



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

IGOR LEAL DE MEDEIROS

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, CARACTERIZAÇÃO E
RECICLAGEM DE POLIETILENO TEREFALATO (PET) PROVENIENTES
DE GARRAFAS DE REFRIGERANTE E ÁGUA PÓS-CONSUMO**

JOÃO PESSOA - PB

2019

IGOR LEAL DE MEDEIROS

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, CARACTERIZAÇÃO E
RECICLAGEM DE POLIETILENO TEREF TALATO (PET) PROVENIENTES
DE GARRAFAS DE REFRIGERANTE E ÁGUA PÓS-CONSUMO**

Trabalho final de curso apresentado
à Coordenação do Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal da
Paraíba, como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador (a): Prof. Dr. Genaro Zenaide
Clericuzi

JOÃO PESSOA – PB

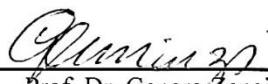
2019

IGOR LEAL DE MEDEIROS

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, CARACTERIZAÇÃO E
RECICLAGEM DE POLIETILENO TEREF TALATO (PET) PROVENIENTES
DE GARRAFAS DE REFRIGERANTE E ÁGUA PÓS-CONSUMO**

Trabalho final do curso apresentado
à Coordenação do Curso de Engenharia
Química como requisito necessário para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química pela Universidade
Federal da Paraíba.

Aprovado em 19 de Setembro de
2019.


Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi


Prof. Dra. Lucineide Balbino da Silva


Prof. Dra. Karla Silvana Menezes Gadelha de Sousa

JOÃO PESSOA – PB

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M488a Medeiros, Igor Leal de.
Análise das propriedades mecânicas, caracterização e
reciclagem de polietileno tereftalato (PET)
provenientes de garrafas de refrigerante e água
pós-consumo / Igor Leal de Medeiros. - João Pessoa,
2019.
68 f.

Orientação: Genaro Zenaide Clericuzi.
Monografia (Graduação) - UFPB/DEQ.

1. PET pós-consumo; caracterização. I. Clericuzi,
Genaro Zenaide. II. Título.

UFPB/BC

Dedico este trabalho a meus pais, Ivo Marques e Claudia Leal que sempre me apoiaram ao decorrer dessa caminhada, me ajudando a superar todas as dificuldades encontradas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por ter guiado meus caminhos e por ter me dado muita luz até o presente momento.

A meu pai, Ivo Marques, e minha mãe, Claudia Leal, por terem me incentivado e me apoiado nas minhas decisões durante esses anos de muito empenho e renúncias.

Aos demais familiares, por terem auxiliado na minha vida educacional.

A minha namorada, Beatriz Aranha, que me acompanhou durante boa parte da minha graduação, compartilhando das diversas noites de estudo, me auxiliando e motivando a seguir sempre em frente.

Aos meus amigos de infância e aos amigos conquistados durante o curso, por compreenderem minhas renúncias e por estarem sempre dispostos a ajudar, inclusive na coleta do material PET necessário para essa pesquisa.

Ao Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi por ter sido muito prestativo comigo em todos os momentos necessitados, como na minha participação do programa Ciência sem Fronteiras, na orientação do meu relatório de estágio e na orientação deste presente trabalho final de curso.

À Prof. Dr. Lucineide Balbino da Silva por ter cedido gentilmente seu tempo para retirar dúvidas e por ter acompanhado o processo produtivo dessa pesquisa.

À Rian, André e Rafael por me ajudarem no processo produtivo do PET.

À todos os professores do departamento de Engenharia Química, por terem me ajudado a obter o conhecimento que possuo hoje.

*“Peçam, e lhes será dado.
Procurem, e encontrarão. Batam, e
lhes será aberto. Pois todo aquele
que pede recebe, quem procura
encontra, e a quem bate se abrirá”.*

(Mt 7,7-8)

RESUMO

A necessidade de favorecer as tarefas diárias tem feito com que produtos poliméricos sejam produzidos, deixando o homem cada vez mais dependente desse tipo de material. Apesar de trazer mais comodidade a todos, uma grande quantidade destes resíduos tem sido gerada, causando diversos impactos negativos ao meio-ambiente, justamente devido à resistência à degradação promovida pela estrutura desses polímeros. Nesse contexto, com o intuito de estudar as propriedades mecânicas para verificar a viabilidade da aplicação de PET pós-consumo em produtos verdes diversos, esse trabalho final de curso realiza uma metodologia de reciclagem de plásticos do tipo PET (polietileno tereftalato), um de cor verde, proveniente do pós-consumo de refrigerante, outro transparente, proveniente do pós-consumo de água e uma mistura entre ambos, com 50% de composição de cada tipo de PET retirados de lanchonetes e eventos no município de João Pessoa, no Estado da Paraíba, transformando-os em corpos de prova para análise das propriedades mecânicas e químicas. O PET verde apresentou maior resistência à tração que o PET transparente e o inverso ocorrendo quanto ao teste de flexão. Foi realizada análise de FTIR para verificar os componentes presentes na amostra de PET pós-consumo e concluiu-se que as bandas obtidas diferenciaram um pouco das bandas do PET virgem. De posse das informações foi comprovado que a sua aplicabilidade é para produtos de baixas resistências devido ao seu comportamento frágil, sendo mais adequado a sua reutilização em artefatos de decoração e produtos como, vassouras, talheres, copos e taças, além de produtos do ramo têxtil, como por exemplo, camisas e solado para calçados.

Palavras-chave: PET pós-consumo; propriedades mecânicas; caracterização; resistência à tração; resistência à flexão; análise FTIR.

ABSTRACT

The need of facilitate daily tasks has made polymeric products to be produced, increasing the dependence of man on this type of material. Despite bringing more convenience to all, a large amount of this waste has been generated, causing several negative impacts to the environment due to the degradation resistance promoted by the structure of these polymers. In this context, in order to study the mechanical properties to verify the feasibility of applying post-consumer PET in various green products, this final course work uses a recycling PET (polyethylene terephthalate) plastics methodology, one of green color, from the post-consumption of soft drinks, another transparent from the post-consumption of water and a mixture between both, with 50% composition of each type of PET taken from snack bars and events in the city of João Pessoa, Paraíba, turning them into specimens for analysis of mechanical and chemical properties. Green PET showed higher tensile strength than transparent PET and the opposite occurred for flexion testing. FTIR analysis was performed to verify the components present in the post-consumption PET sample and it was concluded that the obtained bands differed slightly from the virgin PET bands. With these information, it has been proven that its applicability is for low resistance products due to its fragile behavior, being more suitable for its reuse in decoration artifacts and products such as brooms, cutlery, glasses and bowls, as well as textile products. such as shirts and shoe soles.

Key words: post-consumer PET; mechanical properties; characterization; tensile strength; flexural strength; FTIR analysis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivos gerais	16
1.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Plásticos	18
2.1.1	Polietileno tereftalato (PET).....	19
2.2	Propriedades mecânicas	20
2.2.1	Tensão.....	21
2.2.2	Resistência à flexão	22
2.2.3	Deformação	23
2.2.4	Diagrama tensão versus deformação	23
2.3	Reciclagem.....	27
2.3.1	Reciclagem do PET	28
2.3.2	Classificação	29
2.4	Propriedades químicas	31
2.4.1	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .	31
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	Processo Produtivo	33
3.1.1	Coleta do material.....	33
3.1.2	Separação do material PET.....	34
3.1.3	Higienização do material PET	35
3.1.4	Moagem do material PET	35
3.1.5	Secagem do material PET.....	37
3.1.6	Injeção	37
3.1.7	Caracterização mecânica	40

3.1.8	Caracterização química.....	43
4	RESULTADOS	45
4.1	Moagem	45
4.2	Secagem	47
4.3	Injeção.....	48
4.4	Caracterização mecânica.....	50
4.4.1	Curvas de tensão versus deformação.....	50
4.4.2	Curvas de força versus deslocamento.....	59
4.5	Caracterização química.....	61
5	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura molecular do PET.....	19
Figura 2- Curva tensão versus deformação do polycarbonato (PC).....	25
Figura 3 - Comportamento da curva tensão versus deformação para materiais dúcteis e frágeis	25
Figura 4 - Fluxograma do ciclo de vida dos materiais	27
Figura 5 - Processo produtivo de reciclagem do PET	29
Figura 6 - Códigos de reciclagem para cada tipo de plástico	30
Figura 7 - Fluxograma do processo produtivo de obtenção do corpo de prova	33
Figura 8 - Parte do material PET recolhido	34
Figura 9 - Material PET tratado.....	35
Figura 10 - Moinho de facas número 1.....	36
Figura 11 - Moinho de facas número 2.....	36
Figura 12 - Estufa de secagem e esterilização	37
Figura 13 - Material PET pesado.....	38
Figura 14 - Máquina de injeção	39
Figura 15 - Máquina universal de ensaios mecânicos	40
Figura 16 - Máquina universal de testes mecânicos ajustada para o teste de tração	42
Figura 17 - Máquina universal de testes mecânicos ajustada para o teste de flexão.....	43
Figura 18 - PET triturado pós consumo de água obtido após a moagem no moinho número 1	45
Figura 19 - PET triturado pós consumo de água obtido após a moagem no moinho número 2	46
Figura 20 - PET triturado pós consumo de refrigerante obtido após a moagem no moinho número 1.....	46
Figura 21 - PET triturado pós consumo de refrigerante obtido após a moagem no moinho número 2.....	47
Figura 22 - PET seco proveniente do pós-consumo de água e de refrigerante após período de 24 horas na estufa	47
Figura 23 - Corpos de prova de PET proveniente do pós-consumo de refrigerante	48
Figura 24 - Corpos de prova de PET proveniente do pós-consumo de água	49
Figura 25 - Corpos de prova proveniente do PET MIX	49

Figura 26 - Curvas de tensão versus deformação para o PET MIX: a) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 1; (b) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 2; (c) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 3; (d) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 4; (e) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 5.	51
Figura 27 - Curvas de tensão versus deformação para o PET transparente: a) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 1; (b) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 2; (c) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 3; (d) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 4; (e) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 5.	54
Figura 28 - Curvas de tensão versus deformação para o PET verde: a) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 1; (b) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 2; (c) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 3...	57
Figura 29 - Espectro da amostra de PET transparente obtido pela análise de FTIR	61
Figura 30 - Espectro da amostra de PET verde obtido pela análise de FTIR.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros iniciais para o processo de injeção	38
Tabela 2 - Parâmetros finais para o processo de injeção	39
Tabela 3 - Parâmetros utilizados no ensaio de tração.....	41
Tabela 4 - Parâmetros utilizados no ensaio de flexão	42
Tabela 5 - Valores dos parâmetros obtidos a partir das curvas de tensão versus deformação para a blenda polimérica.....	53
Tabela 6 - Valores dos parâmetros obtidos a partir das curvas de tensão versus deformação para o PET transparente.....	57
Tabela 7 - Valores dos parâmetros obtidos a partir das curvas de tensão versus deformação para o PET verde	59
Tabela 8 - Valores dos parâmetros obtidos a partir dos testes de flexão para o PET MIX	60
Tabela 9 - Valores dos parâmetros obtidos a partir dos testes de flexão para o PET transparente.....	60
Tabela 10 - Valores dos parâmetros obtidos a partir dos testes de flexão para o PET verde	60
Tabela 11 - Bandas de absorção de PET transparente com seus respectivos modos vibracionais associados.....	63
Tabela 12 - Bandas de absorção de PET verde com seus respectivos modos vibracionais associados	63

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, principalmente dos anos 2000 até o presente momento, a população mundial tem cada vez mais posto em prática as ideias do capitalismo, onde o trabalho é excessivo, o tempo livre é curto e o consumo é elevado. Com a crescente necessidade de facilitar as tarefas diárias e de acompanhar a intensa rotina vivida, muitos produtos poliméricos foram desenvolvidos. Por outro lado, pouco se pensou no meio ambiente e na imensa quantidade de resíduos gerados, desenvolvendo assim um dos maiores desafios do século XXI: conter a quantidade desse tipo de resíduo e propor uma solução para os seus efeitos no meio ambiente.

Os polímeros são muito presente em nosso cotidiano e isso é um reflexo da rápida urbanização dos últimos tempos. A sua aplicação é muito vasta e têm sido muito utilizada nos mais diversos ramos da indústria, principalmente no setor alimentício e de bebidas, isso porque além de ser um material de baixo custo operacional e de produção, tem também como uma das suas principais características a durabilidade fornecida por sua composição; graças a esses fatores, começou-se a utilizar esse material em alguns utensílios bem comuns do dia-a-dia, como sacolas, garrafas, copos, pratos, talheres e embalagens de produtos industrializados de maneira geral, tornando o homem cada vez mais dependente desse material.

Apesar de trazer comodidade e diversos benefícios à sociedade moderna, alguns polímeros são potencialmente danosos ao meio ambiente em diversos aspectos justamente devido à sua principal característica: a resistência à degradação. Todos esses polímeros possuem um tempo de vida muito elevado, permanecendo em nosso planeta por décadas. De acordo com (SAFETY4SEA, 2018), plásticos do tipo PET (polietileno tereftalato), por exemplo, muito utilizado em garrafas de água e de refrescos, possuem um tempo de vida de 450 anos, evidenciando assim sua lenta decomposição; já as sacolas plásticas (compostas por polietileno de baixa densidade), um dos produtos mais utilizados pelo homem, tem um ciclo de vida entre 10 e 20 anos para ser totalmente decompostas. Nesse meio tempo, os plásticos vão reduzindo de tamanho e se transformando em micro plásticos, dificultando ainda mais a sua retirada do meio ambiente.

Arelado ao tempo de vida desses polímeros, outra dificuldade enfrentada é o fato de que metade de todo material plástico produzido nas indústrias, aproximadamente 300 milhões de toneladas por ano, é projetado para ser utilizado apenas uma vez,

aumentando consideravelmente a quantidade de resíduo gerado dessa natureza. Estima-se também que a cada minuto, cinco trilhões de sacolas plásticas são utilizadas e um milhão de garrafas do mesmo material são compradas (UN ENVIRONMENT, 2018) em todo o mundo.

Da década de 1950 até os tempos atuais, 8,3 bilhões de toneladas de plástico foram produzidos, onde apenas 9% foram reciclados e 12% foram incinerados, enquanto os 79% restantes foram encaminhados para os lixões, aterros ou foram dispersados no meio ambiente. O problema é que uma boa parte desses 79% é levada do continente aos oceanos através das chuvas e dos rios, prejudicando fortemente a vida marinha do local. Caso o atual cenário seja mantido, a perspectiva é de que no ano de 2050 exista mais plástico nos oceanos do que peixes (UN ENVIRONMENT, 2018).

No Brasil, estima-se que um pouco mais de 12 milhões e 200 mil toneladas de plástico sejam produzidas anualmente e apenas 9% desse total considera-se mal gerenciado (JAMBECK, J, 2015), concluindo assim que o país, em comparação com os demais países, como a China, por exemplo, que produz pouco mais de 31 milhões e 600 mil toneladas de plástico e 74% desse valor é mal gerenciado, consegue evitar em sua grande maioria que estes resíduos causem a degradação do meio ambiente.

No caso do polietileno tereftalato (PET) pós-consumo, por ser um termoplástico, o seu processo de recuperação ocorre mais facilmente, visto que através de um aquecimento em temperaturas consideradas relativamente baixas, cadeias moleculares são quebradas. Assim, o material pode ser novamente conformado e consequentemente reutilizado, caracterizando-se como um material ambientalmente amigável.

1.1 Objetivos gerais

- Estudo das propriedades mecânicas com o intuito de verificar a viabilidade da aplicação de PET pós-consumo em produtos verdes (ambientalmente amigáveis) diversos.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar testes de flexão e tração do material PET obtido;

- Obter diagrama de tensão versus deformação para cada tipo de PET a partir dos dados dos testes de resistência à tração;
- Comparar resistência à tração e a flexão entre os tipos de PET;
- Verificar composição do material obtido através de Espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Plásticos

A palavra "plástico" é derivado do grego "plastikos", que tem como significado “dar forma ou ajuste por moldagem”. A Sociedade da Indústria dos Plásticos (*The Society of the Plastics Industry*), sugeriu uma definição para plástico que foi adotada em todo o mundo. Ela afirma que plástico é:

"Qualquer material de um grande e variado grupo de materiais constituído total ou parcialmente de combinações de carbono com oxigênio, nitrogênio, hidrogênio e outros elementos orgânicos ou inorgânicos que, apesar de sólido no estado acabado, em algum estágio de sua fabricação é liquefeito, e, assim, suscetível de ser moldado em várias formas, a maioria geralmente pela aplicação, individual ou em conjunto, de calor e pressão."

Os plásticos que encontramos nos dias de hoje são derivados de polímeros. A palavra “polímeros” pode ser explicada pela união do termo “poli”, que significa vários, e “meros”, que são pequenas estruturas químicas. Em outras palavras, podemos dizer que os polímeros são pequenas estruturas químicas que se interligam repetitivamente, formando uma longa cadeia polimérica. O número de vezes que o mero se repete é caracterizado pela letra “n” e ela representa o grau de polimerização dessa molécula.

Os polímeros podem ser de origem natural ou de origem sintética. Os polímeros de origem natural são encontrados em plantas e animais, como, por exemplo, a borracha, o algodão, o couro e a seda, além de algumas proteínas e enzimas. Esses foram descobertos muito antes do desenvolvimento do que hoje é conhecido como polímeros sintéticos. No início de sua história, os plásticos naturais possuíam características até hoje desejadas em muitos processamentos. Alguns deles eram leves, outros fortes, moldáveis ou translúcidos. Eram poucos os materiais que apresentavam essas características combinadas.

Com o passar dos anos, a indústria foi se reinventando e criando novos tipos de polímeros naturais modificados, produzidos sinteticamente, porém utilizando inicialmente como matéria prima em sua produção pequenas moléculas de polímeros orgânicos. A partir da descoberta do baquelite, novos caminhos para criação de materiais mais refinados foram criados, não necessitando mais de um composto orgânico como insumo. Esses materiais são conhecidos também como plásticos

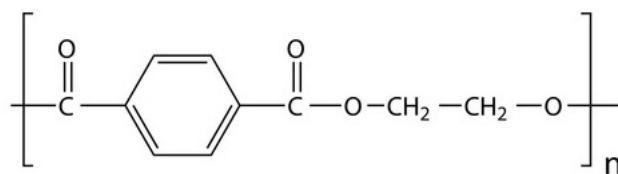
industriais e encontram-se muito presentes em diversos produtos do nosso cotidiano, como sacolas, copos, garrafas e utensílios diversos.

2.1.1 Polietileno tereftalato (PET)

O polietileno tereftalato (PET), é um tipo de termoplástico da família dos poliésteres bastante conhecido no mundo inteiro. Isso se deve ao fato de que o material está presente em muitos utensílios do nosso dia-a-dia, principalmente em garrafas. Porém, segundo a Associação Brasileira da Indústria do PET - ABIPET, esse material foi apresentado ao mundo primeiramente através da indústria têxtil pelos ingleses Whinfield e Dickson, no ano de 1941, logo após o desabastecimento sofrido pelas Guerras Mundiais, forçando os países europeus a procurarem alternativas ao algodão e ao linho. No Brasil, o PET começou a ser explorado no ano de 1988, seguindo a mesma trajetória mundial, da indústria têxtil às indústrias de garrafas e embalagens.

O PET pode ser obtido através de dois tipos de reação de condensação de monômeros, são elas: a esterificação do ácido tereftálico e o etileno glicol ou pela transesterificação entre o etileno glicol e o dimetil tereftalato em um meio básico. A sua repetida estrutura molecular possui uma fórmula química composta por carbono, hidrogênio e oxigênio $(C_{10}H_8O_4)_n$ como a maioria dos plásticos industriais e pode ser melhor visualizada através da Figura 1.

Figura 1 - Estrutura molecular do PET



Fonte: FEITOR, M.; JUNIOR, C.; BEZERRA, C.; SOUSA, R.; COSTA, T. *Evaluation of aging in air of poly (ethylene terephthalat) in oxygen plasma. Mat. Res. v.18, no.5. São Carlos, Brasil. Outubro, 2015*

O PET, em seu estado natural, é transparente, flexível e semi cristalino. Porém, alguns tipos de processamento envolvem altas temperaturas, causando deslizamento entre as moléculas interligadas por ligações de Wan der Walls. Dessa forma, o material

se transforma em um líquido viscoso e por ser um termoplástico, pode ser facilmente moldado para novas formas. Isso acontece em uma faixa de temperatura entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão do material, algo em torno de 75°C e 260°C (GIRIJA, B., 2005), respectivamente.

Devido a forma como é produzido, o PET utilizado nas indústrias fornece ao consumidor um produto mais acessível, seguro e higiênico, possibilitando que as mais diversas classes obtenham um produto moderno. Por ser da família dos poliésteres, o material possui uma combinação de características excelente que agregam qualidade ao produto, que são a sua resistência mecânica, química e térmica, suportando impactos, combatendo positivamente a ação de agentes agressivos e mantendo-se pouco reativo quando submetido à altas temperaturas. Por conta disso, o PET é muito utilizado na indústria de bebidas e de alimentos com matéria prima principal na produção de garrafas de água, refrigerantes e refrescos em geral. Além desse tipo de indústria, o PET também pode ser encontrado na indústria têxtil e automotiva, como parte componente para fios e cabos e também para aplicações agrícolas, entre outros.

2.2 Propriedades mecânicas

Com o intuito de melhor controlar os processos e garantir a qualidade de seus produtos, os testes de propriedades mecânicas são largamente utilizados na indústria. Através deles, é possível descrever o comportamento de um determinado material quando submetido a aplicação de forças externas observando até que ponto ocorre a ruptura ou falha no material. De posse dos dados, projetar e fabricar os produtos desejados se torna mais seguro. Ao se tratar de materiais de construção como tubos de conexão e válvulas, por exemplo, onde sua maior ou completa composição é proveniente de plásticos, é necessário obter materiais com alta resistência às tensões e consequentemente suscetíveis à baixas deformações.

Na última década, é notório que o mercado global tem se tornado cada vez mais competitivo e exigente. Sendo assim, torna-se fundamentalmente importante um maior controle de qualidade a fim de se obter um produto de qualidade para a satisfação do cliente. O uso de parâmetros e padrões previamente estabelecidos por instituições certificadas e renomadas mundialmente auxilia no processamento mecânico e facilita a obtenção das especificações demandadas. Nesse caso, dentre os principais órgãos certificadores do mundo está a Sociedade Americana para Testes e Materiais (American

Society for Testing and Materials – ASTM) e a ISO (International Organization for Standardization). Ambos são responsáveis por desenvolver padrões de diversos tipos de ensaio, produtos, serviços e atividades científicas e tecnológicas, buscando facilitar a padronização mundial. No Brasil, o órgão certificador que realiza esse papel é a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), um dos membros fundadores da ISO.

No caso da indústria dos plásticos, a ISO possui padrões estabelecidos no catálogo 83, e mais precisamente, na seção 83.080.01; nessa seção, é possível encontrar metodologias para testes mecânicos a serem realizados nesse tipo de material. Um exemplo é o teste de resistência à tração e o teste de resistência à flexão, ambos abordados nessa pesquisa, variando apenas de um tipo de teste para outro a direção e a velocidade do dispositivo de carga, além da posição dos suportes de fixação dos corpos de prova. Todos os testes são baseados no cálculo da força exercida sobre o material, podendo ser calculada de acordo com a Eq. (1):

$$\text{Força (F)} = \text{Massa (m)} \cdot \text{Aceleração (a)} \quad \text{Eq. (1)}$$

As unidades geralmente utilizadas seguem o Sistema Internacional (SI) de unidades são: a força é dada em Newton (N), que representa a força da gravidade que age sobre um quilograma de massa; quilograma (kg), para massa; e metro por segundo ao quadrado (m/s^2), para a aceleração. Por convenção, em condições normais do ambiente, o valor padrão utilizado para a aceleração é igual à $9,807 \text{ m/s}^2$ por se tratar da força gravitacional no planeta.

2.2.1 Tensão

A partir da definição, a tensão aplicada em um corpo pode ser considerada como a razão entre uma força aplicada perpendicularmente à uma determinada área de seção transversal conforme a Equação (2), onde a Força é dada em Newton (N) e a Área é dada em metros quadrados (m^2) de acordo com o Sistema Internacional de Unidades. Já a Tensão é dada mega pascals ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$).

$$\text{Tensão } (\sigma) = \text{Força (F)} / \text{Área da seção transversal (A}_s) \quad \text{Eq.(2)}$$

Alguns tipos de tensões são bastante conhecidas no cenário da engenharia e seus conceitos se distinguem devido ao sentido e a direção em que a força é aplicada. Dentre os tipos mais conhecidos de tensão estão a tração, a compressão e a força de cisalhamento.

2.2.1.1 Resistência à tração

Como a tração é um tipo de tensão, ela pode ser compreendida como uma força aplicada a uma amostra de forma que ela deforme ou não a sua composição. Essa força é aplicada em ambas extremidades da amostra com direções opostas umas das outras de forma que o sentido dessa força aplicada seja do centro às extremidades. Seguindo esse conceito, o teste de resistência à tração é um dos mais utilizados pela indústria de plástico. Isso se deve porque através dos valores obtidos, é possível dizer se o material tem ou não a habilidade de suportar forças na direção de extensão do mesmo, em outras palavras, se o material suporta ou não ser esticado.

O teste de resistência à tração é realizado com o auxílio de uma máquina de ensaio universal e baseia-se nos padrões estabelecidos pela ISO 527-1 e a ASTM D-638. De acordo com a ISO 527-1, os corpos de prova utilizados nesse tipo de teste geralmente apresentam 150 mm de comprimento, 20 mm de largura em suas extremidades, 10 mm de largura no seu ponto mais estreito e 3 mm de espessura. O processo, que se inicia na tração realizada pela máquina a partir das extremidades dos corpos de prova, registra a força desse movimento e mede também a capacidade de alongamento da amostra através de uma curva de tensão versus deformação até o momento da sua ruptura.

2.2.2 Resistência à flexão

A resistência à flexão é outro parâmetro muito importante utilizado na indústria. A partir dos resultados dos testes de resistência à flexão, é possível determinar a quantidade de carga que pode ser aplicada antes que o corpo de prova chegue a romper. Assim como o teste de tração, o teste de flexão também segue parâmetros estabelecidos pela ISO e pela ASTM, mais precisamente a ISO 178 e a ASTM D-790 e D-747.

Diferentemente do teste de tração, onde o maquinário era regulado para tensionar o material a partir de suas extremidades, no teste de resistência a flexão, o corpo de prova é pressionado em seu centro por uma carga com determinada velocidade, sofrendo tensões numa posição transversal ao do plástico. Com o intuito de manter a amostra fixada, suas extremidades são apoiadas em blocos separados. Esse espaço é determinado tanto pela ISO quanto pela ASTM como 16 vezes a espessura da amostra.

A maioria dos termoplásticos e dos elastômeros não fraturam com tanta facilidade, fazendo com que eles possam sofrer tensões por diversas vezes, com tanto que seja respeitado o limite de proporcionalidade, dificultando assim a medida da resistência à flexão. Portanto, no padrão estabelecido pela ASTM, a resistência é medida quando a deformação atingida é de 5%. Já no padrão estabelecido pela ISO, a força será medida quando a deflexão for igual a 1,5 vezes a espessura da amostra.

2.2.3 Deformação

A deformação de um determinado corpo está intimamente ligada a uma tensão aplicada. Na maioria dos casos, ela só existe se algum tipo de tensão estiver sendo exercida. Portanto, pode-se dizer que a deformação é a alteração do tamanho de um corpo por unidade de comprimento

A deformação é uma grandeza adimensional, mas em muitos casos ela é dada por metro/metro. Para ser melhor compreendida, a medida pode ser realizada em termos de porcentagem de alongamento.

2.2.4 Diagrama tensão versus deformação

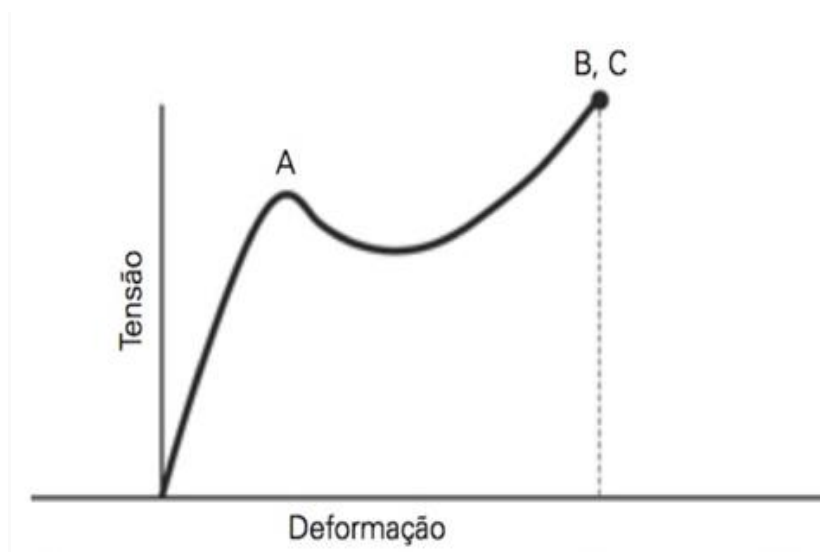
Os diagramas de tensão versus deformação são obtidos através dos resultados dos testes de tração e flexão realizados pela máquina de ensaio universal. A explicação se dá pelo fato de que à medida que o corpo de prova vai sendo tracionado ou flexionado pela ação da carga, a máquina, associada a um software de computador, produz simultaneamente curvas precisas de tensão e deformação. Assim, é possível interpretá-las para obter o comportamento do material.

As curvas de tensão (σ) versus deformação (ε) possui características diferentes para cada tipo de material analisado. No caso dos plásticos, a curva pode se assemelhar com a curva para o Policarbonato da Figura 2, onde o ponto A é o limite de proporcionalidade ou ponto de escoamento dado em mega pascal (MPa) ou em psi. O ponto limita o início do processo de escoamento, que, em outras palavras, possibilita analisar o momento em que o material deixa de se deformar elasticamente e começa a se deformar plasticamente. A partir de então, a tensão e a deformação deixam de ter uma relação de proporcionalidade, ocorrendo uma deformação permanente e irreversível. Após esse limite, a curvatura tende a aumentar devido ao aumento dos efeitos da deformação plástica.

Em alguns casos, a curva de tensão versus deformação não nos fornece pontos de proporcionalidade muito bem definidos, portanto, faz-se necessário traçar uma reta paralela à porção linear da curva com certo distanciamento da mesma (*offset*) para facilitar essa análise. O distanciamento é estabelecido por convenção e geralmente segue um valor de aproximadamente 0,002mm no eixo da deformação. Em certo momento, quando a reta for traçada, a curva será interceptada e, portanto encontra-se o que é chamado de ponto de escoamento *offset*. No caso em que o material não possui região linear, é estabelecido que o ponto de escoamento fosse aquele em que uma quantidade de deformação (geralmente, $\varepsilon = 0,005$) é gerada a partir de certa quantidade de tensão aplicada.

Até atingir o ponto A, a curva possui um comportamento linear, até que ao atingi-lo, a deformação aumenta sem o aumento de carga. Os pontos B e C representam o momento de ruptura do material, ou seja, pode-se dizer que o limite máximo de ruptura até que o material se divida em duas partes é atingido. Através desses pontos pode-se medir também a resistência máxima do material tanto quanto a deformação quanto à tensão exercida sobre ele.

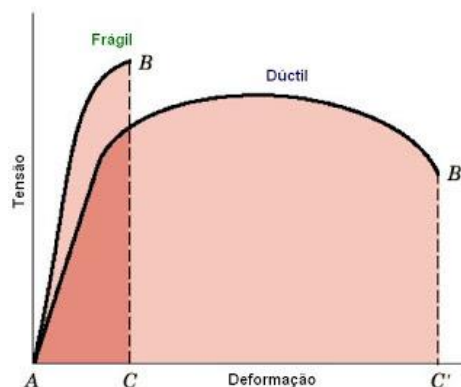
Figura 2- Curva tensão versus deformação do polycarbonato (PC)



Fonte: ASKELAND, D.; WRIGHT, W. *Ciência e engenharia dos materiais. Terceira edição.* Cengage. São Paulo, Brasil. 2013.

Na grande maioria das vezes, curvas em que os pontos de escoamento e ponto de ruptura estão muito próximos, os materiais são considerados mais resistentes ao alongamento, ou seja, menos extensíveis devido à sua dureza. No caso de materiais mais frágeis, o ponto de ruptura aparece logo após a região linear da curva, e consequentemente, os materiais são menos resistentes, ou não possuem resistência nenhuma ao alongamento. Esses tipos de comportamento podem ser observados na Figura 3.

Figura 3 - Comportamento da curva tensão versus deformação para materiais dúcteis e frágeis



Fonte: CALLISTER, W. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Sétima edição.* LTC. Rio de Janeiro, Brasil. 2008.

A partir da curva de tensão versus deformação pode-se obter parâmetros muito importantes no âmbito do estudo dos materiais, como por exemplo, a tenacidade, o módulo de elasticidade (ou módulo de *Young*) e a ductilidade. O primeiro parâmetro refere-se a energia necessária para que a amostra em teste frature e quebre. Essa energia é calculada através da área sob a curva da tensão versus deformação até o ponto de ruptura. Através da tenacidade pode-se indicar também a resistência de um material na presença de uma trinca. O segundo parâmetro nos permite avaliar a rigidez da amostra, em outras palavras, se ela é resistente ao alongamento; quanto maior o seu valor, mais rígida é a amostra, quanto menor o seu valor, maior é a capacidade de deformar-se elasticamente. Para obter seu valor numérico, faz-se necessário dividir a tensão aplicada na amostra (na unidade N/mm²) pela deformação (na unidade mm/mm) conforme a Equação 3. Graficamente, o módulo de *Young* (E) pode ser encontrado pelo coeficiente angular da reta. Por convenção, esse coeficiente só pode ser obtido na região linear da curva, após isso, o coeficiente é impreciso.

$$\text{Módulo de Young (E)} = \text{Tensão } (\sigma) / \text{Deformação } (\epsilon) \quad \text{Eq.(3)}$$

O terceiro parâmetro mede o grau de deformação plástica de um material. A partir da ductilidade, diz-se que o material é dúctil, quando possui alta deformação plástica, ou frágil, quando possui pouca ou nenhuma deformação plástica. O cálculo da ductilidade pode ser obtido a partir de um alongamento conforme a Equação 4 ou uma redução percentual conforme Equação 5.

$$\%AL = (l_f - l_o / l_o) \cdot 100 \quad \text{Eq.(4)}$$

onde,

% AL = percentual de alongamento

l_f = comprimento da amostra no momento da fratura

l_o = comprimento inicial da amostra

$$\% RA = (A_o - A_f / A_o) \cdot 100 \quad \text{Eq.(5)}$$

onde,

% RA = redução percentual

A_o = área da secção transversal original

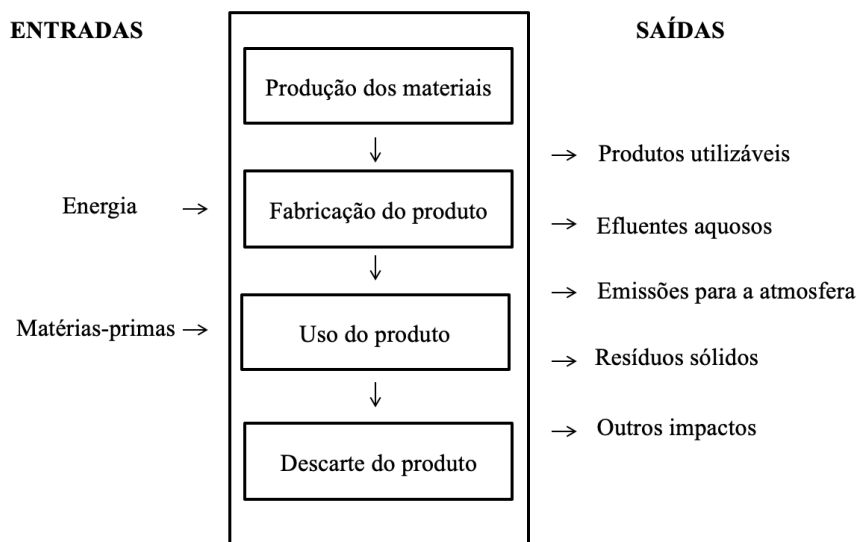
A_f = área da secção transversal no ponto de fratura

Os materiais frágeis são aqueles em que o percentual de alongamento, ou seja, a deformação de fratura, é inferior ou igual à 5%. Após isso, o material é considerado dúctil.

2.3 Reciclagem

O ciclo dos materiais começa no momento em que eles são retirados do meio ambiente através de técnicas de mineração, como por exemplo, os metais; cultivo, como o látex, para produção de borracha; e perfuração, no caso do petróleo e seus derivados. Após isso, o material passa por um processo de refino e purificação para atender as demandas dos mais diversos tipos de indústria, criando o que comumente é chamado de materiais engenheirados. A próxima etapa se constitui no projeto e fabricação do produto demandado, que pode ser mais bem ilustrado a partir do fluxograma da Figura 4. Finalmente, após todas essas etapas, o produto está pronto para ser aplicado e comercializado nos mais diversos ramos.

Figura 4 - Fluxograma do ciclo de vida dos materiais



Fonte: CALLISTER, W. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Sétima edição.

LTC. Rio de Janeiro, Brasil. 2008

O problema é que durante o ciclo de vida dos materiais, muita poluição é originada, tanto pela extração desses materiais do seu meio original quanto pela geração de resíduos. Esses resíduos geralmente são formados pela degradação do produto, devido a ação do tempo e fatores semelhantes, ou quando o produto se torna obsoleto, algo muito comum nos dias de hoje graças a época da rápida modernização em que nossa sociedade se encontra.

Os resíduos em sua grande maioria seguem por três caminhos: são incinerados, dando fim ao produto de maneira geral; são descartados e acumulados em aterros sanitários, voltando à natureza e completando o ciclo de vida; ou são reciclados e reutilizados, auxiliando na conservação e preservação dos recursos naturais e do meio-ambiente.

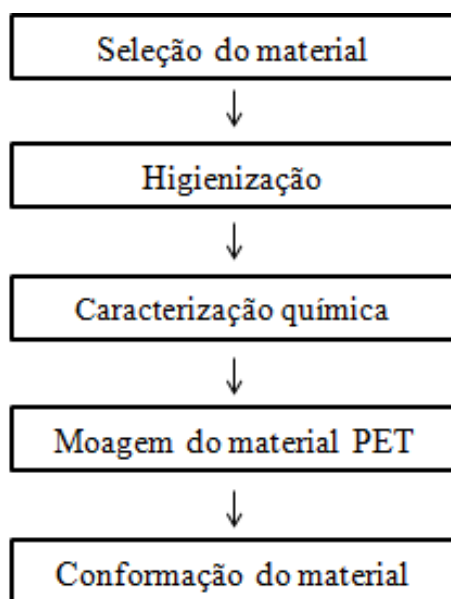
A reciclagem é um processo fundamental nos dias de hoje, visto que os recursos naturais disponíveis são finitos e preza-se pelo bom uso dos mesmos. O processo consiste em realocar o material no ciclo dos materiais através do processamento do mesmo para ser utilizado novamente, porém em outro componente. As razões para se reciclar são inúmeras, principalmente no aspecto ambiental, como por exemplo, vale ressaltar a diminuição significativa do uso energético. De acordo com (CALLISTER, 2008), reciclar alumínio, por exemplo, consome-se 28 vezes menos energia do que refinar minérios naturais do mesmo material. No aspecto econômico, os produtos verdes ainda são considerados um pouco mais caros que os tradicionais, visto que seu processamento necessita de maiores recursos; porém, os benefícios causados pela minimização de impactos ambientais podem agregar valor social ao produto e atrair clientes para esse tipo de segmento.

Os plásticos, em sua grande maioria, materiais não biodegradáveis, se acumulam na natureza levando décadas e décadas para serem decompostos e compõem uma grande parte dos resíduos sólidos de aterros sanitários. Por conta disso, surge a intensa necessidade de recuperar esses materiais através da reciclagem.

2.3.1 Reciclagem do PET

A reciclagem do material PET irá depender da planta em questão, porém, é fato que todas elas seguem praticamente o mesmo mecanismo do fluxograma presente na Figura 5.

Figura 5 - Processo produtivo de reciclagem do PET



Fonte: FRAGA, S. *Reciclagem de materiais Plásticos – Aspectos Técnicos, Econômicos, Ambientais e Sociais*. Primeira edição. Editora Érica. São Paulo, Brasil. 2014

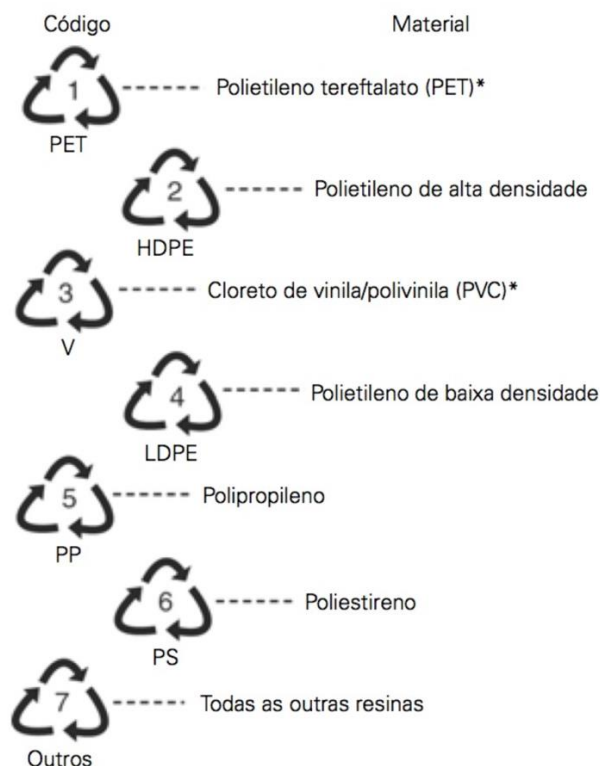
O PET reciclado pode ser utilizado em diversas áreas industriais, como por exemplo, fibras, tecidos, embalagens e fabricação de peças automotivas. Observando a vasta aplicabilidade desse material juntamente com os benefícios gerados ao meio ambiente, a reciclagem vem aumentando gradativamente ao decorrer dos anos em diversas nações. De acordo com (LOKENS GARD, 2013), os Estados Unidos, por exemplo, tem aumentado em 32 vezes a quantidade de material reciclado com o decorrer do tempo, mais precisamente do período de 1982 a 2006.

2.3.2 Classificação

A partir da década de 1970, quando os governos espalhados pelo mundo começaram a se preocupar verdadeiramente com os resíduos sólidos gerados, o governo norte-americano tomou uma medida muito importante no âmbito mundial com a criação do Ato da Conservação e Recuperação de Recursos. Este ato visava promover a reutilização, a redução e a reciclagem de materiais. A partir de então, a reciclagem começou a ser mais amplamente não só nos Estados Unidos, mas no mundo inteiro.

No início, os programas de reciclagem não conseguiam atingir uma eficiência desejada de recuperação, visto que alguns tipos de plástico eram difíceis de serem distinguidos visualmente, como por exemplo, o PET e o PVC, perdendo-se uma grande quantidade de material quando acidentalmente os tipos de plástico eram mal separados. Assim, percebeu-se que uma padronização e uma classificação eram necessárias. Então, em 1988, o Instituto de Garrafas Plásticas da Sociedade das Indústrias de Plástico estabeleceu a classificação e identificação de recipientes plásticos com uma numeração específica para cada tipo de plástico e a abreviatura de seu nome como ilustrado na Figura 6 solucionando assim problemas de identificação dos materiais.

Figura 6 - Códigos de reciclagem para cada tipo de plástico



Fonte: LOKENSGARD, E. *Plásticos Industriais, teoria e aplicações. Quinta edição. Cengage Learning. São Paulo-SP, Brasil, 2013.*

Além da abreviatura do tipo do plástico e do código para cada um deles, adicionou-se também um símbolo composto por setas para indicar que aquele material é habilitado a passar pelo processo de reciclagem, o que causou muita confusão e difícil aceitação inicialmente por imaginar-se que o número representava a quantidade de vezes que aquele material havia sido reciclado.

2.4 Propriedades químicas

As propriedades químicas dos plásticos são bastante discutidas na indústria. A partir delas pode-se afirmar que determinado polímero é resistente ou não à compostos químicos como ácidos, bases, ação da água e produtos químicos em geral, e para isso, é de suma importância testá-los para conhecê-los melhor. Devido a essa necessidade, faz-se extremamente necessário analisar e estudar a química básica de cada estrutura, observando os elementos, as moléculas e os tipos de ligações presentes em cada tipo de material para que assim sejam determinadas características e limitações.

2.4.1 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma das mais importantes técnicas experimentais do mundo. Isso se deve pois ela nos fornece informações qualitativas e semi-quantitativas das amostras, caracterizando os polímeros através da identificação e determinação das suas estruturas químicas, avaliando as ligações entre as moléculas, bem como quais grupos funcionais estão presentes em determinada amostra, seja ela líquida, gasosa ou sólida.

O objetivo da análise de FTIR é medir a absorbância de radiação de uma determinada amostra em um determinado comprimento de onda através da interação da radiação eletromagnética com os átomos e as moléculas; por conta disso, a resposta que se obtém do instrumento é com relação à um espectro de absorção de frequências peculiares de grupos químicos e não de substâncias. Essas frequências irão variar dependendo das características de composição, da estrutura e do modo de vibração de cada amostra em questão. Por conta disso, a qualidade dos dados obtidos dependerá do método de preparo da amostra.

Por ser considerado um procedimento fácil e rápido, as informações desejadas são obtidas em questões de minutos, porém, existe uma necessidade do instrumento utilizado, o espectrômetro de infravermelho, ser conectado à computadores para que os dados de absorção de luz para cada espelho do maquinário sejam convertidos em absorção de luz para cada comprimento de onda através do uso das Transformadas de

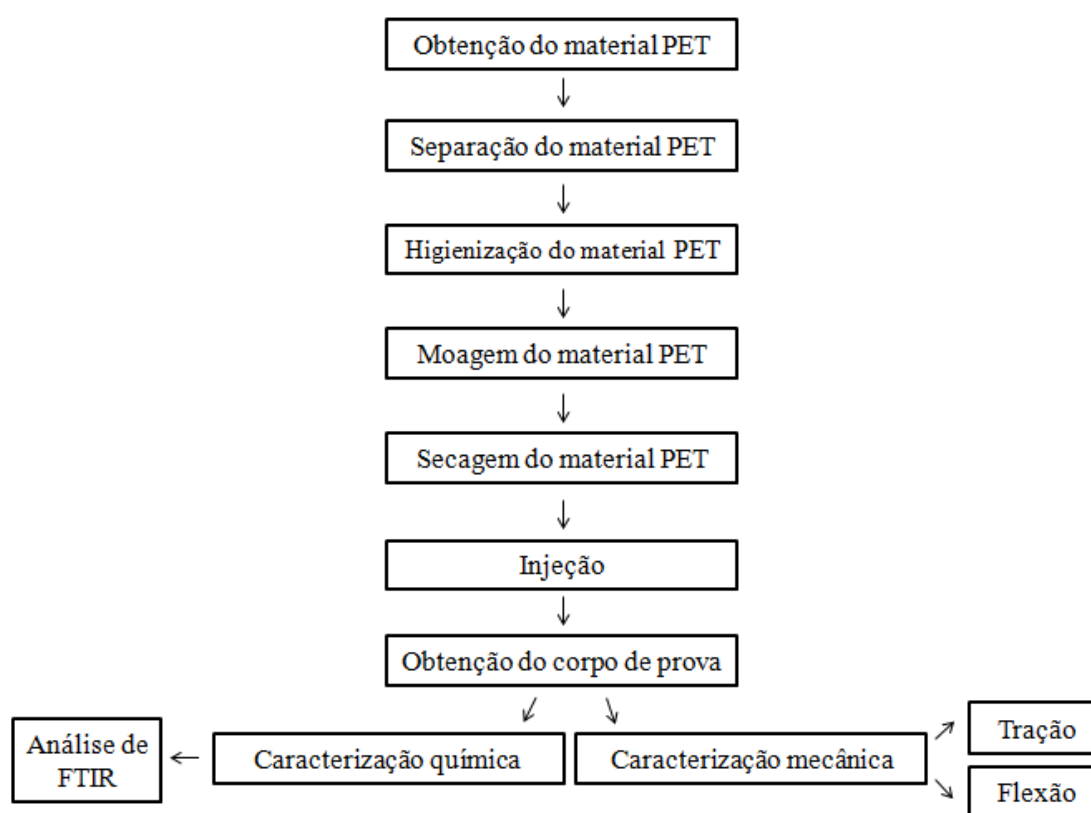
Fourier. Os dados só são obtidos pois são emitidos sinais característicos de cada amostra, chamados de indução bifásica. Devido a dificuldade na leitura dos sinais não conseguem ser interpretados, a metodologia das Transformadas de Fourier é aplicada com o auxílio de um software.

Após transformados, os sinais emitidos pela amostra apresentam picos referentes a frequências de vibração para cada grupo funcional existente, permitindo então a análise qualitativa da amostra. A análise quantitativa é realizada através da altura dos picos, quanto maior a altura, maior será a quantidade de um determinado grupo funcional e vice-versa.

3 METODOLOGIA

A metodologia realizada nessa pesquisa se divide em duas partes: a primeira com relação ao processo produtivo realizado com o material PET recolhido, e a segunda com relação às análises das propriedades mecânicas e químicas realizadas no material após a obtenção dos corpos de prova (Figura 7).

Figura 7 - Fluxograma do processo produtivo de reciclagem para obtenção do corpo de prova



Fonte: Autor

3.1 Processo Produtivo

3.1.1 Coleta do material

As garrafas de polietileno de tereftalato (PET) foram coletadas em lanchonetes e em festividades no município de João Pessoa no mês de junho de 2019 (Figura 8). Foram escolhidas apenas garrafas de água e de refrigerante pós consumo de volumes

(garrafas de 300mL, 600mL, 1L, 2L e 3L em sua maioria) e coloração (garrafas verdes e transparentes) variadas.

Figura 8 - Parte do material PET recolhido



Fonte: Autor

3.1.2 Separação do material PET

As garrafas foram separadas de acordo com sua coloração e de acordo com o material existente previamente ao seu consumo (Figura 9). Após isso, retirou-se o rótulo, a tampa e seu lacre com o auxílio de uma tesoura e uma faca, já que não são formados por plásticos do tipo PET para assim obter uma análise mais precisa do material coletado e com o menor grau de impurezas possível.

Figura 9 - Material PET tratado



Fonte: *Autor*

3.1.3 Higienização do material PET

O material PET coletado passou por um processo de higienização com o intuito de retirar o excesso do material existente internamente pré-consumo e também para retirar resquícios do rótulo da garrafa. O processo foi realizado apenas com água para evitar que moléculas de produtos químicos, como detergente, entre em contato com a garrafa e modifique a sua composição.

3.1.4 Moagem do material PET

O material tratado e higienizado precisou ser moído para que fosse diminuído o seu alto volume inicial e assim ser adicionado sem dificuldades à máquina de injeção. Dessa forma, o PET foi adicionado à dois moinhos de faca diferentes: o moinho número 1 (Figura 10), que gerava flocos maiores e o moinho número 2 (Figura 11), que gerava uma flocos menores. Ambos os equipamentos se encontravam no Laboratório de Materiais Poliméricos - DEMAT do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Após a moagem, o material obtido foi encaminhado para um compartimento onde todo o resíduo formado se alocava. Logo em seguida, o material foi recolhido e encaminhado para uma balança para que fosse pesado. O moinho foi higienizado após

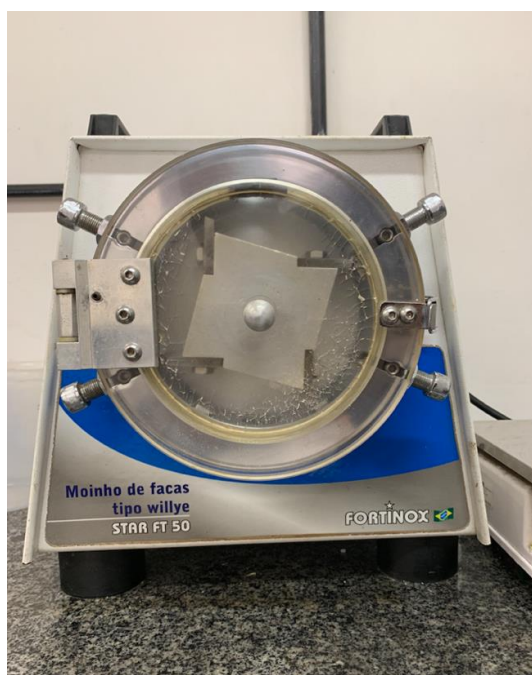
cada moagem para que as partículas de cada tipo de PET não se misturassem e assim amostras menos impuras fossem obtidas. A mesma metodologia foi aplicada para os dois moinhos de faca.

Figura 10 - Moinho de facas número 1



Fonte: Autor

Figura 11 - Moinho de facas número 2



Fonte: Autor

3.1.5 Secagem do material PET

A secagem do material PET moído se deu em uma estufa de secagem e esterilização (Figura 12) presente no Laboratório de Fenômenos dos Transportes localizado no Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. O material permaneceu no equipamento por 24h na temperatura de 60°C. A temperatura escolhida foi baseada nos estudos realizados por (PAIHTEA, P; LALNGAIHAWMAA, A; SAINIA, G., 2019) e levando em consideração também que a temperatura de fusão desse tipo de plástico é de 260 °C e sua degradação ocorre em aproximadamente 440 °C (GIRIJA, B., 2005) ou seja, bem maior que a escolhida, evitando assim a perda do material.

Figura 12 - Estufa de secagem e esterilização



Fonte: Autor

3.1.6 Injeção

Primeiramente, o material seco foi pesado com o auxílio de uma balança (Figura 13) e de uma espátula. Pesou-se 500g de PET verde, 100% PET proveniente do pós-

consumo de refrigerante e adicionou-se à injetora para iniciar o processo de obtenção dos corpos de prova. A mesma metodologia foi realizada para o PET transparente, 100% PET proveniente do pós-consumo de água. No caso do PET MIX, uma composição de 50% PET proveniente do pós-consumo de água e 50% PET proveniente do pós-consumo de refrigerante foi estabelecida.

Figura 13 - Material PET pesado



Fonte: Autor

Após a pesagem, o material esverdeado seco foi alimentado na injetora (Figura 14) e os parâmetros utilizados para esse processo foram baseados nos estudos de (SILVA, L. B., 2015) que serviram de estimativas iniciais e encontram-se na Tabela 1. A mesma metodologia foi realizada para o material transparente e para o PET MIX.

Tabela 1 - Parâmetros iniciais para o processo de injeção

Parâmetro	Valor
Perfil de temperatura (°C)	250, 260, 270
Pressão de recalque (bar)	280
Pressão de injeção (bar)	300
Tempo de injeção (s)	15
Tempo de resfriamento (s)	15

Figura 14 - Máquina de injeção



Fonte: Autor

Após aplicar o material na injetora com os parâmetros estabelecidos na Tabela 1, verificou-se que o PET é bastante viscoso e fácil de ser moldado na temperatura escolhida. Dessa forma, pôde-se comprovar que o material é vítreo e termoplástico, como previamente citado pela literatura.

Os parâmetros utilizados por (SILVA, L. B., 2015) foram utilizados como estimativas iniciais e aos poucos foram sendo adaptados para a melhor conformação, evitando assim a presença de falhas ou rupturas dos mesmos de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros finais para o processo de injeção

Parâmetro	Valor
Perfil de temperatura (°C)	260, 270, 285
Pressão de recalque (bar)	280
Pressão de injeção (bar)	320
Tempo de injeção (s)	15
Tempo de resfriamento (s)	15

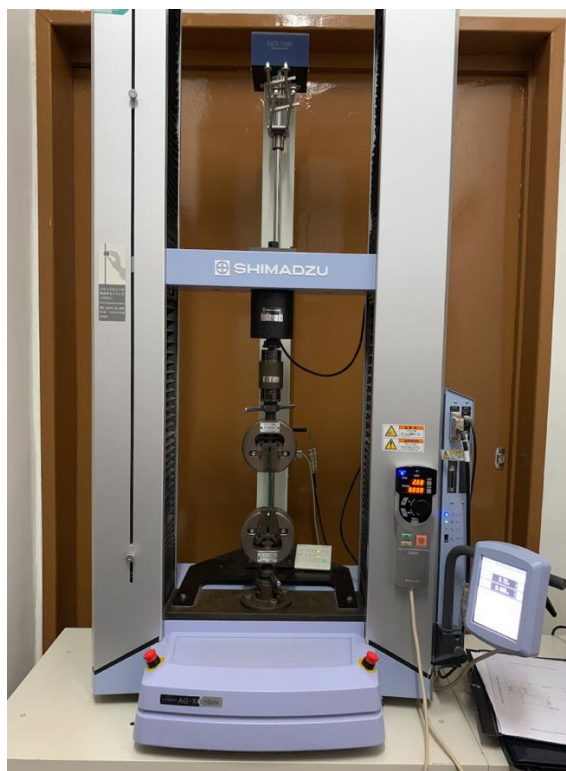
O material esverdeado proveniente do pós-consumo de refrigerante foi o escolhido para ser testado na injetora primeiramente e por conta disso foi o PET com o menor número de corpos de prova, totalizando 8. Já para o PET proveniente do pós-

consumo de água e para PET MIX, foram obtidos 12 corpos de prova. Estas atividades foram desenvolvidas no Laboratório de Materiais Poliméricos - DEMAT do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

3.1.7 Caracterização mecânica

Os ensaios de tração e flexão foram realizados no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) localizado no Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba; para isso, os corpos de prova foram submetidos à testes em uma Máquina de Ensaio Universal (*Universal Testing Machine - UTM*) – *Autograph, Shimadzu* (Figura 15) que suportava até 10kN de força.

Figura 15 - Máquina universal de ensaios mecânicos



Fonte: Autor

Os ensaios de tração e de flexão forneceram valores de tensão e de deformação. Matematicamente, a deformação é estabelecida de acordo com a Equação 6.

$$\text{Deformação } (\varepsilon) = l_i - l_o / l_o = \Delta l / l_o \quad \text{Eq.(6)}$$

onde,

l_i = comprimento instantâneo;

l_o = comprimento original;

Δl = variação de comprimento em um dado instante

Usualmente, o valor da deformação é dado em forma de percentual de alongamento, sendo necessário multiplicar a Equação 6 por 100.

3.1.7.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração teve como base as normas estabelecidas pela ASTM D-638. O maquinário foi ajustado para esse tipo de teste (Figura 16) e a velocidade de carregamento utilizada baseou-se nos estudos de (MELO, P.M.A., 2019) que se encontra na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados no ensaio de tração

Tipo de PET/ Parâmetro	PET Verde	PET Transparente	PET MIX
Número de amostras	3	5	5
Velocidade de carregamento (mm/min)		50	

Figura 16 - Máquina universal de testes mecânicos ajustada para o teste de tração



Fonte: Autor

3.1.7.2 Ensaio de Flexão

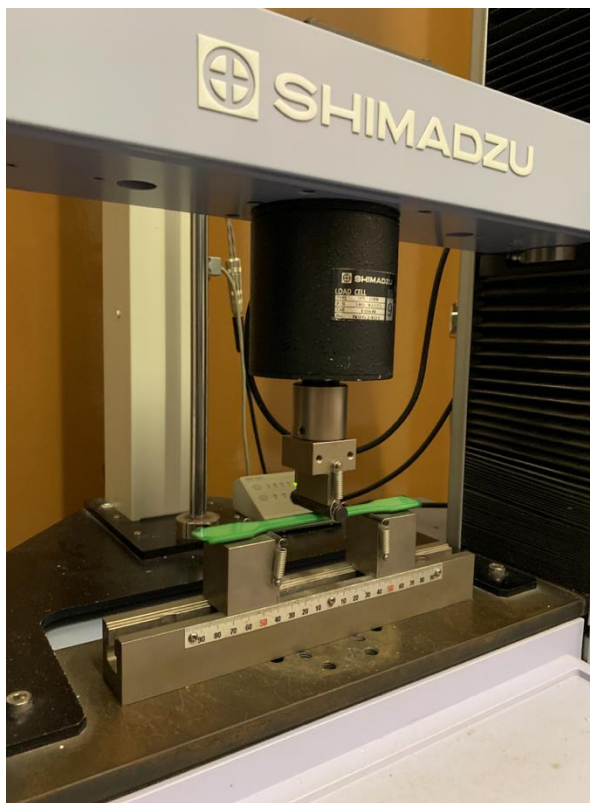
O ensaio de flexão seguiu as normas estabelecidas pela ASTM D-790 e D-747. O maquinário foi ajustado para esse tipo de teste (Figura 17) e os parâmetros utilizados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados no ensaio de flexão

Tipo de PET/ Parâmetro	PET Verde	PET Transparente	PET MIX
Número de amostras	3	5	5
Velocidade de carregamento (mm/min)		2	

A escolha da velocidade de carregamento baseou-se nos estudos de (MELO, P.M.A., 2019).

Figura 17 - Máquina universal de testes mecânicos ajustada para o teste de flexão



Fonte: *Autor*

3.1.8 Caracterização química

A caracterização química realizada foi a Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). Devido à nossa amostra se encontrar em um estado sólido, foi necessário utilizar uma metodologia que se aplicasse ao estado da amostra. A técnica de análise escolhida foi via pastilha de brometo de potássio (KBr) baseado nos estudos de (GONÇALEZ, 2002), (OLIVEIRA, 2011), (PEREIRA, 2017) e (SOUZA, 2018).

O primeiro passo foi obter a pastilha do branco contendo apenas KBr; para isso, macerou-se o brometo de potássio até que atingisse uma granulometria bem pequena, na forma de um pó fino. Feito isso, colocou-se o pó de KBr no pastilhador com o auxílio de uma espátula e para que a pastilha fosse formada, utilizou-se uma prensa. Assim, foi

possível colocar a pastilha no porta amostras do espectrofotômetro (*IRTracer-100*, *Shimadzu*) e realizar a análise de infravermelho.

O segundo passo foi obter a pastilha da mistura entre o KBr e o material PET, contendo 0,1 mg de material PET moído para cada 10 mg de KBr. A mesma metodologia foi realizada para a pastilha de PET transparente e PET verde, diferenciando-se apenas no fato de que o PET proveniente da moagem das garrafas também precisou ser macerado para misturar-se ao KBr. Estas atividades foram desenvolvidas no LABFILM - CEAR da Universidade Federal da Paraíba.

4 RESULTADOS

4.1 Moagem

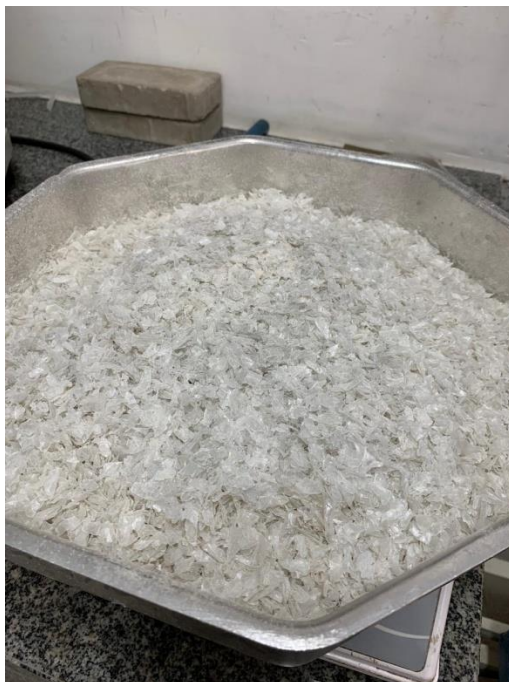
Ao ser retirado do compartimento do moinho de facas número 1, percebeu-se que o material triturado obtido ainda possuía partículas grandes e não uniformes (Figura 18) - (Figura 20). Assim, fez-se necessário passar pelo moinho de facas número 2 para obter partículas menores e mais uniformes (Figura 19) - (Figura 21), facilitando a adição do mesmo à injetora e evitando o entupimento do maquinário.

Figura 18 - PET triturado pós consumo de água obtido após a moagem no moinho número 1



Fonte: Autor

Figura 19 - PET triturado pós consumo de água obtido após a moagem no moinho número 2



Fonte: *Autor*

Figura 20 - PET triturado pós consumo de refrigerante obtido após a moagem no moinho número 1



Fonte: *Autor*

Figura 21 - PET triturado pós consumo de refrigerante obtido após a moagem no moinho número 2



Fonte: *Autor*

4.2 Secagem

O material obtido após a secagem (Figura 22) encontrava-se aparentemente em condições normais, sem nenhum sinal aparente de degradação como era de se esperar, já que a temperatura de secagem escolhida era bem inferior à de degradação.

Figura 22 - PET seco proveniente do pós-consumo de água e de refrigerante após período de 24 horas na estufa



Fonte: *Autor*

4.3 Injeção

Além das adaptações ao decorrer do procedimento, a diferença no número de corpos de prova (Figura 23), (Figura 24), (Figura 25) se deu devido ao fato de que anteriormente ao manuseio da injetora, restos de outros materiais plásticos ainda se encontravam no equipamento, fazendo com descartássemos os primeiros objetos obtidos e perdêssemos um pouco do material moído para evitar qualquer tipo de contaminação ou impureza gerada por outro tipo de plástico.

Figura 23 - Corpos de prova de PET proveniente do pós-consumo de refrigerante



Fonte: Autor

Figura 24 - Corpos de prova de PET proveniente do pós-consumo de água



Fonte: *Autor*

Figura 25 - Corpos de prova provenientes do PET MIX contendo 50% de PET transparente e 50% de PET verde



Fonte: *Autor*

Foram obtidos corpos de prova de 16,5 cm de comprimento, 1,9 cm de largura e 0,4 cm de espessura, diferenciando um pouco das normas estabelecidas pela ISO 527-1 e pela ASTM D-638, citada previamente para testes de tração. Quanto a sua aparência, cada objeto apresentou um aspecto brilhoso, muito similar ao de um material acrílico, a sua textura bem lisa e aparentemente pouco flexível devido a sua dureza.

4.4 Caracterização mecânica

Ao serem colocados na máquina universal de testes mecânicos, os corpos de provas provenientes do PET pós-consumo de refrigerante, água e sua blenda foram submetidos a testes de tração e de flexão para analisar a sua resistência. Assim, alguns parâmetros foram observados como a sua força, tensão e deformação de ruptura. Assim, foram feitas as curvas de tensão versus deformação para cada um dos corpos de prova observados.

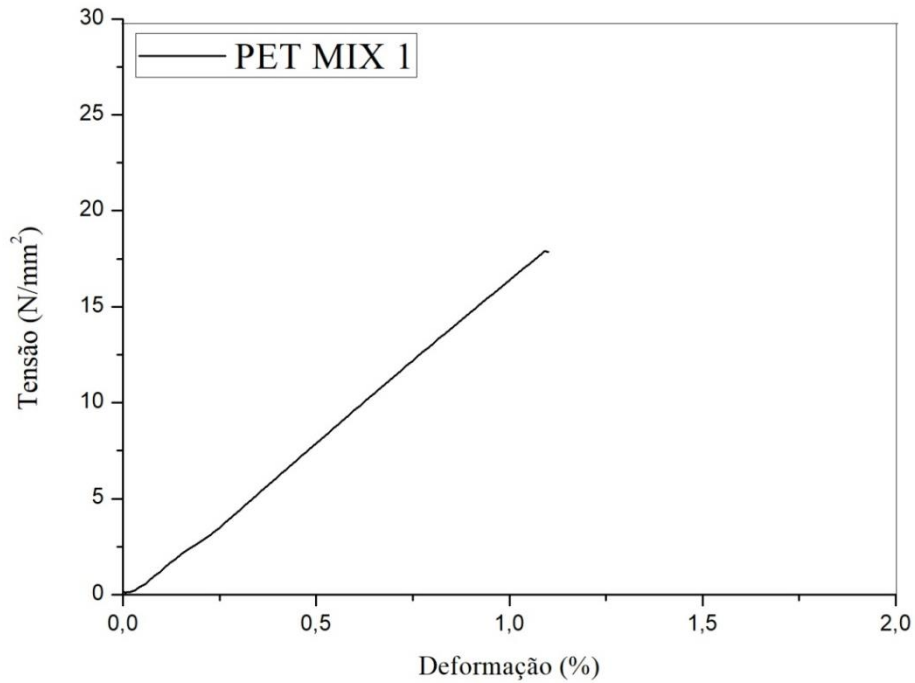
4.4.1 Curvas de tensão versus deformação

4.4.1.1 Ensaios de Tração

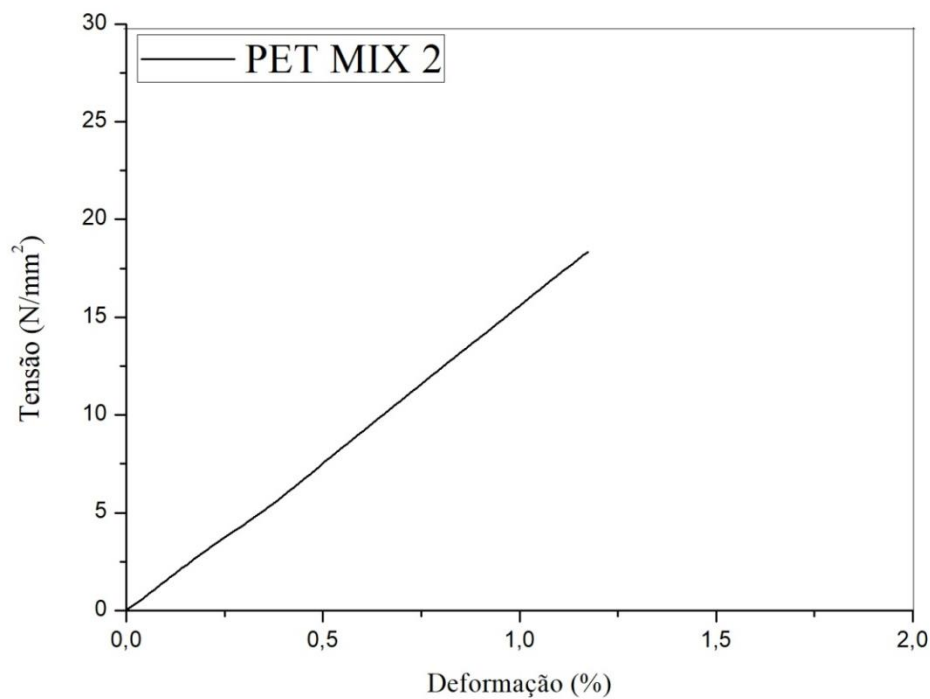
As curvas tensão versus deformação para cada corpo de prova e para cada tipo de PET foram obtidas com o auxílio do software *Origin Pro 7* e encontram-se nas Figuras 26, 27 e 28 bem como o valor de seus parâmetros nas Tabelas 5, 6 e 7, obtidos com o auxílio do software *Trapezium X*.

Com o intuito de comprovar o comportamento linear das cruvas de tensão versus deformação, foi realizada uma regressão linear com o auxílio do software *Origin Pro 7*. Assim, foi possível achar a equação da reta e os coeficientes de determinação (R^2) para cada curva. Os valores desses coeficientes de determinação se encontram nas Tabelas 5, 6 e 7.

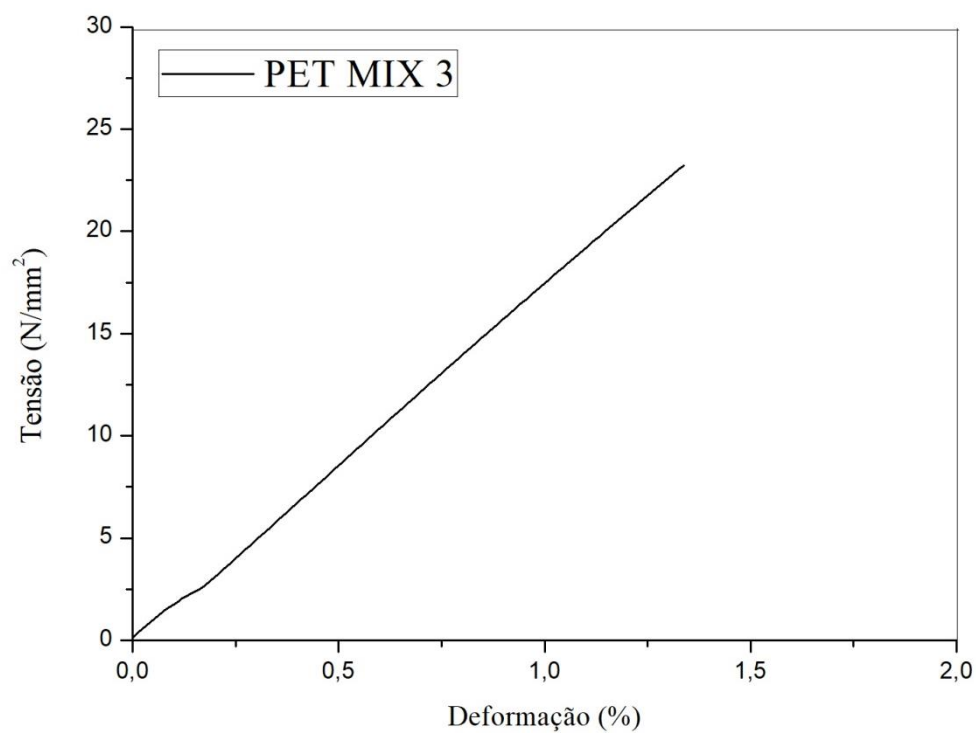
Figura 26 - Curvas de tensão versus deformação para o PET MIX: a) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 1; (b) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 2; (c) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 3; (d) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 4; (e) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 5.



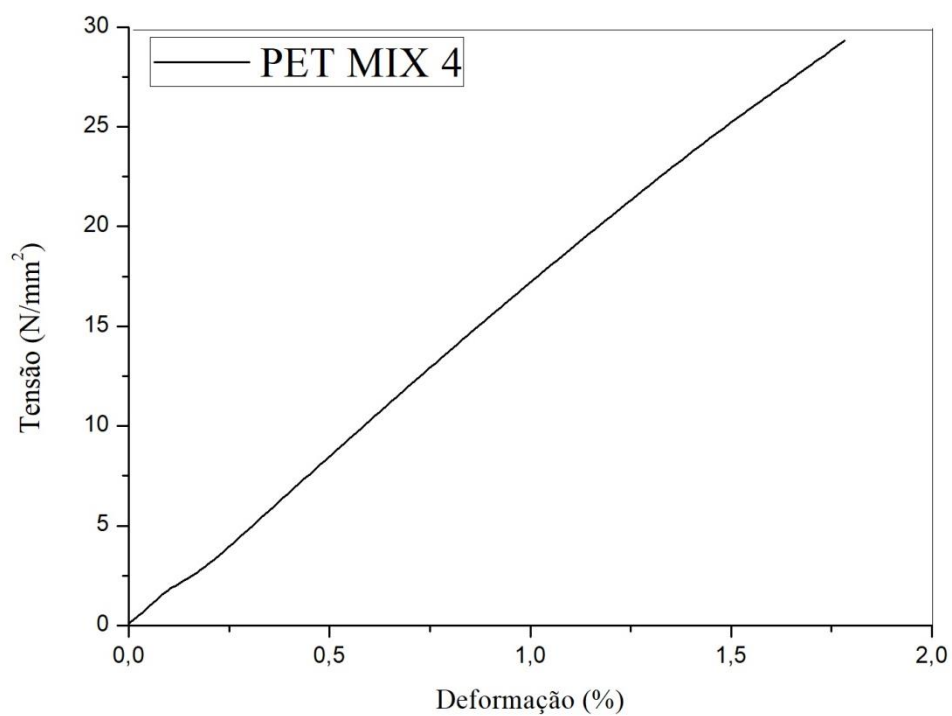
(a)



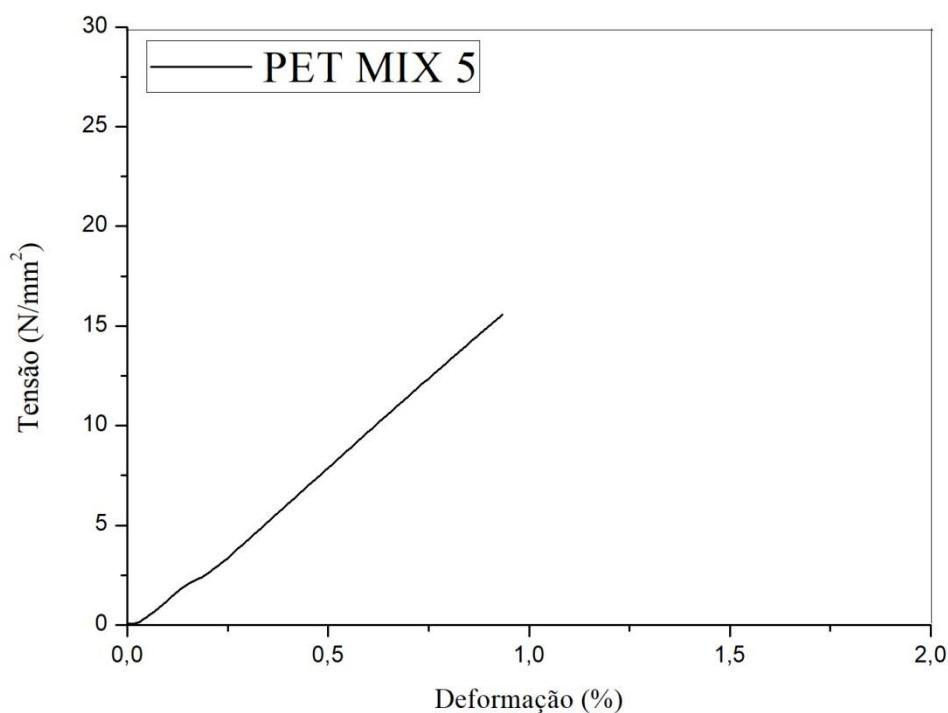
(b)



(c)



(d)



(e)

É possível observar que as Figuras 26 (a, b, c, d e e) correspondem a deformação elástica para o PET MIX. Para as Figuras (a, b e e) a deformação máxima em termos de porcentagem foi de aproximadamente 1% e para as Figuras (c e d) a deformação máxima atingiu valores superiores à 1,3%.

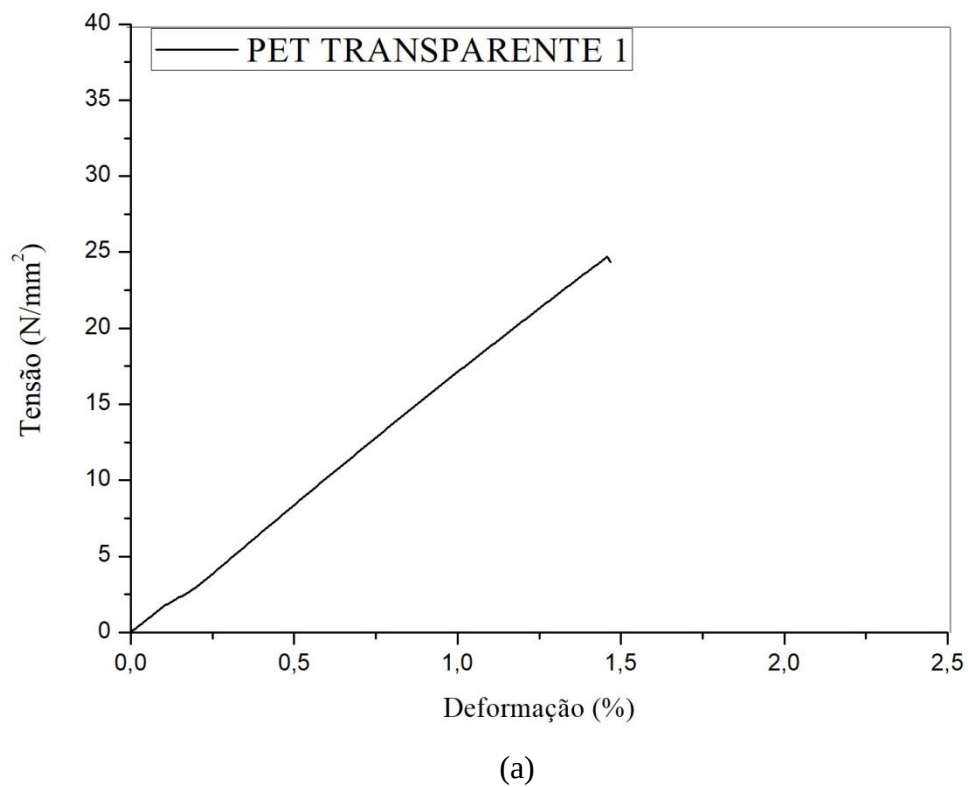
Tabela 5 - Valores dos parâmetros obtidos a partir das curvas de tensão versus deformação para o PET MIX

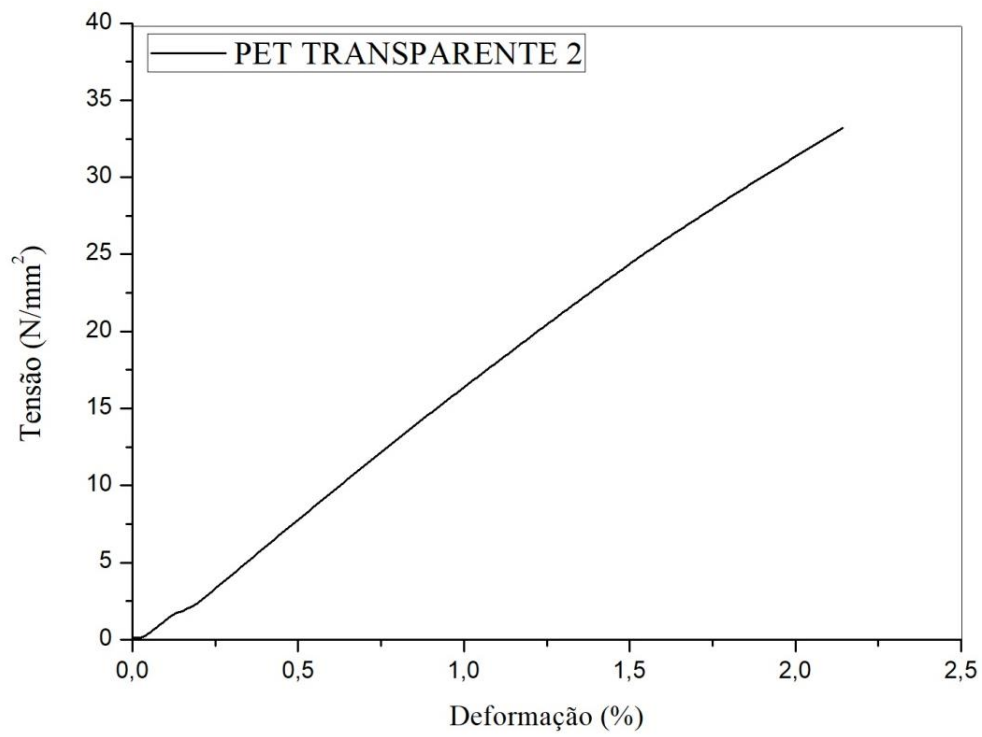
Corpo de prova	Módulo de elasticidade (N/mm)	Tensão na ruptura (N/mm²)	Deformação na ruptura (%)	Coefficiente de determinação (R²)
PET MIX 1	1674,55	17,85	1,10	0,99
PET MIX 2	1572,94	18,33	1,17	0,99
PET MIX 3	1758,55	23,21	1,33	0,99
PET MIX 4	1675,58	29,30	1,78	0,99
PET MIX 5	1710,03	15,57	0,93	0,99
Média	1678,33	20,85	1,26	0,99

A partir dos dados apresentados na Tabela 5, foi possível perceber que os corpos de prova apresentaram valores similares de tensão e deformação, o que era de se esperar

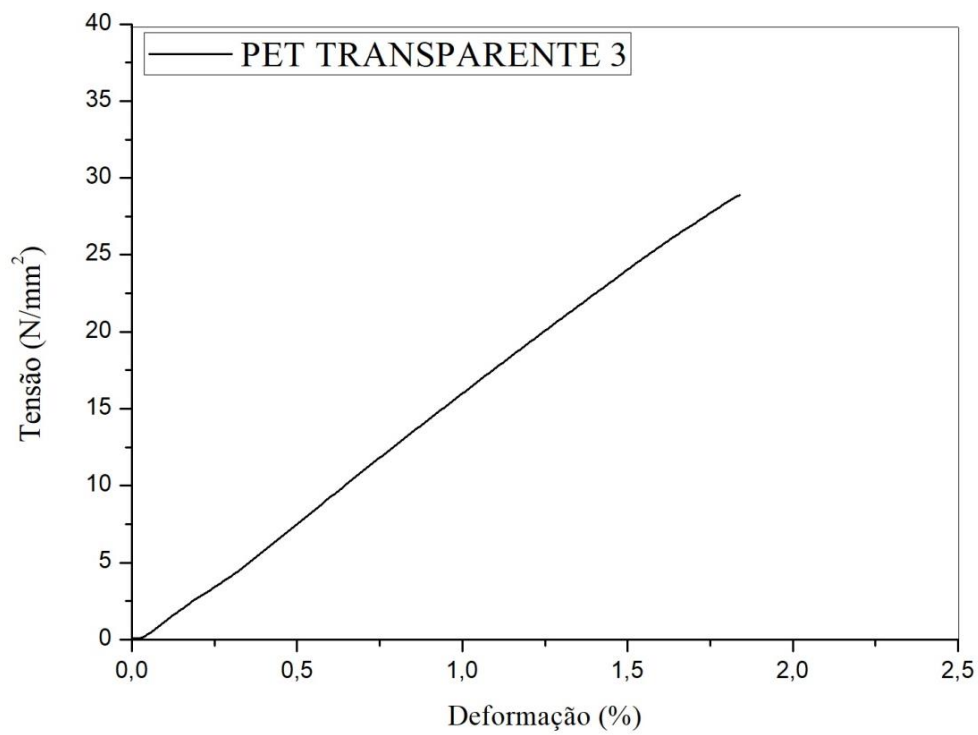
já que o material era o mesmo e foi conformado através da mesma metodologia na injetora.

Figura 27 - Curvas de tensão versus deformação para o PET transparente: a) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 1; (b) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 2; (c) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 3; (d) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 4; (e) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 5.

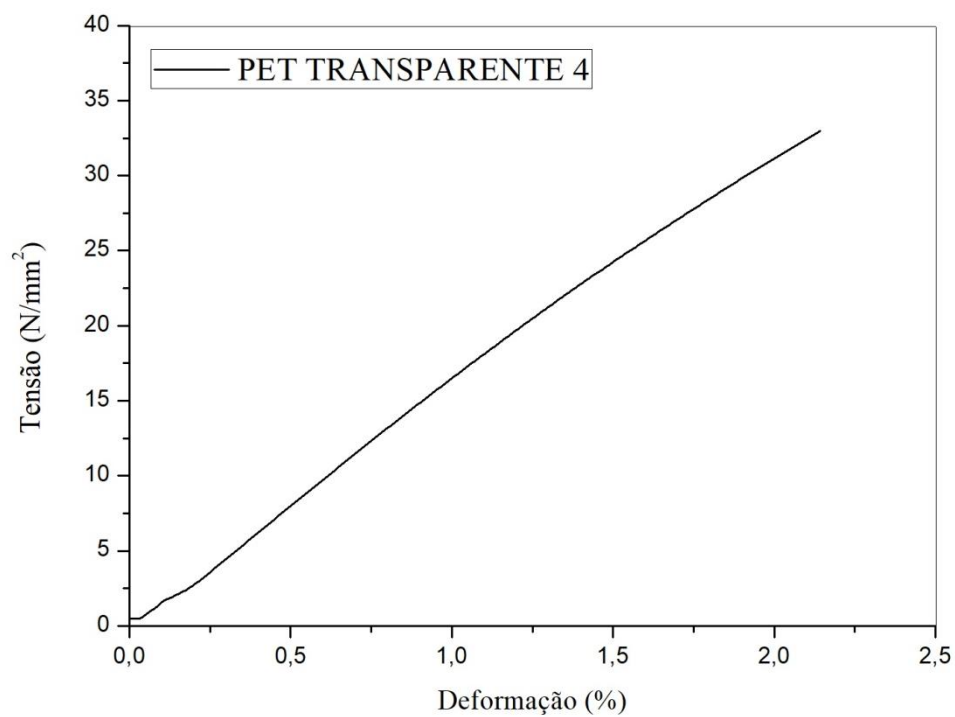




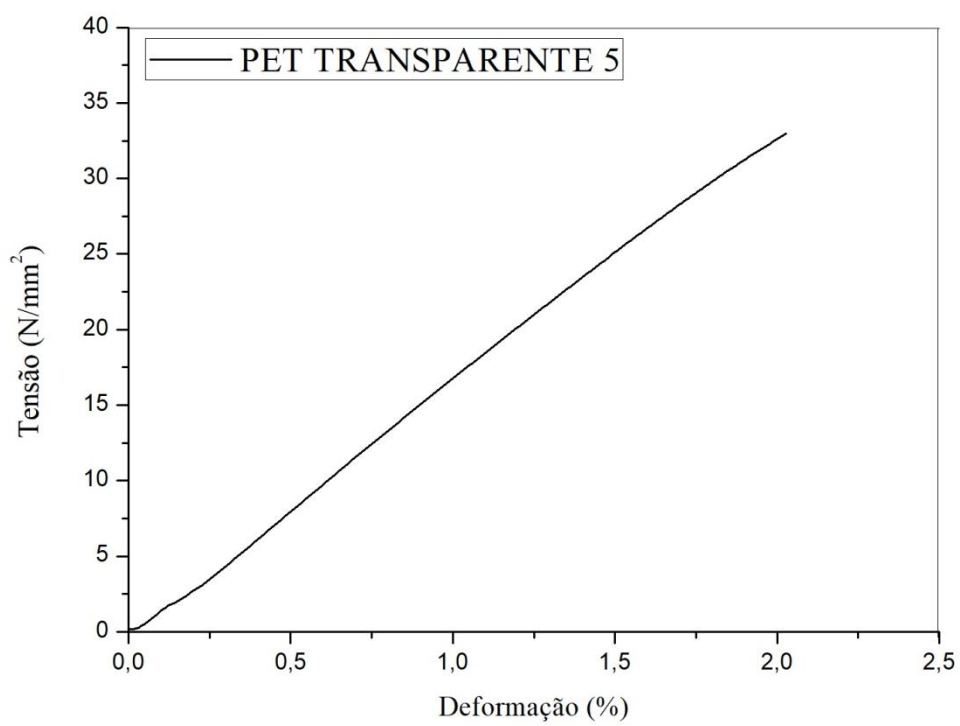
(b)



(c)



(d)



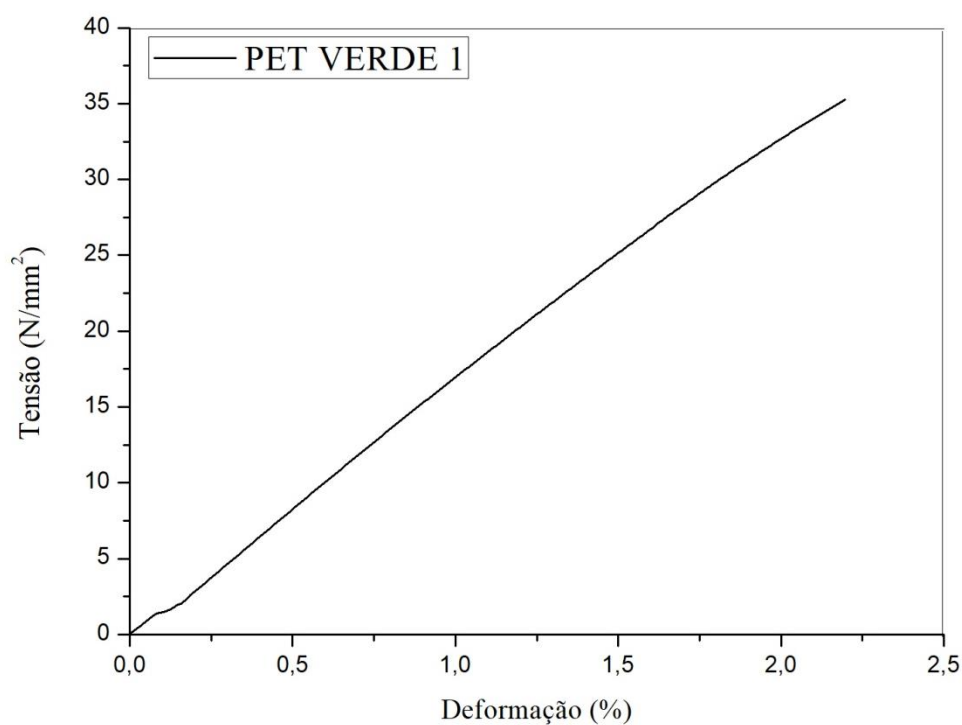
(e)

Tabela 6 - Valores dos parâmetros obtidos a partir das curvas de tensão versus deformação para o PET transparente

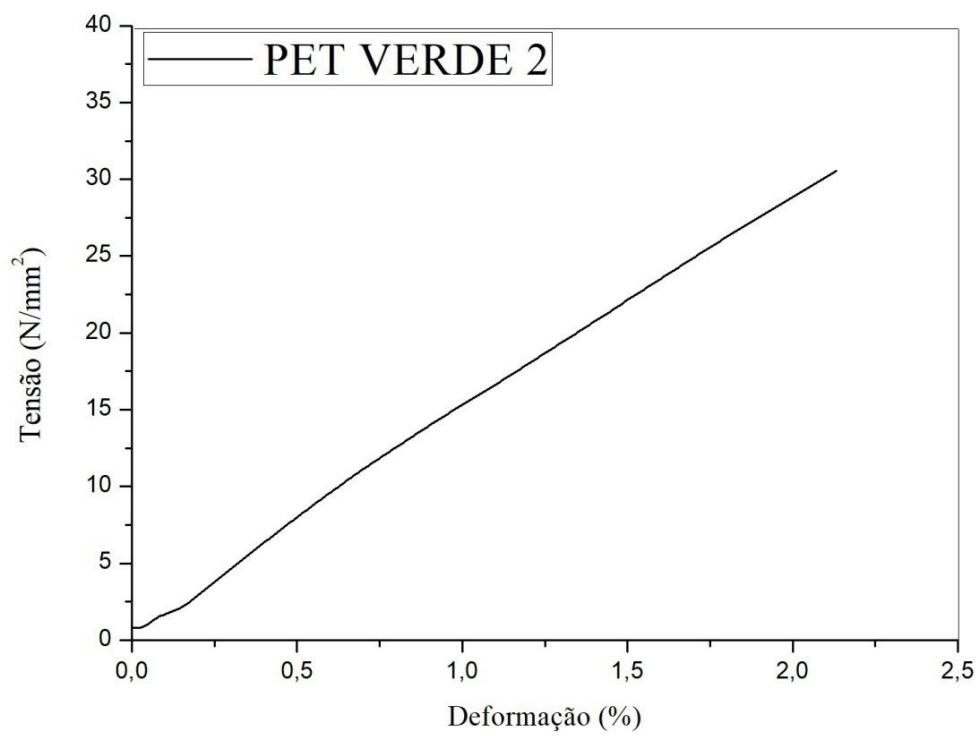
Corpo de prova	Módulo de elasticidade (N/mm)	Tensão na ruptura (N/mm²)	Deformação na ruptura (%)	Coefficiente de determinação (R²)
PET Transparente 1	1720,15	24,69	1,45	0,99
PET Transparente 2	1604,06	33,19	2,14	0,99
PET Transparente 3	1624,59	28,90	1,84	0,99
PET Transparente 4	1576,10	32,98	2,14	0,99
PET Transparente 5	1679,25	32,97	2,02	0,99
Média	1640,83	30,54	1,91	0,99

A partir dos dados apresentados na Tabela 6, foi possível perceber que houve um aumento dos valores de tensão e de deformação no PET transparente, evidenciando assim a sua maior resistência frente ao PET MIX testado primeiramente.

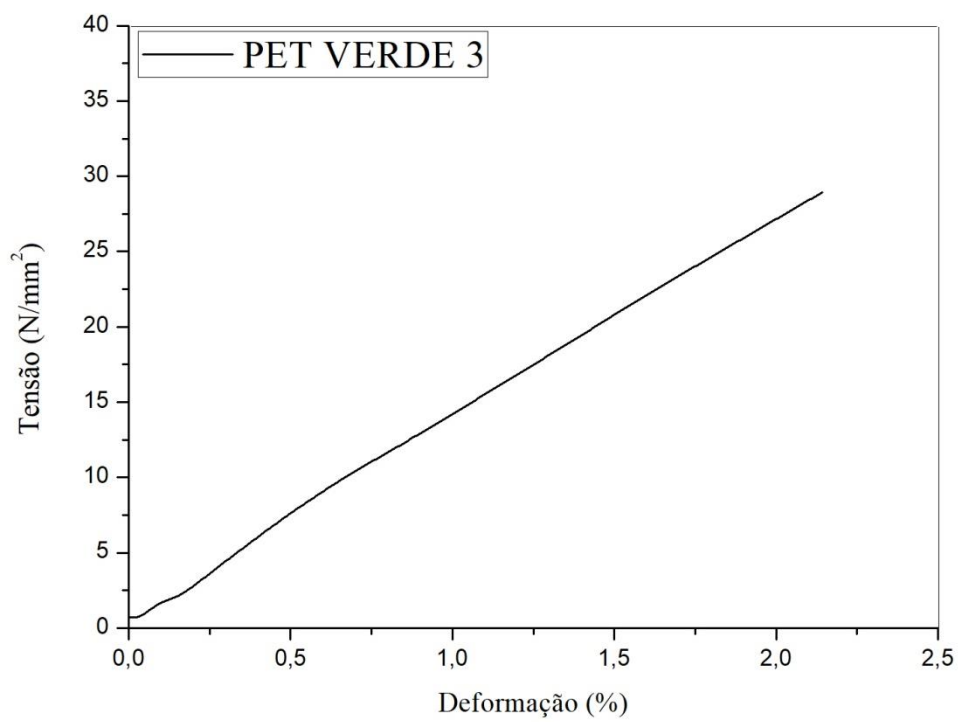
Figura 28 - Curvas de tensão versus deformação para o PET verde: a) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 1; (b) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 2; (c) Curva de tensão versus deformação para o corpo de prova 3.



(a)



(b)



(c)

Tabela 7 - Valores dos parâmetros obtidos a partir das curvas de tensão versus deformação para o PET verde

Corpo de prova	Módulo de elasticidade (N/mm)	Tensão na ruptura (N/mm ²)	Deformação na ruptura (%)	Coefficiente de determinação (R ²)
PET Verde 1	1648,84	35,27	2,19	0,99
PET Verde 2	1423,71	30,53	2,13	0,99
PET Verde 3	1335,92	28,93	2,14	0,99
Média	1469,49	31,57	2,15	0,99

Os dados obtidos na Tabela 7 mostram que o PET verde é um pouco mais resistente à tração que o PET transparente e que o PET MIX. No entanto, o módulo de elasticidade foi aumentado com a mistura. Assim, pode-se observar que misturar os tipos de PET não beneficiou a resistência do material.

A partir das curvas de tensão versus deformação obtidas, foi possível perceber que o material apresentou apenas deformação elástica, visto que logo após sua região linear, o material atinge o ponto de ruptura, não existindo deformação plástica, diferenciando dos resultados obtidos pela curva tensão versus deformação para o PET pós-consumo conformado por extrusão e depois conformados por injeção dos estudos de (NOVELLO, 2014). Porém, as curvas de alguns dos compósitos analisados por (NOVELLO, 2014) se assemelhou bastante às do PET MIX, PET transparente e do PET verde desta pesquisa. Com isso, conclui-se que os PET provenientes do pós-consumo de refrigerante e água conformados a partir da injeção do material granulado não são considerados dúcteis, apresentando um comportamento frágil e consequentemente menos tenazes, características essas bem semelhantes à cerâmica e ao vidro.

4.4.2 Curvas de força versus deslocamento

4.4.2.1 Ensaios de Flexão

Após os ensaios de flexão na Máquina de Ensaio Universal – *Autograph*, *Shimadzu 10 kN*, foi possível encontrar alguns parâmetros para cada um dos corpos de prova com o auxílio do software *Trapezium X*, conforme as Tabelas 8, 9, 10.

Tabela 8 - Valores dos parâmetros obtidos a partir dos testes de flexão para o PET MIX

Corpo de prova	Módulo de Elasticidade (N/mm)	Tensão na ruptura (N/mm²)	Deformação na ruptura (%)
PET MIX 1	2579,50	46,94	1.82
PET MIX 2	*	*	*
PET MIX 3	2650,75	50,62	1.91
PET MIX 4	2556,07	61,09	2.39
PET MIX 5	2596,64	52,45	2.02
Média	2595,74	52,77	2.03

* o corpo de prova se rompeu sem que o maquinário identificasse os valores dos parâmetros associados à essa ruptura.

Tabela 9 - Valores dos parâmetros obtidos a partir dos testes de flexão para o PET transparente

Corpo de prova	Módulo de Elasticidade (N/mm)	Tensão na ruptura (N/mm²)	Deformação na ruptura (%)
PET Transparente 1	2526,29	67,51	2.67
PET Transparente 2	2586,21	61,00	2.35
PET Transparente 3	2664,47	64,90	2.43
PET Transparente 4	2348,43	75,93	3.23
PET Transparente 5	2427,13	66,85	2.75
Média	2510,51	67,24	2.69

Tabela 10 - Valores dos parâmetros obtidos a partir dos testes de flexão para o PET verde

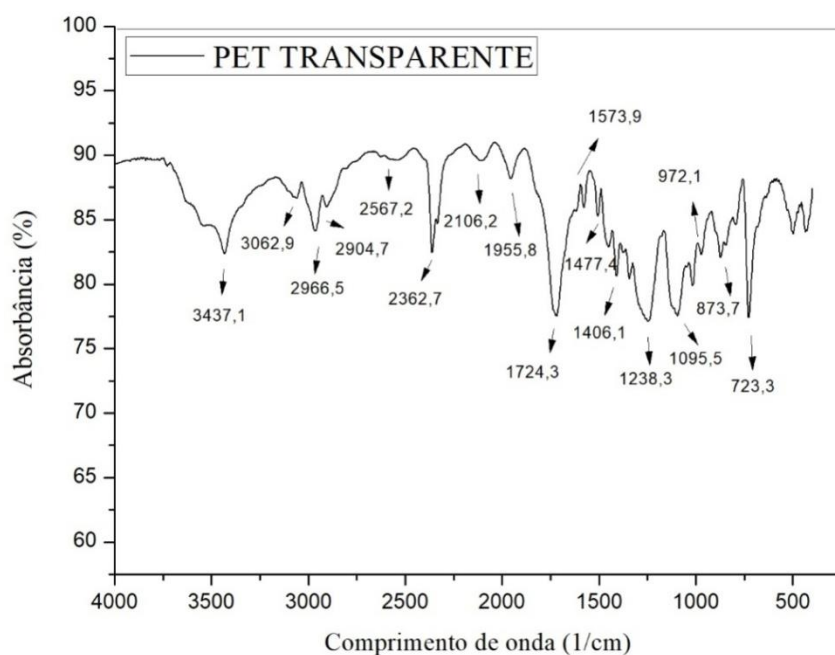
Corpo de prova	Módulo de Elasticidade (N/mm)	Tensão na ruptura (N/mm²)	Deformação na ruptura (%)
PET Verde 1	2809,64	57,48	2.04
PET Verde 2	2477,14	72,73	2.93
PET Verde 3	2551,69	64,28	2.51
Média	2612,82	64,83	2.50

A partir dos dados obtidos nas Tabelas 8, 9, 10, se observa que assim como nos testes de tração, o material não apresentou altas resistências com relação aos testes de flexão, confirmando assim seu comportamento frágil. Porém, percebeu-se também que o material analisado é mais resistente à flexão do que à tração e isso pode ser comprovado através dos pontos de tensão e deformação no momento da ruptura.

4.5 Caracterização química

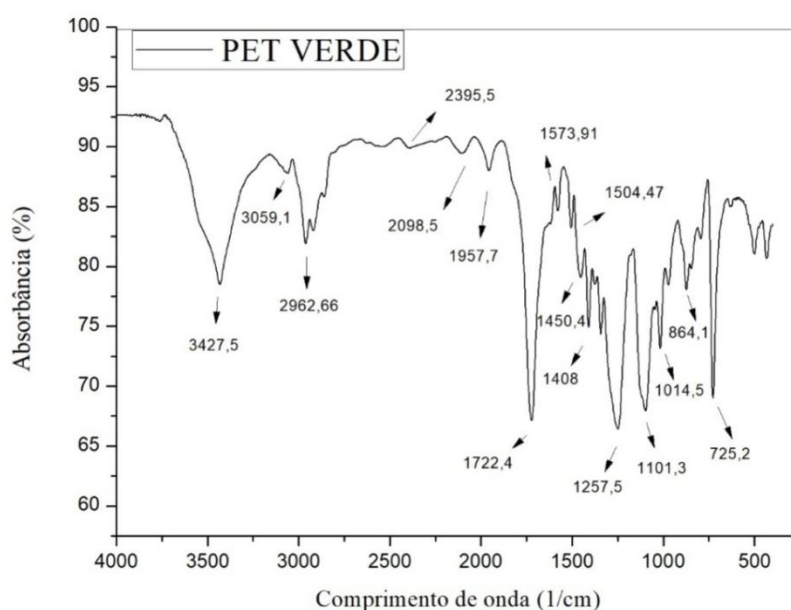
As pastilhas de PET transparente e PET verde pós consumo misturados com KBr foram colocadas no espectrofotômetro que forneceu os espectros ilustrados nas Figuras 28 e 29 respectivamente.

Figura 29 - Espectro da amostra de PET transparente obtido pela análise de FTIR



Fonte: Autor

Figura 30 - Espectro da amostra de PET verde obtido pela análise de FTIR



Fonte: Autor

Ao obter o espectro, era esperado que as bandas se assemelhassem às bandas encontradas nos estudos de (PEREIRA, 2017). Porém, é válido ressaltar que o material PET utilizado nessa pesquisa não é virgem, e sim pós consumo, o que pode ter influenciado na diferenciação de algumas bandas. Os estudos de (CINELLI, 2016) fornece espectros obtidos a partir de PET revestido por *whey protein* e evidencia que a presença de diferentes tipos de substâncias, mesmo que passando por um processo de higienização, pode influenciar na amostra do PET. Assim, apenas algumas bandas dos espectros obtidos por (CINELLI, 2016) se assemelham com o desta pesquisa.

Os picos detectados no espectro nos forneceu as bandas que se encontram na Tabela 11 e 12 para os PET transparente e verde respectivamente.

Tabela 11 - Bandas de absorção de PET transparente com seus respectivos modos vibracionais associados

Bandas de absorção (cm⁻¹)	Bandas do espectro infravermelho
3543,2; 3437,1 e 3062,9	Trecho de ligações simples: O-H e H-H estendido
2966,5; 2904,7 e 2567,2	Trecho de ligações simples: C-H estendido
2362,7 e 2106,2	Trecho de ligações triplas: calcita (CaCO ₃), CO ₂
1955,8; 1724,3 e 1573,9	Trecho de ligações duplas: C=O, C=C e C=N
1477,4; 1406,1	C-O, OH
1238,3; 1095,5	Grupo tereftalato, grupo metileno
723,3	Grupo de ésteres polares e benzeno

Tabela 12 - Bandas de absorção de PET verde com seus respectivos modos vibracionais associados

Bandas de absorção (cm⁻¹)	Bandas do espectro infravermelho
3427,5 e 3059,1	Trecho de ligações simples: O-H e H-H estendido
2962,6	Trecho de ligações simples: C-H estendido
2098,5	Trecho de ligações triplas: calcita (CaCO ₃), CO ₂
1957,7; 1722,4 e 1573,9	Trecho de ligações duplas: C=O, C=C e C=N
1450,4; 1408	C-O, OH
1257,5; 1014,5	Grupo tereftalato, grupo metileno
725,2	Grupo de ésteres polares e benzeno

Com relação ao PET transparente, algumas bandas do PET verde foram deslocadas para a direita; isso pôde ser observado entre o comprimento de onda 3500 e 2500 cm⁻¹. Nas demais bandas, houve pequenos deslocamentos para a direita e para a esquerda. Esse deslocamento pode ter acontecido devido a presença do corante do PET verde, influenciando na localização das mesmas.

Foi possível perceber também que o comprimento dos picos do PET transparente diferenciou-se dos picos do PET verde. Nos estudos de (PEREIRA, 2017) os picos são intensos e era de se esperar que o resultado fosse similar, porém, esse comportamento apenas foi observado no PET verde. A diferença de intensidade foi atribuída a presença de umidade nas amostras, visto que o tempo entre o processo de secagem e o processo da

análise das propriedades químicas foram distantes. Além disso, o fato do material analisado não ser virgem pode também ter influenciado nos resultados obtidos.

5 CONCLUSÃO

Após as análises dos testes das propriedades mecânicas, verificou-se que o PET MIX com composição de 50% proveniente do pós-consumo de água e 50% proveniente do pós-consumo de refrigerante nesta pesquisa não favoreceram a resistência do material e isso pode ser comprovado através das curvas de tensão versus deformação. Nos testes de tração, o PET MIX obteve a menor média de porcentagem de deformação até o momento de ruptura, com 1,26%, enquanto o PET verde obteve os melhores resultados com uma média de 2,15%. O PET transparente aproximou-se bastante com o PET verde, com 1,91%. Nos testes de flexão, o PET MIX também apresentou valores mais baixos, com 2.03%, enquanto que o PET transparente apresentou os maiores valores com 2.69% contra 2.50% do PET verde.

As curvas de tensão versus deformação obtidas mostraram um comportamento linear, confirmado pelo coeficiente de determinação para cada curva. Assim, concluiu-se que nenhuma das amostras analisadas possuíam deformação plástica, pois após a deformação elástica, o material atingia seu ponto de ruptura.

Os dados obtidos pela análise de FTIR mostraram que a intensidade e a localização das bandas diferiram um pouco dos encontrados na literatura. Provavelmente, essa diferença pode ter sido gerada devido à presença de umidade e a presença de estruturas do corante utilizado no PET verde, além do fato da amostra PET ser pós-consumo e não virgem.

De posse dos dados, conclui-se então que após passar pela injetora o uso desse tipo de material para fabricação de produtos que necessitem de alta resistência à tração e flexão fica inviabilizado. Dessa forma, faz-se necessário uma pesquisa posterior mais aprofundada para verificar se essa resistência é dada devido ao material contido internamente previamente ao consumo ou se o corante de coloração esverdeada do PET é o fator que influencia nesse resultado.

A aplicabilidade para esse tipo de material fica restrita a produtos que necessitem de baixa resistência, devido ao seu comportamento frágil. Portanto, o material pode ser utilizado em produtos e peças de decoração, como frascos de sabonete e similares, material de varrição, roupas, taças, copos e garrafas de água e/ou refrigerante sendo ainda necessária uma pesquisa mais aprofundada para verificar aspectos como contaminação.

REFERÊNCIAS

ASKELAND, D.; WRIGHT, W. Ciência e engenharia dos materiais. Terceira edição. Cengage. São Paulo, Brasil. 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. Resina PET – História. 2012. Retirado de <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=46>. Acesso em: 25 de set, às 20h20

AZO CLEANTECH. Recycling of Polyethylene Terephthalate (PET or PETE). 2012. Retirado de: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=254>. Acesso em: 25 de set, às 20h32

CALLISTER, W. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Sétima edição. LTC. Rio de Janeiro, Brasil. 2008

CARREIRA, L. G.; NOVELLO, M. V.; PIRES, H. M.; CANTO, L. B. Propriedades mecânicas de misturas poliméricas PET/PC reforçadas com fibras de vidro curtas. Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Outubro, 2009

CINELLI, P.; SCHMID, M.; BUGNICOURT, E.; COLTELLI, M.; LAZZERI, A. Recyclability of PET/WPI/PE multilayer films by removal of whey protein isolate-based coatings with enzymatic detergents. Materials 9, 473; Junho, 2016.

FEITOR, M.; JUNIOR, C.; BEZERRA, C.; SOUSA, R.; COSTA, T. Evaluation of aging in air of poly (ethylene terephthalat) in oxygen plasma. Mat. Res. v.18, no.5. São Carlos, Brasil. Outubro, 2015

FRAGA, S. Reciclagem de materiais Plásticos – Aspectos Técnicos, Econômicos, Ambientais e Sociais. Primeira edição. Editora Érica. São Paulo, Brasil. 2014

GIRIJA, B.; SAILAJA, R.; GIRIDHAR, M. Thermal degradation and mechanical properties of PET blends. *Polymer Degradation and Stability*, v.90, p 147-153. India, 2005

GONÇALEZ, M.; DINIZ, R.; WIEBECK, H.; SILVA, L. Comparação de Técnicas FTIR de Transmissão, Reflexão e Fotoacústica na Análise de Poliamida-6, Reciclada e Irradiada. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 12, nº 1, p. 60-68. São Paulo, Brasil, 2002

JAMBECK, J. Plastic waste inputs from land into ocean. *Science*, v.347, p 768-771. Estados Unidos, Nova Iorque. Fevereiro, 2015

LEBLANC, R. The decomposition of waste in landfills: a story of time and materials. Disponível em: <<https://www.thebalancesmb.com/how-long-does-it-take-garbage-to-decompose-2878033>>. Acesso em: 25 de jun, 10h20

LOKENS GARD, E. Plásticos Industriais, teoria e aplicações. Quinta edição. Cengage Learning. São Paulo-SP, Brasil, 2013

MELO, P.M.A.; MACÊDO, O. B.; BARBOSA, G. P.; UEKI, M. M.; SILVA, L. B. High-density polyethylene/mollusk Shell-waste composites: effects of particle size and coupling agent on morphology mechanical and thermal properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2): p1915-1925, 2019

NETO, G. Produção e caracterização de filmes poliméricos para revestimento comestível em goiabas. Trabalho final de curso (graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017

NOVELLO, M.; CARREIRA, L.; CANTO, L. Post-consumer Polyethylene Terephthalate and Polyamide 66 Blends and Corresponding Short Glass Fiber Reinforced Composites. *Materials Research*. 2014; 17(5): 1285-1294.

OLIVEIRA, M. Espectrofotometria no infravermelho por metodologia FTIR (Fourier Transform Infrared): validação da análise do teor de ureia e de outros parâmetros de

qualidade do leite. Dissertação de Mestrado (pós-graduação em Medicina Veterinária) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2011

OMNEXUS. Polyethylene Terephthalate (PET): A Comprehensive Review. Retirado de <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic>> Acesso em: 25 de set, às 21h01

PAIHTEA, P; LALNGAIHAWMAA, A; SAINIA, G. Recycled Aggregate filled waste plastic bottles as a replacement of bricks. P.L. Paihte et al. / Materials Today: Proceedings 15 (2019) 663–668. India, 2019

PARKER, L. We Made Plastic. We depend on it. Now we're drowning in it. National Geographic. 2018. Retirado de <<https://www.nationalgeographic.com/magazine/2018/06/plastic-planet-waste-pollution-trash-crisis/>> Acesso em: 25 de jun, 10h00

PEREIRA, A.; SILVA, M.; LIMA, É; PAULA, A; TOMMASINI, F. Processing and Characterization of PET Composites Reinforced With Geopolymer Concrete Waste. Materials Research - 20(Supl. 2), p.411-420. Brasil, 2017.

SAFETY4SEA. Marine Debris: How long until it's gone? 2018. Retirado de: <<https://safety4sea.com/marine-debris-long-gone/>> Acesso em: 25 de jun, 10h38

SILVA, L.B., BRETAS, R.E.S., Processamento de Blendas PET/LCPs: propriedades e orientação molecular, obtenção de filmes por extrusão em matriz plana. Saarbrücken: novas edições acadêmicas, 282p, 2015

SOUZA, A.; LIMA, D.; OLIVEIRA, S. Técnica FTIR e suas aplicações em amostras orgânicas. ENEPEX - Encontro de Ensino Pesquisa e Extensão da Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul. Brasil, 2018.

UN ENVIRONMENT. Our planet is drowning in plastic pollution. 2018. Retirado de <<https://www.unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution/>> Acesso em: 25 de jun, 09h32

VAN VLACK, L. Princípios de ciência dos materiais. Editora Blucher. São Paulo, Brasil, 1970