

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ERICK MASSASHI YOKOTA

**ESTUDO DA MATÉRIA-PRIMA PARA IMPRESSORA 3D PROVENIENTE DA
RECICLAGEM DAS TAMPAS DE GARRAFAS**

LONDRINA

2021

ERICK MASSASHI YOKOTA

**ESTUDO DA MATÉRIA-PRIMA PARA IMPRESSORA 3D PROVENIENTE DA
RECICLAGEM DAS TAMPAS DE GARRFAS**

Study of raw material for 3D printer from the recycling of bottle covers

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Francisco Rosário

Coorientador: Dr. Jean Halison de Oliveira

LONDRINA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ERICK MASSASHI YOKOTA

**ESTUDO DA MATÉRIA-PRIMA PARA IMPRESSORA 3D PROVENIENTE DA
RECICLAGEM DAS TAMPAS DE GARRFAS**

Trabalho de conclusão de Graduação apresentado
como requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

09/novembro/ 2021

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
Titulação (Doutorado)
UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
Titulação (Doutorado)
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD)

Prof. Dr. Francisco Rosário (Orientador)
Titulação (Doutorado)
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD)

**LONDRINA
2021**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais que me apoiaram desde o início até o fim do curso, pela atenção, preocupação e um pouco da insistência para conseguir manter o meu foco nos estudos. Também agradeço parentes próximos da família.

Agradeço ao Prof. Dr. Francisco Rosário por ter aceito ser meu orientador, ajudando-me no trabalho e pela paciência que teve para me direcionar para finalizar esta etapa da vida.

Agradeço aos professores do curso que dedicaram fazer sempre a melhor forma de ensino para os alunos, pela paciência e por todos os conselhos que nos guiaram à aprendizagem.

Agradeço aos amigos que fizeram parte dessa jornada, que estavam presentes nos momentos difíceis ou nos momentos de alegria, compartilhando e ajudando para conseguir passar nas matérias.

Também agradecer a todas as pessoas que influenciaram diretamente ou indiretamente para a realização do trabalho.

RESUMO

O presente trabalho é o estudo da viabilidade da utilização do polímero reciclado oriundo das tampas de garrafas para utilização em impressora 3D, por meio dos estudos das propriedades dos materiais Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e de Polipropileno (PP) que compõem as tampas das garrafas. A partir destes materiais reciclados, foi desenvolvido um filamento para impressora 3D com dimensão aproximada de 1,65 mm, onde ficou 0,1 mm menor em relação ao requerido. O material foi processado na extrusora com velocidade da rosca de 40 RPM, 190 °C na matriz, 85 °C na segunda zona de aquecimento e 185 °C na primeira zona de aquecimento. Para verificar se o filamento reciclado contém as propriedades adequadas para impressora 3D, foram realizadas as caracterizações no Índice de Fluidez (MFI), Espectroscopia na região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e ensaio de tração. Em análise de MFI foi realizado na norma ASTM D1238. No espectro de FTIR foi encontrado bandas características de PEAD e PP no material de estudo. No ensaio de tração o valor médio de módulo de elasticidade e tensão de ruptura, foi comparado com PEAD virgem e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). As propriedades mecânicas do material reciclado foram inferiores ao material virgem e ABS.

Palavras-chaves: Polietileno; Polipropileno; Reciclagem; Impressora 3D.

ABSTRACT

The present work is the study of the feasibility of using recycled polymer from bottle caps for use in 3D printers, through studies of the properties of High Density Polyethylene (HDPE) and Polypropylene (PP) materials that make up the caps of the bottles. From these recycled materials, a filament was developed for a 3D printer with an approximate dimension of 1.65 mm, where it was 0.1 mm smaller than required. The material was processed in the extruder at a screw speed of 40 RPM, 190 °C in the die, 85 °C in the second heating zone, and 185 °C in the first heating zone. To verify if the recycled filament has the proper properties for a 3D printer, the characterizations were performed using the Melt Flow Index (MFI), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and tensile test. In MFI analysis was performed in ASTM D1238 standard. In the FTIR spectrum, characteristic bands of HDPE and PP were found in the study material. In the tensile test, the mean value of modulus of elasticity and tensile strength was compared with virgin HDPE and Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). The mechanical properties of recycled material were inferior to virgin material and ABS.

Keywords: Polyethylene; Polypropylene; Recycling; 3d printer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - O mecanismo do funcionamento da impressora de moldagem por fusão e deposição	17
Figura 2- Estrutura química do polietileno.....	19
Figura 3 – Estrutura química do polipropileno	21
Figura 4 - Identificação de materiais plásticos	23
Figura 5 - Fluxograma dos métodos.....	24
Figura 6 - Tampa de garrafa PET reciclado.....	25
Figura 7 - Material reciclado separado nas cores Vermelho, Verde e Branco. ...	26
Figura 8 - Moinho de facas do tipo willye.....	27
Figura 9 - Mini extrusora mosnorosca	28
Figura 10 - Prensa Hidráulica	29
Figura 11 - Produção de filamento para impressora 3D na extrusora.....	30
Figura 12 - Rebobinador	30
Figura 13 - Filamento para impressora 3D produzido a partir do material reciclado.....	31
Figura 14 - Máquina de Índice de fluidez.....	33
Figura 15 - Curva de Tensão por Deformação do MSSC	34
Figura 16 -- Curva de Tensão por Deformação do MSV.....	35
Figura 17 - Espectro de FTIR da Tampa (PEAD) e Filamento reciclado (Mistura de PEAD e PP)	39
Quadro 1.....	16

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - As principais propriedades mecânicas dos materiais funcionais usados em AM	18
Tabela 2- Propriedades mecânicas do PEAD	20
Tabela 3 - Valores de módulo de elasticidade e tensão de ruptura do MSSC ...	35
Tabela 4 - Valores de módulo de elasticidade e tensão de ruptura do MSV	36
Tabela 5 - Valor médio de módulo de elasticidade e tensão de ruptura do material reciclado e valor de PEAD virgem para comparação	36
Tabela 6 - Valores de índice de fluidez, g/10min (190 °C / 2,16kg)	37

LISTA DE SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
ESCR	<i>Stress Cracking</i>
FDM	<i>Fused Deposition Moldeling</i>
FTIR	Espectroscopia na região do Infravermelho por Transformada de Fourier
MA	Manufatura Aditiva
MFI	Índice de Fluidéz
MM	Material Misturado
MSC	Material separado por cor
MSV	Material separado na cor vermelha
MSSC	Material sem separação de cor
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PEMD	Polietileno de Média Densidade
PET	Politereflato de Etileno
PLA	Poli Ácido Láctico
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
SLA	StereoLithoGrapphy Apparatus

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	13
1.2	Justificativa	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Manufatura aditiva (3D)	15
2.1.1	<i>Fused Deposition Modeling (FDM)</i>	16
2.1.2	<i>Propriedades requeridas dos materiais para a manufatura aditiva por extrusão</i>	18
2.2	Polietileno	19
2.2.1	<i>Polietileno de Alta Densidade (PEAD)</i>	20
2.3	Polipropileno	21
2.4	Reciclagem	22
2.5	Processo de Extrusão de Termoplásticos	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	Separação das cores do material reciclado	25
3.2	Moagem do material reciclado para extrusora	26
3.3	Extrusora para produção de pellets e <i>corpos de prova</i>	27
3.4	Fabricação de filamento para impressora 3D	29
3.5	Ensaio de Tração	31
3.6	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	31
3.7	Índice de fluidez (MFI)	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	33
4.2	Índice de Fluidez (MFI)	37
4.3	Espectroscopia na região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	38
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Entre as inovações tecnológicas atuais, a impressora 3D ou manufatura aditiva (MA) é considerada uma das mais importantes dos últimos anos por mudar a metodologia de fabricação de produtos. As fabricações dos objetos tridimensionais são feitas a partir da adição do material, camada por camada, sob referência de um modelo digital preparado com a utilização de *software Computer Aided Design (CAD)*. Conhecido também como prototipagem rápida, o tempo de fabricação da peça é menor, tem baixo consumo de energia para processamento da peça, gera pequena quantidade de resíduos, significando que é uma tecnologia econômica (NOVOA, D' ALMEIDA, 2016; SANTOS, 2018).

A impressora 3D está cada vez mais ganhando popularidade, com o desenvolvimento da versão de baixo custo, a mesma tem sido utilizada em mercados domésticos ou públicos gerais, não só pelas indústrias. Entre os vários tipos de manufaturas aditivas, *Fused Deposition Modeling (FDM)* é o processo mais utilizado para a construção de protótipos por impressora 3D. FDM utiliza o termoplástico como matéria-prima para a fabricação das peças, os materiais comumente utilizados são os Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e Poli Ácido Láctico (PLA). Mas existem outros tipos de polímeros que são pesquisados que podem ser utilizados, como: Politereflato de Etileno (PET), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Policarbonato (PC) e Polietileno de Alta Densidade (PEAD) (PEDROSA, 2015; SANTANA, 2015; NOVOA, D' ALMEIDA, 2016).

O PEAD é um polímero de cadeia simples que tem baixo custo e muitas áreas de aplicações. É empregado para fabricar garrafas de detergentes, peças automotivas, embalagem de produtos alimentícios, tampa para garrafas e filamentos para impressora 3D (SANTOS, *et al.*; LONTRA, 2011).

O uso excessivo dos polímeros termoplásticos tem gerado muitos lixos com descarte inadequado, ocasionando problema ao meio ambiente. A reciclagem é uma forma de diminuir os danos ao meio ambiente e os termoplásticos têm uma facilidade de serem reciclados, trazendo benefício para a indústria no meio da utilização do material reciclado e economia no valor alto de energia em comparação com a matéria-prima oriunda do petróleo (LONTRA, 2011).

Neste trabalho, foi realizado estudo da viabilidade do polímero da tampa de garrafa para a utilização em impressora 3D, apesar de ser um polímero muito empregado em outras áreas, é pouco utilizado nesse ramo da impressora 3D por conta da dificuldade de processamento nesta tecnologia (NOVOA; D' ALMEIDA, 2016).

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade da produção do material reciclado para impressão 3D. Neste caso, o polietileno de alta densidade (PEAD) misturado com polipropileno (PP) reciclado das tampas de garrafas terão as propriedades comparadas com os termoplásticos virgens usados na produção de tampas. Os polímeros irão passar pelo processo de extrusão, para obtenção de um filamento desejado para ser utilizado na impressora 3D.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Verificar a viabilidade do material reciclado oriundo das tampas de garrafas, na obtenção de um filamento para impressão 3D.
- ✓ Realizar análises do material que compõe as tampas recicladas das garrafas com:
 - Ensaio de tração
 - MFI
 - FTIR para caracterização dos materiais.

1.2 Justificativa

A utilização da técnica de impressora 3D vem crescendo na parte industrial, em empresas, universidades e até para o lazer. Isso se deve ao preço do equipamento estar cada vez mais acessível. Para determinadas aplicações não há a necessidade de um filamento de qualidade cujo custo é maior. Uma forma de diminuir o custo seria a utilização de material reciclado mais barato, possibilitando maior utilização e facilidade de fabricação de protótipos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manufatura aditiva (3D)

No final de 1980, foi desenvolvido um processo chamado de manufatura por adição, esse passou a ser conhecido popularmente como impressão 3D. O processo consiste em formar camadas planas por meio da adição de matéria-prima. Foi desenvolvido com o intuito de fabricar peças com mais rapidez, tendo em vista a concretização de ideias (protótipos), exigindo menos em relação à resistência e precisão (SANTANA, 2015).

O termo Manufatura Aditiva (MA) foi regulamentado pela norma ASTM F2792 – 12a (2015) para definir os processos de união de materiais para fabricação de produtos a partir de um exemplo 3D. A Manufatura Aditiva (MA) apresenta sinônimos de acordo com a norma, são as seguintes nomenclaturas: (1) fabricação aditiva, (2) processamentos aditivos, (3) manufatura por adição de camadas, (4) manufatura por camadas e (5) fabricação de formas complexas (SANTANA, 2015).

O termo manufatura aditiva precisou de ajuste, devido a não estar mais limitado somente à fabricação de protótipos, mas também à produção de peças comerciais (SANTANA, 2015).

A primeira manufatura aditiva foi comercializada em 1988, cujo nome é StereoLithoGrapphy Apparatus ou esteriolitografia (SLA). Posteriormente, outros sistemas de manufatura aditiva foram desenvolvidos por comunidades acadêmicas e empresas (SANTANA, 2015).

Em 1993, foi criado por Michael Cima e Emanuel Sachs o primeiro dispositivo chamado de “impressora 3D” que poderia imprimir peças de cerâmica, metais e polímeros. Desde então, muitas empresas desenvolveram a impressora 3D para comercialização (COUTINHO, 2017).

Hoje, existem dois grupos de impressora 3D, profissional e modelo de baixo custo. Segundo Santana (2015), as principais diferenças entre elas podem ser observadas logo abaixo na Quadro 1.

Quadro 1- Diferenças entre a impressora profissional e a impressora de baixo custo

Impressora 3D profissional	Impressora 3D de baixo custo
Utiliza materiais com características específicas, conseqüentemente, tem maior valor de custo. Exemplos de filamentos especiais são: Filamento madeira (fibra de madeira com PLA), filamento alumínio, filamento flexível, filamento policarbonato, entre outros.	Utiliza o filamento plástico de menores valores, são PLA (ácido poliláctico), ABS, (Acrilonitrila butadieno estireno), entre outros. Também utiliza estes filamentos pela facilidade de ser impresso, indicado para iniciante.
Tem a fabricação da estrutura do equipamento com metal, proporcionando melhor aparência e propriedade mecânica.	Enquanto a máquina de baixo custo utiliza estrutura de plástico, a estrutura plástica pode ser de origem da impressora 3D, também estrutura de madeira cortado a <i>laser</i> e outros.
Utiliza <i>software</i> de proprietário (código fechado) e é necessário fazer pagamento da licença (de acordo com fornecedor) para conseguir utilizar. Como cliente, a empresa fabricante pode fornecer treinamento para o operador.	Ao contrário do equipamento profissional, o <i>software</i> é de acesso livre ou código aberto, ou seja, não é preciso fazer pagamento da licença. O <i>software</i> utilizado é flexível ou adaptável, ou seja, pode ser programado como deseja que funcione seu programa.

Fonte: Adaptado de Santana (2015); E.TECH BRASIL (2019)

Apesar da impressora 3D de baixo custo ser acessível economicamente para a população, a tecnologia necessita de conhecimento básico da pessoa que a adquiriu, como parâmetro de velocidade de extrusão, temperatura, pré-aquecimento de plataformas e a escolha do material adequado (PEDROSA, 2015).

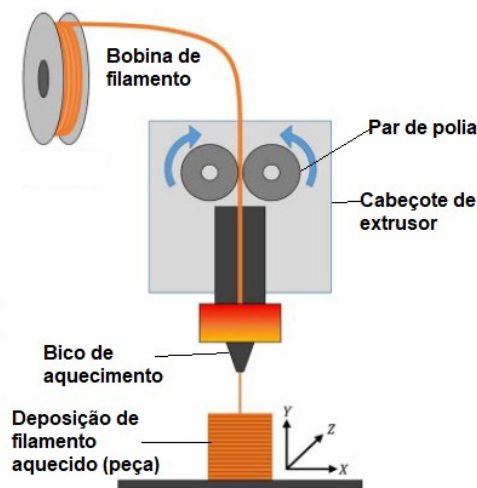
As tecnologias de manufatura aditiva são opções que vêm sendo bastante procuradas pelos públicos, em geral, devido aos seus números de versatilidade de materiais e também pela sua capacidade de fabricar peças simples (tridimensionais) até peças com geometrias complexas. Atualmente, existem vários tipos que se destacam, dentre os mais utilizados, por exemplo, a *Fused Deposition Modeling* (FDM) ou moldagem por fusão e deposição (HORST, 2017; PEDROSA, 2015).

2.1.1 *Fused Deposition Modeling* (FDM)

A impressora 3D de moldagem por fusão e deposição, foi desenvolvida pela empresa Stratasys®. Em 1992, o fundador da empresa Stratasys®, Scott Crump,

patenteou a FDM. O esquema original de funcionamento da impressora de moldagem por fusão e deposição é apresentado na Figura 1 (SANTANA, 2015).

Figura 1 - O mecanismo do funcionamento da impressora de moldagem por fusão e deposição



Fonte: Adaptado de HORST (2017)

O mecanismo da impressora FDM inicia-se pela saída do filamento de polímero termoplástico da bobina, onde o par de polias traciona a matéria-prima até o bico de aquecimento, o polímero passa do estado sólido para o semi-fundido. Após o filamento ser extrudado por bico da impressora o cabeçote extrusor tem capacidade de se movimentar em três eixos axial (x , y , z), depositando polímero. A deposição inicia-se com o preenchimento interno, de modo que o material depositado solidifique em temperatura ambiente, construindo por várias camadas até alcançar a geometria da peça desejada (COUTINHO, 2017; SANTANA, 2015).

O ajuste da temperatura de extrusão é importante para cada tipo de material que tem propriedades reológicas diferentes. Mas um ponto que se destaca é a velocidade de deposição ou da impressão. A velocidade de construção é lenta em função da limitação da taxa de extrusão, viscosidade do material e pelo cabeçote de extrusor (SANTANA, 2015).

A impressora 3D de moldagem por fusão e deposição tem as vantagens de ser acessível ao público geral, uma vez que o modelo de baixo custo que existe atualmente é simples de controlar. Os materiais termoplásticos utilizados têm propriedades mecânicas aceitáveis e a matéria-prima tem valor menor. Os principais termoplásticos empregados são PLA (ácido polilático), ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PC (Policarbonato) e PA (Poliamida, Nylon) e outros que são pesquisados

como PET (Politereftalato de Etileno), PP (Polipropileno), PS (Poliestireno) e PEAD (Polietileno de alta densidade) (COUTINHO, 2017; SANTOS, et al., 2018).

A escolha do material deve levar em consideração a temperatura de fusão baixa. As matérias-primas da impressora FDM são fornecidas em bobina de fio, com diâmetro de 1,75 mm ou 3 mm variado conforme o modelo e tem peso de 1 kg. (COUTINHO, 2017; PEDROSA, 2015).

2.1.2 Propriedades requeridas dos materiais para a manufatura aditiva por extrusão

O requisito necessário de acordo com o tipo de matéria prima é a capacidade da adesão interfacial que é influenciado pelo controle da temperatura do ambiente, a temperatura da base de impressão e temperatura da camada anterior depositado. Estes parâmetros podem prejudicar a aderência da matéria-prima com a base de impressão e entre as camadas impressas. E um outro requisito necessário é que no processo da fabricação não ocorra emaranhamento do polímero, prejudicando o produto final. A presença de porosidade do produto também influencia diretamente na união entre as camadas, isso se deve pela variação da temperatura (Cruz Sanchez, 2020; EUGÊNIO, 2018).

Material termoplástico com estrutura amorfa é mais adequado para manufatura aditiva de extrusão, pela temperatura cristalina que forma material de alta viscosidade, favorecendo o processo de extrusão. Entre os tipos de termoplásticos os que se destacam é o PLA e ABS. Na Tabela 1 são demonstradas algumas propriedades do material utilizado para manufatura aditiva (BOURELL, 2017).

Tabela 1 - As principais propriedades mecânicas dos materiais funcionais usados em AM

Principais propriedades mecânicas funcionais do material para manufaturas aditivas.	ABS
Módulo de elasticidade à tração (MPa)	1627
Tensão na ruptura à tração (MPa)	22
Alongamento na ruptura (%)	6

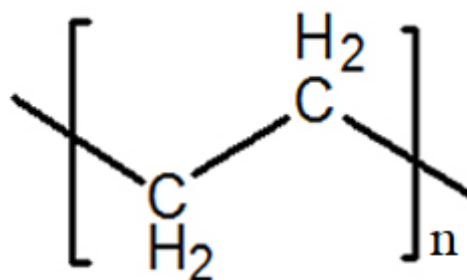
Fonte: Adaptado de JIMÉNEZ (2019)

2.2 Polietileno

O polietileno foi descoberto em 1933 na Inglaterra. Em 1936, foi descoberta sua reação de polimerização por E. W. Fawcett, em 1939, começou a ser comercializado. Ele é um dos polímeros mais utilizados, reciclados e vendidos devido as suas propriedades e características estruturais, tem como vantagem sua característica de poder ser translúcido ou quase transparente, rígido ou flexível, de processamento fácil, não ser higroscópicos e dentro dos termoplásticos é um dos não ser tóxico (CANDIAN, 2007; LONTRA, 2011).

O polietileno é parcialmente cristalino, cuja propriedade física e química varia pela quantidade de fases amorfas e cristalinas. O polietileno tem estrutura simples comparado entre outros polímeros, pode ser observado logo abaixo à estrutura na Figura 2. A produção pode ser feita por diversos processos, por exemplo, por reação de adição, porém depende da natureza química do monômero e o requisito da aplicação, assim então a técnica de obtenção do polímero varia com sua necessidade (CANDIAN, 2007; LONTRA, 2011).

Figura 2- Estrutura química do polietileno



PE (polietileno)

Fonte: MENDA (2011)

No comércio são encontrados quatro tipos de polietileno: Polietileno de baixa densidade (PEBD), Polietileno linear de baixa densidade (PELBD), Polietileno de média densidade (PEMD) e Polietileno de alta densidade (PEAD). A principal diferença entre os polietilenos é a presença de ramificação na cadeia polimérica, alterando as densidades. A presença da ramificação depende da escolha do tipo de

iniciador (catalizador) e da pressão no reator. Com o iniciador é controlada a distribuição da ramificação, influenciando na densidade, cristalinidade, propriedade e na aplicação (CANDIAN, 2007; LONTRA, 2011).

2.2.1 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

O polietileno de alta densidade começou a ser comercializado na década de 50. Atualmente, é o quarto polímero mais vendido, com consumo de 30%, mundialmente, do PEAD e a segunda resina mais reciclada no mundo. O PEAD é considerado um dos melhores plásticos devido as suas propriedades mecânicas, com a capacidade de resistir impactos, as altas temperaturas e resistência aos reagentes químicos. Na Tabela 2, estão algumas das propriedades mecânicas do material (CANDIAN, 2007; LONTRA, 2011; SANTOS, et al., 2018).

Tabela 2- Propriedades mecânicas do PEAD

Propriedades Mecânicas	Valores
Tensão no escoamento à tração	28 MPa
Tensão na ruptura à tração	29 MPa
Tensão na ruptura à compressão	20 MPa
Resistência à compressão	17 MPa
Resistencia à flexão	14 – 20 MPa
Módulo de elasticidade à tração	900 MPa
Alongamento na ruptura	860 %
Resistencia ao impacto Izod	140 J/m

Fonte: Adaptado de CANDIAN (2007)

O PEAD tem elevado temperatura cristalina de (130 a 141) °C em comparação com PEBD, devido a maior presença de cristalinidade. Como suas cadeias possuem poucas ramificações, a aproximação das cadeias favorece interações do tipo dispersão de London, necessitando de maiores energias para separar as cadeias poliméricas e, conseqüentemente, maiores temperaturas de fusão (CANDIAN, 2007).

O PEAD possui diversas aplicações de acordo com o tipo de processamento da fabricação (moldagem por sopro, extrusão e moldagem por injeção), entre elas

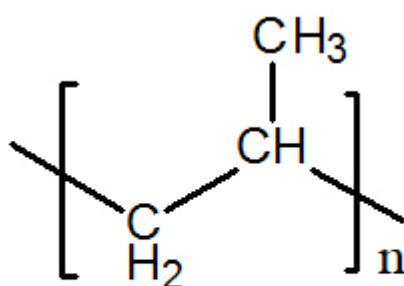
são: garrafa de detergentes, bandeja, peças automotivas, embalagem de produtos alimentícios, isolamento de fios telefônicos, revestimento de tubulações metálicas, brinquedos, tampas para garrafas, filamentos para impressora 3D (CANDIAN, 2007; LONTRA, 2011; SANTOS, et al., 2018).

O polímero PEAD não é muito utilizado na impressora 3D e existem poucos estudos que falam sobre essa aplicabilidade. Porém, este material possui característica de ser aplicável no ramo das impressoras FDM (SANTOS, et al., 2018).

2.3 Polipropileno

O polipropileno (PP) é um termoplástico semicristalino obtido a partir da polimerização de monômero propeno com adição de catalizador estereoespecífico. O termo estereoespecífico refere-se à característica de controle da posição do grupo metil na cadeia polimérica de forma ordenada, como sindiotático e isotático. O PP é originado do subproduto gasoso da refinaria do petróleo. Com controle de temperatura, pressão e adição de catalizador, ocorre a reação de polipropileno conforme a estrutura da Figura 3 (PIZZITOLA, 2011; SATO, 2008).

Figura 3 – Estrutura química do polipropileno



PP (polipropileno)

Fonte: Adaptado de MENDA (2011)

Em 1955, com a pesquisa do professor G. Natta da Polietecnico di Milano na Itália, por meio da utilização de sistema de catalizador estereoespecífico Ziegler, foi possível a obtenção do polímero com estrutura regular e cristalina com propriedades

desejadas, tornando o em produto comercializável (PIZZITOLA, 2011; HENRIQUES, 2016).

A densidade do polipropileno é aproximadamente $0,90 \text{ g/cm}^3$. Sua temperatura de transição vítrea é de 18°C e sua temperatura de fusão cristalina é de aproximadamente 165°C . O módulo de elasticidade deste material possui valor entre 1,14 e 1,15 GPa, a resistência à tração entre 31 e 41,4 MPa e resistência ao escoamento entre 31 e 37 MPa (OTA, 2004).

Em 1995, o PP foi um dos termoplásticos mais consumido pelo mundo. Atualmente, as indústrias utiliza PP para fabricação de embalagens, componentes de carros, eletrodomésticos de pequeno porte, tampas de bebidas carbonatados, entre outros.

A resistência mecânica e as temperaturas relativamente altas derivam da alta cristalinidade, sendo que a região não cristalina gera a flexibilidade. O PP é susceptível à fotodegradação devido à interação do polímero com a energia proveniente da radiação eletromagnética no espectro UV-Vis-IR, causando a variação da estrutura química, levando à redução da massa molecular (ALMEIDA, 2010; PIZZITOLA, 2011).

2.4 Reciclagem

Os resíduos plásticos podem trazer grande impacto para o meio ambiente devido ao tempo de degradação, o que pode gerar problemas em aterros sanitários, descartes inadequados deste plástico, causando poluição na cidade, ao ponto de contribuir com o foco de doenças devido ao acúmulo de água e alagamento nas ruas com o entupimento dos bueiros (ALMEIDA, 2010).








Com base nesses problemas que podem ser gerados pelos materiais plásticos, a reciclagem tem grande importância para a ciência a qual busca uma forma de reaproveitar o material reciclado e transformar em matéria-prima para a fabricação de novos produtos (ALMEIDA, 2010).

Os termoplásticos podem ser reciclados indefinidamente em teoria, porém é de conhecimento que há alteração nas características dos polímeros, por diferentes fatores como: intempéries a que se expôs, por contaminação, separação e coleta inadequada e a quebra das cadeias de polímeros, entre outros (PARENTE, 2006).

A reciclagem é realizada pelas indústrias para o reaproveitamento das perdas geradas na produção. O material descartado é coletado e levado para o processo de transformação em matéria-prima sem ou com adição de uma porcentagem de materiais virgens para a manufatura de novos produtos (PARENTE, 2006; ALMEIDA, 2010).

Não são todos os polímeros que podem ser reciclados. Para facilitar a identificação dos polímeros que podem passar por este processo, foi criada uma codificação do número 1 ao 7 adotado pela ABNT na Norma Brasileira 13230, que pode ser observado na Figura 4 logo a seguir (PARENTE, 2006).

Figura 4 - Identificação de materiais plásticos

	PET – politereftalato de etileno
	PEAD – polietileno de alta densidade
	PVC – policloreto de vinila
	PEBD – polietileno de baixa densidade
	PP – polipropileno
	PS – poliestireno
	Outros

Fonte: Adaptado de PARENTE (2006)

Atualmente, o mercado de reciclagem está atuando com um grande volume de material e a margem do crescimento é bastante promissora (PARENTE, 2006).

2.5 Processo de Extrusão de Termoplásticos

Na indústria, o processo de extrusão é o mais utilizado para transformação de polímeros, além de causar baixo impacto ambiental, por motivo de não utilizar solventes e gerar poucos resíduos. O processo de extrusão tolera que faça a incorporação de aditivos, cargas e pigmentos para polímeros (ALMEIDA, 2010; ARAÚJO, 2009).

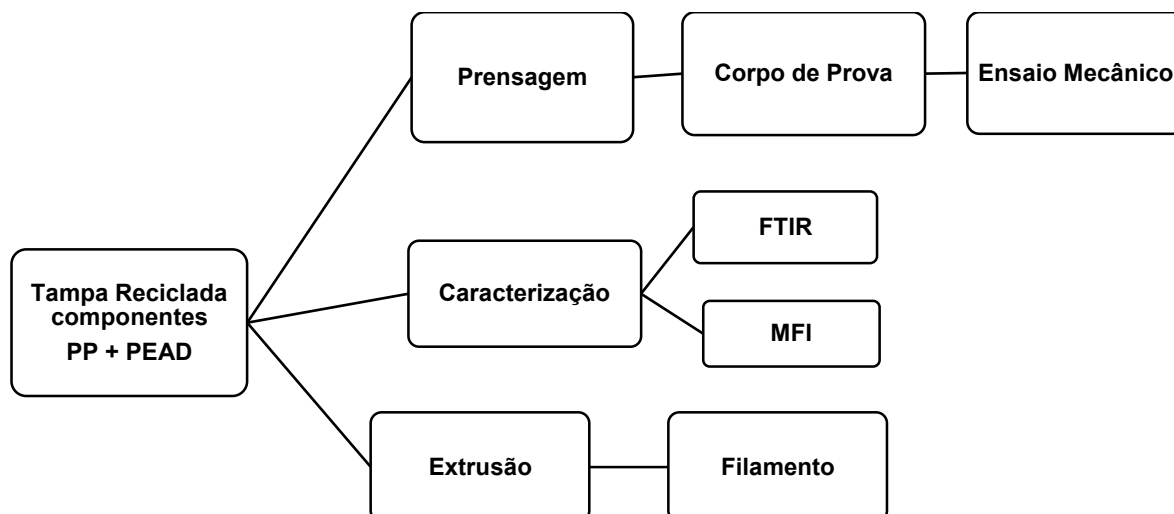
Extrusão é um processo contínuo, com função básica de transportar, plastificar, misturar e entregar para a matriz um fluxo constante de material, formando uma massa homogênea, proporcionando uma peça de acordo com as necessidades desejadas. Pode produzir produtos semi-acabados, como: pellets, chapas, perfis, tubos, entre outros (ALMEIDA, 2010; ARAÚJO, 2009).

Durante o processamento na extrusora, o material sofre degradação devido às altas temperaturas, altas pressões e ao cisalhamento gerado por esforço mecânico. As condições do processamento (temperatura em cada região de aquecimento e velocidade de rotação da rosca) devem ser planejadas previamente para dar início ao processo. Estas condições irão influenciar nas propriedades físico-químicas do material (ALMEIDA, 2010; ARAÚJO, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas do trabalho são mostradas no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma dos métodos



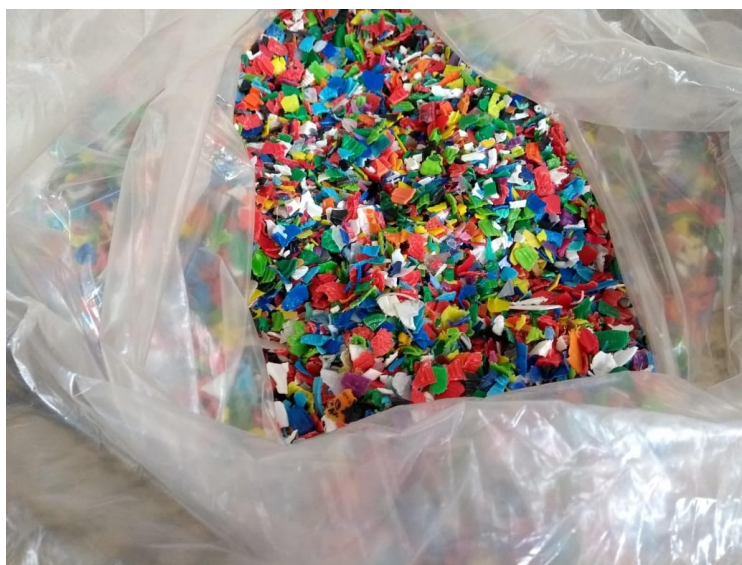
Fonte: Autoria própria (2021)

3.1 Separação das cores do material reciclado

As tampas de garrafas PET fornecidos pela empresa de reciclagem já estavam moídas e é de conhecimento que elas poderiam ser fabricadas tanto por material PEAD ou PP, assim dificultando a separação delas devido à granulometria reduzida. Com isso, no trabalho, foi manipulado com mistura de reciclado PEAD e PP.

O primeiro procedimento realizado no trabalho é a separação por catação das cores (vermelho, verde e branco) do material reciclado (tampa de garrafa PET). Este procedimento é realizado para obter filamentos na coloração selecionada e, assim, evitar a obtenção de filamentos acinzentados típicos de materiais reciclados sem a devida separação das cores. A separação do material é mostrada logo abaixo nas Figura 6 e Figura 7.

Figura 6 - Tampa de garrafa PET reciclado



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 7 - Material reciclado separado nas cores Vermelho, Verde e Branco



Fonte: Autoria própria (2021)

Ao final da separação, foram obtidos cerca de 1,5 kg do material de cor vermelha, 1,3 kg de cor verde e 0,8 kg de cor branca.

3.2 Moagem do material reciclado para extrusora

A segunda fase do trabalho foi a moagem do material reciclado separado por cores (MSC) e do material reciclado sem separação das cores (MSSC). Esse procedimento foi realizado para testar se a extrusora possui os parâmetros adequados para fazer os filamentos e corpos de prova para ensaio de tração.

A moagem foi realizada com moinho de facas do tipo *willye* da fabricante Fortinox, modelo STAR FT 50, disponibilizado pelo laboratório B002 de Cerâmica do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná no campus Londrina. O equipamento é apresentado na Figura 8. Para evitar o aquecimento no interior do equipamento por atrito, foram adicionados na máquina de moagem 200 g de material reciclado e com pausas após ser alimentado três vezes, o mesmo procedimento foi realizado tanto para os materiais separados por cores quanto para o material reciclado sem a devida separação. Para acelerar o resfriamento foi utilizado um compressor de ar.

Figura 8 - Moinho de facas do tipo willye



Fonte: Autoria própria (2021)

3.3 Extrusora para produção de pellets e *corpos de prova*

Após a moagem, a próxima etapa foi a obtenção dos *pellets* para produção dos corpos de provas. Este procedimento foi realizado com MSSC e com material separado na cor vermelha (MSV) na mini extrusora monorosca de bancada da marca AX Plásticos disponibilizado pelo laboratório B001 de Polímero do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do campus Londrina. Inicialmente, o filamento é formado pela extrusora, em seguida, passa pela pelitizadora para obter *pellets*. A extrusora é mostrada na Figura 9.

Figura 9 - Mini extrusora mosnorosca

Fonte: Aatoria própria (2021)

Com os pellets e a prensa hidráulica da fabricante Marconi disponibilizados pelo laboratório B001 de Polímero do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do campus Londrina, foi preparada a placa para ser retirado o corpo de prova, o equipamento é mostrado na Figura 10.

Para iniciar a produção, as placas da parte superior e inferior da prensa foram aquecidas até 190 °C. Em seguida, *pellets* foram vazados na parte central, ajustando-se no formato do molde retangular, para a formação da placa. Já posicionados entre as placas, foi aplicado pressão de 10 toneladas para haver espalhamento dos *pellets* em toda superfície do molde, em seguida, foi aliviada a pressão.

No próximo procedimento, foram aplicadas cinco toneladas e alívio logo em seguida, repetindo este processo dez vezes, deste modo evitando a formação de bolhas na placa a ser obtida.

Após terminar a repetição do procedimento anterior, o material foi mantido por 10 minutos com pressão de 10 toneladas.

Passados os 10 minutos, foram resfriadas as placas do equipamento e juntamente a amostra, por meio do sistema de resfriamento com água até temperatura 50 °C, evitando com que ocorra o empenamento da placa.

Foi possível obter duas placas tanto para MSC quanto para MSV.

Em seguida, nove corpos de prova foram retirados para os dois tipos de material reciclado, MSC e MSV, por meio do gabarito (molde na forma de cunha) com a aplicação de pressão via prensa hidráulica das placas no formato de gravata nas dimensões, de acordo com a norma ASTM D 638, adequado para ensaio.

Figura 10 - Prensa Hidráulica

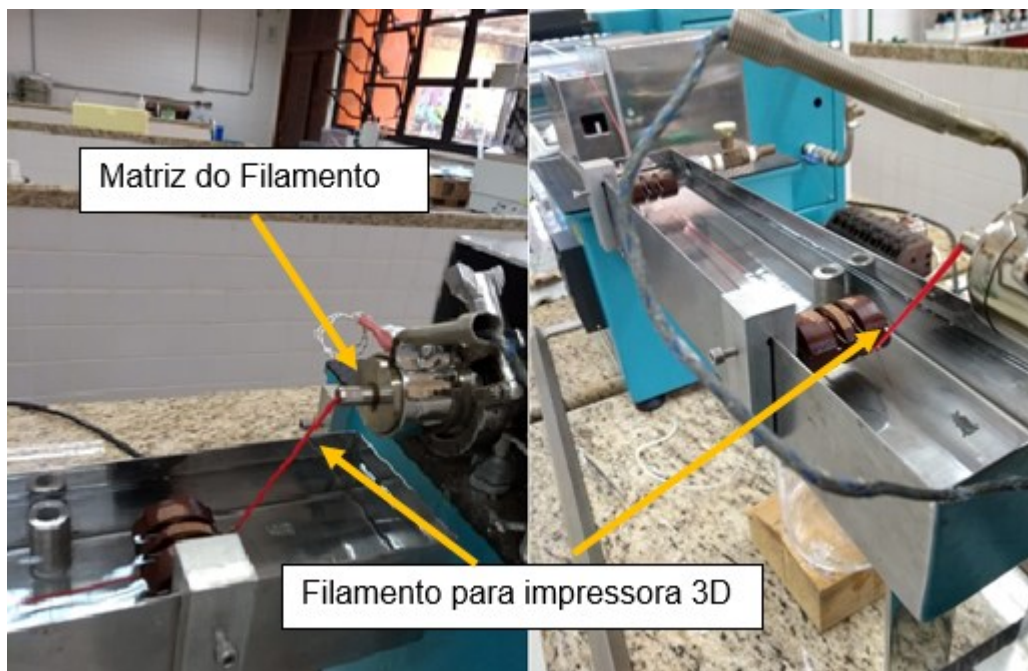


Fonte: Autoria própria (2021)

3.4 Fabricação de filamento para impressora 3D

Na extrusora de bancada foi realizado o processamento do material reciclado obtendo-se os filamentos, mediante uma matriz de extrusão. Foram preparados com a utilização do MSV como parâmetro de fabricação, ajustando a rotação da rosca para 40 rpm, rotação do rebobinador de 1,84 rpm, com perfil de temperatura de 185 °C para as duas zonas de aquecimento e temperatura da matriz de 190 °C com o intuito de se obter um filamento com espessura de 1,75 mm. Na Figura 11 é mostrado o processo de fabricação do filamento. A Figura 12 mostra o rebobinador em funcionamento e a Figura 13 os filamentos produzidos.

Figura 11 - Produção de filamento para impressora 3D na extrusora



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 12 - Rebobinador



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 13 - Filamento para impressora 3D produzido a partir do material reciclado



Fonte: Autoria própria (2021)

3.5 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado na máquina universal Arotec WDW – 100E disponibilizado pelo laboratório B006 de Ensaio do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do campus Londrina, utilizando oito corpos de provas para o material reciclado MSSC (sem a separação das cores) e sete para MSV (material separado na cor vermelha). Os corpos de provas foram retirados das placas produzidos anteriormente por meio do gabarito (molde na forma de cunha) no formato de gravata, conforme a norma ASTM D

3.6 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Com a técnica Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) com a técnica reflexão total atenuada (ATR) foi realizada a identificação do

polímero presente nas amostras. Equipamento espectrômetro Spectrum Two – ParkinElmer disponibilizado pelo laboratório B004 de Análise do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do campus Londrina, realizou-se a análise no comprimento de onda 400 a 4000 cm^{-1} com dois tipos de amostras, uma com a tampa (PEAD) de garrafa e a outra amostra com o material do filamento de MSV que será utilizado como matéria-prima para impressora 3D. Com o uso do *software* Origin® foi possível montar as curvas com os picos para realizar análise.

3.7 Índice de fluidez (MFI)

No índice de fluidez (MFI), tendo como amostra utilizados para análise o material reciclado MSV, o procedimento para coleta dos dados foi de acordo com a norma ASTM D1238 na qual a carga utilizada foi de 2,16 kg com a temperatura de $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ e tempo de corte da amostra foi realizado a cada um minuto. Em seguida, foi calculado o índice de fluidez para (g /10 min). A figura 14 apresenta o equipamento de Índice de Fluidez (MFI) da marca INSTRON modelo Ceast MF10 disponibilizado pelo laboratório B001 de Polímero do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do campus Londrina.

Figura 14 - Máquina de Índice de fluidez



Fonte: Autoria própria (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

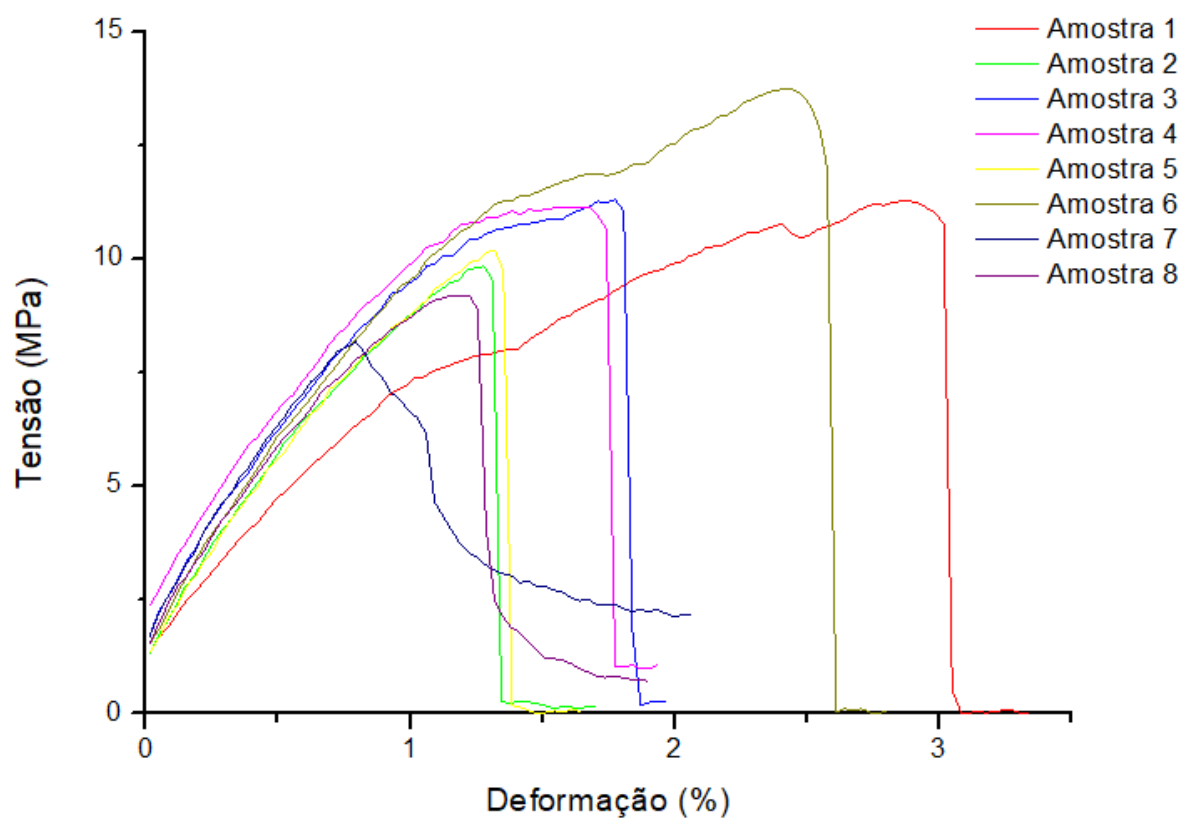
4.1 Ensaio de tração

Para verificar o comportamento mecânico do filamento proveniente do MSSC e MSV, foi realizado o ensaio mecânico de tração para o MSSC e MSV. Foram ensaiados oito corpos de prova para MSSC e sete corpos de provas para MSV.

Com os resultados coletados foram construídas as curvas de tensão por deformação ($\sigma \times \epsilon$) com ajuda do *software* Origin®. Os gráficos resultantes estão apresentados nas Figuras 15 e 16.

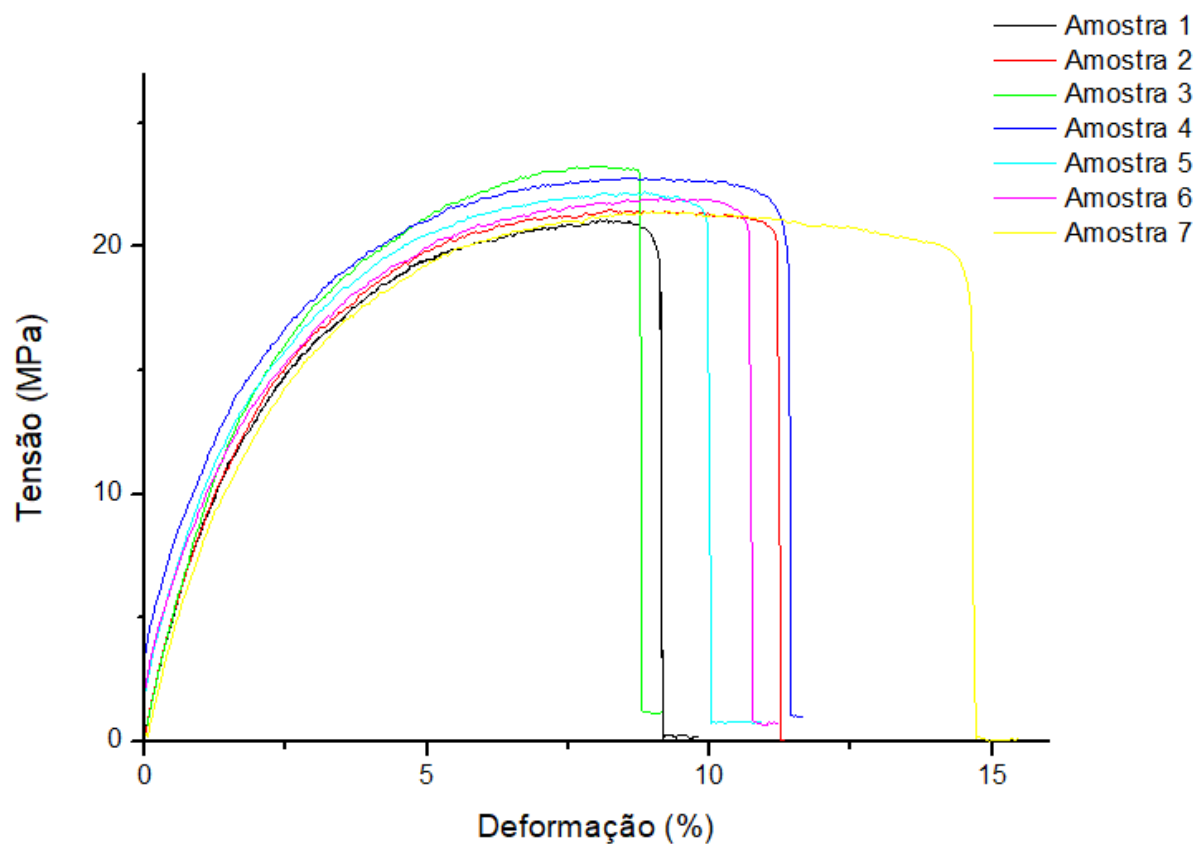
Os valores do módulo de elasticidade e tensão na ruptura estão nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. Os valores médios dos módulos de elasticidade e tensão na ruptura juntamente ao desvio padrão estão representados na Tabela 6 juntamente com valor de PEAD para comparação.

Figura 15 - Curva de Tensão por Deformação do MSSC



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 16 -- Curva de Tensão por Deformação do MSV



Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 3 - Valores de módulo de elasticidade e tensão de ruptura do MSSC

Amostras MSSC	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão de ruptura à tração (MPa)
1	572,48	11,27
2	774,24	9,84
3	795,25	11,31
4	740,94	11,14
5	747,24	10,19
6	764,55	13,76
7	909,25	8,18
8	784,74	9,91

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 4 - Valores de módulo de elasticidade e tensão de ruptura do MSV

Amostras MSV	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão de ruptura à tração (MPa)
1	567,80	21,08
2	626,50	21,44
3	745,64	23,26
4	630,00	22,82
5	718,00	22,23
6	572,47	21,94
7	637,10	21,44

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 5 - Valor médio de módulo de elasticidade e tensão de ruptura do material reciclado e valor de PEAD virgem para comparação

Propriedade Mecânica	MSSC	MSV	Material Virgem (PEAD)
Módulo de elasticidade à tração (MPa)	769,40 ± 92,61	628,25 ± 70,21	900
Tensão na ruptura à tração (MPa)	10,67 ± 1,61	21,94 ± 0,79	29

Fonte: Autoria própria (2021)

A partir da curva de tensão por deformação para MSSC, é possível observar que o material tem comportamento de um polímero frágil, apresentando pouca deformação nos corpos de provas, as amostras sofrem deformação praticamente puramente elástica e, logo após, sofrem fratura frágil. Para os resultados dos MSV tem-se deformações maiores em comparação com MSSC.

Com base na Tabela 5 é possível determinar que houve perda nas propriedades em relação ao material virgem e ao material de estudo. No módulo de elasticidade foi aproximadamente de 14,5% e na tensão de ruptura foi aproximado de 63,2% para MSSC e 30,2% para módulo de elasticidade e 24,3% para tensão de

ruptura no MSV. Isso demonstra que a separação realizada pode ter diminuído a quantidade de PP nas amostras, já o MSSC houve perda relativamente alta na tensão de ruptura, porém o módulo de elasticidade teve perda menor em comparação ao MSV.

Mediante os dados da tabela 3 e 4, é possível verificar que o material em comparação com ABS, PEAD e material de estudo, o módulo de elasticidade à tensão do ABS tem maior valor comparado com PEAD e material de estudo demonstrando que ABS apresenta comportamento mais frágil em comparação aos outros materiais. Já a tensão na ruptura à tração é similar com ABS e MSV. Apesar da diferença no valor das propriedades é necessário adaptar de acordo com a exigência do produto à ser fabricado para sua utilização.

As perdas das propriedades podem ser devidas à utilização do material reciclado sem a separação das cores sujeito à presença de vários tipos de polímeros além do PEAD e PP até mesmo material diferente do polímero, com a seleção das cores é possível determinar a grosso modo se o material selecionado tem origem da tampa de uma garrafa PET.

Apesar da perda de propriedade mecânica, em determinada aplicação que não exija uma boa propriedade mecânica poderia ser utilizado, porém seria necessário realizar novamente o ensaio de tração após ser impresso pela impressora 3D tanto no material reciclado sem a separação das cores e no material separado por cores.

4.2 Índice de Fluidez (MFI)

O índice de fluidez (MFI) foi realizado para determinar sua fluidez de modo a verificar a viabilidade do material a ser utilizado na impressora 3D. Para a análise do índice de fluidez, foi utilizado o MSV. Os valores da massa coletados e os valores médios do índice de fluidez podem ser verificados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de índice de fluidez, g/10min (190 °C / 2,16kg)

(Continua)

Amostra	Massa	Tempo do corte da amostra
1	0,292 g	1 min

(Conclusão)

Amostra	Massa	Tempo do corte da amostra
2	0,280 g	1 min
3	0,281 g	1 min
4	0,294 g	1 min
5	0,285 g	1 min
Valor média	2,86 ± 0,06 g / 10 min	

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com uma empresa fornecedora de PEAD, o índice de fluidez para o PEAD utilizado nas tampas é de 2,0 g/10 min (190°C/2,16kg), comparado ao material de estudo é possível verificar que há pouca alteração, umas das justificativas para estas pequenas diferenças é o fato de que o material reciclado ter sofrido pequena degradação ao passar novamente na extrusora. De acordo com Lorandi (2016), durante o processamento, pode ter sofrido degradação termo-oxidativa. Isso acontece quando os processos de degradação térmica, mecânica e/ou química acontecem simultaneamente. O principal fenômeno que pode ocorrer em degradação termo-oxidativa é a cisão das cadeias, onde há diminuição da massa molar do PEAD, portanto aumentando o valor do índice de fluidez.

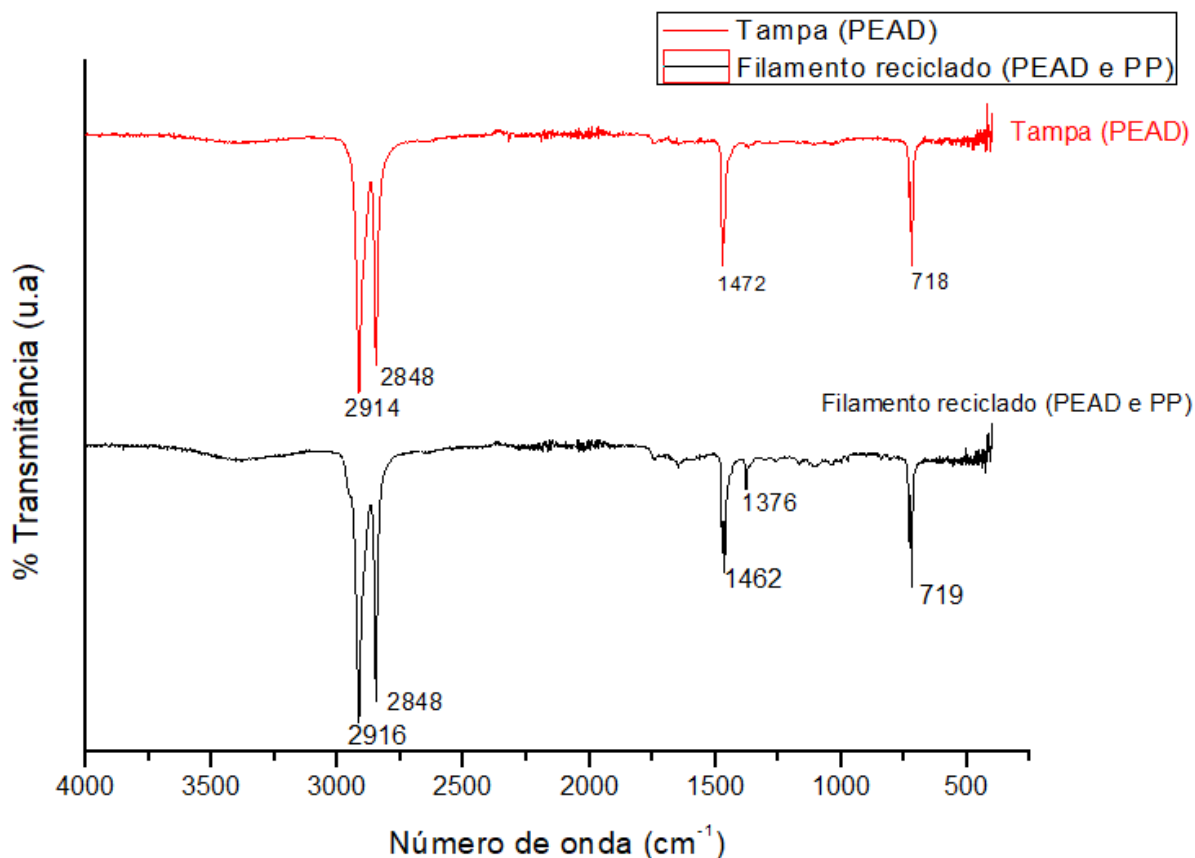
4.3 Espectroscopia na região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de espectroscopia na região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) com a técnica de ATR foi realizada para identificar os grupos funcionais e realizar a comparação entre a tampa (PEAD) de uma garrafa PET e o filamento MSV que tem maior pureza, possivelmente contendo menor quantidade de polímeros que possam ser diferentes do PEAD, como mencionado anteriormente no resultado de ensaio de tração.

Por meio da curva construída que está representada na Figura 17, foi possível identificar as bandas características do polímero PEAD que são 2915 e 2847cm⁻¹ correspondes ao estiramento (C-H) simétrico e assimétrico dos grupos metil e metileno, deformação angular (C-H) em 1472 cm⁻¹ e 720 cm⁻¹ características das

sequências do grupo CH₂ (NOVOA; D' ALMEIDA, 2016; PITARELI, Gleisa et al. , 2001).

Figura 17 - Espectro de FTIR da Tampa (PEAD) e Filamento reciclado (Mistura de PEAD e PP)



Fonte: Autoria própria (2021)

Observando a curva de FTIR, há indício da presença do PP pelo pico em 1376 cm⁻¹, apesar da separação minuciosa na cor vermelha, há possibilidade de contaminação com o material na cor diferente e extrusado juntamente para formação do filamento ou uma outra possibilidade é a tampa na cor vermelha ser PP e estar misturada. Com esta análise, é possível entender a dificuldade de reciclar o polímero de acordo com os tipos (PITARELI, Gleisa et al. , 2001).

5 Conclusão

Neste trabalho foram utilizadas tampas de garrafas PET misturadas com PEAD e PP, produzindo filamento reciclado para um estudo na utilização em impressora 3D. Em algumas etapas dos processos, foram encontradas dificuldades de determinar e separar por cada tipo de polímero, pela razão do material reciclado utilizado já estar com tamanho reduzido e assim dificultando a separação, apesar deste problema, ainda foi possível separar por cores e aproveitá-lo para a produção de filamento. Com o material separado na cor vermelha foi produzido o filamento para impressora 3D. Houve dificuldade na fabricação de um filamento uniforme com diâmetro de 1,75 mm para toda a extensão. Há necessidade de melhoria no controle dos parâmetros do processamento, como velocidade de rosca, velocidade de bobinagem e a quantidade do material que entra pela alimentação da extrusora.

Apesar dos controles dos parâmetros, o filamento obtido estava com diâmetro entorno de 1,65 mm, 0,1 mm menor do que 1,75 mm que é a dimensão requerido para impressora 3D e pouca variação do diâmetro para toda extensão do filamento.

Pelo resultado de índice de fluidez comparando com PEAD virgem e a amostra reciclada, houve um pequeno aumento. Com a análise de FTIR, as bandas características do PEAD foram apresentadas na curva do material reciclado e também apresentou pico em 1376 cm^{-1} que é indício da presença do PP.

Neste trabalho, não foi possível realizar teste com filamento na impressora 3D, por esta questão, não podemos afirmar se é possível que o filamento produzido seja utilizado para impressão 3D. Um outro ponto é a dificuldade da impressora não conseguir puxar o filamento até o bico de extrusão devido seu diâmetro ser menor que requerido e mais um problema é a variação no diâmetro ao longo do filamento que pode afetar a quantidade de material depositado em cada camada prejudicando dimensão da peça ou até mesmo poderia empenar ela.

O principal problema encontrado, neste trabalho, foi o controle do processamento de fabricação do filamento que exige um equipamento que tenha pouca variação nos parâmetros.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Rosemire dos S. **Influência da velocidade de rotação no processo de extrusão do polipropileno virgem e reciclado**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - D638**: Standard test method for tensile properties of plastics, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1238-10: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer**, 2010.
- ARAÚJO, Joyce R. **Compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de curauá obtidos por extrusão e injeção**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- BOURELL, David, et al. **Materials for additive manufacturing**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 66, 2017.
- CANDIAN, Livia M. **Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais**. 2007. 167 f. Dissertação (Mestrado de Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- COUTINHO, Rafaella T.P. **Avaliação dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas de peças de PLA/PBAT fabricadas por impressão 3D**. 2017. 63 f. Projeto (Graduação em Engenharia de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- CRUZ SANCHEZ, F., Boudaoud, H., Camargo, M., & Pearce, J. M. **Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy**. Journal of Cleaner Production, 264, 2020.
- E.TECH BRASIL. **Filamento especial**. Disponível em: <http://www.etchbrasil.com.br/produto/17/filamento-especiais>. Acesso em: 07 jun 2021.
- EUGÊNIO, Pacelly Brandão de Araújo. **VOID3D: Impressora 3D de baixo custo**. 2018. 48 f. Dissertação (Mestrado em Gestão da Inovação e da Infomação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- HENRIQUES, Luiz. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de compósito de polipropileno de alta cristalinidade reforçado com talco para aplicações automotivas em ambientes de alta temperatura**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado em Processos Industriais)- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2016.
- HORST, Diogo J. **Investigação da bioatividade e das propriedades termo-física-mecânicas de resinas vegetais e sua processabilidade na fabricação aditiva (3D)**. 2017. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

JIMÉNEZ, Mariano, et al. **Additive manufacturing technologies: na overview about 3D printing methods and future prospects**. Research Article, 30, 2019.

LONTRA, Beatriz G. F. **Reciclagem mecânica de polietileno de alta densidade obtido a partir de sacolas plásticas**. 2011. 44 f. Projeto (Graduação em Engenharia de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

LORANDI, Paula D' Agnoluzzo. **Determinação da influência dos parâmetros de extrusão na reologia e propriedades mecânicas de resina PEAD**. 2016. 47 f. TCC (Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2016.

MENDA, Mario. Química viva. **Conselho Regional de Química – IV Região**. 2011. Disponível em: https://www.crq4.org.br/quimicaviva_plasticos. Acesso em: 06 jun 2021.

NOVOA, D. M.C; D' ALMEIDA, J. R. M. **Avaliação físico-químico do PEAD processado pelo método de impressão 3D por moldagem por fusão e deposição – FDM**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2016, Natal, 2016.

OTA, Waldyr N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidros utilizados pela indústria automotiva nacional**. 2004. 104 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. (OTA, 2004)

PARENTE, Ricardo A. **Elementos estruturais de plásticos reciclado**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

PARENTE, Ricardo Alves. **Elementos Estruturais de Plásticos Reciclado**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

PEDROSA, Tiago F.S. **Conceção e desenvolvimento de equipamento de extrusão de filamento para impressora 3D**. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, 2015.

PITARELI, Gleisa et al. **Identificação de blendas polietileno / polipropileno por espectroscopia no infravermelho e calorimetria exploratória diferencial**. 6^a CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2001, São Bernado do Campo. São Paulo. 2001.

PIZZITOLA, Ivani C. dos P. **Efeito da incorporação de fibras curtas de sílica amorfa em compósitos de polipropileno utilizados pela indústria automotiva nacional**. 2011. 131 f. Dissertação (Ciências dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SANTANA, Leonardo. **Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA**. 2015. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2015.

SANTOS, Luana M et al. **Tipos de Polímeros Utilizados como Matéria Prima no Método de Manufatura Aditiva por FDM: uma abordagem conceitual.** In ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2018, Maceió. Alagoas: ABREPO, 2018.

SATO, Alex K. **Desenvolvimento e caracterização de um compósito híbrido de polipropileno homopolímeros e micro fibra de sílica amorfa e fibra de madeira, utilizando agente de acoplagem.** 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.