



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias

Aline Muniz Lima

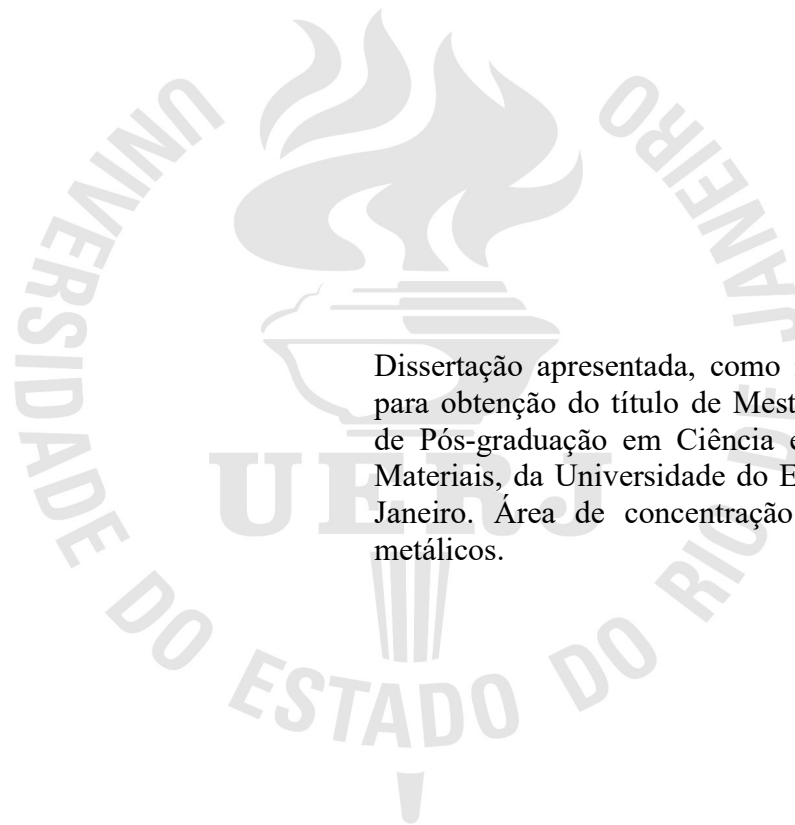
**Influência da argila bentonita nas propriedades de compósitos a partir de  
blendas PEAD reciclado/PET pós consumo**

Rio de Janeiro

2022

Aline Muniz Lima

**Influência da argila bentonita nas propriedades de compósitos a partir de blendas  
PEAD reciclado/PET pós consumo**



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: Materiais não metálicos.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Elaine Vidal Dias Gomes Líbano  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Patricia Soares da Costa Pereira

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/CZO

L732 Lima, Aline Muniz

Influência da argila bentonita nas propriedades de compósitos a partir de blendas PEAD reciclado/PET pós consumo/ Aline Muniz Lima – 2022.  
70 f.

Orientadora: Elaine Vidal Dias Gomes Líbano  
Coorientadora: Patrícia Soares da Costa Pereira

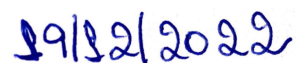
Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais.

1. Ciência e Tecnologia de Materiais – Teses. 2. Argila bentonita– Teses. 3. Blendas poliméricas – Teses. 4. Polietileno de alta densidade – Teses. 5. Poli tereftalato de etileno – Teses. I. Líbano, Elaine Vidal Dias Gomes. II. Pereira, Patrícia Soares da Costa. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias. IV. Título.

CDU 620

Bibliotecária: Rosana Maria dos Passos – CRB 7 4908

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



---

Assinatura

---

Data

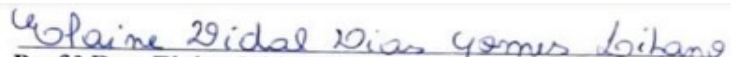
Aline Muniz Lima

**Influência da argila bentonita nas propriedades de compósitos a partir de blendas  
PEAD reciclado/PET pós consumo**

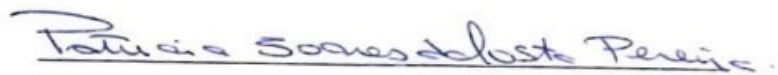
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais não metálicos.

Aprovada em 29 de novembro de 2022.

Banca Examinadora:

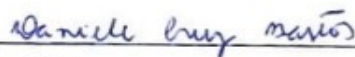
  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Elaine Vidal Dias Gomes Libano

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. Daniele Cruz Bastos

Faculdade de Ciência Exatas e Engenharias - UERJ



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

Faculdade de Ciência Exatas e Engenharias - UERJ



Prof.<sup>a</sup> Dra. Renata Nunes Oliveira

Departamento de Engenharia Química - UFRRJ

Rio de Janeiro

2022

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação primeiramente a Deus por mais essa oportunidade que me foi dada, ele que me sustentou durante todos esses anos de muita luta, em meio ao desânimo, ao cansaço ele foi o meu sustento. Segundamente, dedico a mim mesma, foram dias difíceis, dias em que eu pensei em desistir, em que eu achei que não valia mais a pena, dias em que eu precisei ser meu próprio colo, mas graças a minha perseverança e força de vontade cheguei até aqui.

## AGRADECIMENTOS

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

Agradeço aos meus pais pelo apoio.

Agradeço a minha amiga Karolina Vieira, mestre pela turma anterior, pelas dicas e por toda ajuda sempre que precisei. “Um amigo fiel é uma poderosa proteção: quem o achou, descobriu um tesouro”. (Eclesiástico 6:14)

Agradeço a minha orientadora Elaine Vidal Dias Gomes Líbano e a minha coorientadora Patricia Soares da Costa Pereira pelo excelente trabalho de orientação, por toda ajuda, conselho, dicas, por sempre estar disponível a qualquer momento compartilhando todo conhecimento e experiência que carregam. Graças a Deus fiz uma ótima escolha, eu tive não só orientadoras, mas sim ótimas amigas e parceiras de trabalho que com certeza levarei para sempre no meu coração. A elas, todo o meu carinho e admiração.

Agradeço a antiga UEZO, atual UERJ, minha segunda casa, onde venho seguindo toda a minha vida acadêmica. Tenho muito orgulho de ter feito parte dessa história.

Você nunca sabe a força que tem. Até que a sua única alternativa é ser forte.

*Johnny Depp*

## RESUMO

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

No presente trabalho foi investigado o efeito de compatibilização de blendas de Polietileno de alta densidade/Poli (tereftalato de etileno) (PEAD/PET) através da incorporação do argilomineral Bentonita (Bento) organofilizado. Um estudo foi realizado através da incorporação de diferentes concentrações de argila nas blendas PEAD/PET com composição de 50/50 %massa. As blendas poliméricas foram processadas por extrusão e posteriormente caracterizadas. Análises como densidade, dureza, índice de fluidez (MFI), difração de raios X (DRX), espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas. A análise de densidade indicou um aumento para as amostras compatibilizadas quando comparadas a amostra sem compatibilizante, no entanto, houve uma pequena redução para a amostra com 15% de Bento. A análise de dureza apresentou o mesmo comportamento indicando que o máximo ideal seria 10% de Bento. O índice de fluidez apresentou uma leve redução para todos os compósitos. Na análise de DRX observou-se que os picos de intensidade estão bem definidos, o que mostra claramente a existência de cristalinidade em todos os sistemas estudados. A bentonita não apresentou seus picos característicos nos compósitos PEAD/PET/Bento, sugerindo uma possível intercalação/esfoliação das camadas de argila na matriz PEAD/PET. A análise de FTIR mostrou que a adição da carga inorgânica à mistura polimérica não promoveu o aparecimento de novas bandas de absorção, sugerindo que exista mistura física simples sem reações químicas envolvidas. A análise de MEV dos compósitos confirma a hipótese da ocorrência de alguma compatibilização.

Palavras-chave: Argila Bentonita. Blendas Poliméricas. Compósitos. Polietileno de Alta Densidade. Poli Tereftalato de Etileno.



## ABSTRACT

LIMA, Aline Muniz. *Influence of bentonite clay on the properties of composites from recycled HDPE/ post-consumer PET blends*. 2022. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Programa de Pós - Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais - Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

In the present work, the compatibilization effect of high-density polyethylene/Poly (ethylene terephthalate) (HDPE/PET) blends was investigated through the incorporation of the organophilized clay mineral Bentonite (Bento). This study was carried out through the incorporation of clay concentrations into HDPE/PET blends, composition of 50/50% w/w. The polymeric blends were processed by extrusion and subsequently characterized. Analyzes such as density, hardness, flow index (MFI), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM) were performed. The density analysis indicated an increase for the compatibilized samples when compared to the sample without compatibilizer, however, there was a small reduction for the sample with 15% Bento. The hardness analysis showed the same behavior, indicating that the ideal maximum would be 10% Bento. The melt flow index showed a slight reduction for all composites. In the XRD analysis, it was observed that the intense peaks are well defined, which clearly shows the existence of crystallinity in all the systems samples. The bentonite showed no peak in the HDPE/PET/Bento composites, suggesting a possible intercalation/exfoliation of the clay layers in the HDPE/PET matrix. The FTIR analysis showed that the addition of inorganic filler to the polymeric mixture did not promote the appearance of new absorption bands, suggesting that there is a simple physical mixture without chemical reactions involved. The SEM analysis of the composites confirms the hypothesis of some compatibilization.

Keywords: Bentonite Clay. Polymer Blends. Composites. High Density Polyethylene. Poly Ethylene Terephthalate.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Carcaça de jovem Albatroz recheada de lixo plástico. ....	16
Figura 2 - Evolução do número de catadores no Brasil entre 1999 e 2009. ....	17
Figura 3 - Termoplásticos mais encontrados no resíduo sólido urbano. ....	20
Figura 4 - Arcos Coreanos feitos com compósitos. ....	21
Figura 5 - Capacete militar em compósito de baixo peso. ....	21
Figura 6 - Partes do interior de um Mercedes Classe A. ....	22
Figura 7 - Estrutura do poli (tereftalato de etileno). ....	24
Figura 8 - Reação de polimerização para formação do PET. ....	25
Figura 9 - Garrafas PET. ....	26
Figura 10 - Utilização de PET reciclado em manta, edredom, cabide de roupas. ....	27
Figura 11 - Utilização de PET reciclado em manta, edredom, cabide de roupas. ....	27
Figura 12 - Utilização de PET em revestimentos de carpete e bancos de ônibus. ....	28
Figura 13 - Estágios da reciclagem mecânica do plástico. ....	28
Figura 14 - Estrutura química do PE. ....	31
Figura 15 - Modelo estrutural do PE: esferas escuras representam átomos de carbono e esferas claras representam átomos de hidrogênio. ....	31
Figura 16 - Morfologia de um polímero semicristalino. ....	31
Figura 17 - Aplicações do PEAD. ....	32
Figura 18 - Estrutura cristalina dos argilominerais. a) Grupo Tetraédrico, b) Folha Tetraédrica, c) Grupo octaédrico, d) Folha Octaédric. ....	35
Figura 19 - Estrutura laminar da bentonita. ....	36
Figura 20 - Estrutura da argila montmorilonita. ....	37
Figura 21 - Estrutura cristalina da Montmorilonita. ....	37
Figura 22 - Esquema de troca de cátions em argila. ....	39
Figura 23 - Processos produtivos utilizados na transformação de termoplásticos. ....	39
Figura 24 - Esquema básico de extrusão. ....	40
Figura 25 - PEAD, PET e argila, respectivamente. ....	45
Figura 26 - Prensagem das amostras peletizadas. ....	48
Figura 27 - Densímetro DSL910 – GEHAKA. ....	49
Figura 28 - Durômetro Shore D- GS70. ....	50
Figura 29 - Plastômetro Melt Flow Quik Index –Ceast. ....	51
Figura 30 - Difratômetro de raios X Bruker-AXS D8 Advance Eco. ....	52
Figura 31 - FTIR - Thermo Scientific - NICOLET 6700. ....	52
Figura 32 - Microscópio eletrônico de varredura Hitachi TM3030Plus. ....	53
Figura 33 - Densidade da blenda de PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/Bento. ....	55
Figura 34 - Dureza da blenda de PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/Bento. ....	56
Figura 35 - MFI da blenda de PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/Bento. ....	57
Figura 36 - Difratograma de raios X das blendas PEAD/PET, dos compósitos PEAD/PET/Bento e do Bento puro. ....	58
Figura 37 - Espectro de FTIR da blenda PET/PEAD, dos compósitos PEAD/PET/Bento e Bento puro. ....	59
Figura 38 - Imagens de MEV da blenda PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/ Bento 5, 10 e 15%. ....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características e aplicações dos termoplásticos mais utilizados.....	18
Tabela 2 - Formulação dos compósitos.....	47
Tabela 3 - Valores de densidade da blenda de PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/Bento 5, 10, 15%.....	54
Tabela 4 - Valores de dureza da blenda PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/Bento 5, 10, 15%.....	55
Tabela 5 - Valores de MFI para a blenda PEAD/PET e compósitos PEAD/PET/Bento 5, 10, 15%.....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PTA	Ácido tereftálico
BENTO	Bentonita organofílica
DRX	Difração de raios X
FTIR	Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Forier
MEG	Monoetileno Glicol
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MFI	Índice de Fluidiez
MMT	Argila Montmorilonita
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Poli Tereftalato de Etileno
TGA	Análise Termogravimétrica

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	<b>Objetivo</b> .....	14
1.1.1	Objetivo Geral .....	14
1.1.2	Objetivos Específicos .....	14
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
2.1	Reciclagem de Polímeros Termoplásticos .....	15
2.1.1	Resíduos sólidos urbanos e seus impactos .....	15
2.1.2	Polímeros Termoplásticos .....	17
2.2	<b>Compósitos</b> .....	20
2.3	Matrizes poliméricas .....	23
2.3.1	PET – Poli (Tereftalato de Etileno) .....	24
2.3.2	PEAD (Polietileno de Alta Densidade) .....	30
2.4	Blendas Poliméricas .....	33
2.5	Compatibilização de Polímeros .....	34
2.5.1	Argila .....	34
2.5.2	Argila Montmorilonita Organofílica .....	36
2.5.3	Modificação química da argila .....	38
2.6	Processamento de Termoplásticos .....	39
2.6.1	Extrusão .....	39
2.7	Propriedades de blendas poliméricas compatibilizadas com argila .....	41
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	45
3.1	<b>Materiais</b> .....	45
3.2	<b>Equipamentos</b> .....	46
3.3	<b>Métodos</b> .....	46
3.3.1	Preparação dos compósitos .....	46
3.3.2	Preparação dos corpos de prova .....	47
3.4	<b>Caracterização</b> .....	48
3.4.1	Ensaio de Densidade .....	48
3.4.2	Ensaio de Dureza .....	49
3.4.3	Índice de Fluidez (MFI) .....	50
3.4.4	Difração de raios X (DRX) .....	51
3.4.5	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) .....	52
3.4.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	53
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	54
4.1	<b>Ensaio de Densidade</b> .....	54
4.2	<b>Ensaio de Dureza</b> .....	55
4.3	<b>Índice de Fluidez (MFI)</b> .....	57
4.4	<b>Difração de raios X (DRX)</b> .....	58
4.5	<b>Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</b> .....	59
4.6	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b> .....	60
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	61
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	62
7	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	63

## 1. INTRODUÇÃO

Os polímeros termoplásticos têm conquistado espaço como materiais de grande relevância para a sociedade atual, entretanto seu descarte ainda é um grande problema. Os materiais poliméricos como polietileno de alta densidade (PEAD) e poliésteres, como o poli (tereftalato de etileno) (PET), são termoplásticos amplamente utilizados e consumidos como embalagens 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).

O PEAD possui boa processabilidade, baixo custo e excelente equilíbrio de propriedades físicas. O PET possui aplicações de uso comum e de engenharia devido ao conjunto de propriedades – físico-mecânicas, térmicas, químicas, entre outras. Algumas de suas características são: excelente brilho, alta resistência mecânica, química e térmica, boa processabilidade e baixa permeabilidade ao gás (RODRIGUES *et al.*, 2020).

São inúmeros os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado desses materiais. Estima-se que até 2025, 2.42 bilhões de toneladas de plásticos serão descartados por ano (RIGAIL-CEDEÑO *et al.*, 2019). Dessa forma, a indústria de reciclagem tem trabalhado a fim de minimizar esses impactos por meio da sua reutilização. Uma alternativa interessante e promissora sob o ponto de vista ambiental, além do fato de agregar valor aos resíduos é o desenvolvimento de blendas, possibilitando a criação de material com propriedades intermediárias entre os constituintes puros. Blendas poliméricas são materiais que se destacam pela ampla faixa de possíveis aplicações, pois suas propriedades físicas, químicas e mecânicas podem ser alteradas, a depender da concentração dos constituintes, visando um desempenho desejável para o produto oferecendo um balanço atrativo dessas propriedades.

No contexto do presente trabalho, por exemplo, o PEAD pode modificar as propriedades do PET, pois apresenta alta resistência ao impacto e boa resistência aos solventes químicos. Por outro lado, o PET pode melhorar as propriedades mecânicas e térmicas do PEAD. Entretanto, a imiscibilidade entre ambos leva a formação de blendas com baixa adesão e alta tensão superficial, gerando separação de fases e resultando em um material com baixas propriedades mecânicas. Estas propriedades podem ser melhoradas adicionando-se um agente compatibilizante na interface dos dois polímeros (SPERLING, 1990; WANG *et al.*, 2019).

Nos últimos anos as argilas têm sido muito empregadas como agentes de compatibilização de blendas de polímeros imiscíveis, melhorando as suas propriedades. As argilas são

um material abundante e de baixo custo. As argilas mais utilizadas são as bentonitas (Bento), constituídas essencialmente pela montmorilonita (MMT), por possuir capacidade de laminação adequada e elevada razão de aspecto. No entanto, é preciso que a argila seja organicamente modificada por um agente tensoativo, com a finalidade de promover compatibilidade com o polímero. A etapa de organofilização é um dos meios principais para promover a dispersão e esfoliação da argila na matriz polimérica (AUBRY, 2019; DE ALMEIDA *et al.*, 2018; LU *et al.*, 2018; MEDERIC, *et al.*, 2018; MÉLO *et al.*, 2014). No processo de obtenção dos compósitos, a adição da bentonita organofílica tem como objetivo melhorar as propriedades da blend PEAD/PET.

## **1.1. Objetivo**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo estudar a influência da bentonita organofílica (BENTO), nas propriedades dos compósitos obtidos a partir de polietileno de alta densidade reciclado (PEAD) e poli (tereftalato de etileno) pós consumo (PET).

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Obter os compósitos de PEAD/PET/Bento através do processamento em extrusora dupla-rosca co-rotativa;
- Verificar a utilização de diferentes teores de bentonita organofílica (5, 10 e 15%) na melhoria da interação entre o PEAD e o PET.
- Avaliar as propriedades físicas, estruturais e morfológicas dos novos materiais compósitos obtidos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Reciclagem de Polímeros Termoplásticos

#### 2.1.1 Resíduos sólidos urbanos e seus impactos

O crescimento da população, desenvolvimento econômico e tecnológico, e a crescente urbanização vem trazendo muitas mudanças no estilo de vida das pessoas. Com isso, o aumento de resíduos sólidos tanto em quantidade quanto em diversidade, principalmente nos centros urbanos têm se tornado cada vez mais inevitável. Esses resíduos se tornaram uma ameaça para o ecossistema e à saúde humana. Até 2010 eram coletados no Brasil entre 180 e 250 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos; boa parte desses resíduos não possuem uma boa destinação sendo despejados em lixões a céu aberto. Iniciativas de coleta seletiva são imprescindíveis para a minimização desses problemas, porém ainda se precisa de muitas melhorias, sobretudo, no Brasil (GOUVEIA, 2012).

Estudos apontam que 40% dos resíduos gerados acabam em lixões e aterros sanitários sem os cuidados adequados, economicamente o país perde em torno de 8 bilhões de reais ao enterrar o lixo que poderia ser reaproveitado, esses dados enfatizam a importância do incentivo a reciclagem. O despejo inadequado desses resíduos pode ser contido por meio da redução, da reutilização e da reciclagem. Um grande problema frente a reciclagem de plásticos pós-consumo é a presença de contaminação (PEREIRA, 2014).

A decomposição da matéria orgânica presente no lixo resulta na formação de um líquido de cor escura, o chorume, que pode contaminar o solo e as águas superficiais ou subterâneas pela contaminação do lençol freático. Pode ocorrer também a formação de gases tóxicos, asfixiantes e explosivos que se acumulam no subsolo ou são lançados na atmosfera. Os locais de armazenamento e de disposição final tornam-se ambientes propícios para a proliferação de vetores e de outros agentes transmissores de doenças. Pode haver também a emissão de partículas e outros poluentes atmosféricos, diretamente pela queima de lixo ao ar livre ou pela incineração de dejetos sem o uso de equipamentos de controle adequados. De modo ge-



ral, os impactos dessa degradação estendem-se para além das áreas de disposição final dos resíduos, afetando toda a população (GOUVEIA, 2012).

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. Na observa-se um albatroz com resíduos plásticos em seu estômago. Mais de 260 espécies distintas já foram encontradas engasgadas, sufocadas, presas e imobilizadas por resíduos plásticos, tais resíduos também foram encontrados em estômagos e cloacas (câmara onde se abrem o canal intestinal, o aparelho urinário e o aparelho genital) de animais. Entre as espécies encontram-se invertebrados, aves marinhas, peixes, mamíferos e tartarugas (DIAS, 2016).

Figura 1 - Carcaça de jovem Albatroz recheada de lixo plástico.

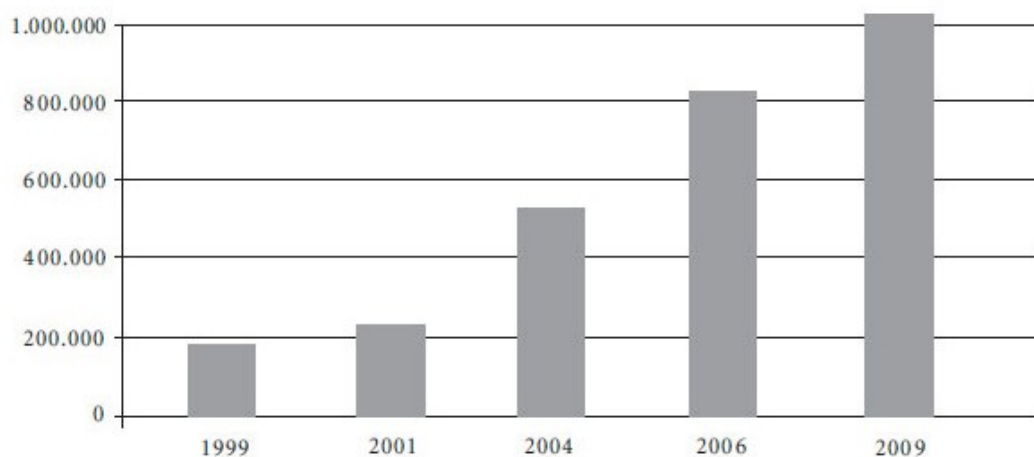


Fonte: DE CARVALHO DIAS, 2016

Além dos impactos ambientais e econômicos, a má disposição dos resíduos sólidos também constitui uma grande ameaça à saúde humana devido as substâncias tóxicas que são liberadas quando em contato com o solo. Esses compostos uma vez inalados podem se localizar no sangue, aumentando o risco de patologias como o câncer, anomalias congênitas, bebês podem nascer com baixo peso ou natimorto, e o efeito pode também ser abortivo (GOUVEIA, 2012).

Os trabalhadores responsáveis pela coleta desses resíduos, chamados catadores, constituem uma das classes que mais sofrem devido as más condições de trabalho, com grande exposição a esses agentes tóxicos sem nenhum equipamento adequado de proteção. Esses trabalhadores se expõem à grande risco de se contaminar com vírus, adquirir doenças respiratórias e osteomusculares, por exemplo. Apesar disso, esses profissionais são protagonistas da indústria de reciclagem no país. Não há números precisos de catadores, mas estima-se que no total há mais de um milhão nas cidades brasileiras. Na Figura 2, nota-se o crescimento do número de catadores entre 1999 e 2009 (GOUVEIA, 2012). Diante disso, torna-se muito importante a inclusão social desse segmento de trabalhadores, tornando a sua atividade mais digna, garantindo a geração de renda com mais segurança.

Figura 2 - Evolução do número de catadores no Brasil entre 1999 e 2009.



Fonte: GOUVEIA, 2012

### 2.1.2. Polímeros Termoplásticos

A palavra polímero possui origem grega, em que POLI significa muitos e MERO significa partes. Assim, POLÍMERO é uma macromolécula resultando de uma união de várias partes que se repetem em toda cadeia (PEREIRA, 2015).

Os polímeros termoplásticos são materiais muito consumidos, sobretudo pela indústria de embalagens, a sua produção e consumo aumentam constantemente. Em 2012, a produção de polímeros chegou a 288 milhões de toneladas no mundo, sendo o Brasil responsável por

apenas 6,41 milhões de toneladas. Nessa época, a participação do Brasil ainda era pequena se comparada a dimensão do país, correspondendo apenas 2% do volume produzido mundialmente. Dessa forma, a fabricação de compósitos vem atraindo muito interesse devido a novas e excelentes propriedades que essa combinação de materiais pode oferecer (LEI e WU, 2010). Apesar de existirem muitos termoplásticos, o polipropileno (PP), o polietileno (PE), o politereftalato de etileno (PET), o policloreto de vinila (PVC) e o poliestireno (PS) representam cerca de 90% do consumo nacional. São materiais que possuem propriedades como baixa densidade, baixo custo, são moldáveis à quente, excelentes isolantes térmicos e elétricos, resistentes ao impacto, possuem boa aparência e por isso possuem uma extensa gama de aplicações (COELHO, 2020). O poliuretano (PU) e o terpolímero de acrilonitrila-butadienoestireno (ABS) também são muito utilizados em escala industrial (PEREIRA, 2015). A Tabela 1 apresenta as principais características e aplicações de todos esses materiais termoplásticos.

Tabela 1 - Principais características e aplicações dos termoplásticos mais utilizados.

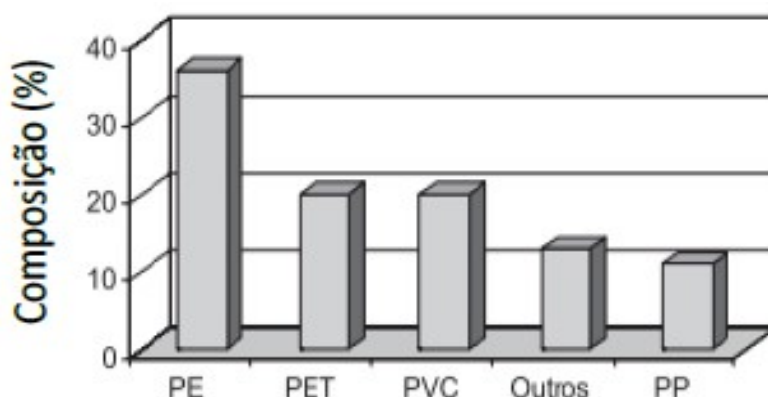
<b>Polímero</b>	<b>Principais Propriedades</b>	<b>Aplicação</b>
<b>Polietileno (PE)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo;</li> <li>- Elevada resistência química;</li> <li>- Maciez e flexibilidade;</li> <li>- Excelentes propriedades isolantes;</li> <li>- Baixa permeabilidade a água;</li> <li>- Atóxico;</li> <li>- Inodoro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PEBD: filmes, laminados recipientes, embalagens, brinquedos;</li> <li>- PELBD: embalagens de alimentos, bolsas de gelo, utensílios domésticos, canos e tubos.</li> <li>- PEAD: garrafas, brinquedos, filmes, tubos, tanques de combustível, materiais hospitalares.</li> <li>- PEUAPM: engrenagens, componentes para bombas de líquidos corrosivos, implantes de ossos artificiais.</li> </ul>
<b>Polipropileno (PP)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevada resistência química e a solventes;</li> <li>- Fácil moldagem e coloração;</li> <li>- Alta resistência a fratura por flexão ou fadiga;</li> <li>- Boa resistência ao impacto;</li> <li>- Boa estabilidade térmica (&gt;15°C).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brinquedos, recipientes para alimentos, remédios, produtos químicos, carcaças para eletrodomésticos, tubos para canetas, filmes orientados, carpetes, seringas de injeção, material hospitalar esterilizável, autopeças.</li> </ul>

<b>Poliestireno (PS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil processamento;</li> <li>- Fácil coloração;</li> <li>- Alta resistência a ácidos e álcalis;</li> <li>- Baixa densidade e absorção de umidade.</li> <li>- Baixa resistência a solventes orgânicos, calor e intempéries.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peças de máquinas e automóveis, gabinetes de TV e rádio, aparelhos eletrônicos, utensílios domésticos, brinquedos, isolantes térmicos, protetor de equipamentos.</li> </ul>
<b>Poli (cloreto de vinila) (PVC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo;</li> <li>- Elevada resistência à chama;</li> <li>- O processamento demanda cuidados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tubos, carcaças de utensílios domésticos, revestimentos de fios e cabos, composição de tintas.</li> </ul>
<b>Poli (tereftalato de etileno) (PET)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa resistência mecânica, térmica e química;</li> <li>- Boas propriedades de barreira;</li> <li>- Absorção de oxigênio de 10 a 100 vezes menor que outros polímeros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Garrafas para bebidas carbonatadas, óleos vegetais, produtos de limpeza, fibras, películas transparentes e altamente resistentes.</li> </ul>
<b>Poliuretano (PU)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pode ser estendido para melhorar suas propriedades;</li> <li>- Resistência a rasgos e impactos;</li> <li>- Estabilidade térmica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiais de revestimento, fibras, adesivos, borrachas, espumas plásticas, peças de automóveis.</li> </ul>
<b>Terpolímero de acrilonitrila butadienoestireno (ABS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistente à abrasão;</li> <li>- Impermeável à água e ligeiramente permeável ao vapor;</li> <li>- Flexível;</li> <li>- A resistência química depende da composição da resina;</li> <li>- Estabilidade térmica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Confeção de móveis, componentes para a indústria automotiva, chassis de televisores, rádios, painéis</li> </ul>

Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2015

A Figura 3 apresenta a proporção em que esses termoplásticos são encontrados nos resíduos sólidos urbanos, e como pode-se observar o PE apresenta um maior consumo, em torno de 40%.

Figura 3 - Termoplásticos mais encontrados no resíduo sólido urbano.



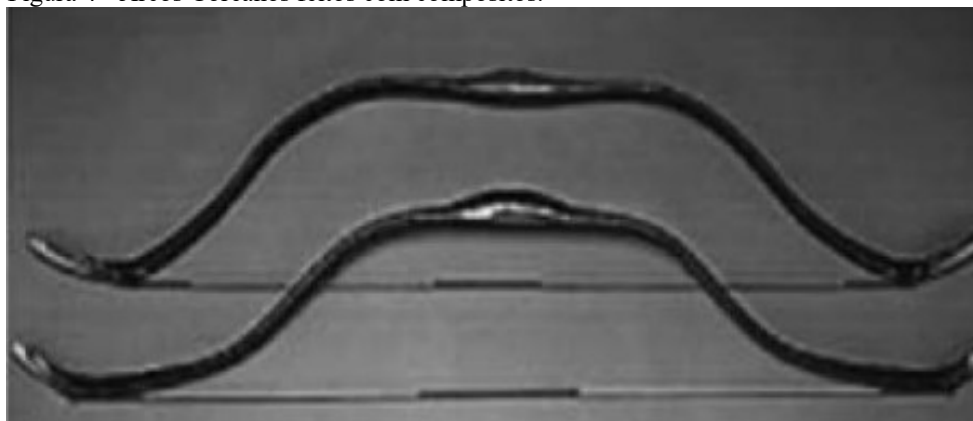
Fonte: COELHO, 2020

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. Nas indústrias eletrônicas há os chamados plásticos tecnológicos, que podem ser usados em produtos elétricos e eletrônicos. Mas para isso é necessário utilizar um retardante de chama eficaz que atualmente tem alto custo e causa perda de propriedades mecânicas, sendo essa a maior dificuldade para sua aplicação (RONKAY *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2014).

## 2.2 Compósitos

Ao contrário do que muitos pensam, os materiais compósitos já existem a séculos, originários das primeiras sociedades agrícolas, desde quando as paredes eram reforçadas com feixes de palha para aumentar a integridade estrutural, bem como arcos, Figura 4, e as carroças que eram constituídas de paus, ossos e chifres de animais para uso pessoal. Mais tarde, esses compósitos foram substituídos por materiais mais resistentes como a madeira (compósito natural) e o metal (FM VENTURA, 2009).

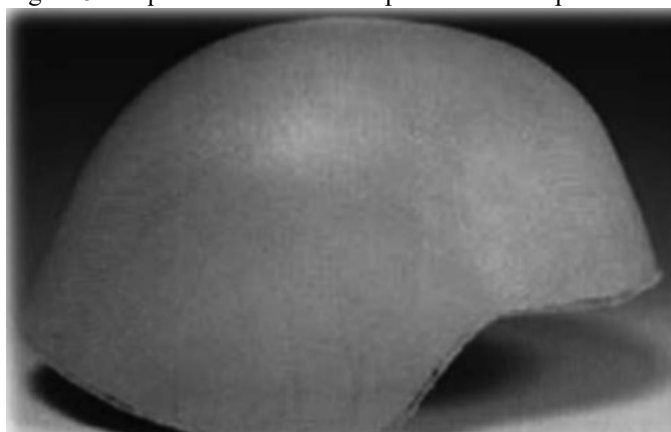
Figura 4 - Arcos Coreanos feitos com compósitos.



Fonte: Adaptado de FM VENTURA, 2009

Os compósitos ressurgiram na metade do século XX em aplicações elétricas devido as suas propriedades eletromagnéticas. Nas décadas de 80 e 90 o uso desses materiais tornaram-se frequentes para melhorar o desempenho de veículos espaciais e aviões militares. A introdução de fibras naturais como carga em compósitos deu origem a materiais muito utilizados no cotidiano; conforme pode ser observado nas Figuras 5 e 6. (FM VENTURA, 2009).

Figura 5 - Capacete militar em compósito de baixo peso.



Fonte: FM VENTURA, 2009

Figura 6 - Partes do interior de um Mercedes Classe A.



Fonte: FM VENTURA, 2009

Os materiais compósitos são constituídos por dois ou mais constituintes diferentes e representam a combinação de duas fases (matriz e reforço), apesar de não serem miscíveis entre si, são compatíveis quimicamente e possuem propriedades mecânicas que se complementam. A matriz polimérica é o material formado por polímeros ou por um polímero associado a outra classe de materiais os quais são responsáveis pela interligação do compósito. É reforço, os materiais responsáveis por completar as características mecânicas do compósito. Sendo assim, possuindo componentes com propriedades químicas e físicas diferentes, os compósitos poliméricos apresentam duas fases distintas chamadas: fase contínua e fase descontínua. A fase contínua então se refere à matriz polimérica e a fase descontínua, também conhecida como fase dispersa, se refere aos reforços. Sua utilização se dá em condições incomuns, onde as necessidades de utilização ou custo não podem ser atendidas pelas ligas metálicas, cerâmicas e polímeros convencionais (FILHO, 2017).

Os polímeros representam a classe de materiais mais utilizados em compósitos devido as suas excelentes propriedades mecânicas à temperatura ambiente, baixo peso e custo, e por ser de fácil fabricação e podem ser classificados em compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas e compósitos de fibras contínuas. A fabricação de compósitos de matriz polimérica é muito vantajosa, pois envolve altas pressões e baixas temperaturas, evitando a degradação do reforço (FM VENTURA, 2009).

A qualidade das propriedades mecânicas finais dos compósitos poliméricos depende de alguns parâmetros como a natureza das cargas, distribuição e orientação das cargas na ma-

triz e adesão interfacial carga-matriz. A melhoria das propriedades mecânicas é obtida por meio da transferência de tensões entre a carga e a matriz, isso só acontece quando há uma boa adesão na interface polímero-carga, pelo fato de a transferência ocorrer na região de contato entre as fases (SEGATELLI *et al.*, 2012; LIMA, 2019).

Essas aplicações são muito desejadas na aeronáutica e na indústria espacial, onde aconteceu a primeira aplicação de compósitos. Além disso, esse tipo de material proporciona uma grande economia já que a redução de peso é convertida em economia de combustível. Indústrias esportivas, aplicações biomédicas, construção civil, indústria naval e aplicações como reforço na reparação e manutenção de estruturas metálicas devido à incomparável dureza e rigidez, à versatilidade de produção, à simplicidade dos métodos de reparação e aos reduzidos custos de fabricação constituem a larga faixa de aplicação dessa classe de materiais (PEIXOTO, 2012; FM VENTURA, 2009; LIMA, 2019).

Dessa forma, os compósitos têm sido alvo de muitas pesquisas na área de materiais e grandes descobertas surgem a todo momento, são novos materiais, com novas propriedades e as mais diversas aplicações.

### **2.3. Matrizes poliméricas**

São muitos os polímeros que são utilizados como matrizes em compósitos reforçados com fibras naturais. Estes polímeros são formados pelas combinações de pequenas moléculas, denominadas monômeros, as quais se combinam para formação de macromoléculas. Os polímeros podem ser classificados de inúmeras formas, dependendo do objetivo de quem as classifica; normalmente, decorrente da estrutura química, do método de preparação, das características tecnológicas e do comportamento mecânico. Conforme as características tecnológicas os polímeros podem ser classificados em termoplásticos e termofixos. (FILHO 2017; PEREIRA, 2015).

Os polímeros termoplásticos possuem, como características principais, o fato de poderem ser amolecidos pelo calor e endurecidos pelo frio, repetidas vezes sem perder suas propriedades. Os termoplásticos podem ser moldados várias vezes devido à sua característica de se tornarem fluidos, sob ação da temperatura, e depois retornarem às características anteriores quando há um decréscimo de temperatura. Inversamente, denomina-se termofixos, os plásticos que são maleáveis apenas no momento de sua fabricação, não sendo possível remodelá-



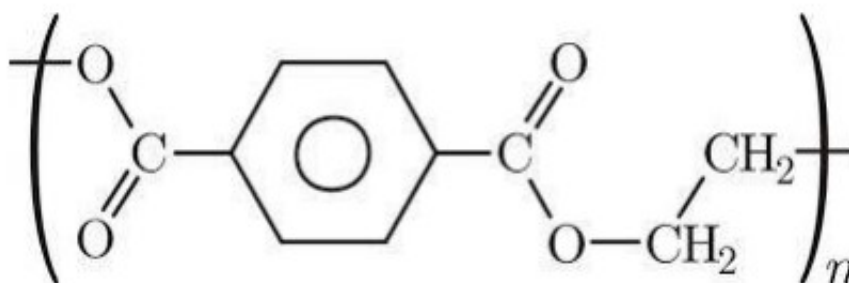
los posteriormente, pois não mais fundem após a sua solidificação (FILHO, 2017). Nessa dissertação serão abordadas as matrizes de PET e PEAD.

### 2.3.1. PET – Poli (Tereftalato de Etileno)

O PET é um polímero termoplástico semicristalino da classe dos poliésteres muito utilizado tanto em indústrias alimentícias, principalmente garrafas, quanto em artefatos de uso doméstico, na indústria têxtil, de automóveis, eletrônicos, entre outros setores devido ao seu baixo custo e alto desempenho, uma vez que possui alta transição vítrea e temperatura de fusão, proporcionando ótimas propriedades mecânicas, térmicas, químicas, físicas, de barreira e ópticas. É a terceira resina mais consumida no Brasil e a mais reciclada (ABIPLAST, 2016; ZAMAN *et al*, 2012). Esse material ocupa extenso espaço em aterros após seu descarte o que gera além da poluição visual pela disposição inadequada nas ruas, sérios problemas de inundações pelo entupimento de galerias pluviais e a redução da vida útil de aterros sanitários (RODRIGUES, 2020).

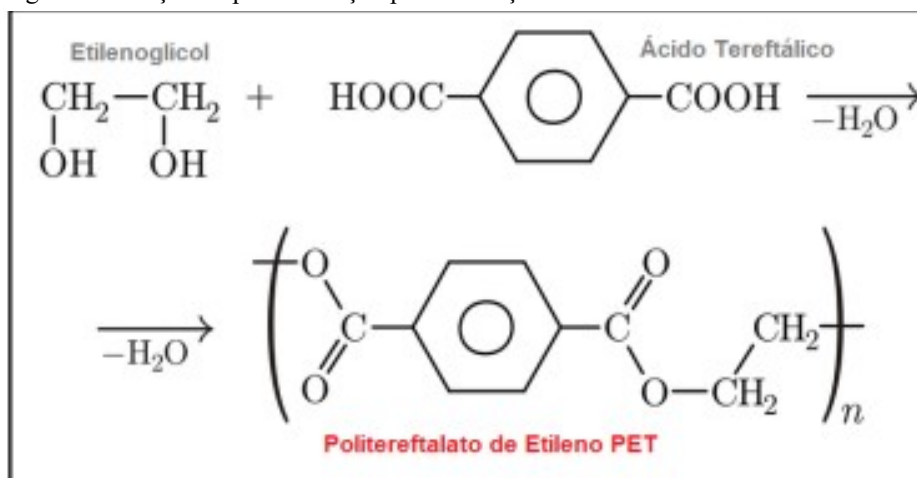
Produzida a partir da polimerização de ácido dicarboxílico e um glicol ou bifenol com água. É composta por carbono e oxigênio, possui anel aromático e a sua estrutura pode ser representada pela Figura 7. A Figura 8 mostra a reação de polimerização do ácido tereftálico (PTA) e o monoetileno glicol (MEG), derivados da nafta petroquímica (LUIZ, 2016).

Figura 7 - Estrutura do poli (tereftalato de etileno).



Fonte: DE CARVALHO DIAS, 2016

Figura 8 - Reação de polimerização para formação do PET.



Fonte: LUIZ, 2016

O PET apresenta temperatura de fusão cristalina de  $247 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  e densidade na faixa de  $1,39 - 1,41 \text{ g.cm}^{-3}$ . O grupo benzênico na cadeia principal confere alta resistência mecânica, sendo assim capaz de substituir outros materiais a depender da aplicação. O primeiro poliéster linear foi sintetizado em 1930 a partir do monômero a base de trimetileno glicol e do ácido dicarboxílico hexadecametileno, isso resultou na primeira fibra sintética. Porém, devido a sua baixa temperatura de fusão e baixa estabilidade hidrolítica, a qualidade do produto ficou comprometida. Somente em 1946 o PET foi descoberto e passou a ser muito utilizado na indústria têxtil. As primeiras embalagens surgiram nos Estados Unidos e em seguida na Europa no início dos anos 70. No Brasil ele só chegou em 1988 sendo utilizado primeiramente na indústria têxtil e só em 1993 passou a ser utilizado mais fortemente em embalagens, principalmente como garrafas (GONÇALVES, 2014; ROMÃO, 2009).

A destinação para a reciclagem dos resíduos de PET é um procedimento adequado para a economia de energia, preservação de fontes esgotáveis de matéria-prima, redução de custos com disposição final do resíduo, economia com a recuperação de áreas impactadas pelo mau acondicionamento dos resíduos, aumento da vida útil dos aterros sanitários, a redução de gastos com a limpeza e a saúde pública, e a geração de emprego e renda (RODRIGUES, 2020). Um grande problema da reciclagem do PET no setor de embalagens é a presença de contaminações presentes nos polímeros pós-consumo. A preocupação em não se contaminar os alimentos é grande e cuidados precisam ser tomados a todo o tempo. Diante disso, as embalagens devem conter três camadas formando um sanduíche de PET virgem com recheio de PET reciclado. A resolução (RDC N.20/2008) de 26 de março de 2008 prevê que as empresas

de reciclagem operem com tecnologias denominadas *superclean* e *bottle-to-bottle* para a produção do PET reciclado grau alimentício. No processo *bottle-to-bottle*, a única diferença em relação ao processo de reciclagem, é a adição da etapa de policondensação visando aumentar a massa molar do polímero (ROMÃO, 2009).

### 2.3.1.1 Aplicações do PET reciclado

O índice de reciclagem do PET no Brasil é um dos maiores, e as suas aplicações são as mais diversas. As Figuras 9-12 exemplificam alguns setores que utilizam PET reciclado. As garrafas de PET, Figura 9, apresentam muitas vantagens quando comparadas com a de outros materiais. São muito mais leves e resistentes, não quebram; por isso, possuem um fácil manuseio. O custo do transporte de garrafas a base de PET é muito menor; além disso possuem uma fácil estocagem, pois podem ser comprimidas, cabendo mais garrafas no mesmo espaço ao contrário das de vidro (DE CARVALHO DIAS, 2016).

Figura 9 - Garrafas PET.



Fonte DE CARVALHO DIAS, 2016

Alguns artefatos de uso doméstico que fazem uso do PET são: edredons, travesseiros, mantas, tapetes e carpetes, cordas do varal e as vassouras, conforme mostrado na Figura 10 (GONÇALVES, 2014).

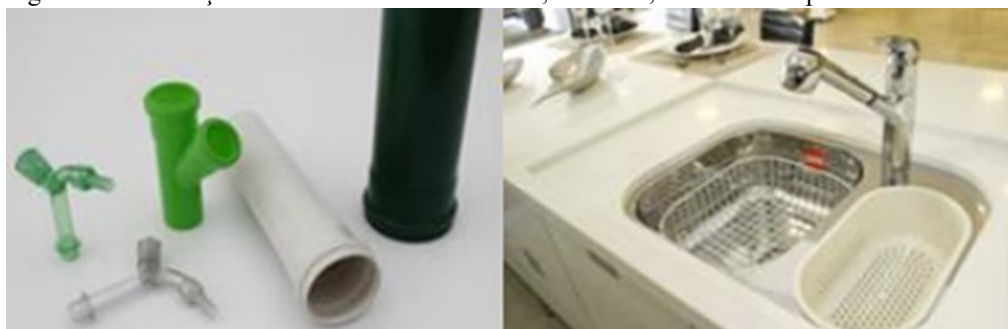
Figura 10 - Utilização de PET reciclado em manta, edredom, cabide de roupas.



Fonte: GONÇALVES, 2014

Na construção civil utilizam-se PET em caixas d'água, tubos e conexões, torneiras, telhas e na fabricação de tintas conforme ilustrado na Figura 11 (GONÇALVES, 2014).

Figura 11 - Utilização de PET reciclado em manta, edredom, cabide de roupas.



Fonte: GONÇALVES, 2014

Na indústria de automóveis os carros nacionais têm seus revestimentos de carpete produzidos com PET reciclado. Assim como bancos de ônibus, trens e metrô conforme a Figura 12 (GONÇALVES, 2014).

Figura 12 - Utilização de PET em revestimentos de carpete e bancos de ônibus.

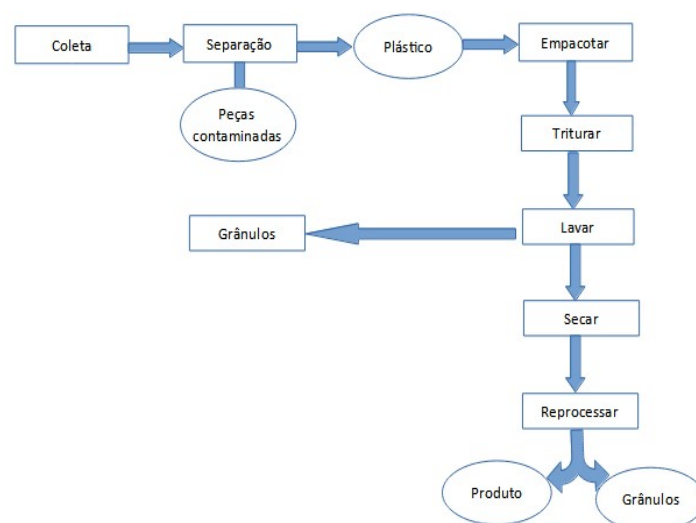


Fonte: GONÇALVES, 2014

### 2.3.1.2 Reciclagem mecânica do PET

A reciclagem mecânica é a principal forma de reciclagem do PET, Figura 13, em que o material em grânulos é novamente processado com polímeros virgens. Existe também a reciclagem química, que é quando o plástico é despolimerizado (destruição da estrutura polimérica), podendo haver depois novos processos de polimerização para formação de novos produtos. A reciclagem energética ocorre quando o plástico passa pela combustão, e os produtos finais são energia e CO<sub>2</sub>; neste tipo de reciclagem não há a ênfase em novos produtos, mas somente em energia (DEUS *et al.*, 2016).

Figura 13 - Estágios da reciclagem mecânica do plástico.



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

O processo de reciclagem pode ser classificado em quatro categorias, são elas: primária, secundária, terciária ou quaternária (DEUS *et al.*, 2016).

- Reciclagem primária - quando a matéria-prima é de fonte confiável e limpa. O processo envolve a seleção dos resíduos, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento.
- Reciclagem secundária - quando a matéria-prima é de resíduos sólidos urbanos e o processo é como na reciclagem anterior. A matéria prima pode também ser proveniente da indústria, mas o produto final tem propriedades inferiores à matéria virgem.
- Reciclagem terciária - quando o processo é baseado na despolimerização, ou decomposição química controlada, e os produtos poderão ser submetidos à polimerização, processamento, industrialização e utilização.
- Reciclagem quaternária - quando o processo é baseado na combustão, para o aproveitamento energético, onde há emissão de CO<sub>2</sub>.

Um grande problema da reciclagem é a perda de propriedades que o material sofre por meio da degradação térmica durante o processamento termomecânico ao qual é submetido. Induzem-se reações de cisão de cadeia, diminuindo o peso molecular do polímero, por isso, o pó resultante da reciclagem mecânica apresenta propriedades inferiores ao PET virgem. As condições de reprocessamento desses materiais devem ser estipuladas cuidadosamente para minimizar esses efeitos e a formação de blendas caracterizam atualmente uma grande alternativa frente a esse problema (FERREIRA *et al.*, 2011; CRUZ *et al.*, 2017). Por isso, a mistura com o PEAD reciclado constitui uma ótima alternativa para esse grande problema, produzindo assim propriedades melhoradas e diminuindo a suscetibilidade à hidrólise. Extensores de cadeia como fosfitos podem ser utilizados para compensar a perda de viscosidade durante a reciclagem (GUESSOUM, 2013).

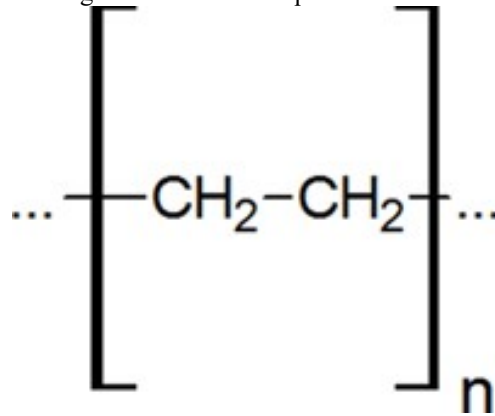
A separação de PET pós-consumo de outros resíduos é feita por meio da coleta seletiva, que são lugares destinados a separação tanto manual quanto mecânica desses materiais. Sua reciclagem é composta pela etapa de recuperação, que vai do descarte a confecção de fardos de recipientes prensados, revalorização que vai da compra da sucata à produção de flocos (pedaços de garrafas moídas) e a transformação desses flocos em grânulos ou materiais acabados (CONCEIÇÃO *et al.*, 2016).

### 2.3.2. PEAD (Poliétileno de Alta Densidade)

O polietileno (PE) é um material ceroso, sem cor e sem cheiro e configura-se, quimicamente, como polímero mais simples, sendo representado pela cadeia:  $(\text{CH}_2\text{-CH}_2)_n$ . É solúvel em alguns solventes orgânicos entre 60°C e 80°C e geralmente é plastificado. É utilizado nas populares sacolas plásticas, filmes, frascos, brinquedos, baldes, garrafas, cisternas, entre outros. A sua produção em escala mundial, implica que seu custo de aquisição seja menor que o dos demais polímeros, posicionando-o como um dos tipos de plásticos mais utilizados. O polietileno é inerte quimicamente, se originando da polimerização do etileno ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ), denominado de eteno pela IUPAC, de onde deriva seu nome. Várias reações de polimerização podem produzir o polietileno, dentre elas podemos citar: a polimerização por radicais livres; a polimerização aniônica e a polimerização catiônica. Cada uma destas polimerizações gera um tipo diferente de polietileno. O polietileno é um polímero de cadeia linear podendo se apresentar de algumas formas, são elas: PEBD (polietileno de baixa densidade); PEAD (polietileno de alta densidade); PELBD (polietileno linear de baixa densidade); UHWPE (polietileno de massa molecular ultra alta) e PEX (polietileno com formação de rede). O polietileno de baixa densidade (PEBD) é obtido em condições de pressões elevadas, enquanto o polietileno de alta densidade (PEAD) é obtido sob pressões ambientais, com o uso de catalisadores. O PEBD é mais flexível que o PEAD. Um grande exemplo de aplicação desses materiais é a Tupperware (COELHO, 2020; EDSON, 2017).

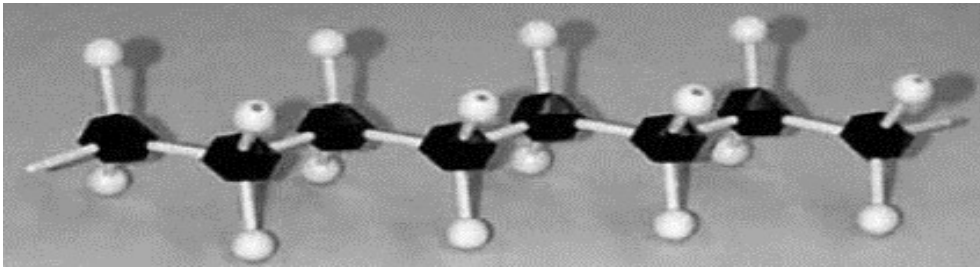
O PE é o mais simples dos hidrocarbonetos poliméricos, sua estrutura na fase cristalina apresenta conformações em zig-zag, sendo formada pela repetição do monômero  $-(\text{CH}_2)_n-$  e finalizada com grupos  $\text{CH}_3$ . O comprimento entre as ligações de carbono é da ordem de 0,154nm ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ) e o ângulo de ligação é de 109,5°, conforme representado na Figura 14 (PEREIRA, 2015). A Figura 15 mostra a estrutura do PE. O PE é um polímero semicristalino, ou seja, apresenta estrutura cristalina e amorfa ao mesmo tempo, conforme Figura 16 (PEREIRA, 2015).

Figura 14 - Estrutura química do PE.



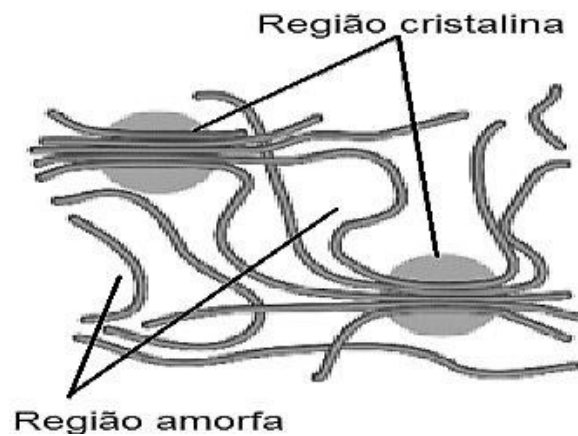
Fonte: PEREIRA, 2015

Figura 15 - Modelo estrutural do PE: esferas escuras representam átomos de carbono e esferas claras representam átomos de hidrogênio.



Fonte: PEREIRA, 2015

Figura 16 - Morfologia de um polímero semicristalino.



Fonte: PEREIRA, 2015

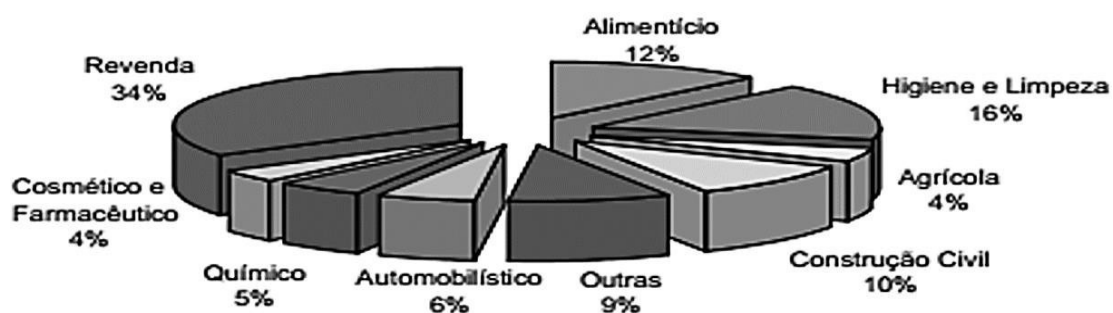
O PEAD foi sintetizado pela primeira vez em 1955, por meio de catalisadores organometálicos de Ziegler-Natta, com polimerização na fase líquida, com temperaturas mais bai-



xas e pressões mais próximas da atmosférica (PEREIRA, 2015). É um dos termoplásticos mais importantes, com excelentes propriedades como alta tenacidade, sobretudo em baixas temperaturas; boa resistência química e elétrica além de ser um material barato e de fácil produção por quase todos os tipos de processamento como injeção, compressão e moldagem por sopro; no entanto o seu baixo ponto de fusão e más propriedades térmicas limitam o seu uso industrial (ZAMAN *et al.*, 2012). Estruturalmente, é um material linear embora apresentem pequenas quantidades de ramificações de cadeias curtas e longas, é um polímero rígido e resistente à tração, com moderada resistência ao impacto, obtido por polimerização a baixa pressão (COUTINHO *et al.*, 2003).

O PEAD é um material que apresenta uma ótima relação custo/benefício entre os outros polímeros e materiais como vidro e metal. É um polímero inerte e atóxico e, devido ao seu caráter apolar, apresenta alta estabilidade química. Possui densidade de 0,94 a 0,96 g/cm<sup>3</sup> e cristalinidade entre 60% e 80% (KISSIN, 2012). As mais diversas aplicações do PEAD o tornam um dos materiais mais consumidos no mercado mundial em torno de 30%, perdendo apenas para o PET, em torno de 60%. Ele é muito utilizado em embalagens flexíveis, garrafas, sacos, filmes, recipientes, construção civil, indústria automobilística, pavimentações, madeira plástica, entre outros, conforme mostrado na Figura 17 (CRUZ *et al.*, 2008).

Figura 17 - Aplicações do PEAD.



Fonte: PEREIRA, 2015

O PEAD é obtido através da polimerização do eteno, e pode ocorrer de quatro formas (PEREIRA, 2015).

- Em suspensão – sistema com meio dispersante, monômero insolúvel e iniciador solúvel no solvente;

- Em solução – sistema com solvente, monômero solúvel e iniciador solúvel;
- Em emulsão – sistema com meio dispersante, monômero e polímero insolúvel e iniciador solúvel no dispersante (água);
- Em fase gasosa – ocorre em reatores de leito fluidizado, sendo essa a tecnologia mais moderna.

A maior parte da capacidade produtiva utiliza o processo de suspensão (PEREIRA, 2015).

## 2.4. Blendas Poliméricas

Blendas são misturas de materiais de mesma natureza, assim, as blendas poliméricas são caracterizadas pela mistura física de dois ou mais polímeros. Mistura de polímeros pós-consumo podem ser uma alternativa para a comercialização de materiais reciclados com custo/desempenho satisfatórios e potenciais de aplicação em embalagem e nos setores domésticos e de engenharia. No entanto, até agora, o desenvolvimento de processos eficientes para a reciclagem de misturas de materiais plásticos pós-consumo, por métodos físico-mecânicos, tem sido bastante limitado (PRACELA *et al.*, 2002). A mistura de polímeros termoplásticos é uma excelente técnica para produzir materiais com melhores propriedades e desempenho em comparação com os polímeros individuais envolvidos. As poliolefinas que possuem ligações relativamente fracas podem ser reforçadas pelo PET, relativamente mais fortes (RODRIGUES, 2020).

A produção de artefatos a partir destes resíduos é uma tarefa desafiadora, porque eles são imiscíveis entre si devido a diferença de polaridade entre eles. Enquanto o poliéster é composto de grupos polares, as poliolefinas são apolares. Polaridades divergentes geralmente levam à imiscibilidade. Misturas imiscíveis têm propriedades que não são adequadas para aplicações industriais e, portanto, são incompatíveis (CHIU e HSIAO, 2006; RODRIGUES, 2020). Ao serem misturados mecanicamente, os dois polímeros podem adquirir propriedades inferiores àquelas existentes antes do seu processamento devido à incompatibilidade entre eles. Esta ocorrência acarretaria uma mistura binária com uma desfavorável interação a nível molecular, podendo levar à presença de tensões interfaciais elevadas quando fundida (GONÇALVES, 2014). Os dados de cristalização e fusão são importantes para o desenvolvimento de processos que viabilizem a produção de produtos a partir de blendas. Portanto, existe uma

tendência geral ao aproveitamento desses resíduos considerando-se o imenso valor potencial dos materiais processados e as implicações dos desperdícios e poluição decorrentes da não utilização desses materiais (CRUZ *et al.*, 2008).

A compatibilização de polímeros imiscíveis é comum e normalmente se utiliza um copolímero em bloco para isso, a fim de se projetar materiais com propriedades finais apropriadas de acordo com seu uso final. Entretanto, atualmente as nanopartículas têm sido uma alternativa promissora em substituição de compatibilizadores macromoleculares, apresentando bons resultados, principalmente quando essas nanopartículas estão presentes na interface (HUITRIC *et al.*, 2018).

## **2.5. Compatibilização de Polímeros**

### 2.5.1. Argila

Nos últimos tempos têm se trabalhado muito a fim de conseguir uma alternativa que melhore a morfologia e interface de misturas poliméricas; e as argilas têm sido excelentes candidatas a agente compatibilizante com esse objetivo (YOUSFI *et al.*, 2012).

As argilas são materiais terrosos, naturais, de granulação fina e formados por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Pode ser composta por um ou vários argilominerais, conter matéria orgânica, sais solúveis, partículas de quartzo, pirita, calcita, outros minerais residuais e minerais amorfos. A argila já foi muito utilizada na antiguidade para artefatos como vasos e tijolos; hoje possui uma gama de aplicação na indústria de fertilizantes, catalisadores, elastômeros, cargas para polímeros, papel, entre outros (BARBOSA, 2009; ZADOROSNY, 2017; LIMA, 2019)

A mistura de polímeros e argila 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; LIMA, 2019). Além disso, elas conferem maior rigidez e resistência mecânica, maior tenacidade, maiores temperaturas de distorção e

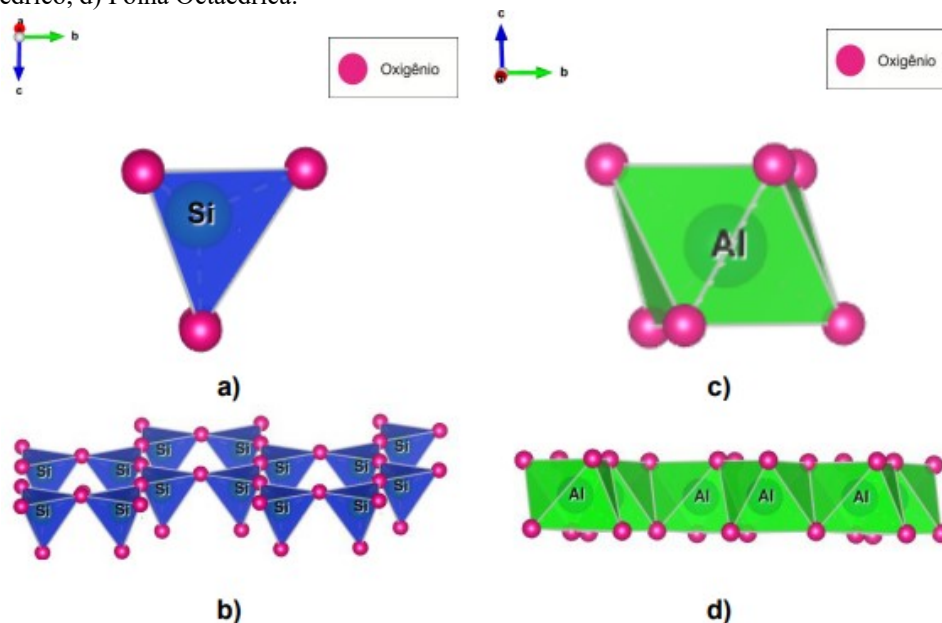
amolecimento, menor inflamabilidade, melhor resistência química e maior estabilidade dimensional (RODOLFO JR, 2009; LIMA, 2019). O controle mútuo da morfologia das fases e na dispersão da argila na mistura é um grande desafio, uma vez que depende da interação entre termodinâmica e cinética (TANAKA *et al.*, 2018).

O arranjo de suas folhas tetraédricas e octaédricas definem o tipo de argila, podendo ser (TEIXEIRA-NETO, 2009; LIMA, 2019):

- Lâmelas 1:1 – uma folha tetraédrica está ligada a uma folha octaédrica.
- Lâmelas 2:1 – uma folha octaédrica está no meio de duas folhas tetraédricas, como um sanduíche.

A argila mais comum e abundante é do tipo caulinita, 1:1. Entre as argilas 2:1, a montmorilonita está entre as mais abundantes e tecnologicamente relevantes (TEIXEIRA-NETO, 2009; LIMA, 2019). Na Figura 18, podemos observar a estrutura cristalina dos argilominerais.

Figura 18 - Estrutura cristalina dos argilominerais. a) Grupo Tetraédrico, b) Folha Tetraédrica, c) Grupo octaédrico, d) Folha Octaédrica.

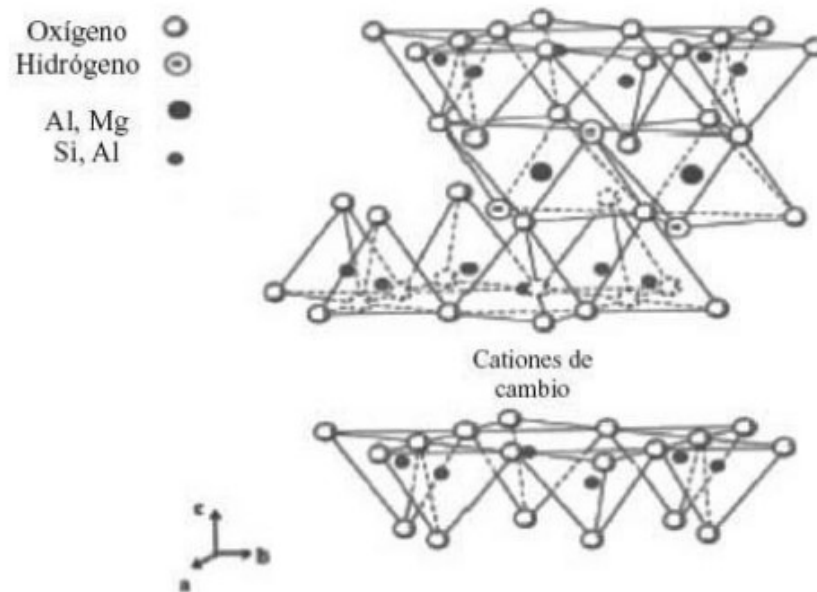


Fonte: CAETANO, 2015

### 2.5.2. Bentonita (Montmorilonita)

Dentre os vários silicatos em camadas, as bentonitas têm sido uma das mais empregadas nos últimos anos como cargas para a preparação de nanocompósitos poliméricos por apresentar como argilomineral predominante a montmorilonita (DANIELE, 2015). Bentonita, Figura 19, é o termo utilizado para denominar as argilas com granulometria muito fina, que apresenta tamanho de partículas variando de 0,1  $\mu\text{m}$  a 2  $\mu\text{m}$  de diâmetro e com tamanho médio de aproximadamente 0,5  $\mu\text{m}$  (CAETANO, 2015).

Figura 19 - Estrutura laminar da bentonita.

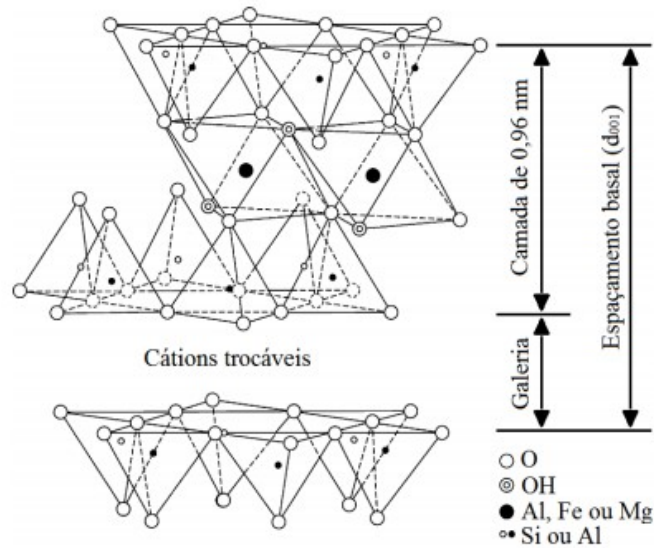


Fonte: DANIELE, 2015

A montmorilonita (MMT) é um argilomineral pertencente à família dos filossilicatos 2:1 composto por camadas estruturais formado por duas folhas tetraédricas de sílica (SiO<sub>4</sub>) e uma folha central octaédrica de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), unidas entre si por átomos de oxigênio comum a ambas as folhas, formando uma camada com espessura de 0,96 nm como ilustrado na Figura 20. A MMT possui 80 % dos cátions trocáveis nas galerias e 20 % nas superfícies laterais. As camadas são alocadas umas sobre as outras e são ligadas entre si por forças de van der

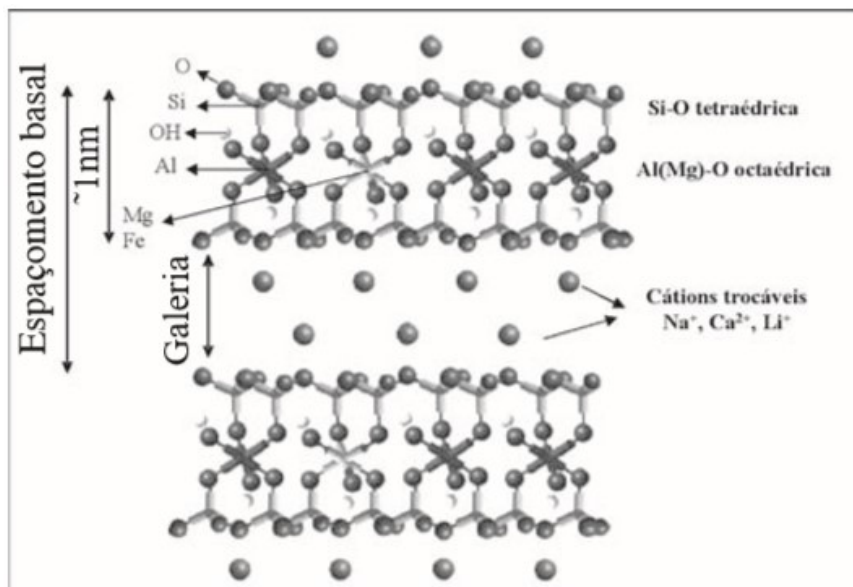
Walls, ligação fraca, deixando entre elas um espaço vazio denominada galeria ou espaço interlamelar, conforme ilustrado na Figura 21 (BERTUOLI, 2014; LIMA, 2019).

Figura 20 - Estrutura da argila montmorilonita.



Fonte: BERTUOLI, 2014

Figura 21 - Estrutura cristalina da Montmorilonita.



Fonte: PAIVA *et al.*, 2008; LIMA, 2019

Substituições isomórficas (substituição de cátions estruturais por outros cátions de valência inferior) do  $\text{Al}^{3+}$  por  $\text{Si}^{4+}$  na folha de tetraedros e  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{2+}$  por  $\text{Al}^{3+}$  na folha de octaedros acontecem na formação geológica das argilas, resultando em carga negativa na superfície das mesmas devido a uma deficiência de cargas na estrutura cristalina. Essa carga negativa é compensada pela presença de cátions como sódio ( $\text{Na}^+$ ) e cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) no espaço interlamelar (estrutura da argila) (NÓBREGA *et al.*, 2011; LIMA, 2019).

As argilas possuem inúmeras aplicações, entre elas, como carga em polímeros, porém, essa aplicação muitas das vezes só é possível se a argila passar por uma modificação superficial. Essa modificação é chamada de organofilização e vem sendo utilizada na área de ciência dos materiais objetivando incorporá-la como carga em nanocompósitos poliméricos para compatibilização (PAIVA *et al.*, 2008, LIMA, 2019)

Essa organofilização é necessária pois os compostos poliméricos (apolares) não possuem afinidade com a argila (polar) devido à diferença de polaridade. Existem diversos tipos de argila, entre elas: a caulinita, argilas vermelhas e especialmente as esmectitas. A montmorilonita (MMT), uma esmectita, vem atraindo o interesse de muitos pesquisadores por possuir características específicas e de grande interesse para a indústria (TINO, 2011; LIMA, 2019).

### 2.5.3. Modificação química da argila

Para a modificação química da argila são utilizados compostos orgânicos adequados em que uma extremidade da cadeia orgânica tenha afinidade com a superfície do argilomineral e a outra extremidade seja compatível, ou tenha afinidade com o meio orgânico que se pretende introduzir as partículas de argilas de forma a se ter interações micrométricas ou nanométricas, melhorando um conjunto de propriedades do compósito formulado (SILVA e FERREIRA, 2008; LIMA, 2019).

Os sais quaternários de amônio são, desde os anos 20 do século passado, os principais compostos utilizados para transformação das argilas esmectitas sódicas em organofílica. A organofilização ocorre por meio da adição de amônio (com ao menos uma cadeia contendo 12 ou mais átomos de carbono) em dispersões aquosas de argilas esmectitas sódicas, Figura 22. Nestas dispersões aquosas as partículas da argila encontram-se em elevado grau de delaminação, isto é, as partículas elementares da argila, que são lamelas, devem encontrar-se (em mai-

or ou menor grau) umas separadas das outras (e não empilhadas), facilitando a introdução dos compostos orgânicos, que as tornarão organofílicas (BARBOSA *et al.*, 2006; LIMA, 2019).

Figura 22 - Esquema de troca de cátions em argila.



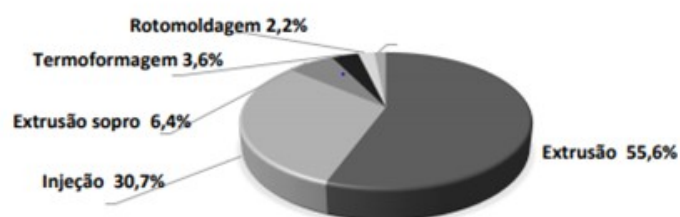
Fonte: PAIVA *et al.*; 2008

As argilas organofílicas contêm moléculas orgânicas entre suas camadas estruturais, isso permite a expansão entre os planos da argila, mudando a sua natureza hidrofílica para hidrofóbica ou organofílica (PAIVA *et al.*, 2008; LIMA, 2019).

## 2.6. Processamento de Termoplásticos

Os polímeros termoplásticos podem ser processados de diversas formas, são eles: extrusão, injeção, sopro, emulsão, termoformagem, rotomoldagem. Os processamentos mais usuais são extrusão e injeção, conforme pode ser observado na Figura 23 (PEREIRA, 2015).

Figura 23 - Processos produtivos utilizados na transformação de termoplásticos.



Fonte: PEREIRA, 2015



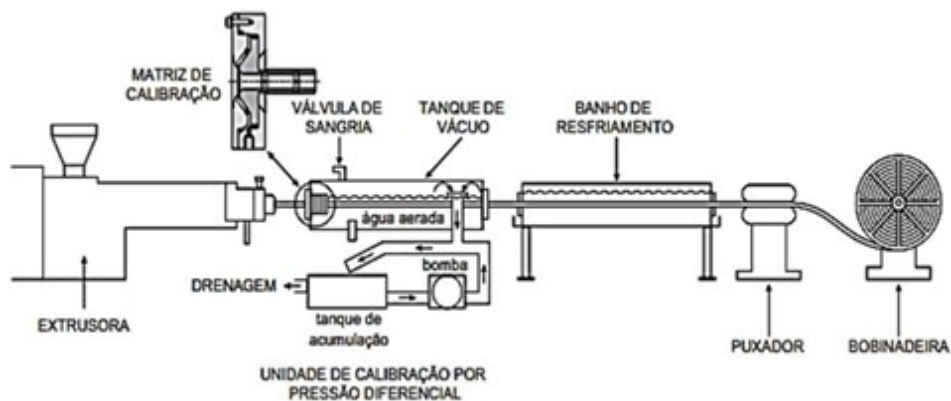
### 2.6.1. Extrusão

Este método é bastante atrativo devido à sua versatilidade, ausência de solventes, compatibilidade com as técnicas de processamento convencionais, simplicidade e menor custo que os processos de polimerização (síntese) *in situ*. De todas as técnicas para processamento de polímeros no estado fundido, a extrusora dupla-rosca tem provado ser a mais eficiente para a esfoliação e a dispersão das camadas de silicato. Devido à boa combinação de altas taxas de cisalhamento e de promover boa afinidade polímero-organoargila, essa extrusora leva à formação de compósitos com propriedades superiores aos produzidos pela técnica *in situ* (RAY e OKAMOTO, 2003).

Extrudar significa “empurrar”. Nesse processo o polímero é plastificado, homogeneizado e bombeado através da matriz com fluxo uniforme e constante, de forma que o extrudado atinja o resfriamento com as dimensões adequadas. É, portanto, um processo contínuo (PEREIRA, 2015).

Consiste em forçar a passagem do material fundido pela matriz de perfil desejado, dando forma ao produto final. Esse perfil pode ser calibrado, resfriado, cortado ou enrolado, conforme demonstrado na Figura 24. Antes de chegar à matriz o material granulado passa por dentro de um cilindro aquecido, contendo em seu interior uma ou duas roscas “sem fim”, que transportam, misturam, compactam e permitem a retirada de gases liberados no processo (PEREIRA, 2015).

Figura 24 - Esquema básico de extrusão.



Fonte: PEREIRA, 2015

## 2.7. Propriedades de blendas poliméricas compatibilizadas com argila

COELHO e MORALES (2013) estudaram o efeito da montmorilonita organofílica na compatibilização e nas propriedades morfológicas, mecânicas e térmicas de blendas de PA6/PEBD. Blendas imiscíveis de poliamida (PA6) e polietileno de baixa densidade (PEBD) foram preparadas com e sem a presença de polietileno enxertado com anidrido maleico como compatibilizante. Montmorilonita organofílica foi incorporada nas blendas por intercalação do fundido. Foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de transmissão (MET), difração de raios X (DRX), calorimetria diferencial exploratória (DSC) e ensaios de resistência a tração. Análises morfológicas e estruturais apresentaram boa dispersão da argila, com a obtenção de estruturas intercaladas e esfoliadas em todos os nanocompósitos estudados. A separação de fases foi observada nas amostras, e tanto o compatibilizante como a argila causaram redução no tamanho dos domínios. Esta estrutura proporcionou uma melhora significativa nas propriedades mecânicas das blendas, revelando o efeito de reforço causado pela argila. O módulo elástico e a tensão máxima aumentaram em até 300% e 100%, respectivamente. O efeito da compatibilização da argila foi positivo. Pelas análises de DSC pode-se observar o surgimento de um pico na região de fusão da PA6 atribuído à formação de uma nova fase cristalina devido à presença de argila.

OLIVEIRA, *et al.* (2015) apresentaram estudos sobre a influência da modificação da argila montmorilonita nas propriedades morfológicas, termo-mecânicas e mecânicas de nanocompósitos de blendas de poliamida 6/Acrilonitrila-EPDM-estireno (AES). Três nanoargilas foram utilizadas para a preparação dos nanocompósitos: duas montmorilonitas comerciais modificadas organicamente (Cloisite 30B e Cloisite 20A) e uma montmorilonita sódica não modificada (Cloisite Na<sup>+</sup>). Difração de Raios X em alto ângulo, microscopia eletrônica de transmissão e testes de tração foram utilizados para avaliar as propriedades dos materiais. Para os nanocompósitos preparados com Cloisite 30B observou-se um aumento do espaçamento basal desta nanocarga e nanocompósitos esfoliados foram obtidos. Por outro lado, as misturas com Cloisite 20A apresentaram estrutura intercalada e para todas as misturas com Cloisite Na<sup>+</sup>, verificou-se a presença de pequenos aglomerados de nanoargila. As propriedades termo-mecânicas foram avaliadas por análise dinâmico mecânica e temperatura de deflexão térmica. Os resultados mostraram que a modificação da nanocarga afeta simultaneamente o grau de reforço da matriz, dispersão das lamelas de argila na blenda e tamanho da fase dispersa AES. A adição das diferentes nanoargilas aumenta o módulo elástico de todos os nanocompó-

sitos ternários em relação à blenda pura sem argila. Por outro lado, um aumento na tenacidade foi obtido apenas para os sistemas com Cloisite Na<sup>+</sup>. Um aumento significativo no módulo de armazenamento e HDT foi observado pela incorporação da Cloisite 30B na blenda.

FERREIRA *et al.* (2011) avaliaram o uso de argila organofílica na compatibilização de misturas PP/EPDM. Misturas PP/EPDM com variadas razões PP:EPDM, não compatibilizadas e compatibilizadas com o polipropileno modificado com anidrido maleico (PP-g-MA), foram preparadas por fusão. A influência da adição de 1 pcr (uma parte por cem de resina) de uma argila bentonita na morfologia, propriedades mecânicas e reológicas destas misturas foi avaliada. A bentonita empregada como carga, proveniente da Bentonit União Nordeste/PB foi purificada e modificada organicamente antes de ser adicionada às misturas. Os dados de difratometria de raios X mostraram que, para diferentes razões de PP:EPDM na mistura a incorporação de 1 pcr de argila organofílica resultou na formação de nanocompósitos desordenados (20 ou 40% de EPDM) ou intercalados/esfoliados (10 e 30% EPDM), respectivamente. A incorporação da argila organofílica provocou alterações nas propriedades morfológicas, mecânicas e reológicas das misturas, especialmente daquelas preparadas com 30% em massa de EPDM onde a ação compatibilizante da argila foi observada. O processo de compatibilização praticamente não foi alterado com a incorporação simultânea da argila modificada organicamente e do PP-g-MA. Isto indica que a argila organofílica pode ser utilizada como agente compatibilizante inorgânico para estas misturas em substituição ao compatibilizante orgânico PP-g-MA, tradicionalmente usado para fortalecer a interface e estabilizar a morfologia das blendas PP/EPDM.

RIGAIL-CEDEÑO *et al.* (2019) estudaram a morfologia e propriedades termomecânicas de nanocompósitos de argila, polietileno de alta densidade reciclado (rHDPE) e de tereftalato de polietileno reciclado (rPET). Misturas de rHDPE (75% em peso) provenientes de embalagens e rPET (25% em peso) de garrafas foram misturadas com duas organoargilas (Cloisite 20A e Cloisite 30B) (3% em peso) e um agente compatibilizante à base de etileno-glicidil metacrilato (EGMA) (5% em peso). Os nanocompósitos de plásticos reciclados foram processados por extrusão e injeção. Diversas técnicas foram utilizadas para caracterizar a dispersão, morfologia, propriedades mecânicas e compatibilização dessas blendas. O efeito de reforço do rPET na fase contínua de rHDPE dependeu do tipo de argila orgânica e do aditivo compatibilizante. Ambas as argilas orgânicas aumentaram a rigidez e a resistência do rHDPE e do rPET, como evidenciado por um aumento no módulo de Young correspondente e na resistência à tração final. O EGMA aumentou a compatibilidade na mistura de plásticos reciclados e nos nanocompósitos de argilas como evidenciado nos resultados de alongamento e energia na

ruptura, o que era desejado. Por outro lado, Cloisite 20A mostrou-se mais compatível com EGMA do que Cloisite 30B nessas misturas de rHDPE/rPET com base nos resultados das propriedades termomecânicas. A mistura rHDPE/rPET com EGMA/Cloisite 20A apresentou o melhor equilíbrio entre rigidez, resistência e tenacidade.

CHEN e EVANS (2011) investigaram misturas de polímeros de poliestireno (PS)/acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e PS/ABS de alto impacto com aditivos organoargilosos e copolímeros. Eles foram preparados por processamento de fusão usando diferentes sequências de mistura para testar a capacidade da argila em realizar um papel compatibilizante em blendas poliméricas. Em geral, a adição de argila aumentou o módulo de tração e teve pouco efeito na resistência à tração. Para as blendas estudadas, a adição de argilas organofílicas causou uma redução catastrófica na resistência ao impacto, propriedade crítica para a viabilidade comercial. Os nanocompósitos de mistura de polímeros adotaram uma estrutura semelhante à dos nanocompósitos de ABS/argila conforme determinado por difração de raios X e microscopia eletrônica de transmissão. Sugere-se que o reforço de argila inibe a absorção de energia pela formação de fissuras e cisalhamento em altas taxas de deformação. A mistura simultânea dos três componentes proporcionou nanocompósitos com alongamento e energia superiores à falha em comparação com a mistura sequencial. A argila pré-tratada com um surfactante contendo benzila forneceu as melhores propriedades gerais entre as várias argilas testadas e dos dois teores de argila estudados 4% em peso foi preferido em vez de 8% em peso de adição.

BRITO *et al.* (2013) realizaram estudos de nanocompósitos obtidos a partir de blendas entre o poli (ácido lático) e o terpolímero (etileno/acrilato de metila/metacrilato de glicidila). A argila organofílica comercial Cloisite 20A (C20A) foi utilizada como nanocarga. Interações entre a argila e o terpolímero foram investigadas por reometria de torque. As estruturas dos nanocompósitos foram determinadas por difração de raios X, sendo obtidos nanocompósitos intercalados e microcompósitos. A atuação da argila como agente compatibilizante foi evidenciada por fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura. As propriedades mecânicas das blendas mostraram-se dependentes tanto da morfologia como do grau de dispersão da argila. Estudos por reometria de torque indicaram que a argila organofílica C20A pode ter reagido quimicamente com o terpolímero EMA-GMA e que a velocidade de reação aumenta à medida que a concentração de C20A aumenta. A reometria de torque também evidenciou mudanças na estrutura da argila, passando de tactóide a intercalada e finalmente esfoliada, durante o tempo de residência no misturador. O estado de dispersão da argila influenciou as propriedades mecânicas das blendas, deste modo, os nanocompósitos intercalados a-

presentaram melhor balanço de propriedades comparados aos microcompósitos. A partir das análises morfológicas e dos ensaios mecânicos evidenciou-se que a adição da argila proporcionou redução do tamanho das partículas da fase dispersa, ou seja, atuou como agente compatibilizante, resultando em aumento da resistência ao impacto, entretanto, sem que houvesse perda considerável do módulo de rigidez.

MORALES *et al.* (2010) estudaram a avaliação da esfoliação da argila organofílica pela aplicação do modelo de Nielsen e das propriedades mecânicas, ópticas e permeabilidade em nanocompósitos de PEAD/PEBDL. Uma blenda de polietileno de alta densidade e polietileno de baixa densidade (PEAD/PEBDL) comumente utilizada em filmes de embalagem foi modificada com argila montmorilonita organofílica comercial para obter nanocompósitos com melhores propriedades de barreira. Amostras com 5 e 7,5% de argila (em massa) foram estudadas em diferentes condições de processamento. Filmes produzidos com os nanocompósitos foram avaliados quanto à dispersão da argila por difração de raios X e microscopia eletrônica de transmissão. As propriedades de barreira dos filmes foram determinadas pelas medições de permeabilidade ao oxigênio e ao vapor d'água. As propriedades mecânicas e ópticas também foram determinadas. Observou-se uma estrutura com a argila parcialmente esfoliada e intercalada. A permeabilidade ao oxigênio diminuiu significativamente enquanto a permeabilidade à água foi pouco influenciada. As propriedades mecânicas e a transparência dos filmes foram pouco alteradas. O modelo de Nielsen foi aplicado para os dados de permeabilidade relativa e demonstrou ser um ótimo recurso para a avaliação do grau de esfoliação da argila para as diferentes amostras, que foram confirmadas pelas análises realizadas em microscopia eletrônica de transmissão. O modelo de Nielsen trata-se de um estudo a partir de propriedades macroscópicas para a interpretação do desempenho dos nanocompósitos. Este recurso indicou que o sistema estudado apresenta duas ocorrências importantes: esfoliação insuficiente e baixa razão de aspecto da argila. Portanto, pode-se concluir que aumentos significativos de propriedades de barreira são possíveis pela obtenção de uma boa esfoliação, mas também se faz necessária a utilização de argilas com alta razão de aspecto das nanopartículas.

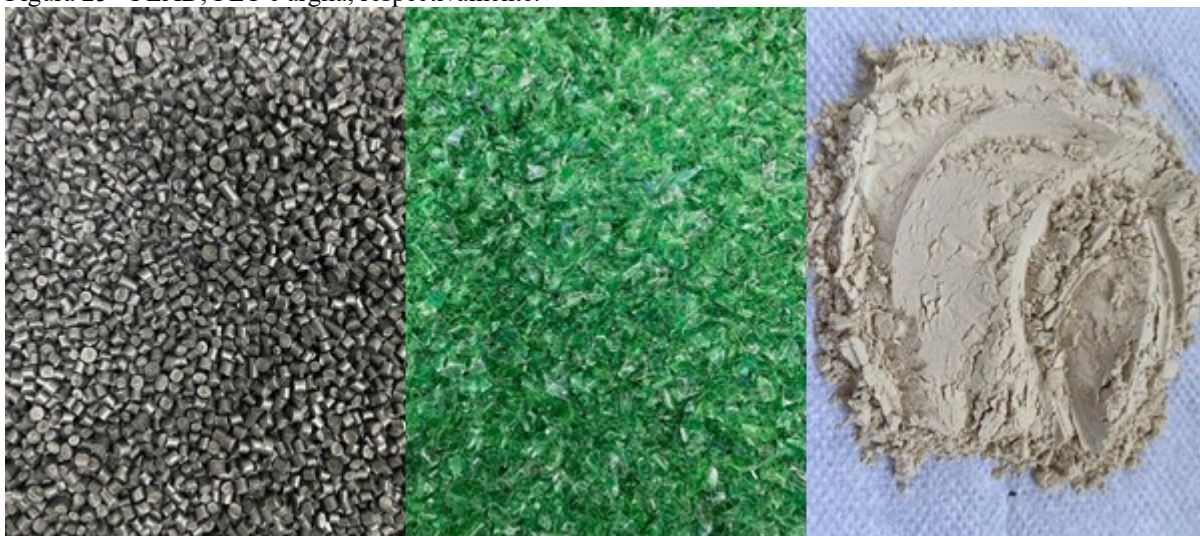
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os materiais utilizados para a realização deste trabalho, bem como os procedimentos adotados na preparação do desenvolvimento dos compósitos PEAD/PET/Bento.

#### 3.1 Materiais

O PEAD reciclado foi gentilmente cedido pela Empresa de Reciclagem Peterlu, Seropédica, Rio de Janeiro. O PET, pós-consumo, na cor verde, oriundo de garrafas de refrigerante, utilizado neste trabalho foi gentilmente cedido pela empresa REPET, São Paulo, Brasil. A argila bentonita organofílica é uma argila comercial, ela foi comprada já organofilizada pela empresa Bentonorte, RJ. A bentonita foi seca em estufa e depois peneirada para a obtenção de uma granulometria uniforme, de 325 mesh. Esses materiais estão apresentados na Figura 25 abaixo.

Figura 25 - PEAD, PET e argila, respectivamente.



Fonte: Autor

## 3.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados para o desenvolvimento desta dissertação encontram-se listados abaixo:

- Balança hemi-analítica Bel Engineering M3102 <sup>(a)</sup>
- Densímetro digital, marca GEAKA, modelo DSL 910 <sup>(a)</sup>
- Difratorômetro de raios X Bruker-AXS D8 Advance Eco<sup>(b)</sup>
- Durômetro Shore D, marca, modelo, GS 702 TYPE <sup>(a)</sup>
- Espectrofotômetro FTIR - Nicolet 6700 da Thermo Scientific<sup>(c)</sup>
- Extrusora Teck Tril, modelo DCT 20-40 <sup>(a)</sup>
- Medidor de índice de fluidez, marca, MELT SLOW (CEAST) <sup>(a)</sup>
- Microscópio eletrônico de varredura Hitachi TM3030Plus<sup>(b)</sup>
- Prensa hidráulica Marconi modelo MA098/A <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Laboratório Didático e Pesquisa de Processamento de Materiais - LDPPM - UERJ-ZO

<sup>(b)</sup> Centro de Tecnologia Mineral - CETEM – UFRJ

<sup>(c)</sup> Laboratório de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - UFRJ

## 3.3 Métodos

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

### 3.3.1 Preparação dos compósitos

Para avaliar o efeito compatibilizante da mistura PEAD/PET diferentes teores de argila bentonitas foram empregados: 5, 10 e 15% em peso. A Tabela 2 apresenta a formulação e nomenclatura dos materiais utilizados.

O PEAD, PET e compatibilizante (argila) foram colocados em sacos e em seguida agitados manualmente de forma vigorosa, buscando melhorar desta forma a distribuição dos pellets de PEAD e PET junto com o compatibilizante. Em seguida encaminhou-se a mistura para o processamento.

Tabela 2 - Formulação dos compósitos.

<b>Nomenclatura</b>	<b>PEAD (% m/m)</b>	<b>PET (% m/m)</b>	<b>Bento (%m/m)</b>
PEAD/PET	50	50	-
PEAD/PET/Bento 5%	47,5	47,5	5
PEAD/PET/Bento 10%	45	45	10
PEAD/PET/Bento 15%	42,5	42,5	15

Fonte: AUTOR, 2022.

Os compósitos foram preparados em extrusora dupla-rosca co-rotativa (Teck Tril, modelo DCT 20-40), com um perfil de temperaturas variando de 190 a 250°C desde a alimentação até a saída da matriz. A velocidade de rotação utilizada foi de 30rpm. As amostras foram obtidas na forma de filamentos contínuos. O material foi então picotado em tamanho próximo ao grão do PEAD e do PET.

### 3.3.2 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova dos materiais foram confeccionados em prensa hidráulica de aquecimento, marca Marconi, modelo MA 098, Figura 26, a partir da prensagem das amostras pelletizadas que foram obtidas durante a extrusão. Foram confeccionados filmes com 10 e 30 g para cada percentual de argila empregada.

As amostras foram submetidas a temperatura de 280 °C por 30 min para as amostras com 10 g e por 1 hora para as amostras com 30 g na prensa quente para fundir com pressão de 9 bar para formação dos filmes. Em seguida, essas amostras foram caracterizadas.



Figura 26 - Prensagem das amostras peletizadas.



Fonte: Autor

### 3.4 Caracterização

Para o ensaio de dureza foram utilizadas as amostras com 30g, para as demais análises foram utilizadas as amostras com 10g. Cada análise utilizou cinco corpos de prova.

#### 3.4.1 Ensaio de Densidade

As amostras de PEAD (reciclado)/PET (pós-consumo) e os compósitos PE-AD/PET/Bento (5, 10 e 15%) foram caracterizadas pelos ensaios de densidade utilizando-se o densímetro (modelo DSL 910- GEHAKA), Figura 27, de acordo com a norma ASTM D792 (2008). O valor da densidade foi calculado a partir da média aritmética.

Figura 27 - Densímetro DSL910 – GEHAKA.



Fonte: COELHO (2020)

### 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 – GS70, Figura 28, pois a amostra foi considerada um “plástico rígido”. Foram utilizados quatro corpos de prova das amostras com dimensão de 1 cm x 1 cm. Em cada amostra foram analisados 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 das amostras.

Figura 28 - Durômetro Shore D- GS70.



Fonte: COELHO, 2020

### 3.4.3 Índice de Fluidez (MFI)

O ensaio de MFI foi realizado nas blendas de PEAD (reciclado)/PET (pós-consumo) 50/50 sem e com compatibilizante (5 e 10 e 15%). Para a realização do mesmo foi utilizado o equipamento medidor de índice de fluidez (CEAST- Quick Index), Figura 29, de acordo com a norma (ASTM D1238-2010), a uma temperatura de 230°C e carga de 2,160Kg de cada material. Após o resfriamento das alíquotas, cada uma foi pesada em balança analítica (Marte AY220) e, a partir desses dados, foi calculado o valor do índice de fluidez, cuja unidade é expressa em gramas/10 minutos. Para cada amostra foi excluído o maior e o menor valor, calculando assim a média aritmética de cinco determinações.

Figura 29 - Plastômetro Melt Flow Quik Index –Ceast.

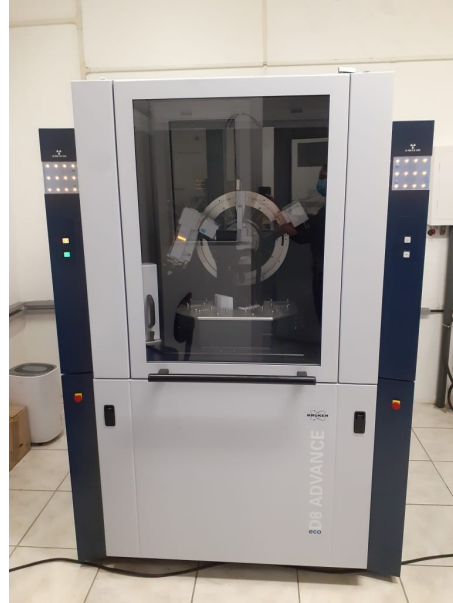


Fonte: COELHO (2020)

#### 3.4.4 Difração de raios X (DRX)

A estrutura cristalina dos compósitos de PEAD (reciclado)/PET (pós-consumo) 50/50 sem e com compatibilizante (5 e 10 e 15%) foi investigada por difratometria de raios X a altos ângulos (WAXD). Os difratogramas foram obtidos empregando a radiação de  $\text{CuK}\alpha$ , com comprimento de onda  $1.54180 \text{ \AA}$ , com tensão 40 kv e corrente de 25mA, Figura 30.

Figura 30 - Difratorômetro de raios X Bruker-AXS D8 Advance Eco.



Fonte: AUTOR, 2022.

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

Para identificar possíveis mudanças na estrutura química dos compósitos foram realizadas análises de FTIR (FTIR - modelo Nicolet 6700 da Thermo Scientific), Figura 31, no modo ATR, utilizando cristal de ZnSe, na faixa de número de ondas de  $4000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ , com 120 varreduras e resolução de  $4 \text{ cm}^{-1}$ .

Figura 31 - FTIR - Thermo Scientific - NICOLET 6700.



Fonte: COELHO (2020)

### 3.4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização morfológica tem por objetivo verificar a dispersão do compatibilizante na blenda PEAD/PET, para essa análise foram utilizadas as amostras de 10g. A análise morfológica dos materiais puros e de suas misturas com e sem agente compatibilizante foi realizada por MEV na superfície das amostras. Para isso, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura Hitachi TM3030Plus, Figura 32. Por se tratar de um material não condutor, as amostras foram previamente recobertas com ouro. Foi utilizada uma voltagem de aceleração de elétrons igual a 15 KV e magnitude de ampliação de imagem 2000x.

Figura 32 - Microscópio eletrônico de varredura Hitachi TM3030Plus.



Fonte: AUTOR, 2022.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

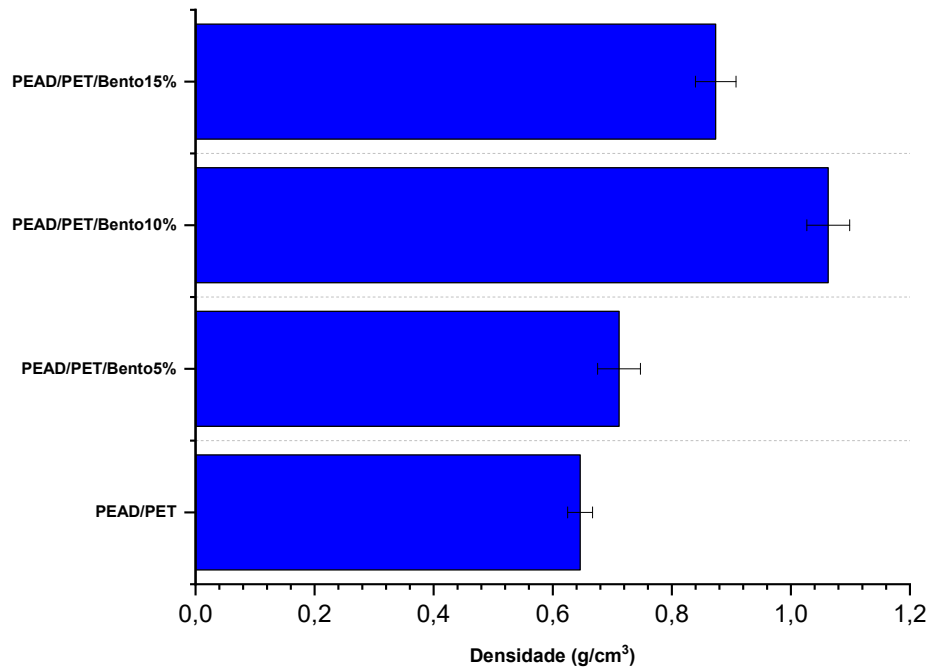
### 4.1 Ensaio de Densidade

A Tabela 3 e Figura 33 mostram os valores médios de densidade da mistura PEAD/PET e a densidade das misturas geradas pela incorporação de argila (Bentonita). Como esperado percebe-se claramente a influência da argila montmorilonita organofílica na densidade das blendas com a sua inserção na cadeia de PEAD/PET ocasionando um aumento nos valores da densidade para todas as amostras quando comparados com o PEAD/PET sem compatibilizante. Porém foi possível notar uma queda no valor da densidade para a mistura com maior teor de compatibilizante (15%) em relação a amostra com 10% de compatibilizante. Essa diminuição na densidade possivelmente é decorrente do maior teor de vazios provavelmente ocasionados pela má homogeneização das misturas.

Tabela 3 - Valores de densidade da blenda de PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/Bento 5, 10, 15%.

	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desv pad</b>
<b>PEAD/PET</b>	0,646	0,021
<b>PEAD/PET/Bento5%</b>	0,711	0,036
<b>PEAD/PET/Bento10%</b>	1,0628	0,036
<b>PEAD/PET/Bento15%</b>	0,8738	0,034

Figura 33 - Densidade da blenda de PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/Bento.



#### 4.2 Ensaio de Dureza

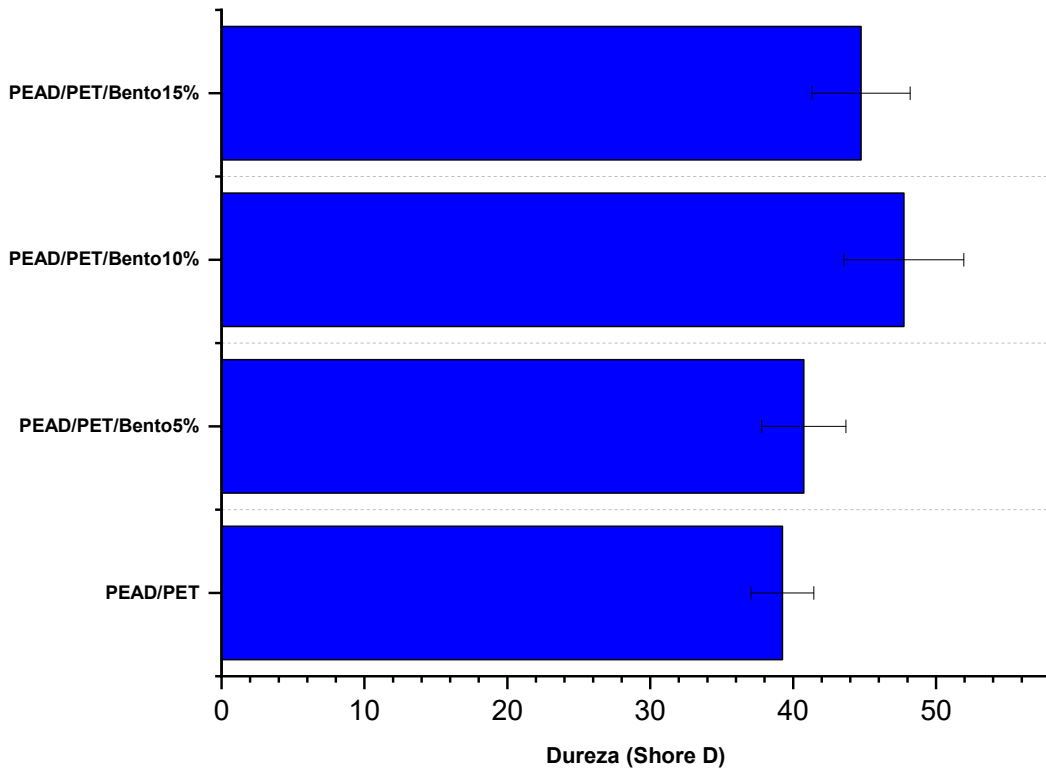
Na Tabela 4 e Figura 34 são mostrados os resultados de dureza da blenda PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET com diferentes teores de argila. Segundo a literatura a Dureza Shore D do PET é de aproximadamente 80 ShoreD (ISOLDI, 2003).

Tabela 4 - Valores de dureza da blenda PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/Bento 5, 10, 15%.

	<b>Dureza (Shore D)</b>	<b>Desv pad</b>
<b>PEAD/PET</b>	39,25	4,20
<b>PEAD/PET/Bento5%</b>	40,75	2,95
<b>PEAD/PET/Bento10%</b>	47,75	4,20
<b>PEAD//PET/Bento15%</b>	44,75	10,43



Figura 34 - Dureza da blenda de PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/Bento.



Pode-se observar que houve um aumento de dureza para todas as amostras compatibilizadas em relação ao PEAD/PET sem compatibilizante, o que pode ser explicado pela presença do agente compatibilizante que favorece a interação entre as cadeias tornando-as mais difíceis de serem rompidas pelo penetrador do durômetro. Vale ressaltar o mesmo efeito ocorrido na análise de densidade, para a amostra com maior teor de compatibilizante (15%), onde ocorreu uma diminuição da dureza quando comparada ao teor de 10% de argila bentonita, resultado este que não era esperado, uma vez que com a adição de maiores quantidades de compatibilizante esperava-se que obtivessem maiores valores de dureza, entretanto, este fato pode ter sido ocasionado pela má homogeneização dos compósitos preparados na extrusora devido ao baixo cisalhamento promovido por esta, ou a quantidade de argila incorporada pode ter sido excessiva atrapalhando as cadeias.

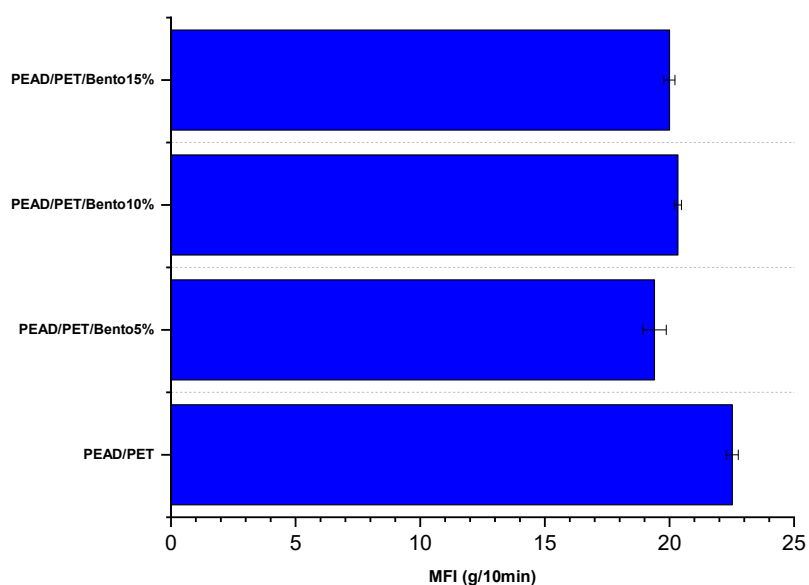
### 4.3 Índice de Fluidez (MFI)

A Tabela 5 e Figura 35 mostram os valores médios de MFI da blenda PEAD/PET e o MFI dos compósitos gerados pela incorporação de argila (Bentonita). Observa-se uma diminuição do MFI para todas os compósitos, sendo o menor valor 19,4 g/10min no compósito PEAD/PET/Bento5%. Esses resultados provavelmente estão associados à restrição do movimento das cadeias e, conseqüentemente, do fluxo imposta pela presença da argila (LIBANO *et al.*, 2018) devido ao aumento da densidade e dureza provocado com a sua incorporação. Vale observar que para a amostra com 15% de Bento houve o mesmo efeito de redução apresentado para a densidade e dureza, ainda que não significativa, confirmando assim, uma possível má homogeneização da amostra, ou sugerindo um máximo ideal de 10%.

Tabela 5 - Valores de MFI para a blenda PEAD/PET e compósitos PEAD/PET/Bento 5, 10, 15%.

	<b>MFI (g/10 min)</b>	<b>Desv pad</b>
<b>PEAD/PET</b>	22,52	0,242
<b>PEAD/PET/Bento5%</b>	19,4	0,474
<b>PEAD/PET/Bento10%</b>	20,34	0,142
<b>PEAD/PET/Bento15%</b>	20	0,219

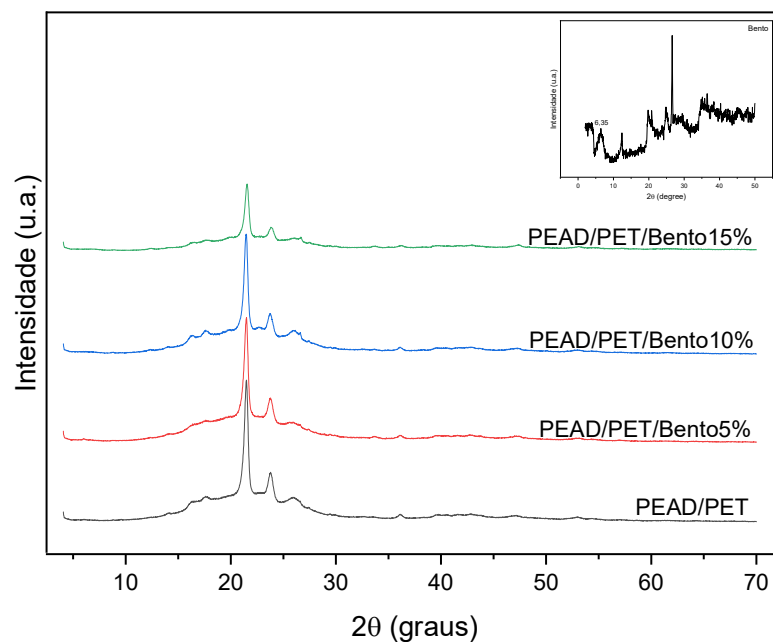
Figura 35 - MFI da blenda de PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/Bento.



#### 4.4 Difração de raios X (DRX)

A Figura 36 mostra o difratograma de raios X das amostras de PEAD/PET, PEAD/PET/Bento (5, 10 e 15%) e Bento puro.

Figura 36 - - Difratograma de raios X das blendas PEAD/PET, dos compósitos PEAD/PET/Bento e do Bento puro.



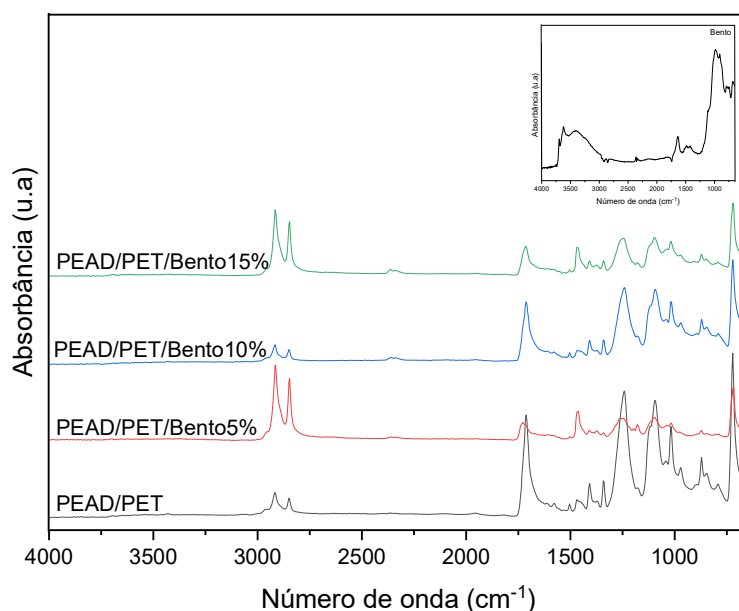
Todos os difratogramas ilustrados mostraram a presença de picos cristalinos correspondentes aos planos de difração do PEAD em  $2\theta = 21,4^\circ$  (110) e  $23,7^\circ$  (200). O pico de difração  $2\theta$  em  $25,74^\circ$  (100) foi atribuído ao sistema triclinico do PET (TORRES-HUERTA *et al.*, 2014; CAZAN *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019). Observou-se que os picos de intensidade estão bem definidos, o que mostra claramente a existência de cristalinidade em todos os sistemas estudados.

A bentonita apresenta um pico característico em  $2\theta = 6,9^\circ$ , mas esse pico não é observado nos compósitos PEAD/PET/Bento, sugerindo uma possível intercalação/esfoliação das camadas de argila na matriz PEAD/PET (CHEN *et al.*, 2017).

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

Os espectros de FTIR das amostras, Figura 37, mostram bandas de absorção que estão associadas ao modo de vibração da ligação C-H: estiramento/*stretching* em 2919 e 2854  $\text{cm}^{-1}$ , movimento de pêndulo ou *bending* em 1462  $\text{cm}^{-1}$ , e torção ou *rocking* em aproximadamente 730  $\text{cm}^{-1}$  (MONTEIRO *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2020).

Figura 37 - Espectro de FTIR da blenda PET/PEAD, dos compósitos PEAD/PET/Bento e Bento puro.



O PEAD também apresenta as ligações C-C que são normalmente observadas com pico(s) de absorbância em um número de onda na região entre 1000-1250  $\text{cm}^{-1}$  (COELHO *et al.*, 2020; LAZRAK *et al.*, 2019). O estiramento -C=O (a 1716  $\text{cm}^{-1}$ ) do PET pode ser observado nos espectros. Também é possível observar três grupos de bandas principais de absorção que descrevem as características cristalinas e amorfas do PET: entre 872 e 1000  $\text{cm}^{-1}$  pertencem às conformações *gauche* e *trans* dos grupos oxietileno; entre 1411 e 1250  $\text{cm}^{-1}$ , relacionadas às conformações *trans* e *gauche* do -CH<sub>2</sub> nos grupos éster do PET; o terceiro par de bandas que caracterizaram a cristalinidade do PET, entre 1100 e 1250  $\text{cm}^{-1}$ , atribuídas ao ângulo de torção no grupo éster (O=C-O-CH<sub>2</sub>) do PET. (RAVICHANDRAN, *et al.*, 2016; LI, *et al.*, 2018; RODRIGUES *et al.*, 2020). A adição da carga inorgânica à mistura polimérica não

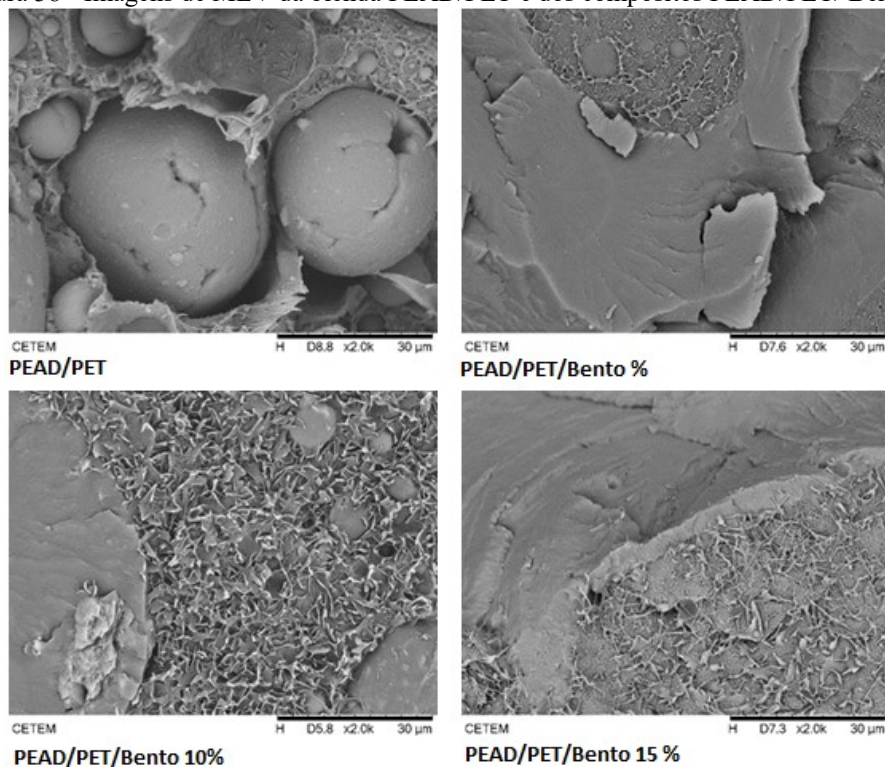
promoveu o aparecimento de novas bandas de absorção, sugerindo que exista mistura física simples sem reações químicas envolvidas (CAZAN *et al.*, 2018).

#### 4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise morfológica da blenda PET/PEAD e dos compósitos PET/PEAD/Bento é apresentada na Figura 38. A micrografia de MEV da mistura PEAD/PET confirma a forte incompatibilidade entre os dois polímeros. As partículas dispersas são grandes, possuem dimensões muito diferentes e não apresentam boa adesão interfacial entre as fases. Algumas partículas de PEAD são ligeiramente alongadas devido ao estiramento sofrido após a extrusão.

As micrografias dos compósitos PEAD/PET/Bento confirmam a hipótese da ocorrência de alguma compatibilização. Com relação ao PEAD/PET, as micrografias dos compósitos PEAD/PET/Bento mostram uma melhor adesão. Todas essas características indicam claramente a ocorrência de uma compatibilização significativa entre as duas fases induzida pela presença do argilomineral. Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores (DIMITROVA *et al.*, 2000; ROSNAN *et al.*, 2013, YOUSFI *et al.*, 2013).

Figura 38 - Imagens de MEV da blenda PEAD/PET e dos compósitos PEAD/PET/ Bento 5, 10 e 15%.



## 5. CONCLUSÃO

Blendas de PEAD reciclado e PET pós-consumo, com argila bentonítica organofílica atuando como agente de compatibilização, foram obtidas por extrusão. Os resultados são resumidos como:

- A densidade aumentou com a adição de bentonita, o que pode ser atribuído à boa adesão matriz/carga. A Bentonita sódica tem densidade de 0,9 -1,0 g/cm<sup>3</sup>.
- Houve aumento na dureza de todas as amostras compatibilizadas em relação ao PEAD/PET sem compatibilizante, indicando melhor interação entre as cadeias nos compósitos PEAD/PET/Bento.
- O MFI diminuiu para todas as misturas de argila, associado à restrição do movimento das cadeias, e conseqüentemente do fluxo, imposta pela presença da argila, devido a um aumento de densidade.
- Os resultados de DRX sugerem possível intercalação/esfoliação de camadas de argila na matriz PEAD/PET.
- Os resultados do FTIR indicam que a adição da carga inorgânica à mistura polimérica não promoveu o aparecimento de novas bandas de absorção, sugerindo que ocorreu apenas interação física.
- As micrografias SEM dos compósitos PEAD/PET/Bento confirmaram a hipótese da ocorrência de alguma compatibilização.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar uma melhor homogeneização entre as amostras.
- Estudar outros percentuais de Bento incorporados a blenda de PEAD/PET.
- Avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos.
- Realizar a caracterização térmica dos materiais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

*ABIPLAST*, Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Perfil 2016.

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*, Standarts Test Methods for Rubbers Property – Durometer Hardness: ASTM D 2240 – 05.

ASTM D 1238 – 10, *Standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos, 2010.

*ASTM D792: 2008* Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.

AUBRY, T. An overview on clay-mediated compatibilization of polyethylene/polyamide blends with droplet morphology. *Applied Clay Science*, v. 175, p. 184–189, july. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.04.002>

BARBOSA, R. *Estudo da modificação de argilas bentoníticas para aplicação em nanocompósitos de polietileno*. 2009. 186f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, 2009.

BARBOSA, R., ARAÚJO, E. M., DE OLIVEIRA, A. D., DE MELO, T. J. A. Efeito de sais quaternários de amônio na organofilização de uma argila bentonita nacional. *Cerâmica*, v. 52, n. 324, p. 264–268, dez. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132006000400009>

BERTUOLLI, P. T. *Desenvolvimento e caracterização de uma tinta em pó base poliéster contendo montmorilonita funcionalizada com silano*. 2014. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

BRITO, G. F., AGRAWAL, P., ARAÚJO, E. M., DE MÉLO, T. J. Efeito compatibilizante de uma argila organofílica na blenda PLA/terpolímero (etileno/acrilato de metila/metacrilato de glicidila). *Polímeros Ciência e Tecnologia*, v. 23, n. 4, p. 531–537, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2013.009>.

BURILLO, G., HERRERA-FRANCO, P., VAZQUEZ, M., ADEM, E. Compatibilization of recycled and virgin PET with radiation-oxidized HDPE. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 63, n. 3-6, p. 241–244, mar 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(01\)00586-2](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(01)00586-2).

CAETANO, E. H. *Caracterização mineralógica de argilas bentoníticas*. 2015. 92 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Química Aplicada, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2015.

CAZAN, C., COSNITA, M., ISAC, L. The influence of temperature on the performance of rubber - PET-HDPE waste - based composites with different inorganic fillers. *Journal of*



*Cleaner Production*, v. 20, p. 1030-1040, jan 2019. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.045>.

CHEN, B.; EVANS, J. R. G. Mechanical properties of polymer-blend nanocomposites with organoclays: Polystyrene/ABS and high impact polystyrene/ABS. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, v. 49, n. 6, p. 443–454, jan. 2011. DOI:  
<https://doi.org/10.1002/polb.22202>

CHEN, R.S.; AHMAD, S.; GAN, S. Characterization of recycled thermoplastics-based nanocomposites: Polymer-clay compatibility, blending procedure, processing condition, and clay content effects. *Composites Part B: Engineering*. v. 131, p. 91-99, dec. 2017  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.057>.

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>.

CHIU, H. T.; HSIAO, Y. K. Compatibilization of poly (ethylene terephthalate)/polypropylene blends with maleic anhydride grafted polyethylene-octene elastomer. *Journal of Polymer Research*, v. 13, n. 2, p. 153-160, oct. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10965-005-9020-z>

COELHO, K.V.S. *Compósitos sustentáveis à base de plástico reciclado e serragem de madeira sem uso de agente compatibilizante*. 2020. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2020.

COELHO, K.V.S., ELAINE. V.D.G. LÍBANO., FLORÊNCIO. G. R. FILHO., SHIRLENY. F. SANTOS., PATRICIA. S.C. PEREIRA e DANIELE. C. B. 2021. Development of wood plastic composite with reduced water absorption. *International Journal of Development Research*, v. 11, p. 44547-44551, feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.37118/ijdr.21116.02.2021>

COELHO, P. H. DA S. L.; MORALES, A. R. Efeito da Montmorilonita Organofílica na Compatibilização e nas Propriedades Morfológicas, Mecânicas e Térmicas de Blendas de PA6/ PEBD. *Polímeros Ciência e Tecnologia*, v. 23, n. 3, p. 410–416, 2013. DOI:  
<http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2013.040>.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. DE. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros*, v. 13, n. 1, p. 01-13, jan. 2003. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005> .

CRUZ, S. A., FARAH, M., ZANIN, M., e BRETAS, R. E. Avaliação das propriedades reológicas de blendas de PEAD virgem/PEAD reciclado. *Polímeros*, v. 18, n. 2, p. 144–151, jun 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000200012>

CRUZ, S. A., SCURACCHIO, C. H., FITARONI, L. B., OLIVEIRA, É. C. The use of melt rheology and solution viscometry for degradation study of post-consumer poly(ethylene terephthalate): The effects of the contaminants, reprocessing and solid state polymerization. *Polymer Testing*, v. 60, p. 236–241, july. 2017. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.03.026>.

DA CONCEIÇÃO, R. D. P., PEREIRA, C., PESSOA, G., PACHECO, E. B. A. V. A cadeia de reciclagem de pet pós-consumo e as definições de suas etapas: um estudo de caso no Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, n. 39, p. 80–96, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-9478201613514>

DE ALMEIDA, F., CORREIA, A., E SILVA, E. C., LOPES, I. C., SILVA, F. J. G. Compatibilization effect of organophilic clays in PA6/PP polymer blend. *Procedia Manufacturing*, v. 17, p. 1154–1161, june 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.016>

DE CARVALHO DIAS, J. *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.

DE MATTOS MARIANO, D. *Desenvolvimento de compósitos e/ou nanocompósitos de polietileno de alta densidade com argila organofílica via extrusão*. 2012. 53 f. Graduação (TCC). Curso de Tecnologia em Polímeros, Universidade Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2012.

DE PAIVA, L. B; MORALES, A. R; DÍAZ, F. R. V. Organoclays: Properties, preparation and applications. *Applied Clay Science*, v. 42, n. 1-2, p. 8–24, 1 dec. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.02.006>

DE PAIVA RODRIGUES, N., LÍBANO, E. V. D. G., BASTOS, D. C., DA COSTA PEREIRA, P. S. Incorporação de PET pós-consumo em misturas de PEAD virgem compatibilizadas. *Brazilian Applied Science Review*, v. 4, n. 3, p. 1748–1764, jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.34115/basrv4n3-080>

DEUS, R. M., DOS SANTOS, R. M., ANA, S. S., FRANCISCO, C. R., JUNIOR, O. R. D. S. O design thinking como método de resolução de problemas: um estudo de caso em uma empresa de reciclagem. In: Simpósio de engenharia de produção, XXIII; 2016, Bauru. *Gestão de operações em serviços e seus impactos sociais*. São Paulo, 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Rafael-Deus/publication/312213982\\_O\\_Design\\_Thinking\\_como\\_metodo\\_de\\_resolucao\\_de\\_problemas\\_um\\_estudo\\_de\\_caso\\_em\\_uma\\_empresa\\_de\\_reciclagem/links/5876b69c08ae8fce492dd481/O-Design-Thinking-como-metodo-de-resolucao-de-problemas-um-estudo-de-caso-em-uma-empresa-de-reciclagem.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Rafael-Deus/publication/312213982_O_Design_Thinking_como_metodo_de_resolucao_de_problemas_um_estudo_de_caso_em_uma_empresa_de_reciclagem/links/5876b69c08ae8fce492dd481/O-Design-Thinking-como-metodo-de-resolucao-de-problemas-um-estudo-de-caso-em-uma-empresa-de-reciclagem.pdf). Acesso em 28 nov. 2022.

DIMITROVA, T.L., LA MANTIA, F.P., PILATI, F., TOSELLI, M., VALENZA, A., VISCO, A. On the compatibilization of PET/HHDPE blends through a new class of copolyesters. *Polymer*, v. 41, p. 4817-4824, june 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00709-0](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00709-0).

DOS SANTOS, R. M., BASTOS DE ALMEIDA, Y. M., DE LIMA, A. G. B. *Estudo da cristalização e fusão de blendas de pet reciclado com pead*. Congresso Nacional de Pesquisas e Ensino em Ciências – CONAPESC. Disponível em: [http://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2019/TRABALHO\\_EV126\\_MD1\\_S A6\\_ID1123\\_31072019111043.pdf](http://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2019/TRABALHO_EV126_MD1_S A6_ID1123_31072019111043.pdf). Acesso em 29 ago. 2022

FERREIRA, K. R., LEITE, I. F., SIQUEIRA, A. D. S., RAPOSO, C. M., CARVALHO, L. H., e SILVA, S. M. Uso de argila organofílica na compatibilização de misturas PP/EPDM. *Polímeros*, v. 21, n. 5, p. 421–428, dez. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000072> .

FILHO, E. J. *Processamento e caracterização de matrizes poliméricas de polietileno de baixa densidade reforçadas com fibras de abacá*. 2017. 102 f. Dissertação. (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda - Uni-FOA, Volta Redonda-RJ, 2017.

FM VENTURA, A. M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. *C.Tecn. Mat.*, Lisboa, v.21, n. 3-4, p. 10-19, jul. 2009. Disponível em: [https://www.academia.edu/36770951/Os\\_COMp%C3%B3sitOs\\_e\\_a\\_sua\\_apliCa%C3%A7%C3%A3O\\_na\\_Reabilita%C3%A7%C3%A3O\\_de\\_estRutuRas\\_met%C3%A1llicas?bulkDownload=thisPaper-topRelated-sameAuthor-citingThis-citedByThis-secondOrderCitations&from=cover\\_page](https://www.academia.edu/36770951/Os_COMp%C3%B3sitOs_e_a_sua_apliCa%C3%A7%C3%A3O_na_Reabilita%C3%A7%C3%A3O_de_estRutuRas_met%C3%A1llicas?bulkDownload=thisPaper-topRelated-sameAuthor-citingThis-citedByThis-secondOrderCitations&from=cover_page). Acesso em 30 ago. 2022.

FERREIRA, C. T.; DA FONSECA, J.B.; e SARON, C. Reciclagem de Rejeitos de Poli(tereftalato de etileno) (PET) e de Poliamida (PA) por meio de Extrusão Reativa para a Preparação de Blendas. *Polímeros*, São Paulo, v. 21, n. 2, p.118-122, maio. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000029>

GONÇALVES, A. P. B. *Desenvolvimento de compósitos a base de blenda de pet reciclado/pead reforçados com fibra de bananeira*. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 17, n. 6, p. 1503–1510, jun. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-81232012000600014>

GUESSOUM, M., MEDJDOUB, N., NEKKA, S., HADDAOUI, N. Rheological and mechanical properties of recycled poly(ethylene terephthalate)/high density polyethylene blends. In: *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, v. 5, p. 04026, sep. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20130504026>

HUITRIC, J., VILLE, J., MEDERIC, P., AUBRY, T. Solid-state mechanical properties of PE/PA blends filled with organoclay or compatibilized by a graft co-polymer: A comparative study. *Polymer Testing*, v. 70, p. 208–214, sep. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.07.011>

JASSIM, A. K. Recycling of Polyethylene Waste to Produce Plastic Cement. *Procedia Manufacturing*, v. 8, p. 635–642, mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.081>

KISSIN, Y. V. Polyethylene: end-use properties and their physical meaning. *Carl Hanser Verlag GmbH Co KG*, jan. 2012. ISBN 1569905215. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/287262143\\_Polyethylene\\_End-use\\_properties\\_and\\_their\\_physical\\_meaning](https://www.researchgate.net/publication/287262143_Polyethylene_End-use_properties_and_their_physical_meaning). Acesso em 30 ago. 2022

LAZRAK, C., KABOUCHI, B., HAMMI, M., FAMIRI, A., ZIANI, M. 2019. Structural study of maritime pine wood and recycled high-density polyethylene HDPEr. Plastic compo-

site using Infrared-ATR spectroscopy, X-ray diffraction, SEM and contact angle measurements. *Case Stud. Constr. Mater.* v10, p. e00227, june. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00227>

LEI, Y.; WU, Q. Wood plastic composites based on microfibrillar blends of high density polyethylene/poly(ethylene terephthalate). *Bioresource Technology*, v. 101, n. 10, p. 3665–3671, may. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.069>

LI, X., WANG, Y., WANG, S.C., ZHANG, Y., MAO, S., WANG, G.H., LIU, J.X., HUANG, L.J., LI, H., BELFIORE, L.A., TANG, J.G. Effects of modified graphene oxide on thermal and crystallization properties of PET. *Polymers*, v. 10, p. 613–627, june. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10060613>.

LIBANO, E.V.D.G.; PEREIRA, P.S.C.; GONÇALVES, L.C.C.J.; COELHO, K.V.S. Processamento e avaliação das propriedades físicas, morfológicas e térmicas de compósitos de PE-AD reciclado e vermiculita. *Engevista*, V. 20, n.2, p. 296-311, abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v20i2.1351>

LIMA, A.M. *Preparação de compósito de polifluoreto de vinilideno (pvdf) com argila aplicável à célula combustível tipo pem*. 2019. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Polímeros, Universidade Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2019.

LU, C., GAO, X. P., YAO, D. H., CAO, C. L., LUO, Y. J. Improving flame retardancy of linear low-density polyethylene/nylon 6 blends via controlling localization of clay and intumescent flame-retardant. *Polymer Degradation and Stability*, v. 153, p. 75–87, apr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.022>

LUIZ, F.N. *Processamento e avaliação físico-química de madeira sintética de blendas extrudadas com politereftalato de etileno (PET) e lignina kraft*. 2016. 66 f. Dissertação (Pós-graduação em Tecnologias Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

MEDERIC, P., FNEICH, F., VILLE, J., AUBRY, T. Migration of clay and its role in droplet morphology establishment during melt mixing of clay polyethylene/polyamide nanocomposites. *Applied Clay Science*, v. 165, p. 257–263, dec 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.08.024>

MÉLO, T. J., ARAÚJO, E. M., BRITO, G. F., AGRAWAL, P. Development of nanocomposites from polymer blends: Effect of organoclay on the morphology and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 615, p. S389–S391, dec. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.151>

MONTEIRO, J.R.G., SIRELI, L., LÍBANO, E.V.D.G., BASTOS, D.C., PEREIRA, P.S.C. Recyclability by extrusion molding of high-density polyethylene from plastic bags. *International Journal of Development Research*, v. 10, p. 36709-36713, 2020. DOI: <https://doi.org/10.37118/ijdr.19105.06>

MORALES, A. R., DA CRUZ, C. V., PERES, L., ITO, E. N. Nanocompósitos de PE-AD/PEBDL: avaliação da esfoliação da argila organofílica pela aplicação do modelo de Niel-

sen e das propriedades mecânicas, ópticas e permeabilidade. *Polímeros*, v. 20, n. 1, p. 39–45, fev. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000004>

NÓBREGA, K. C., WANDERLEY, A. S. D., LEITE, A. M. D., ARAÚJO, E. M., MELO, T. D. Obtenção e caracterização de argilas organofílicas visando à aplicação em nanocompósitos poliméricos. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.6, n. 2, p. 84-90, 2011. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/227/198>. Acesso em 29 ago. 2022.

OLIVEIRA, A. D. D., CASTRO, L. D. C. D., JUNG, M. K., PESSAN, L. A. Influência da modificação da argila montmorilonita nas propriedades mecânicas, termo-mecânicas e morfológicas de nanocompósitos de blendas de poliamida 6/Acrilonitrila-EPDM-estireno. *Polímeros*, v. 25, n. 2, p. 219–228, abr. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2013.040>

PAIVA, L. B.; GUIMARÃES, T. R.; MORALES, A. R.. Propriedades Mecânicas de Nanocompósitos de Polipropileno e Montmorilonita Organofílica. *Polímeros*, v. 16, n. 2, p.136-140, jun. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282006000200014>

PEREIRA, E. R. *Viabilidade técnica do reaproveitamento e valorização das borras de pead provenientes do processo de injeção de termoplásticos*. 2015. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Ppge3M, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

PRACELLA, M., ROLLA, L., CHIONNA, D., GALESKI, A. Compatibilization and properties of poly (ethylene terephthalate)/polyethylene blends based on recycled materials. *Macromolecular Chemistry and Physics*, v. 203, n. 10-11, p. 1473–1485, july. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-3935\(200207\)203:10/11<1473::AID-MACP1473>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1521-3935(200207)203:10/11<1473::AID-MACP1473>3.0.CO;2-4)

RAVICHANDRAN, S.A., RAJAN, V.P., ARAVIND, P.V., SEENIVASAN, A., PRAKASH, D.G., RAMAKRISHNAN, K. Characterization of terephthalic acid monomer recycled from post-consumer RPET polymer bottles, *Macromolecular Symposia*, v. 361, p. 30-33, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/masy.201400269>

RIGAIL-CEDENO, A. F., DIAZ-BARRIOS, A., GALLARDO-BASTIDAS, J., ULLAGUARI-LOOR, S., MORALES-FUENTES. Recycled HDPE/PET Clay Nanocomposites. In: *Key Engineering Materials*, v. 821, p. 67–73, sep. 2019. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.821.67>

RODOLFO JR., A.; MEI, L. H. I. Nanocompósitos de PVC com argila organicamente modificada: efeitos do processamento e do método de incorporação da argila. *Polímeros*, v. 19, n. 1, p. 1–9, abr. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000100006>

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, MARCO-A. D. Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. *Polímeros*, v. 19, n. 2, p. 121–132, jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000200009>

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>

ROSAS, A.L.T.1, GOMES, A.S.1, DUTRA FILHO, J.C. *Propriedades térmicas, condutividade protônica e medidas de inchamento em água de membranas baseadas em poli(éter éter cetona) sulfonada/argila montmorillonita*. BRASILTEC 2014, 24 e 25 de setembro de 2014, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <https://ptdocz.com/doc/28189/6%C2%BAb---mosteiro-e-c%C3%A1vado>. Acesso em 30 ago. 2022.

ROSNAN, R. M.; ARSAD, A. Effect of MMT concentrations as reinforcement on the properties of recycled PET/HDPE nanocomposites. *Journal of Polymer Engineering*, v. 33, n. 7, p. 615–623, oct. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1515/polyeng-2013-0107>

SILVA, A.R.V.; FERREIRA, H.C. Esmectitas organofílicas: conceitos, estruturas, propriedades, síntese, usos industriais e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 3, n. 3, p. 01-11, 2008. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/79/106>. Acesso em 28 ago.2022

SPERLING, L. H. Polymer alloys and blends thermodynamics and rheology, by L. A. Utracki, Hanser, Munich, 1989, 356 pp. Price: \$90.00. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Letters*, v. 28, n. 12, p. 387–387; nov 1990. DOI: <https://doi.org/10.1002/pol.1990.140281208>

SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, IX, 2014, Porto Alegre. *Avaliação de desempenho mecânico de blendas de PEAD virgem e borras injetadas como alternativa para reutilização de resíduo industrial*. Porto Alegre, 2014. Disponível em: <http://www.abes-rs.org.br/qualidade2014/trabalhos/id884.pdf>. Acesso em 30 ago. 2022.

SINHA RAY, S.; OKAMOTO, M. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science*, v. 28, n. 11, p. 1539–1641, nov. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002>

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, dec. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.10.027>

TEIXEIRA-NETO, É.; TEIXEIRA-NETO, Â. A. Modificação química de argilas: desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado. *Química Nova*, v. 32, n. 3, p. 809–817, maio. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300023>

TINO, A. B. DE A. *Organofilização de uma argila montmorillonita*. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE; Curso de Engenharia de Minas. XX CONIC, IV CONITI, VIII JOIC. 2011. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/organofilizacao-de-uma-argila-montmorillonita-alan-anderson/4846814/>. Acesso em 29 ago. 2022

TORRES-HUERTA, A.M.; RAMÍREZ, D.P.; DOMÍNGUEZ-CRESPO, M.A.; ANGEL-LÓPEZ, D.D.; FUENTE, D.D.L. Comparative assessment of miscibility and degradability on PET/PLA and PET/chitosan blends. *European Polymer Journal*, v. 61, p. 285-299, dec.2014. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.10.016>

VENTURA, Ana Mafalda F.M. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, Vol. 21, n.º 3/4, PG 10, 11, 2009. Disponível em. Acesso em 02 set. 2013.

WANG, D., YANG, B., CHEN, Q. T., CHEN, J., SU, L. F., CHEN, P., ... SHI, Y. A facile evaluation on melt crystallization kinetics and thermal properties of low-density polyethylene (LDPE)/Recycled polyethylene terephthalate (RPET) blends. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, v. 2, n. 3, p. 126–135, july. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.05.002>

YOUSFI, M., SOULESTIN, J., VERGNES, B., LACRAMPE, M. F., KRAWCZAK, P. Morphology and mechanical properties of PET/PE blends compatibilized by nanoclays: Effect of thermal stability of nanofiller organic modifier. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 128, n. 5, p. 2766–2778, aug. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.38450>

ZAMAN, H. U., HUN, P. D., KHAN, R. A., YOON, K. B. Improvement of the mechanical and rheological properties of HDPE/PET/MWCNT nanocomposites. *Composite Interfaces*, v. 19, n. 2, p. 71–81, may. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/09276440.2012.688644>