora dupla rosca para realizar as misturas e foram adotadas concentrações entre 1% a 3%. Posteriormente, o material foi injetado para que pudesse ser realizado os testes necessários. Foi verificado que os microcompósitos obtidos com a argila Cloisite 30b e a matriz de PET em uma formulação de 3%, tiveram melhores resultados tênses quando comparada as outras formulações.

ALMEIDA (2010) desenvolveu um estudo que tinha como objetivo a elaboração e caracterização de um filme com materiais nanocompósitos, com matriz celulósica e reforço de diferentes MMT com nanopartículas de prata. Foi observado um material com estrutura intercalada, além de fornecer uma ação antimicrobiana contra *Escherichia coli*, *Salmonella* entérica e *Staphylococcus aureus*.

DUARTE (2019) investigou as interações entre os constituintes do compósito híbrido polietileno/fibra de linter/argila montmorilonita/PEg-MA, fazendo uso de caracterização por reometria de placas paralelas, FTIR e análise morfológica por MEV e MET. Os resultados da análise reológica revelaram incremento dos módulos de armazenamento e de perda, assim como da viscosidade complexa com a adição das cargas. A análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou a presença de um pigmento aglomerado no polietileno puro, este que teve forte influência na reologia do material. O MEV mostrou igualmente uma melhor superfície de adesão para compósitos com linter e PE-g-MA. Tanto a análise por DRX quanto por microscopia eletrônica de transmissão (MET), revelaram indícios de regiões de aglomeração e de esfoliação para o compósito com argila.

MATTOS (2020) estudou o efeito da argila bentonita modificada nas propriedades estruturais de nanocompósitos formados pela matriz polimérica de poliestireno, e preparados por intercalação ultrassônica via solução. Os resultados do seu estudo em relação ao teste de DRX, mostraram que houve um aumento no espaçamento basal entre a argila pura e seu estado com 75% de modificação, saltando de 1,29 nm para 2,13 nm. Nas propriedades mecânicas foram encontradas melhorias significativas em todos os testes, na comparação do polímero puro com os compósitos, em especial na tensão de ruptura, onde há um salto de 0,01 MPa do polímero puro para 76,71 MPa em PS/3% ArgB./10min/30% pot..

MACHADO *et al.* (2021) realizaram um estudo com a finalidade de avaliar o efeito da adição de diferentes teores de uma bentonita *in natura* (Bent) e bentonita organofílica (Bento) na matriz de polipropileno pós-consumo (PPpc), visando diminuir o impacto ambiental e agregar valor a esse novo material compósito. Os resultados desse estudo apontaram que, a adição de até 8% de Bent ou Bento na matriz de PPpc, aumentou a estabilidade térmica dos compósitos, sem alterar de forma significativa as propriedades de densidade, dureza e MFI. Os resultados obtidos em relação à análise termogravimétrica mostraram que, a elevada estabilidade térmica dos polímeros na presença de nanopartículas de argila pode ser devido ao efeito de barreira provocado pelas camadas esfoliadas da argila.

GONÇALVES (2021) elaborou um material compósito usando uma matriz polimérica termoplástica (polipropileno comercial) reforçada com o bagaço de malte de cevada e argila organofílica. O bagaço de malte, assim como a argila organofílica, foram adicionados em diferentes quantidades ao PP. O bagaço de malte foi caracterizado através de processos como MEV, TGA e Infravermelho. Os resultados dos experimentos do autor, permitiu concluir que o bagaço de malte exibe um caráter hidrofílico relevante. Concluiu-se também que o uso do bagaço de malte, sem quaisquer tratamentos químicos diretos, não permite que o resíduo desempenhe qualquer ação reforçante. Foi constatado que, um desempenho intermediário só é alcançado quando um teor reduzido de argila organofílica é adicionado. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) comprovou a falta de adesão relevante entre a carga de bagaço de malte e a matriz termoplástica.

SOUZA *et al.* (2022) realizaram um estudo que tinha o objetivo de desenvolver compósitos à base de polipropileno pós-consumo e bentonita (*in natura* e organofílica). Neste estudo dos autores, foram preparados compósitos pela incorporação de diferentes tipos e concentrações de bentonita em matriz de PP pós-consumo. Os resultados obtidos mostraram que a adição da carga inorgânica promove uma redução na dureza dos compósitos e torna o material mais frágil, e conseqüentemente, reduz a sua resistência ao impacto. Os resultados também mostraram que o polipropileno pós-consumo e a bentonita podem ser considerados para a produção de compósitos sustentáveis.

ZAMAN e KHAN (2022) sintetizaram nanocompósitos de PEBD/argila organofílica com polietileno oxidado como aditivo de agente de acoplamento e retardante de chamas. Os autores observaram um aumento de 22% na resistência a tração e 17% no módulo de elasticidade e uma redução de 30% no alongamento à ruptura ao adicionarem 5% de argila organofílica C20A na matriz de PEBD. Além disso, ao adicionarem o agente de acoplamento

foi possível melhorar a resistência à tração em mais de 15% e o módulo de elasticidade em 20%. O aprimoramento dessas propriedades é alcançado através de fortes ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila do polietileno oxidado e o oxigênio do silicato ao reforço de nanocamadas intercaladas, aumentando assim o espaço entre as galerias da nanoargila.

## 2.7 Compósitos híbridos

A definição do termo híbrido dada pela norma ASTM D3878-07 dentro do contexto de materiais compósitos, consiste em materiais que possuem dois ou mais tipos distintos de matriz ou de reforço. Estes constituintes podem se distinguir quanto às propriedades físicas ou mecânicas, composição química ou forma do material (morfologia).

O estudo de compósitos híbridos de sistemas como: fibras naturais/fibras naturais, fibras naturais/fibras sintéticas, com matrizes de epóxi, poliéster, fenólico, resinas de poliuretano e etc., é hoje bem consolidado na literatura (SATHISHKUMAR, 2014; VENKATESH, 2016; YUSOFF, 2016). Contudo, o crescimento do interesse por materiais alternativos sustentáveis, tem direcionado as novas pesquisas de compósitos híbridos para combinações de reforços como fibras naturais/fibras naturais ou fibras naturais/ cargas nanométricas de fontes orgânicas, buscando muitas vezes materiais substitutos às fibras sintéticas (SABA, 2014).

Diversos trabalhos reportam certos efeitos da hibridização de fibra natural e carga nanométrica, como a diminuição da absorção de água do material e incremento das propriedades mecânicas. BORBA *et al.* (2014) estudaram compósitos de polietileno de alta densidade/farinha de casca de arroz e ou nanopartícula mineral (argila montmorilonita - MMT). As propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos aumentam consideravelmente com uma pequena adição de nanoargila como carga reforçante.

Trabalhos apontam ainda, compósitos híbridos de fibra natural/nanoargila para aplicações na indústria de embalagens. Nesse sistema as fibras naturais são adicionadas para o incremento da biodegradabilidade do material e as nanopartículas para favorecer as propriedades mecânicas e de barreira gasosa (MAJEED *et al.*, 2013).

Os estudos em compósitos híbridos vêm crescendo muito nos últimos anos, como reportado pela literatura:



RESENDE *et al.* (2011) sintetizaram compósitos de polipropileno/fibras de vidro, polipropileno/fibra da coroa do abacaxi e híbridos de polipropileno/fibras de vidro/fibra da coroa do abacaxi e compararam suas propriedades mecânicas. Dentre os materiais em estudo, o compósito híbrido foi o que apresentou maior rigidez quando comparado aos demais. Este comportamento é atribuído ao sinergismo das fibras de vidro e fibras provenientes da coroa do abacaxi tratadas.

LI *et al.* (2017) estudaram a funcionalização do óxido de grafeno com poliolefinas e a produção do nanocompósito desse óxido funcionalizado com matriz de PEAD. O óxido de grafeno foi obtido pelo método de Hummers modificado, e em seguida foi funcionalizado usando metacrilato de glicidil (GMA) e método de enxerto de monômeros duplos de estireno (St), obtendo OG-g-(GMA-co-St), após algumas reações entre o grupo epóxido e o grupo anidrido foi obtido anidrido maleico (MAH) e depois foi covalentemente ligado ao PEAD, para se chegar ao nanocompósito OG-g-PEAD-g-(MAH-co-St). Os nanocompósitos foram misturados usando misturador Haake, com quantidades de óxido de grafeno funcionalizado de 0; 0,1; 0,2; 0,5 e 1% em peso. Foi produzido em paralelo o nanocompósito OG/PEAD com 0,1% em peso de OG sem funcionalização. Em relação as propriedades mecânicas, a comparação da tensão e deformação na ruptura do PEAD puro com o nanocompósito OG/PEAD com 0,1% de OG, mostrou um decréscimo de 18,8 para 18,1 MPa e de 844,0% para 255,5% respectivamente. Por outro lado, para o compósito OG-g-PEAD-g-(MAH-co-St) com o mesmo percentual de 0,1% de carga funcionalizada, a tensão na ruptura aumentou para 23,6 MPa e a deformação na ruptura aumentou para 1402%. Assim, confere-se que a funcionalização é uma maneira eficiente de melhorar a interação entre o OG e a matriz polimérica apolar. Além disso, foi relatado no estudo que até 0,2% de f-OG teve um acréscimo das propriedades mecânicas, e nesse patamar atingiu um valor máximo de 24,2 MPa e 1941% na tensão e deformação na ruptura, respectivamente. Comparando esse resultado com o PEAD puro, a tensão teve aumento de 28,7 % e a deformação na ruptura de 130%.

BHURASI *et al.* (2018) produziram nanocompósitos de PEAD/PEUAMM com óxido de grafeno (OG) funcionalizado com intuito de obter melhores propriedades mecânicas e citocompatibilidade. Para tanto, inicialmente o Polietilenoimina (PEI) foi ligado ao OG para funcionalizar o óxido com amina (OG-PEI), em seguida foi feito um enxerto com polietileno maleico, resultando em óxido de grafeno modificado, mOG. Os nanocompósitos consistiram em 60% de PEAD e 40% de PEUAMM, reforçados com 0,5; 1 e 3% em peso de mOG. Os nanocompósitos foram obtidos por fusão em uma extrusora e após mistura foram moldados

por injeção. Também foram produzidos nanocompósitos de PEAD/PEUAMM com óxido de grafeno sem funcionalização (OG), para verificar também suas propriedades mecânicas. As propriedades de resistência à tração e módulo de Young obtidos da blenda PEAD/PEUAMM foram de 29 MPa e 645 MPa, respectivamente. A adição de 0,5, 1 e 3% em peso de OG e mOG na mistura PEAD/PEUAMM resultou em diferenças significativas nas propriedades mecânicas. Os valores de 0,5 e 1% de OG não obtiveram valores significativos quando comparados com a mistura PEAD/PEUAMM, sendo suas resistências à tração de  $29 \pm 2,5$  MPa e  $56,1 \pm 3,7$  MPa, e os módulos de Young,  $620 \pm 27,5$  MPa e  $787 \pm 53,6$  MPa, respectivamente. Com o aumento da carga no valor de 3% de OG e mOG os resultados das propriedades mecânicas reduziram quando comparadas com 1 % de carga, isto indica que a adição de uma maior quantidade de carga pode potencialmente reduzir as propriedades. Além disso, eles observaram que os nanocompósitos apresentaram boa ligação e proliferação de células musculares esqueléticas *in vitro*.

CAVALCANTI *et al.* (2019) prepararam amostras híbridas de compósitos contendo fibras de sisal, juta e curauá como materiais de reforço, e resina epóxi como matriz através da técnica de hand lay-up com uma fração em volume de fibras de 30%. No trabalho desenvolvido foram avaliados os efeitos dos tratamentos químicos de alcalinização, e uma combinação de alcalinização com posterior silanização, bem como a variação na quantidade de fibras de sisal, juta e curauá. A composição das amostras foi realizada de forma que se utilizou um tecido bidimensional de juta, onde eram costuradas as fibras de sisal e curauá de forma alinhada numa única direção, para a configuração juta e sisal. Para o tratamento de alcalinização, as fibras e o tecido utilizados foram submersos em uma solução alcalina de NaOH por cerca de uma hora e posteriormente lavados em água corrente. O tratamento misto constituiu na imersão das fibras e o tecido em uma solução de silano (pH 5) por cerca de 1 hora, posterior ao tratamento de alcalinização. De acordo com os resultados dos testes realizados por CAVALCANTI *et al.* (2019), a hibridização melhorou as propriedades de tensão dos compósitos híbridos quando comparados ao compósito contendo apenas o tecido composto de juta. Enquanto a resistência à tração do compósito contendo apenas o tecido de juta não tratado obteve um valor de 39,75 MPa, a resistência à tração do compósito híbrido de juta com sisal não tratado obteve 66,77 MPa. Os resultados dos tratamentos químicos foram variados, tendo efeito positivo para juta apenas e juta e sisal, e efeito negativo para juta e curauá. Os melhores resultados para a resistência à tração e o módulo de elasticidade foram obtidos pelas amostras híbridas de juta e sisal com tratamento alcalino, tendo um valor de 74,78 MPa e 6,76 GPa, respectivamente.

BEKELE *et al.* (2022) produziram amostras de compósitos híbridos com fibras de sisal e fibras da planta ensete, uma espécie de bananeira falsa de origem africana, com a utilização de resina poliéster como matriz, através do método *hand lay-up*. As amostras foram preparadas com as fibras dispostas em uma única direção, paralelas ao sentido das forças de tração. As fibras não sofreram nenhum tratamento prévio para melhorar as propriedades superficiais. Foram produzidas cinco amostras diferentes contendo seis camadas cada uma, variando a quantidade de cada tipo de fibra, com proporções de 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 e 0/100 em peso de ensete em relação ao sisal. De acordo com os resultados dos testes realizados por BEKELE *et al.* (2022), a resistência à tração do compósito contendo apenas fibras de ensete com matriz poliéster apresentou o menor valor entre todas as amostras produzidas, aproximadamente 69,7 MPa. A hibridização com fibra de sisal melhorou a resistência à tração do compósito, resultando em maior resistência à tração. À medida que a quantidade de fibra de sisal aumenta no compósito híbrido, a resistência à tração é melhorada, atingindo um máximo de 150 MPa quando se tem apenas fibras de sisal. Segundo o autor, as fibras de ensete possuem um maior teor de lignina em sua superfície, o que dificulta a adesão com a matriz poliéster, e, conseqüentemente, reduz a resistência à tração do compósito.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os materiais utilizados para a realização desta dissertação, bem como os procedimentos adotados na preparação do desenvolvimento dos compósitos de PEADr/Bentonita/Sisal.

#### 3.1 Materiais

O PEAD reciclado foi adquirido da empresa Polibalbino de São Paulo-SP, Brasil. A Argila Bentonita foi obtida da empresa Bentonorte do Rio de Janeiro-RJ, Brasil. A Fibra de Sisal foi gentilmente cedida pela empresa SISALSUL de São Paulo-SP, Brasil.

Foi realizada a moagem da fibra de sisal, em um Moinho de Facas SL - 32 da marca SOLAB. Em seguida, essas fibras de sisal passaram pela etapa de peneiramento, em Peneiras de Análise Granulométrica da Marca A BRONZINOX, para se obter os seguintes tamanhos: 2,000mm, 0,840mm, 0,590mm e 0,180mm (10, 20, 30 e 80 mesh respectivamente).

A argila bentonita de 0,045mm (325 mesh) é uma argila comercial, e foi usada na forma organofílica. A bentonita foi seca em estufa e depois peneirada para a obtenção de uma granulometria uniforme.

Esses materiais estão apresentados na Figura 12 abaixo.

Todos os materiais foram secos em estufa antes de serem utilizados.

Figura 12 - PEADr, Sisal e Argila, respectivamente.



Fonte: Autor, 2024.

### 3.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados no desenvolvimento desta dissertação apresentam-se relacionados abaixo:

- Balança semi-analítica Bel Engineering M3102 (a)
- Densímetro digital, marca GEAKA, modelo DSL 910 (a)
- Durômetro Shore D, marca, modelo, GS 702 TYPE (a)
- Extrusora Teck Tril, modelo DCT 20-40 (a)
- Picotador, marca SAGEC-SG (a)
- Prensa hidráulica Marconi modelo MA098/A (a)
- Resil Impactor II REF 7614.000, marca CEAST (SERIE NR:22506) (a)
- HDT 3 VICAT P/N6921.000, marca CEAST (a)

(a) Laboratório Didático e Pesquisa de Processamento de Materiais - LDPPM - UERJ-ZO

### 3.3 Métodos

Neste tópico são apresentadas as metodologias empregadas para o desenvolvimento deste estudo.

#### 3.3.1 Preparação dos compósitos

A porcentagem utilizada dos compósitos foi na proporção de: 70% de PEAD reciclado, 10% de argila bentonita e 20% sisal.

Para avaliar o efeito de mistura dos compósitos de PEADr/Bentonita/Sisal, diferentes variações de tamanhos de sisal foram empregados: 2,000mm, 0,840mm, 0,590mm e 0,180mm (ou seja, 10, 20, 30 e 80 mesh). A Tabela 2 apresenta a porcentagem em massa dos materiais utilizados. E a Tabela 3 apresenta a quantidade em gramas dos materiais utilizados.

Tabela 2 - Porcentagem em massa dos materiais utilizados.

Nomenclatura	PEADr (%)	Bentonita (%)	Sisal (%)
PEADr	100	-	-
PEADr/B/S10	70	10	20
PEADr/B/S20	70	10	20
PEADr/B/S30	70	10	20
PEADr/B/S80	70	10	20

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 3 - Quantidade em gramas dos materiais processados.

Nomenclatura	PEADr (g)	Bentonita (g)	Sisal (g)
PEADr	200	-	-
PEADr/B/S10	140	20	40
PEADr/B/S20	140	20	40
PEADr/B/S30	140	20	40
PEADr/B/S80	140	20	40

Fonte: Autor, 2024.

O PEAD reciclado, a argila Bentonita e o sisal foram colocados em sacos, e em seguida foram misturados manualmente de forma vigorosa, buscando uma melhor homogeneização dos componentes. Em seguida encaminhou-se essa mistura para o processamento.

Os compósitos foram preparados em extrusora dupla-rosca co-rotativa (Teck Tril, modelo DCT 20-40), com um perfil de temperaturas variando de 120 a 180°C desde a alimentação até a saída da matriz. A velocidade utilizada de rotação do alimentador foi de 10rpm, e a velocidade da extrusora foi de 70rpm. As amostras foram obtidas na forma de filamentos contínuos. O material foi então picotado pelo picotador, em tamanho próximo ao grão do PEAD reciclado (aproximadamente 3mm), e posteriormente foi acondicionado.

### 3.3.2 Preparação dos corpos de prova

Para as caracterizações, os corpos de prova dos materiais foram confeccionados na prensa hidráulica de aquecimento, marca Marconi, modelo MA 098 (Figura 13), a partir da prensagem das amostras peletizadas que foram obtidas durante a extrusão.

Figura 13 - Prensa hidráulica de aquecimento.



Fonte: Autor, 2024.

Foram confeccionados filmes com aproximadamente 4g cada, 12cm de comprimento e 1,2cm de largura, para cada percentual de sisal empregado. As amostras foram submetidas a temperatura de 190°C por 5 min na prensa quente para fundir com pressão de 6 toneladas para a formação dos filmes. Depois, essas amostras foram colocadas na prensa a frio por 3 min. Após estes processos, as amostras obtidas foram caracterizadas. A Figura 14 mostra os corpos de prova que foram confeccionados.

Figura 14 - Amostras obtidas por prensagem.



Fonte: Autor, 2024.

### 3.4 Caracterização

#### 3.4.1 Ensaio de Densidade

As amostras de PEADr e as amostras dos compósitos de PEADr/B/S (10, 20, 30 e 80 mesh), foram caracterizadas pelos ensaios de densidade utilizando-se o densímetro (modelo DSL 910- GEHAKA), Figura 15, de acordo com a norma ASTM D792 (2008).

O valor da densidade foi calculado a partir da média aritmética de cinco corpos de prova de cada material estudado, com dimensões de 1cm x 1cm.

Figura 15 - Densímetro DSL910 - GEHAKA.



Fonte: Autor, 2024.

#### 3.4.2 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza das amostras foi determinado segundo a norma ASTM D 2240-05 (2010) através do durômetro Shore D - GS702, Figura 16, pois a amostra foi considerada um “plástico rígido”. Foram utilizados cinco corpos de prova de cada material estudado, com dimensão de 2cm x 2cm. Cada amostra teve analisado cinco pontos distintos em seus corpos de prova através da aplicação da força durante 5 segundos. A determinação da dureza foi obtida através das médias aritméticas dos corpos de prova.



Figura 16 - Durômetro Shore D - GS702.



Fonte: Autor, 2024.

### 3.4.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme a norma ASTM D-570 (2018), usando o método da imersão repetida. Foram preparados corpos de prova feitos a partir de filmes prensados, com dimensões de 2cm x 2cm. Cada amostra foi pesada antes da imersão em água para se obter o peso seco. Após, as amostras foram colocadas em seus respectivos béqueres, identificadas, e mergulhadas em água destilada em temperatura ambiente. Decorrido um período de 24h de repouso, as amostras foram secas com um pano, pesadas em balança analítica e posteriormente imersas em água até completar uma semana (7 dias). Após esse período, as amostras foram novamente secas com um pano e pesadas em balança analítica. Esse processo foi repetido de semana em semana, até se chegar na 6ª semana de ensaio.

A absorção de água foi calculada utilizando-se a seguinte fórmula:

$$WA(\%) = \frac{(M2 - M1)}{M1} \times 100$$

onde:

WA = Porcentagem de absorção de água;

M1 = Peso da amostra seca;

M2 = Peso da amostra úmida.

A Figura 17 mostra as amostras imersas em água. Para a realização do teste de absorção, foram utilizados três corpos de prova para cada tipo de material estudado.

Figura 17 - Amostras imersas em água destilada.



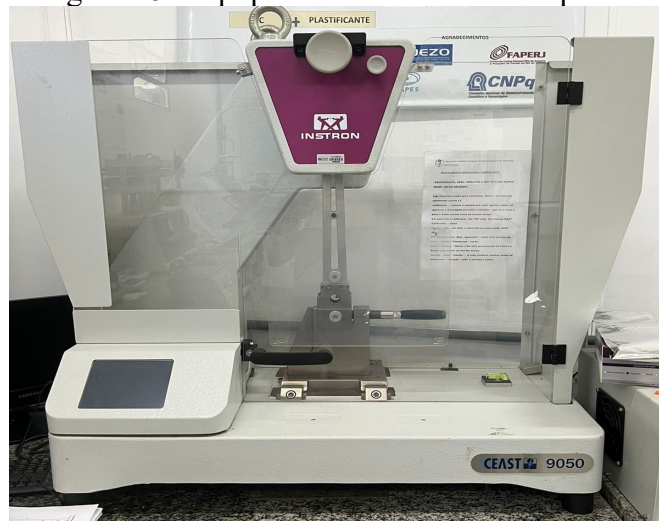
Fonte: Autor, 2024.

#### 3.4.4 Ensaio de Impacto (ASTM D-256)

Para a realização do ensaio de impacto (ASTM D-256), foram utilizados cinco corpos de prova de cada material estudado. Foram realizadas as medidas das larguras e das espessuras de cada um desses corpos de prova. E também foram realizados os entalhes das amostras, antes de se realizar o ensaio de impacto.

As amostras que foram entalhadas mediam aproximadamente 12mm de largura e 3mm de espessura. A Figura 18 mostra o equipamento que foi realizado o ensaio.

Figura 18 - Equipamento do Teste de Impacto.



Fonte: Autor, 2024.

#### 3.4.5 VICAT (ASTM 1525-00)

A análise de VICAT (ASTM 1525-00) foi realizada no equipamento HDT 3 VICAT P/N6921.000 (Figura 19), iniciando na temperatura de 27°C. Foram utilizados 3 corpos de prova de cada material estudado. As amostras ficaram submetidas a uma pressão de 10N com taxa de aquecimento de 50°C/h, e o ensaio teve o seu término a 1mm de penetração da agulha na amostra. As amostras mediam aproximadamente 4cm de comprimento, 12mm de largura e 3mm de espessura.

Figura 19 - Equipamento do Teste de VICAT.



Fonte: Autor, 2024.

### 3.4.6 Temperatura de Deflexão Térmica – HDT (ASTM D648-18)

O ensaio de HDT (ASTM D648-18) foi realizado no equipamento HDT 3 VICAT P/N6921.000 (Figura 20). Foram utilizados 3 corpos de prova de cada material estudado. A temperatura inicial de todos os ensaios foi de 27°C e os corpos de prova ficaram na posição de borda. As amostras ficaram submetidas a uma pressão de 10N e mediam aproximadamente 12mm de largura e 3mm de espessura.

Figura 20 - Equipamento do Teste de HDT.



Fonte: Autor, 2024.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ensaio de Densidade

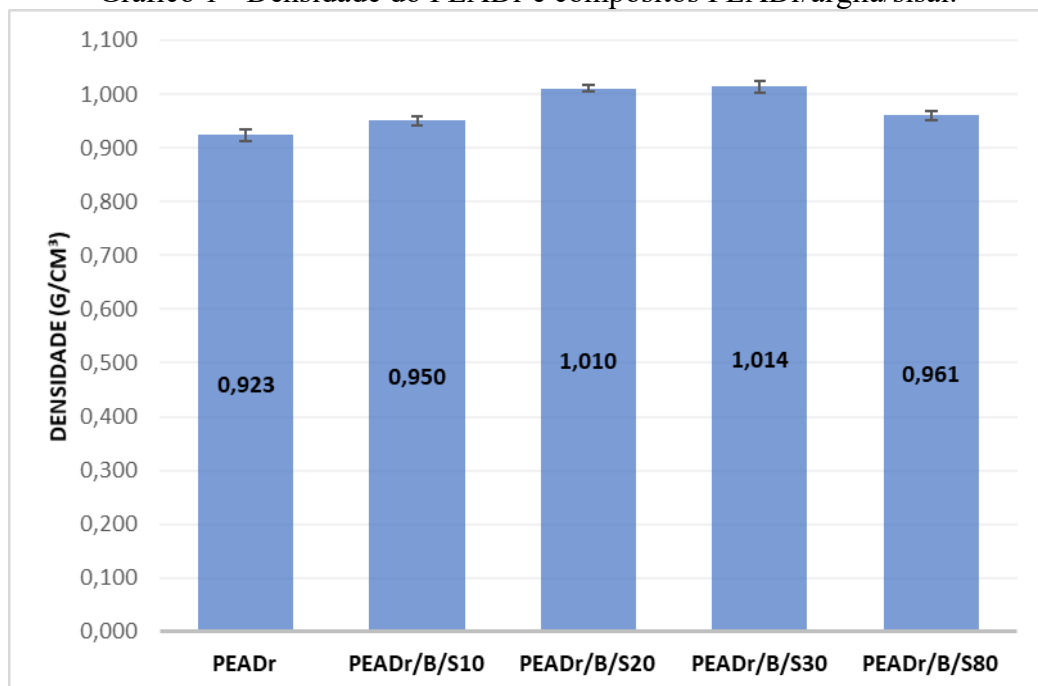
A Tabela 4 e o Gráfico 1 mostram os valores de Densidade obtidos dos materiais estudados.

Tabela 4 - Densidade do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.

Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
PEADr	0,923 ± 0,012
PEADr/B/S10	0,950 ± 0,010
PEADr/B/S20	1,010 ± 0,006
PEADr/B/S30	1,014 ± 0,011
PEADr/B/S80	0,961 ± 0,008

Fonte: Autor, 2024.

Gráfico 1 - Densidade do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.



Fonte: Autor, 2024.

Todas as amostras dos compósitos com a presença de sisal e argila, apresentaram um aumento nos valores das suas densidades, quando comparadas com a amostra de PEADr sem reforço. A presença dos reforços na matriz reciclada possivelmente melhoram a interação reforço-matriz, diminuindo a ocorrência de espaços vazios na interface, aumentando assim a densidade (COELHO *et al.*, 2020). Os aditivos presentes no polímero reciclado podem atuar como plastificantes promovendo uma boa adesão matriz/carga (MARTINS *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2022).

Foi possível notar uma queda da densidade para a amostra de PEADr/B/S80 em relação às outras amostras de compósitos. Essa diminuição na densidade provavelmente é decorrente do maior teor de vazios possivelmente ocasionados pela má homogeneização das misturas, o que poderia ser comprovado através do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV.

A amostra do compósito de PEADr/B/S30 foi a que apresentou o maior valor de densidade, e cerca de 10% superior a densidade da amostra de PEADr sem reforço. E a amostra do compósito de PEADr/B/S10 foi a que apresentou o menor valor de densidade.

## 4.2 Ensaio de Dureza

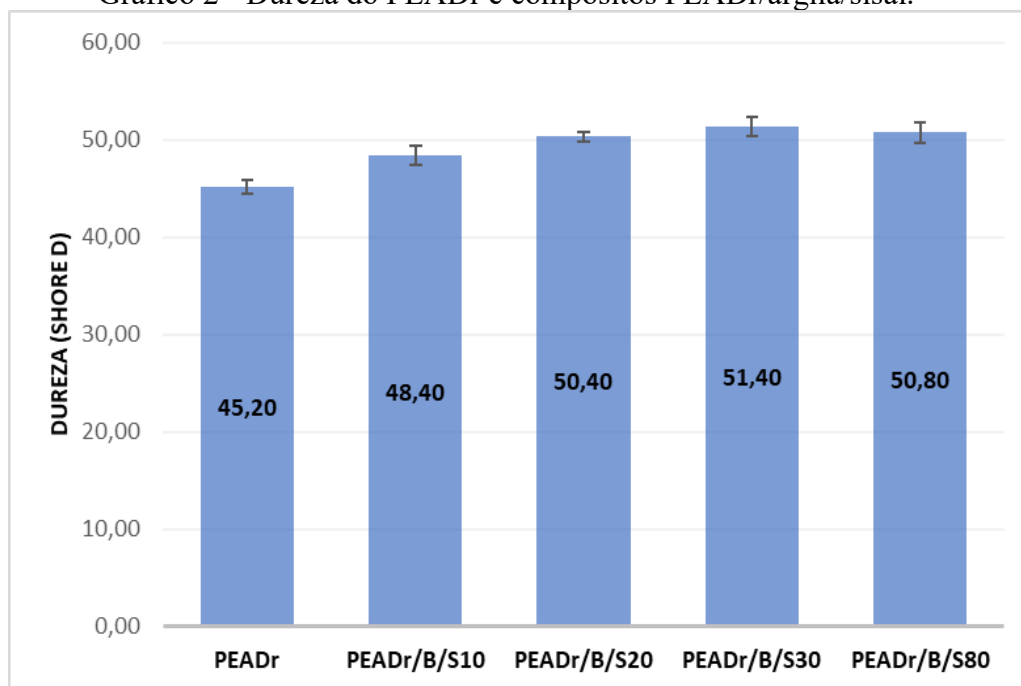
A Tabela 5 e o Gráfico 2 mostram os resultados de Dureza dos materiais estudados.

Tabela 5 - Dureza do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.

<b>Material</b>	<b>Dureza (Shore D)</b>
PEADr	45,20 ± 0,75
PEADr/B/S10	48,40 ± 1,02
PEADr/B/S20	50,40 ± 0,49
PEADr/B/S30	51,40 ± 1,02
PEADr/B/S80	50,80 ± 1,03

Fonte: Autor, 2024.

Gráfico 2 - Dureza do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.



Fonte: Autor, 2024.

Observa-se que a presença do sisal e da argila promoveram um aumento na dureza dos compósitos. Esse aumento da dureza pode ser explicado pela presença do reforço (argila e sisal), que favorece a interação entre as cadeias tornando-as mais difíceis de serem rompidas pelo penetrador do durômetro (LIMA, 2022).

Pode-se observar que, a medida em que se foi aumentando o mesh do sisal (ou seja, diminuindo o seu tamanho), o resultado da Dureza foi aumentando, com exceção da amostra de PEADr/B/S80, que teve uma pequena diminuição no valor da Dureza, o que também ocorreu na análise de Densidade. De acordo com CHAGAS *et al.* (2022) o efeito de diminuição pode ocorrer, devido à possível não uniformidade na distribuição das fibras na matriz, já que esta análise é pontual. As fibras naturais podem promover uma redução na resistência mecânica à penetração, devido a sua higroscopicidade. As moléculas de água teriam um efeito plastificante na superfície e, como o teste de dureza é realizado na superfície, as fibras podem ocasionar também maior absorção de umidade e, portanto, uma queda na dureza (COELHO *et al.*, 2020).

O menor valor de Dureza encontrado foi para a amostra de PEADr sem reforço. E o maior valor de Dureza encontrado foi na amostra do compósito de PEADr/B/S30.

### 4.3 Absorção de água

A absorção de umidade para os plásticos, em geral, é baixa, porém os materiais lignocelulósicos possuem a tendência de absorver umidade, pois são constituídos principalmente por celulose, lignina e hemicelulose que absorvem umidade (hidrofilicos) entre 6 e 14% (MULINARI, 2009).

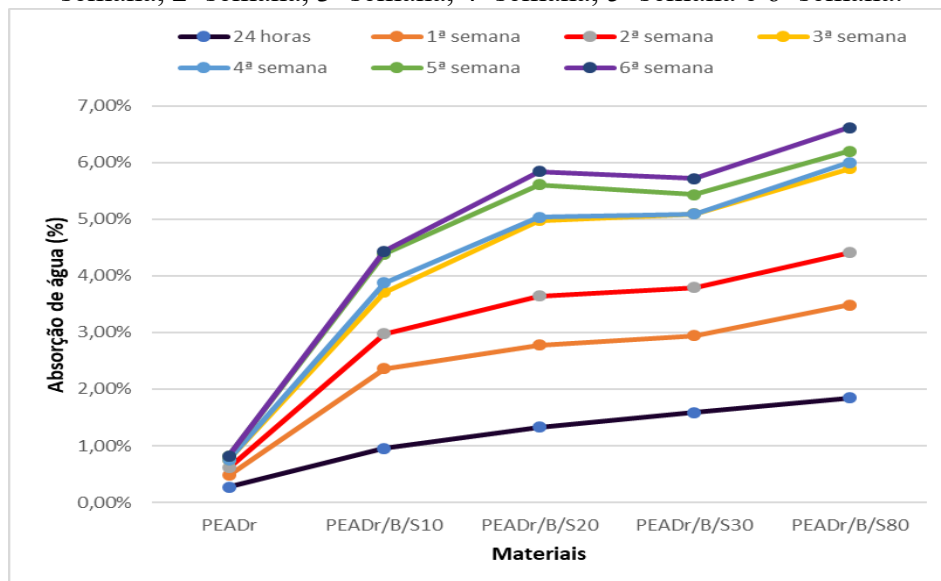
A Tabela 6 e o gráfico 3 mostram os resultados de absorção de água em 24h, 168h (1ª semana), 336h (2ª semana), 504h (3ª semana), 672h (4ª semana), 840h (5ª semana) e 1.008h (6ª semana).

Tabela 6 - Porcentagem de água absorvida do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal, após 24 horas, 1ª semana, 2ª semana, 3ª semana, 4ª semana, 5ª semana e 6ª semana.

Material	24 horas	1ª semana	2ª semana	3ª semana	4ª semana	5ª semana	6ª semana
PEADr	0,274%	0,479%	0,616%	0,753%	0,753%	0,821%	0,821%
PEADr/B/S10	0,955%	2,358%	2,976%	3,706%	3,874%	4,380%	4,436%
PEADr/B/S20	1,330%	2,776%	3,644%	4,974%	5,032%	5,610%	5,842%
PEADr/B/S30	1,584%	2,941%	3,790%	5,090%	5,090%	5,430%	5,713%
PEADr/B/S80	1,845%	3,485%	4,408%	5,894%	5,997%	6,202%	6,612%

Fonte: Autor, 2024.

Gráfico 3 - Absorção de água do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal, após 24 horas, 1ª semana, 2ª semana, 3ª semana, 4ª semana, 5ª semana e 6ª semana.



Fonte: Autor, 2024.



Conforme esperado a amostra de PEADr apresentou a menor absorção de água em todos os tempos estudados (Gráfico 3). Segundo FERREIRA (2022), as macromoléculas do PEAD são hidrofóbicas, o que explica a sua baixa afinidade com moléculas de água e seu grau de absorção baixo.

As amostras dos compósitos contendo fibras de sisal, quando comparados com o PEADr, absorveram uma quantidade significativa de água. Isso se dá ao fato de as fibras naturais possuírem celulose e lignina, estruturas que contém grupo de hidroxila livre, tornando as fibras hidrofílicas (KHAN *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2019).

Para os compósitos estudados, a medida em que se foi aumentando o mesh do sisal, ou seja, a medida em que se foi diminuindo o seu tamanho, a absorção de água foi aumentando consideravelmente, pois se teve um aumento da área superficial.

Em todos os tempos estudados, a amostra de PEADr/B/S80 foi a que absorveu mais água. Provavelmente, a má homogeneização desse compósito aumentou a ocorrência de espaços vazios na interface e por consequência aumentou a higroscopicidade da fibra (MATEUS *et al.*, 2020; PAIVA *et al.*, 2015). Esses resultados corroboram os dados obtidos nas análises de densidade e dureza. As amostras de PEADr/B/S20 e PEADr/B/S30 tiveram valores de absorção bem próximos.

#### **4.4 Ensaio de Impacto (ASTM D-256)**

De acordo com Araújo *et al.* (2009), a resistência ao impacto é um parâmetro muito importante para os polímeros, pois em grande parte de suas aplicações ficam sujeitos a impactos.

A resistência ao impacto é reduzida devido ao entalhe criar um efeito concentrador de tensão (ARAÚJO *et al.*, 2015). Já que a presença do entalhe transforma o estado de tensão uniaxial ou biaxial em triaxial, proporcionando uma fratura frágil. Todos os materiais poliméricos apresentam uma velocidade crítica, acima da qual eles se comportam como materiais frágeis. Por isso é que a velocidade de sollicitação sob impacto é um parâmetro que influencia na resistência ao impacto (CANDIAN, 2007).

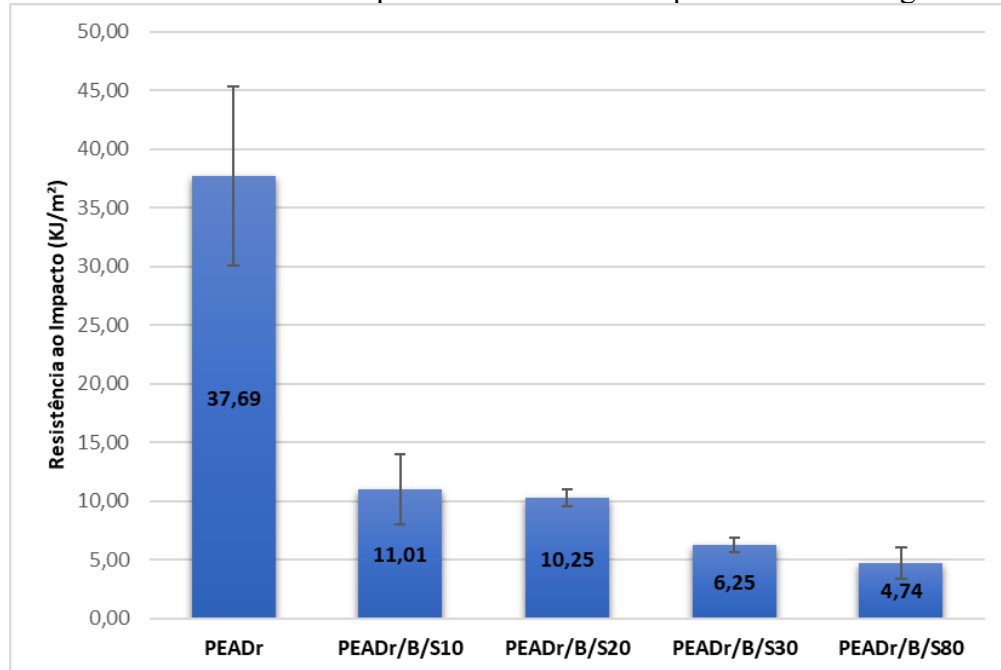
A Tabela 7 e o Gráfico 4 mostram os resultados do teste de impacto dos materiais estudados.

Tabela 7 - Resistência ao impacto do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.

Material	Impacto (KJ/m <sup>2</sup> )
PEADr	37,69 ± 7,65
PEADr/B/S10	11,01 ± 3,02
PEADr/B/S20	10,25 ± 0,73
PEADr/B/S30	6,25 ± 0,61
PEADr/B/S80	4,74 ± 1,35

Fonte: Autor, 2024.

Gráfico 4 - Resistência ao impacto do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.



Fonte: Autor, 2024.

A resistência ao impacto de todos os compósitos diminuiu com a inserção da fibra de sisal e da argila. Os reforços podem atuar como concentradores de tensão na matriz, não oferecendo mecanismos para o material absorver energia e consequentemente promovendo uma redução da propriedade (SOUSA *et al.*, 2012; FERNANDES *et al.*, 2017).

Os resultados do teste mostram que a resistência ao impacto da amostra de PEADr sem reforço é bastante superior a resistência das amostras dos compósitos. Os resultados indicam que quanto menor é o tamanho do sisal nos compósitos estudados, menor é a sua resistência ao impacto.

Considerando os resultados das amostras de compósitos, o menor valor de resistência ao impacto foi encontrado no compósito PEADr/B/S80 (4,74 KJ/m<sup>2</sup>). E o maior valor foi encontrado no compósito PEADr/B/S10 (11,01 KJ/m<sup>2</sup>).

O ensaio de resistência ao impacto pelo método Izod demonstrou que, a adição de fibras de sisal e de argila não promoveu o reforço na matriz polimérica, independente do tamanho de sisal utilizado.

Com exceção do PEAD reciclado, todos os outros corpos-de-prova ensaiados resultaram em ruptura completa, pois se dividiram em dois pedaços. Com a diminuição nos valores dos resultados do ensaio, que foi influenciado pelo tamanho das fibras, conclui-se que houve um aumento da rigidez.

A resistência ao impacto izod não deve ser considerada separadamente, para quantificar a resistência mecânica do material, pois existem polímeros que são sensíveis ao entalhe, porém possuem elevadas propriedades mecânicas (DALFRÉ, 2007).

Vale ainda ressaltar que, no processamento por extrusão, o polímero está sujeito a formar macro radicais, evento induzido pelo efeito termo mecânico (quando há aplicação de tensão e temperatura). Este efeito depende da interação fibra/matriz, tempo e temperatura de processamento, por exemplo. Há ainda a possibilidade de mudança na razão de aspecto das fibras. Algumas características das fibras possuem grande influência no desempenho mecânico, como tamanho, dispersão e orientação. Fibras muito curtas e pouco dispersas tendem a formar concentradores de tensão no material, diminuindo a resistência mecânica como um todo. Portanto, esses dois fenômenos, se ocorrentes, podem influenciar diretamente nas propriedades mecânicas do material (ARAÚJO, 2016).

#### **4.5 Temperatura de Amolecimento - VICAT (ASTM D1525)**

O ensaio de temperatura de amolecimento Vicat é um indicador importante usado para caracterizar a resistência termomecânica do material (HE *et al.*, 2015).

De acordo com BRASKEM (2015) o valor da VICAT (carga de 10 N) do PEAD puro é de 126°C; no estudo de ALVES (2008) foi encontrado o valor médio de 126,4°C. FARIA *et al.* (2023) encontraram em seus estudos, o valor médio de aproximadamente 90°C, da VICAT do PEAD reciclado; PEREIRA *et al.* (2024) encontraram o valor médio de 102,6°C.

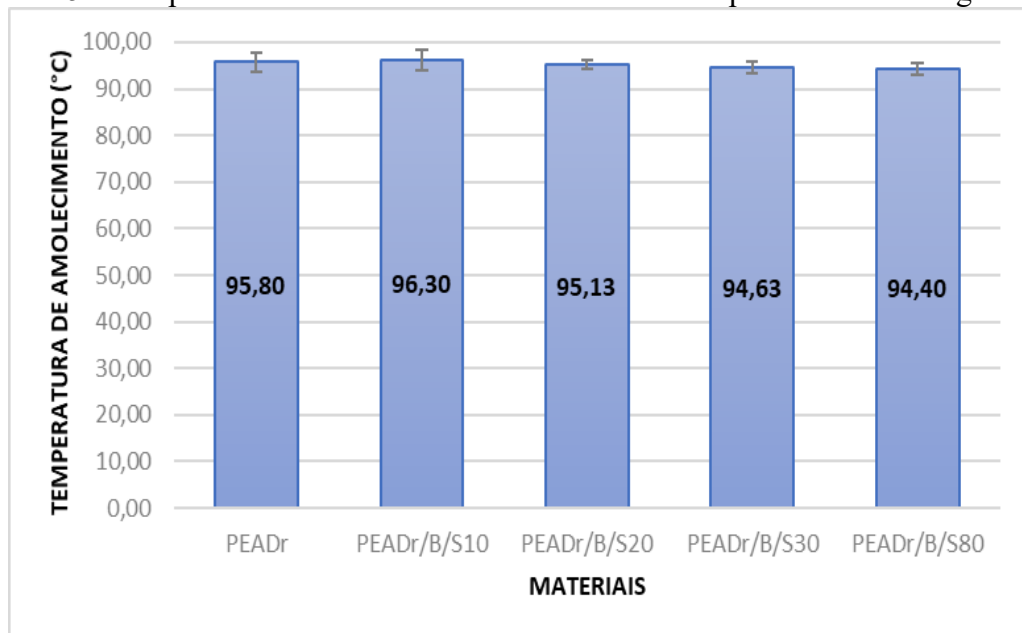
Os resultados dos valores das temperaturas de ponto de amolecimento VICAT estão na Tabela 8 e no Gráfico 5.

Tabela 8 - Temperatura de amolecimento do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.

<b>Material</b>	<b>Temperatura VICAT (°C)</b>
PEADr	95,80 ± 2,05
PEADr/B/S10	96,30 ± 2,19
PEADr/B/S20	95,13 ± 0,93
PEADr/B/S30	94,63 ± 1,16
PEADr/B/S80	94,40 ± 1,30

Fonte: Autor, 2024.

Gráfico 5 - Temperatura de amolecimento do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.



Fonte: Autor, 2024.

O PEADr apresentou temperatura de amolecimento VICAT em torno de 95,80°C. Como é possível observar, comparativamente os valores obtidos são semelhantes e numericamente iguais ao considerar o desvio padrão, não apresentando alterações no que diz respeito ao tamanho da fibra. Esses resultados indicaram que não houve perda de estabilidade térmica nos compósitos.

No estudo de CONCEIÇÃO (2019), a incorporação de resíduos do tronco da palmeira de pupunha na matriz de PEAD também não alterou a temperatura de amolecimento dos materiais. SOARES (2023) também não observou alteração em relação aos compósitos com fibra da casca da castanha do Brasil, óxido de grafeno e polipropileno.

Diferente da tendência observada neste estudo, diversos trabalhos (PEREIRA *et al.*, 2024; FARIA *et al.*, 2023; TAKAHASHI, 2018) comprovaram que o emprego da fibra de sisal ao termoplástico, melhora a estabilidade térmica do material. Os autores consideraram que a rigidez das partículas do reforço ocasiona o aumento da temperatura de amolecimento VICAT.

#### 4.6 Temperatura de Deflexão Térmica - HDT (ASTM D648)

A Temperatura de Deflexão Térmica corresponde a temperatura máxima que um material submetido a um determinado esforço permanece sem sofrer deformação. É um ensaio muito importante em compósitos, pois a partir dele pode-se definir a temperatura máxima de trabalho para um dado material, acima do qual o mesmo possivelmente não conseguirá exercer as funções para a qual foi projetado (JESUS *et al.*, 2019).

De acordo com BRASKEM (2015) o valor da HDT (carga de 0,455 MPa) do PEAD puro é de 76°C; no estudo de ALVES (2008) foi encontrado o valor médio de 78,3°C. SARGIANI (2020) encontrou em seu estudo o valor médio de 81,84°C para a HDT do PEAD reciclado; já PEREIRA *et al.* (2024) encontraram o valor médio de 51,6°C.

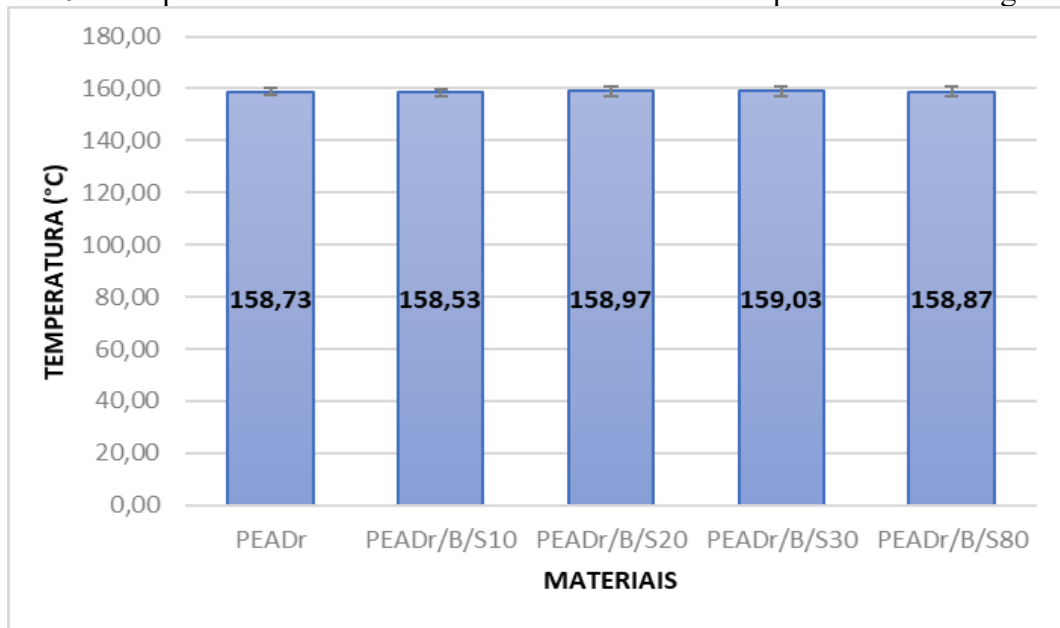
O ensaio para avaliação da Temperatura de Deflexão Térmica pode ser observado na Tabela 9 e no Gráfico 6.

Tabela 9 - Temperatura de Deflexão Térmica do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.

<b>Material</b>	<b>Temperatura HDT (°C)</b>
PEADr	158,73 ± 1,39
PEADr/B/S10	158,53 ± 1,31
PEADr/B/S20	158,97 ± 1,72
PEADr/B/S30	159,03 ± 1,84
PEADr/B/S80	158,87 ± 1,80

Fonte: Autor, 2024.

Gráfico 6 - Temperatura de Deflexão Térmica do PEADr e compósitos PEADr/argila/sisal.



Fonte: Autor, 2024.

Verifica-se por meio dos resultados de HDT que todos os compósitos apresentaram valores muito próximos ao do PEADr, não havendo diferença significativa entre os materiais estudados.

De modo geral, a adição da argila e dos diferentes tamanhos de fibras de sisal não contribuíram para o aumento da temperatura de deflexão térmica. A literatura relata diferentes resultados em relação a HDT de materiais compósitos. JESUS *et al.*, (2019) observaram aumento na resistência térmica de compósitos de poliestireno reciclado com a incorporação de fibra de bagaço de cana de açúcar. ARYA *et al.*, (2024) também obtiveram aumento no valor de HDT de compósitos de polietileno e polipropileno com fibra de bambu. SOARES *et al.*, (2023) verificaram redução da HDT de compósitos de polipropileno, óxido de grafeno e fibra da castanha do Brasil.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foram obtidos compósitos híbridos de matriz polimérica reciclada (PEAD), argila bentonita e fibras de sisal em diferentes tamanhos. Os compósitos foram obtidos pela técnica de processamento por extrusão, depois foram moldados na prensa hidráulica e posteriormente caracterizados. Os resultados estão sintetizados abaixo:

- A densidade aumentou com a adição da fibra de sisal e da argila bentonita, o que pode ser atribuído à boa adesão matriz/carga.
- Houve uma tendência de aumento na dureza de todos os compósitos em relação ao PEADr, evidenciando que os reforços favorecem a interação entre as cadeias tornando-as mais difíceis de serem rompidas pelo penetrador do durômetro.
- O teste de absorção de água mostrou um valor de absorção significativo para o compósito de menor tamanho de fibra de sisal. Isso se dá ao fato de as fibras naturais possuírem celulose e lignina, estruturas que contém grupo de hidroxila livre, tornando as fibras hidrofílicas. O maior valor de absorção foi de 6,612%.
- Os resultados do teste de Impacto mostraram que a resistência ao impacto da amostra de PEADr sem reforço é bastante superior a resistência das amostras dos compósitos. Quanto menor o tamanho da fibra de sisal nos compósitos estudados, menor foi a sua resistência ao impacto, ou seja, diminuiu a ductilidade.
- No ensaio de VICAT, os resultados indicaram que não houve perda de estabilidade térmica nos compósitos.
- Os resultados do teste de HDT demonstraram que todos os compósitos apresentaram valores muito próximos ao do PEADr, ou seja, não houve diferença entre os materiais estudados.
- Os resultados deste trabalho são favoráveis, indicando a possibilidade de se obter um produto final (revestimento internos de paredes, molduras, divisórias internas) contribuindo assim para a sustentabilidade.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar a caracterização térmica dos materiais;
- Testar maiores teores de fibra de sisal;
- Testar outras fibras lignocelulósicas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. *Perfil 2022 - As Indústrias de Transformação e Reciclagem de Material Plástico no Brasil*. São Paulo, SP, 2023. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/>. Acesso em 12 jul. 2024.

AHMAD, E. E. M., LUYT, A. S. Effects of Organic Peroxide and Polymer Chain Structure on Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Sisal Fiber Reinforced Polyethylene Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 125, p. 2216-2222, 2012.

ALMEIDA, G. W. R. DE. *Desenvolvimento e caracterização de filme nanocompósito de base celulósica e sua avaliação como embalagem ativa antimicrobiana*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2010.

ALVAREZ, V.; VÁZQUEZ, A. Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBi-Y/sisal fiber composites. *Composites: Part A*, v. 37, 1672–1680, 2006.

ALVES, A. P. *Polietileno de alta densidade nanoestruturado com pseudoboemita obtida pelo processo sol-gel*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2008.

ARAÚJO, J. A., CASTRO, F. C., POMMIER, S., BELLECAVE, J., MÉRIAUX, J. Equivalent configurations for notch and fretting fatigue. *Frattura ed Integrità Strutturale*, v. 9, 2015. ISSN 19718993.

ARAÚJO, J. R. *Compósitos de Polietileno de Alta Densidade Reforçados com Fibra de Carauá Obtidos por Extrusão e Injeção*. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

ARYA, S., KUMAR, R., CHAURAN, S. Preparation and characterization of woven jute fabric layered composite by using bamboo fiber reinforced polymers as resin matrix. *Journal Elsevier*. 134343, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134343>

BARBER, G. D., CALHOUN, B. H., MOORE, R. B. Poly (ethylene terephthalate) ionomer based clay nanocomposites produced via melt extrusion. *Polymer*, v. 46, p. 6706-6714, 2005.

BARBIERI, D. M., LOU, B., DYKE, R. J., CHEN, H., ZHAO, P., MEMON, S. A., & HOFF, I. (2022). Calcium bentonite and sodium bentonite as stabilizers for roads unbound. *Cleaner Engineering and Technology*, 6(June 2021), 100372. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100372>.

BHUIYAN, M.A.R. *et al.* Heat insulating jute-reinforced recycled polyethylene and polypropylene bio-composites for energy conservation in buildings. *Materials Today Commnucations*, v. 37, 106948, 2023. DOI:10.1016/j.mtcomm.2023.106948.

BHUSARI, S.A., SHARMA, V., BOSE, S., BASU B. HDPE/UHMWPE hybrid nanocomposites with surface functionalized graphene oxide towards improved strenght and

cytocompatibility. *Indian Institute of Science* 16. India, 2018.

BISCAINHO C. A. Materiais compósitos: um dos maiores avanços. *IFP School*. França. 2017. Disponível em: <https://www.betaeq.com.br>. Acesso em 23 ago. 2023.

BISMARCK, A., BALTAZAR-Y-JIMENEZ, A., SARLKAKIS, K. Green composites as Panacea? Socio-economic aspects of green materials. *Environment, Development and Sustainability* v. 8, 445-463, 2006.

BMIMACHINIS. *Cinco tipos de plásticos que usas em tu día a día*. Santiago de Querétaro, México, 2022. Disponível em: <https://www.bmimachines.com/cinco-tipos-de-plasticos-que-usas-en-tu-dia-a-dia/>. Acesso em 06 dez. 2023.

BORBA, C. H. S., *et al.* Potencial de utilização do resíduo do fruto da oiticica no desenvolvimento de compósitos de matriz termoplástica, *Revista Matéria*. v.29, n.1, e20220179, 2024 . DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076 -RMAT-2022-0>.

BORBA, P.M., TEDESCO, A., LENZ, D.M. Effect of reinforcement nanoparticles addition on mechanical properties of SBS/Curauá fiber composites. *Materials Research*, v. 17, p. 412-419, 2014.

BOURMAUD, A. *et al.* Relationships between micro-fibrillar angle , mechanical properties and biochemical composition of flax fibers. *Industrial Crops & Products*, v. 44, p. 343–351, 2013. doi:10.1016/j.indcrop.2012.11.031.

BRANCO, P. M. *Minerais argilosos*. 2014. 1 f. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Tabela de Preços Mínimos Vigentes*. 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mapa-n-595-de-4-de-julho-de-2023-494540705>. Acesso em 13 set. 2023.

BRASKEM. *Polietileno de Alta Densidade GP100BK*. Brasil, 2015. Dinponível em: <https://www.braskem.com.br/cms/Principal/produto/download?id=ie+XPfih9yg=&folhadados=true>. Acesso em 26 set. 2024.

BURGUEÑO, R., QUAGLIATA, M.J., MOHANTY, A., MEHTA, G., DRZAL, L., MISRA, M. Load-bearing natural fiber composite cellular beams and pannels. *Composites: Parte A*, v. 35, p. 645-656, 2004.

CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 7 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. 10° ed. Hoboken, NJ: Wiley New York, 2018. v. 9.

CAMPILHO, R. D. S. G. *Natural fiber composites*. [s.l.] CRC Press, 2015.

CAMPOS, A. *et al.* Efeito do Tratamento das Fibras nas Propriedades do Biocompósito de Amido Termoplástico/Policaprolactona/Sisal. *Polímeros*. São Carlos, São Paulo. v. 21, n. 3, p. 217-222, 2011.

- CANDIAN, L. M. *Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, Brasil, 2007.
- CARVALHO, L. H., CAVALCANTI, W. S. Propriedades Mecânicas de Tração de Compósitos Poliéster/Tecidos Híbridos Sisal/Vidro. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 16, nº 1, p. 33-37, 2006.
- CARVALHO, L. H. Chemical modification of fibers for plastics reinforcement in composites. In: LEÃO, A. L.; CARVALHO, F. X.; FROLLINI, E. *Lignocellulosic. Plastics Composites*, p. 197-222, São Paulo, 1997.
- CÉLINO, A. *et al. The hygroscopic behavior of plant fibers: a review*. v. 1, n. January, p. 1-12, 2014. doi:10.3389/fchem.2013.00043.
- CESTARI, S. P., ALBITRES, G. A.V., MENDES, L. C., ALTSTÄDT, V., GABRIEL, J. B., AVILA, G. C. B., SILVEIRA, I. S. S. Advanced properties of composites of recycled high-density polyethylene and microfibers of sugarcane bagasse. *Journal of Composite Materials*, v. 52, p. 867-873, 2018. <https://doi.org/10.1177/0021998317716268>.
- CHAGAS, G. N., BARROS, M. M., LEÃO, A. G., TAPANES, N. L. C. O., RIBEIRO, R. C. C., BASTOS, D. C. *A hybrid green composite for automotive industry*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 32, e2022017, 2022. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20220027>.
- CHEN, R. S., AHMAD, S., GHANI, M. H. A., SALLEH, M. N. *Optimization of high filler loading on tensile properties of recycled HDPE/PET blends filled with rice husk*. *Aip Conference Proceedings*, v. 1614, n. 4, p. 46-51, july. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4895168>.
- CHOUDHURY, A. Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites. *Materials science and engineering A*, v. 491, p. 492-500, 2008.
- CHOW, C. P. L., XING, X. S., LI, R. K. Y. Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites science and technology*. v. 67, p. 306-313, 2007.
- COELHO, K. V. S., PEREIRA, P. S. C., BASTOS, D. C., LIBANO, E. V. D. G. Estudo da influência do teor de fibras e de compatibilizante na obtenção de compósitos de polietileno de alta densidade pós-consumo (PEADpc) com fibras de bagaço de cana-de-açúcar (BCA). *Cadernos Unifoa*, v. 15, p. 5061, 2020. <https://doi.org/10.47385/cadunifoa.v15.n43.3094>.
- CONCEIÇÃO, A. L. C. *Estudo de propriedades térmicas e mecânicas de compósito de polietileno de alta densidade e resíduo do tronco da palmeira de pupunha para uso como madeira plástica*. 2019. 46 f. Projeto (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2019.
- COSTA, C. G. A., SANTOS, M. C. C., LIBANO, E. V. D. G., BASTOS, D. C., PEREIRA, P. S. C. Recycled hdpe/short coconut fiber composites: effect of coupling agent and fiber loading. *International Journal of Development Research*, v. 12, p. 54990–54994, 2022.

COUTINHO, F. M. B., Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 13, p. 1-13, 2003.

DALFRÉ, G.M. *Cruzetas de Polímeros Reciclados: Caracterização dos Materiais, Análise Numérica e Ensaios de Modelos Reduzidos*. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Estruturas – SET/EESC/USP, São Carlos/SP, 2007.

DEBACHER, N. A., MELLO, C. A. D. *Efeito nas propriedades reológicas da argila com adição de um polímero*. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Química, 2004.

DIAS, J. C., *Rotas de destinação dos resíduos plásticos e seus aspectos ambientais: uma análise da potencialidade da biodegradação*. 2016. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DÍAZ, L. M. *Arcillas y peloides en medicina estética*. Madri, 2004.

DIVYA, H. V., NAIK L. L., YOGESHA, B. Processing Techniques of Polymer Matrix Composites – A Review. *International Journal of Engineering Research and General Science*, v. 4, n. 3, p. 357-362, 2016.

DORNELLAS, E., MARTINS, S. *O poder das argilas: geoterapia*. São Paulo, 2009. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/260300786/O-Poder-Das-Argilas>. Acesso em: 15 de set. 2024.

DUARTE, I. D. *Comportamento reológico de compósitos híbridos compatibilizados de polietileno/fibra de linter/argila montmorilonita*. 2019. 53f. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Graduação em Engenharia de Materiais. Natal, RN, 2019.

DUARTE-POVEDA, G . I. *et al.* Evaluación e implementación de encamisado de polietileno de alta densidad: alternativa de solución a la problemática decorrosión-desgaste em líneas de flujo. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, v. 9, n. 1, 65-72, 2019. DOI: <https://doi.org/10.29047/01225383.153>.

ELFALEH, I. *et al.* A comprehensive review of natural fibers and their composites: Na eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, v. 19, 101271, 2023. DOI:10.1016/j.rineng.2023.101271.

EMBRAPA. Extrato do sisal é testado como inseticida contra *Aedes aegypti*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/8841447/extrato-do-sisal-e-testado-como-inseticida-contra-o-aedes-aegypti>. Acesso em 23 de ago. 2023.

FARIA, A. D., BARROS, G. S., SILVA, G. O., SANTOS, M. C. C., LÍBANO, E. V. D. G., PEREIRA, P. S. C. Efeito da granulometria nas propriedades físico- mecânico, morfológicas e estruturais de compósitos de pead reciclado e fibras de sisal. *Contemporânea – Revista de Ética e Filosofia Política*, v. 3, n. 5, p. 4122-4140, 2023.

FAO. *FAOSTAT*. Rome, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 13 set. 2024.

FERNANDES, J.R. *et al.* Nanopartículas de sílica silanizada como compatibilizante em compósitos de fibras sisal/polietileno. *Polímeros*, v. 27, p. 61–69, 2017. DOI:10.1590/0104-1428.2249.

FERREIRA, R. S. *Preparo e caracterização de um compósito plástico –madeira a base de resíduos de eucalipto/fibra de vidro/polietileno de alta densidade.* 2022. 37f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) –Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina.

FIDELIS, M. E. A. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*. v. 2, n. 2, p. 149-157, 2013.

FONSECA, C.G., CARVALHO, G.S.G., WYPYCH, F., DINIZ, R., LEITÃO, A. A. Na<sup>+</sup> as a probe to structural investigation of dehydrated smectites using NMR spectra calculated by DFT. *Applied Clay Science*, v. 126, p. 132-140, 2016.

FORNES, T. D., PAUL, D. R. *Polymer*, v. 44, p. 4993, 2003.

FRAGA, S. C. L. *Reciclagem de Materiais Plásticos: Aspectos Técnicos, Econômicos, Ambientais e Sociais*. 1ª. Edição. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2014.

FURTADO, J. B. M., FURTADO FILHO, P. A., OLIVEIRA, T. P., CAETANO, M. R. S., FIGUEIREDO, F. C., SANTOS JÚNIOR, J. R. Compósitos de Polietileno/Fibra - Caracterização e Degradação. *Revista Virtual de Química*, v. 12(1), p. 272-285, 2020. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20200021>.

GHOLAMPOUR, A. *Review A review of natural fiber composites: properties , modification and processing techniques, characterization, applications.* [s.l.] Springer US, 2020. v. 55doi:10.1007/s10853-019-03990-y.

GIBSON, R. F. *Principles of composite material mechanics*. 3 ed., CRC press, p. 683, 2011.

GIURGIUTIU, V. *Stress, Vibration, and Wave Analysis in Aerospace Composites*. 1ª ed. Columbia, SC: Academic Press, 2022. doi: 10.1016/B978-0-12-813308- 8.00006-5.

GONÇALVES, L. M. *Desenvolvimento de compósitos de polipropileno (PP) com bagaço de malte e argila organofílica.* 2021. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2021.

GOWDA, T. G. Y., SANJAY, M. R., BHAT, K. S., MADHU, P., SENTHAMARAIKANNAN, P., YOGESHA, B. Polymer matrix-natural fiber composites: An Overview. *Cogent Engineering*, v. 5, article 1446667, 2018. <http://doi.org/10.1080/23311916.2018.1446667>.

GRAM, H. E. Durability of natural fibres in concrete. Swedish cement and concrete research institute. *Research Forum*, v.1, n. 83, p. 225, 1983.

GUIMARÃES, J. L., WYPYCH, F., SAUL, C. K., RAMOS, L. P., SATYANARAYANA, K. G. Studies of the processing and characterization of corn starch and its composites with banana and sugarcane fibers from Brazil. *Carbohydrate Polymers*, 80(1), p. 130-138, 2010.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.11.002>.

HE, S., ZHOU, L., HE, H. Preparation and Properties of Wood Plastic Composites Based on Tea Residue. *Polymer Composites*. College of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China, 2015. DOI 10.1002/pc.23139.

HONG, H., LIU, H., ZHANG, H., HE, H., LIU, T., JIA, D. Improving the performances of polyethylene/sisal fiber composites by infiltratively compatibilizing the multi-scale interfaces. *Composite Interfaces*, v. 22, n.6, p. 489-502, 2015.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Produção de Sisal (fibra)*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/sisal-fibra/br>. Acesso em 13 set. 2024.

IMMICH, A. P. S. *et al.* Fibras. In: AGUIAR, C. R. L. de (org.). *Engenharia têxtil: uma abordagem simplificada*. 1 ed. Santa Catarina: Editora UFSC, 2022. p. 23-76.

JASSIM, A.K. Recycling of polyethylene waste to produce plastic cement. *Procedia manufacturing*, v. 8, p. 635-642, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.081>

JAUHARI, N., MISHRA, R., THAKUR, H., Natural Fibre Reinforced Composite Laminates – A Review. *Materials Today: Proceedings*, v. 2, p. 2868-2877, 2015.

JESUS, L. C. C., LUZ, S. M., LEÃO, R. M., ZATTERA, A. J., AMICO, S. C. Comportamento térmico de compósitos de poliestireno reciclado reforçado com celulose de bagaço de cana. *Revista Matéria*. e-12421, 2019.

KHAN, A., MISHRA, A., PATIDAR, R., PAPPU, A. Effect of lignocellulosic corn stalk on mechanical, physical, and thermal properties of injection moulded low density polyethylene composites: An approach towards a circular economy. *Journal Heliyon*. e25287, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25287>

KILIÇ, E. *et al.* Circularity of new composites from recycled high density polyethylene and leather waste for automotive bumpers. Testing performance and environmental impact. *Science of the Total Environment*, v. 919, 170413, 2024. DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.170413.

KORNMANN, X. *Synthesis and characterization of thermoset-clay nanocomposites, Introduction*, Publicação Interna, Lulea Tekniska Universite, 1999.

KUGEL G. Direct and indirect adhesive restorative materials: a review. *Am J Dent*, 2000.

LARANJEIRA, E. *Propriedades de Compósitos Poliéster/Juta. Influência da Adição de Carga Mineral Nanoparticulada e Sistema Antichama*. 2004. 159f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

LEITE, I. F. *Preparação de nanocompósitos de poli (tereftalato de etileno) - bentonita*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

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

LI, H., XIE, X. M. Polyolefin - functionalized graphene oxide and its GO/HDPE nanocomposite with excelente mechanical properties. *Chinese Chemical Letters* 29, p. 161-165. China, 2017.

LIMA, Aline Muniz. *Influência da argila bentonita nas propriedades de compósitos a partir de blendas PEADreciclado/PET pós-consumo*. 2022. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Programa de Pós - Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

LUZ, A.B., OLIVEIRA, C.H. *Rochas e minerais industriais*. CETEM, 2 ed. 247 p, 2008.

MACHADO, A.B.F.; LIMA, A.M.; BASTOS, D.C.; PEREIRA, P.S.C; LÍBANO, E.V.D.G. Avaliação estrutural e térmica de compósitos de polímero pós-consumo e argila nacional. *Brazilian Journal of Development*. v.7, n.2, p. 13935-13953, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-151>.

MACHINI, S.H.C.e.F.C. Preparador e Regulador de Máquina Injetora. Senai-SP. v. 1, p. 1-30, 2006.

MAJEED, K. *et al.* Potential materials for food packaging from nanoclay/natural fibres filled hybrid composites. *Materials & Design*, v. 46, p. 391-410, 2013.

MARINELLI, A.L., MONTEIRO, M.R., AMBRÓSIO, J.D., BRANCIFORTI, M.C., KOBAYASHI, M., NOBRE, A.D., Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 18, p. 92-99, 2018.

MARINUCCI, G. *Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia*, 1 ed., São Paulo: Artliber, 2011.

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, n. 1, p. 40-46, 2009.

MARTINS S., BARROS M. M., PEREIRA P. S. C., BASTOS D. C. 2019. Use of manufacture residue of fluidized-bed catalyst-cracking catalysers as flame retardant in recycled high-density polyethylene. *Journal of Materials Research Technology* 8(2): 2386-2394. Doi:10.1016/j.jmrt.2018.11.015.

MATEUS, D. N., BASTOS, D. C., LIBANO, E. V. D. G., PEREIRA, P. S. C. Comportamento físico-mecânico, térmico, estrutural e morfológico em compósitos de polietileno de alta densidade pós-consumo e fibras curtas de sisal (PEADpc/FS) com e sem compatibilizante. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 5, p. 32725-32742, 2020. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282005000400009>.

MATHEUS POLETTO, JULIANE DETTENBORN, EDUARDO DALL'AGNOL, MARA ZENI, ADEMIR J. ZATTERA. *Influência do comprimento das fibras nas propriedades*

*mecânicas e térmicas de compósitos de poliestireno e fibras de sisal*. Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Foz do Iguaçu, Paraná, 2009.

MATTHEWS, F. L. *et al.* *Finite element modelling of composite materials and structures*. Boca Raton: CRC Press, 214 p., 2000.

MATTOS, L. P. F. *Estudo das propriedades de nanocompósitos de poliestireno/argila bentonita modificada*. 2020. 51f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2020.

MEDEIROS, D. L., TAVARES, A. O. C., ROZADOS, I. L. G., DOS SANTOS, E. S., VIANA, J. D. *Rev. Virtual Quim.*, v. 8, 1166 p., 2016.

MOKHENA, T. C., LUYT, A. S. Investigation of Polyethylene/Sisal Whiskers Nanocomposites Prepared Under Different Conditions. *Polymer Composites*, v. 35, p. 2221-2233, 2014.

MORÁVIA, W. G. *Comportamento térmico e avaliação microestrutural de concretos leves produzidos com argila expandida*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

MORALES, A. R. *et al.* Nanocompósitos de PEAD/PEBDL - Avaliação da Esfoliação da Argila Organofílica Pela Aplicação do Modelo de Nielsen e das Propriedades Mecânicas, Ópticas e Permeabilidade. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 2010.

MORITA, M. C. *Compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibra de sisal*. 2020. 38p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2020.

MULINARI, D.R. *Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietilenoxo de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana-de-açúcar*. 2009. Tese (Doutorado) – UNESP - Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, 2009.

MULINARI, D. R., VOORWALD, H. J. C., CIOFFI, M. O. H., SILVA, M. L. C. P., CRUZ, T. G., SARON, C. Sugarcane bagasse cellulose/HDPE composites obtained by extrusion. *Composites Science and Technology*, 69(2), p. 214-219, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.10.006>.

NAGAVALLY, R. R. Composite Materials – History, types, fabrication techniques, advantages and applications. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, ISSN: 2321-9009, v. 4, p. 87-92, 2016.

NAPOLI, C. M. *Estudo do polietileno de alta densidade reciclado*. 2022. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciência e Tecnologia do Mar) - Universidade Federal de São Paulo, Santos (SP), 2022.

NAVEEN, J. *et al.* *Mechanical and physical properties of sisal and hybrid sisal fiberreinforced polymer composites*. [s.l.] Elsevier Ltd, 2018.



NWABUNMA, D., KYU, T. Polyolefin Composites. *Wiley Interscience*, 2007.

OLIVEIRA FILHO, E. G. *et al.* Avaliação do comportamento mecânico de compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal. In: *Anais do 72º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração*, 2019, São Paulo.

OWEN, M. M., ACHUKWU, E. O., ROMLI, A. Z., ABDULLAH, A. H. B., RAMLEE, M. H., SHUIB, S. B. Thermal and mechanical characterization of composite materials from industrial plastic wastes and recycled nylon fibers for floor paving tiles application. *Waste Management*, v. 166, p. 25–34, 2023. *Waste Management* 166 (2023) 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.038>.

PAIVA, A. E. M., SOUSA, P. A., POLITI, F. S., SILVA, K. R. C. Efeito da fibra de buriti nas propriedades físicas de argamassas de cimento portland. *Revista Tecnológica*, v. 25, p. 91-102, 2016.

PAIVA, L. B. DE., MORALES, A. R., DÍAZ, F. R. V. Argilas organofílicas: características, metodologias de preparação, compostos de intercalação e técnicas de caracterização. *Cerâmica*, v. 54, 2008.

PANTHAPULAKKAL, S., LAW, S., SAIN, M., Injection molded natural fiber hybrid composites for automobile applications-Mechanical properties and flammability. *International SAMPE Technical Conference*, 2005.

PARAMESWARANPILLAI, J. *et al.* *Bio-based epoxy polymers, blends and composites: synthesis, properties, characterization and applications*. p. 378, 2021.

PEACOCK, A.J., *HANDBOOK OF POLYETHYLENE Structure, Properties and applications*, ed. E.C. Company, Baytown, Texas, p. 1-537, 2000.

PEREIRA, A. P. *et al.* Resistência à tração e flexão de compósito de matriz de policarbonato reforçado com fibra natural de sisal. In: *Anais do 72º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração*, 2017, São Paulo.

PEREIRA, P., LIBANO, E., AZEVEDO, H. M., FARIA, A. Sustainable composites based on polypropylene and clay: Compósitos sustentáveis a base de polipropileno e argila. *Concilium*, [S. l.], v. 24, n. 8, p. 80–93, 2024. Disponível em: <https://clium.org/index.php/edicoes/article/view/3305>. Acesso em: 9 set. 2024.

PICKERING, E. J., MUÑOZ-MORENO, R., STONE, H. J., JONES, N. G. Precipitation in the equiatomic high-entropy alloy CrMnFeCoNi. *Scripta Materialia*, v. 113, p. 106-109, 2016.

PICKERING, K.L., ARUAN EFENDY, M.G., LE, T.M., A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites: Part A*, v. 83, p. 98-112, 2016.

QUIRINO, A. P. *Cordões de Sisal Como Reforço em Compósitos de Matriz Poliéster*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1997.

RAUTUREAU, M., GOMES, C. de S. F., LIEWIG, N., & KATOUZIAN-SAFADI, M. (2017). Clays and health: Properties and therapeutic uses. *Clays and Health: Properties and Therapeutic Uses*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42884-0>.

RESENDE, J. M., OLIVEIRA, F. L., MULINARI, D. R. *Avaliação de compósitos híbridos para aplicações em Engenharia*. Cadernos UniFOA, edição nº 15, p. 11-18, 2011.

REOTERM. *Extrusoras de rosca dupla paralela*, 2024. Disponível em: <https://www.reoterm.com.br/extrusoras-de-rosca-dupla-paralela>. Acesso em 05 de Setembro de 2024.

RONKAY, F., MOLNÁR, B., SZALAY, F., NAGY, D., BODZAY, B., SAJÓ, I. E., BOCZ, K. *Development of Flame-Retarded Nanocomposites from Recycled PET Bottles for the Electronics Industry*. *Polymers*, v. 11, n. 2, p. 233, 1 fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11020233>.

ROWELL, R. M., SANADI, A., CAULFIELD, D. F., JACOBSON, R. E. Utilization of natural fibers in plastic composites problems an opportunities. *First international lignocellulosics plastics composites*, São Paulo, 1996.

SABA, N., TAHIR, P. M., JAWAID, M. A review on potentiality of nano filler/natural fiber filled polymer hybrid composites. *Polymers*, v. 6, n. 8, p. 2247-2273, 2014.

SALEM, V. *Tingimento Têxtil: Fibras, Conceitos e Tecnologias*. São Paulo: Blucher, 2010. 299 p.

SANJAY, M. R. *et al*. Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview. *Natural Resources*, v. 07, n. 03, p. 108–114, 2016.

SANTOS, P. de S. (1989). *Ciência e Tecnologia de Argilas* (E. Blucher, Ed.; 2ª edição).

SANTOS, E, A. *Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de matriz de poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais*. 2007. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

SANTOS, A. M., D'ALENCAR, B., CARRICONDE, C., MENOR, E. *Emprego de argilas caulínicas no tratamento de úlcera vasculogenicas em idosos*. Congresso Brasileiro de Enfermagem, 2009. 1681.

SARGIANI, A. B. *Reciclagem de garrafas plásticas de polietileno de alta densidade: processamento e caracterização do material reciclado, e comparação com as propriedades do material virgem*. Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia de Materiais, EE, UPM, São Paulo, 2020.

SATHISH, T., SUNAGAR, P., SINGH, V., BOOPATHI, S., SATHYAMURTHY, R., AL-ENIZI, A. M., PANDIT, B., GUPTA, M., SEHGAL, S. S. All rights reserved. Characteristics estimation of natural fibre reinforced plastic composites using deep multi-layer perceptron (MLP) technique. *Chemosphere*, v. 337, 139346, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139346>.

SAVINI, G. *Modulação da morfologia e dos padrões térmico e mecânico do polietileno de alta densidade (PEAD) com uma incorporação de etileno-acetato de vinila (EVA) e baixos preços de nanotalco sintético*. 2020. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2020.

SILVA, O. R. R. F., BELTRÃO, N. E. M. *O Agronegócio do Sisal no Brasil*. Campina Grande-PB: Embrapa CNPa/Embrapa SPI, 205p., 1999.

SILVA, R. V. *Compósito de Resina Poliuretano Derivada do Óleo de Mamona e Fibras Vegetais*. 2003. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2003.

SILVA, A. R., FERREIRA, H. C. *Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais*. 2008. 2 f. Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2008.

SILVA, R., HARAGUCHI, S. K., EDVANI, C. M., RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. *Química Nova*. v. 32, v. 3, p. 661-671, 2009.

SILVA, O. R. R. F. *et al.* Sisal com Tecnologia Embrapa para a Geração de Emprego e Renda na Agricultura Familiar do Nordeste. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*. Campina Grande, Paraíba, 2011.

SILVA, V. B., FEITOSA, Y. M., MARADINI, G. S., ALMEIDA, S. M., OLIVEIRA, M. P. *Análise de absorção de água em compósitos de óleo de mamona reforçado com bagaço de cana de açúcar*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Uberlândia-MG, 2019.

SMOLE, M. S., *et al.* Plant Fibres for Textile and Technical Applications. In: GRUNDAS, S. (ed.) *Advances in Agrophysical Research*. 2013.

SOARES, C. P. *Processamento e caracterização de compósitos híbridos de polipropileno reforçado com casca da castanha-do-brasil e óxido de grafeno*. 2023. 108 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear / Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.

SOUSA, T. A. *et al.* Avaliação da resistência ao impacto de compósitos reforçados com fibras naturais. *Cadernos UniFOA*, v. 19, p. 21–29, 2012. DOI:10.47385/cadunifoa.v7.n19.1098.

SOUZA, F. R., SANTOS, M. C. C., CONCEIÇÃO, M. N., BASTOS, D. C., PEREIRA, P. S. C., LÍBANO, E. V. D. G. Sustainable composites based on post-consumer polypropylene and mineral filler. *International Journal of Development Research*, v. 12, ed. 07, p. 57718-57721, 2022. <https://doi.org/10.37118/ijdr.24664.07.2022>.

SPINACÉ, M. A. S., PAOLI, M. A. *A tecnologia da reciclagem de polímeros*. Quim. Nova, v. 28, n. 1, p.65-72, 2005.

STEVENS, M. J., COVAS, J. *Extruder Principles and Operation*. 2 ed. New Delhi:India, Springer, 1995.

TAKAHASHI, M. C. *Compatibilização química em compósitos de pla reforçados com fibras de sisal*. 2018. 164f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

TANAKA, F. H., CRUZ, S. A., CANTO, L. B. Morphological, thermal and mechanical behavior of sepiolite-based poly (ethylene terephthalate)/polyamide 66 blend nanocomposites. *Polymer Testing*, v. 72, p. 298-307, 2018.

TESFAW, S. *et al.* Evaluation of tensile and flexural strength properties of virgin and recycled high-density polyethylene (HDPE) for pipe fitting application. *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p. 3103-3113, 2022. DOI:10.1016/j.matpr.2022.03.385.

THOMAS, S. *et al.* Natural Fibres: Structure, Properties and Applications. In: *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites Green Chemistry and Technology*. 1º ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. p. 742. doi:10.1007/978-3-642-17370-7.

VÄISÄNEN, T., DAS, O., TOMPPU, L. A review on new bio-based constituents for natural fiberpolymer composites. *Journal of Cleaner Production*, v. 149, p. 582-596, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.132>.

VENKATESH, R. P., RAMANATHAN, K., RAMAN, V. S. Tensile, flexural, impact and water absorption properties of natural fibre reinforced polyester hybrid composites. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, n. 3, v. 117, p. 90-94, 2016.

ZHOU, F., CHENG, G., JIANG, B. (2014). Effect of silane treatment on microstructure of sisal fibers. *Applied Surface Science*, 292, 806-812. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.12.054>.

WIT, W. *et al.* *Solucionar a Poluição Plástica: Transparência e Responsabilização*. Suíça: WWF–Fundo Mundial para a Natureza. Suíça, 2019.

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

ZAMAN, H. U., KHAN, R. A. Low Density Polyethylene/Organoclay Nanocomposites Manufactured Using Oxidized Polyethylene as a Coupling Agent and the Flame Retardant Additive. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, v. 21, p. 1-12, 2022.