

Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas

**VIABILIDADE TÉCNICA DA
APLICAÇÃO DE POLÍMEROS
TERMOPLÁSTICOS RECICLADOS
PARA IMPRESSÃO 3D**

Luana Machado dos Santos

Goiânia, GO, Brasil
2019

Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas

VIABILIDADE TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS RECICLADOS PARA IMPRESSÃO 3D

Luana Machado dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas**.

Orientadora: Prof.^a. Marta Pereira da Luz, Dr.^a.

Coorientador: Prof.^o. Marcos Lajovic Carneiro, Dr.

Goiânia, GO, Brasil
2019

S237v Santos, Luana Machado dos
Viabilidade técnica da aplicação de polímeros termoplásticos
reciclados para impressão 3D / Luana Machado dos Santos.--
2019.

140 f.: il.

Texto em português, com resumo em inglês
Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica
de Goiás, Goiânia, 2019
Inclui referências: f. 113-120

1. Termoplásticos. 2. Processos de fabricação. 3.
Estudos de viabilidade. 4. Produtos reciclados. 5.
Polímeros. I.Luz, Marta Pereira da. II.Carneiro, Marcos
Lajovic. III.Pontifícia Universidade Católica de Goiás
- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
de Sistemas - 2019. IV. Título.

CDU: Ed. 2007 -- 678.073(043)

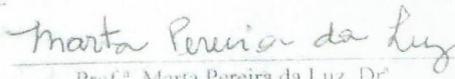
VIABILIDADE TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS RECICLADOS PARA IMPRESSÃO 3D

LUANA MACHADO DOS SANTOS

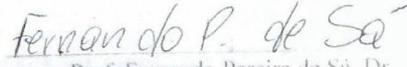
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás em 22/03/2019.

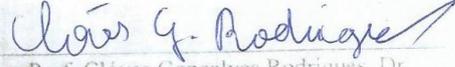

Prof. Marcos Lajovic Carneiro, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Sistemas

Banca Examinadora:


Prof.^a Marta Pereira da Luz, Dr.
Orientadora


Prof. Marcos Lajovic Carneiro, Dr.
Orientador


Prof. Fernando Pereira de Sá, Dr.
Avaliador Externo – IFG Inhumas


Prof. Clóves Gonçalves Rodrigues, Dr.
Avaliador Interno – PUC Goiás

Dedico esta pesquisa como as demais realizações de minha vida aos meus amados pais Ester e Luiz, minhas irmãs Lais e Bruna e *in memoriam* de minha amada avó Ana Machado Bento.

AGRADECIMENTOS

Um trabalho de mestrado pode se descrever como uma viagem sem fim, pois inclui uma trajetória cheia de desafios, tristezas, incertezas, alegrias, choro, barreiras para que você possa desistir durante o percurso. Mas para trilhar todo este caminho só foi possível com o apoio e incentivo de pessoas que acreditavam em mim diariamente.

Agradeço a Deus e o Divino Pai Eterno por me iluminar em todos os desafios e me abençoar em cada conquista da minha vida e por me proteger.

À minha orientadora professora Marta Pereira da Luz e o meu coorientador professor Marcos Lajovic Carneiro pela orientação, ensinamentos e contribuição para a realização deste trabalho, além da motivação, paciência e confiança em mim depositada.

A todos os professores do mestrado que forneceram conhecimento para meu embasamento teórico.

A banca examinadora por aceitar o convite e indicarem sugestões de melhoria na dissertação.

A CAPES pelo apoio financeiro indispensável para que eu pudesse cursar o tão sonhado Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas na PUC Goiás.

À minha família, minha mãe Ester, meu pai Luiz, minhas irmãs Lais e Bruna, meu cunhado Nilcelio por terem sido meu equilíbrio, pela paciência, compreensão, por sempre acreditarem em mim, por todo apoio dado e entenderem a minha ausência. A minha vó Ana Machado Bento *in memoriam* pelos seus ensinamentos.

À professora Daniela Beck por permitir o uso do equipamento para triturar o material, a discente Maríndia (doutoranda) e Thiago (iniciação científica) pela condução da utilização do uso do laboratório de Processamento de Polímeros Observatório (UDESC) em Joinville (SC).

Aos professores Demóstenes Ferreira e José Lucio Gonçalves pela disponibilidade e contribuição em realizar os ensaios de propriedades mecânicas no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação da UFG.

Ao professor Rodrigo do laboratório de Química da PUC Goiás, por facilitar a realização da caracterização das amostras. Ao LAPA da PUC Goiás, pela disponibilidade da utilização da impressora.

Ao José de Freitas pela ajuda na etapa de caracterização, na fabricação do filamento, na fabricação de um equipamento, pelo incentivo, e paciência que teve comigo.

A Isabela e o Rafael Gama da empresa Interativa Reciclagem em Joinville (SC), ao Julio Cesar da empresa Polímeros César em Aparecida de Goiânia (GO), pela doação do material ABS, PLA, PEAD e o PP para realização do meu trabalho. Ao Thiago Correia da “Só ares 3d projects” e o Cleber Rampazo que auxiliou na impressão do corpo de prova com o polímero PP.

À Filmaq3D pela facilidade para que eu pudesse adquirir a extrusora que foi o equipamento chave para realização deste trabalho.

Aos meus amigos Daniela Rocha, Patrícia Zaluske, Isis Granja, Karla Silva, Felipe Ramos, Douglas Marques, Ubirajara Oliveira (UFG), Luis Carlos (UNINOVE), Wictor Leone e Ernani que sempre me apoiaram, incentivaram em realizar esta pesquisa e entenderam minha ausência. Difícil de escrever o que cada um fez e significa para mim, mas cada um sabe o valor que teve nesse trabalho e na minha vida.

Ao “Tio Luiz Silva” pela paciência por sempre me acompanhar nos lugares em busca das amostras e equipamento para realização da pesquisa.

À Driely Rosa e o senhor Osmar pela ajuda na correção deste trabalho, pelo incentivo, compreensão e paciência que teve comigo.

A todos aqueles que duvidaram da minha capacidade, que de alguma forma tentaram me desmotivar, ficam aqui os meus sinceros agradecimentos. Pois todas estas barreiras que passei só serviram de aprendizado e crescimento, fiquei ainda mais forte para lutar em busca dos meus sonhos.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que eu pudesse trilhar esse caminho rumo a minha formação.

EPÍGRAFE

“Quando nada parece dar certo, vou ver o cortador de pedras martelando sua rocha talvez 100 vezes, sem que uma única rachadura apareça. Mas na centésima primeira martelada a pedra se abre em duas, e eu sei que não foi aquela que conseguiu isso, mas todas as que vieram antes” Jacob Riis

VIABILIDADE TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS RECICLADOS PARA IMPRESSÃO 3D

Luana Machado dos Santos

Março/2019

Orientadora: Prof.^a. Marta Pereira da Luz, Dr^a.

Coorientador: Prof.^o. Marcos Lajovic Carneiro, Dr.

Este estudo apresentou a descrição das propriedades mecânicas de peças impressas em equipamento de Manufatura Aditiva com base no sistema de extrusão e verificou a viabilidade de reutilização de insumos reciclados de polímeros termoplásticos: ABS, PLA, PEAD, PP e PETG. Trata-se de pesquisa quantitativa e qualitativa, a partir de ensaios experimentais, por meio de estratégias de avaliação de parâmetros de preenchimento e temperatura de extrusão para cada tipo de polímero. A pesquisa foi dividida em três etapas. Na primeira etapa foi realizada a caracterização dos materiais e análise da perda de massa em várias temperaturas utilizadas durante a fabricação do filamento, observando que a maior perda (5,8256%) foi na temperatura de 280 °C com o polímero PP, e percebeu-se que não houve uma perda significativa de massa. Na segunda etapa foi realizada a fabricação de filamento a partir de material virgem e reciclado, em que foi possível identificar que a dimensão estabelecida nesse filamento foi em 1,75 mm para utilização na impressora 3D Zmorph. A terceira etapa foi a impressão dos corpos de prova com os polímeros virgens e reciclados (ABS; PETG; PLA e PP) com 50% e 35% de preenchimento dos corpos de prova. Após a impressão foi possível constatar que os corpos de prova impressos em PETG reciclado com 50% de preenchimento, foram os que obtiveram o maior limite de resistência à tração (49,12 MPa) e de flexão (5,05 MPa). Já, no ensaio de dureza o PLA reciclado 50% obteve-se a média em 215,55 GPa. Verificaram-se três falhas no processo, em que ocasionou o descarte de peças impressas. Em relação a viabilidade técnica no processo de fabricação dos filamentos a partir de resíduos reciclados, foi confirmado que é viável a impressão de peças em relação à qualidade do filamento e dimensões estabelecidas do filamento

com 1,75 mm, já a viabilidade econômica da fabricação de filamento com material reciclado, mostrou que gera uma economia de aproximadamente cerca de 88% no custo da matéria prima.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Reutilização. Viabilidade Técnica. Viabilidade Econômica. Polímeros Termoplásticos.

ABSTRACT

The presented study is a description of the mechanical properties of printed parts by MA equipment based on the extrusion system and aims to verify the feasibility of reusing recycled thermoplastic polymer materials: ABS, PLA, HDPE, PP and PETG. It is a quantitative and qualitative research from experimental tests, through strategies of evaluation of filling parameters and extrusion temperature for each type of polymer. The research was divided into 3 steps. Initially in the first stage of the research were the characterization of the materials and analysis of the mass loss in several temperatures used during the filament manufacture, observing that the greatest loss of 5.826% was at the temperature of 280 °C with the polymer PP, and it was noticed that there is a significant mass loss. In the second stage the filaments were manufactured from virgin and recycled material, in which it was possible to identify that the size established in this filament was at 1,75mm for use in the Zmorph 3D printer. The third step was to test the specimens with virgin and recycled ABS polymers and virgin PETG with 50% and 35% filling of the specimens, after printing it was possible to verify that the specimens printed in PETG recycled with 50 % of fill was the material that obtained the highest tensile strength limit of 49,12 MPa and flexion with 5,05 MPa. In the hardness test, the recycled PLA 50% obtained an average of 215,55 GPa. There were three flaws in the process, which led to the disposal of printed parts. As regards technical feasibility in the process of manufacturing filaments from recycled waste, it has been confirmed that it is entirely feasible to print parts relative to the quality of the filament and established filament dimensions of 1,75 mm, since the economic viability of the filament manufacture with recycled material, showed that it generates an economy of approximately 88% in the cost of the raw material.

Keywords: *Additive Manufacturing. Reuse. Technical viability. Economic viability. Thermoplastic Polymers.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE QUADROS.....	xvi
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xviii
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivos.....	22
1.1.1 Objetivo geral	22
1.1.2 Objetivos específicos.....	23
1.2 Estrutura do trabalho	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Manufatura Aditiva (Ma)	24
2.2 Manufatura Aditiva por extrusão	30
2.2.1 Polímeros Utilizados como matéria prima na FDM	33
2.3 Manufatura Aditiva a partir da visão sustentável.....	36
2.3.1 Processo de extrusão de plástico	39
2.4 Trabalhos correlatos	42
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	47
3.1 Caracterização dos materiais	49
3.2 Fabricação dos filamentos	50
3.2.1 Preparação das amostras	51
3.2.2 Processo de extrusão.....	53
3.2.3 Análise de custos do filamento	58
3.3 Estudo da fabricação de peças.....	60
3.3.1 Procedimentos para fabricação da peça.....	61
3.3.2 Análise das propriedades mecânicas	63
3.3.2.1 Medição da massa e densidade.....	64
3.3.2.2 Ensaio de tração.....	65
3.3.2.3 Ensaio de flexão.....	65
3.3.2.4 Ensaio de impacto.....	66
3.3.2.5 Ensaio de dureza.....	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1 Caracterização dos materiais	71
4.2 Fabricação do filamento.....	90
4.2.1 Análise de custo	99
4.3 Estudo da fabricação da peça	100
4.3.1 Medição de massa	101
4.3.2 Análise das propriedades mecânicas	102
4.3.2.1 Medição da densidade	102
4.3.2.2 Ensaio de tração.....	103
4.3.2.3 Ensaio de flexão.....	106
4.3.2.4 Ensaio de impacto.....	107
4.3.2.5 Ensaio de dureza.....	107

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
Limitações da Pesquisa e Sugestões para trabalhos futuros	111
REFERÊNCIAS	113
Apêndice A – Fabricação do puxador	121
Apêndice B – Fotos dos corpos de provas impressos.....	125
Apêndice C – Resultado do ensaio de Tração	132
Apêndice D – Resultado do ensaio de flexão	135
Apêndice E – Resultado do ensaio de Impacto	138
Apêndice F – Resultado do ensaio de dureza	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico dos setores de aplicação de indústrias na MA.	26
Figura 2 - Etapas dos processos de MA.	27
Figura 3 - Diferença entre os tipos de impressões 3D na MA.....	29
Figura 4 - Etapas do processo FDM da Stratasys.....	30
Figura 5 - Parâmetros do processo FDM.....	31
Figura 6 - Padrões de estratégias de preenchimento das camadas no processo de extrusão: (a) Peça com um contorno e preenchimento do tipo linear (b) Peça preenchida de forma concêntrica com contornos e (c) Combinação de preenchimento com linhas de contorno e linear.	32
Figura 7 - Esquema do processo de extrusão.	40
Figura 8 - Esquema do componente do puxador.	41
Figura 9 - Esquema do processo de extrusora com puxador.	41
Figura 10 - Filamento fabricado por resíduos de plásticos: (a) PLA; (b) PEAD; (c) PP; e (d) PET.	44
Figura 11 - Diagrama de etapas da pesquisa empírica.	48
Figura 12 - Equipamentos utilizados: (a) Mufla; e (b) Balança de precisão.	49
Figura 13 - Grânulos de polímeros utilizados para caracterização: (a) ABS; (b) PLA; (c) PP; (d) PEAD; e (e) PETG.	50
Figura 14 - Moinho de 4 facas.....	51
Figura 15 - Material para ser triturado: (a) ABS amarelo; (b) ABS vermelho; (c) ABS verde; (d) ABS cinza; (e) ABS preto; (f) ABS natural; e (g) PLA natural.	52
Figura 16 - Resíduos de prototipagem triturado: (a) ABS amarelo; (b) ABS vermelho; (c) ABS verde; (d) ABS cinza; (e) ABS preto; (f) ABS natural; e (g) PLA natural.	52
Figura 17 - Materiais utilizados nos experimentos: (a) ABS natural; (b) ABS branco; (c) ABS cinza; (d) PEAD azul; (e) PP vermelho; (f) PETG translucido; (g) PETG verde (h) PP natural; (i) PLA natural; e (j) PLA laranja.	53
Figura 18 - Extrusora Filmaq 3D (a) extrusora; (b) funil; (c) matriz de saída	54
Figura 19 - Paquímetro digital.....	55
Figura 20 - Puxador para tracionar o filamento.....	55
Figura 21 - Extrusora de filamento para impressora 3D.	57
Figura 22 - Modelos de corpo de prova: (a) tração; (b) flexão; (c) impacto; e (d) massa, densidade e dureza.	60
Figura 23 - Representação gráfica do G-Code do corpo de prova impresso: (a) 50% de preenchimento; e (b) 35% de preenchimento.	61
Figura 24 - Impressora Zmorph.....	62
Figura 25 - Equipamento para ensaio de tração.	65
Figura 26 - Equipamento para ensaio de flexão.	66
Figura 27 - Ensaio de impacto.....	67
Figura 28 - Equipamento para ensaio de impacto.	68
Figura 29 - Esquema do ensaio de microdureza.....	69
Figura 30 - Ensaio de Dureza no Durômetro do modelo Vickers: (a) equipamento; (b) análise microscopia.....	69

Figura 31 - Equipamento para ensaio de dureza: (a) equipamento; (b) marcação da amostra; e (c) resultado.....	70
Figura 32 - Gráfico das curvas de perda de massa na temperatura 180°C.	71
Figura 33 - Amostras na temperatura de 180°C: (a) PLA no 7º ciclo; (b) PEAD no 8º ciclo; (c) ABS no 10º ciclo; (d) PP no 10º ciclo; (e) PETG no 10º ciclo.	73
Figura 34 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 180°C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.....	74
Figura 35 - Gráfico das curvas de perda de massa na temperatura 200°C.	74
Figura 36 - Amostras na temperatura de 200°C: (a) PLA no 7º ciclo; (b) PEAD no 5º ciclo; (c) ABS no 7º ciclo; (d) PP no 10º ciclo; (e) PETG no 10º ciclo.	76
Figura 37 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 200°C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.....	77
Figura 38 - Gráfico das curvas de perda de massa na temperatura 220°C.	77
Figura 39 - Amostras na temperatura de 220°C: (a) PLA no 7º ciclo; (b) PEAD no 4º ciclo; (c) ABS no 6º ciclo; (d) PP no 10º ciclo; (e) PETG no 10º ciclo.	79
Figura 40 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 220°C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.....	80
Figura 41 - Gráfico das curvas de perda de massa na temperatura 240°C.	80
Figura 42 - Amostras na temperatura de 240°C: (a) PLA no 3º ciclo; (b) PEAD no 2º ciclo; (c) ABS no 4º ciclo PEAD no 2º ciclo; (d) PP no 6º ciclo; (e) PETG no 9º ciclo.	82
Figura 43 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 240°C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.....	83
Figura 44 - Gráfico da Curva de perda de massa na temperatura 260°C.....	83
Figura 45 - Amostras na temperatura de 260°C: (a) PLA no 3º ciclo; (b) PEAD no 2º ciclo; (c) ABS no 3º ciclo; (d) PP no 6º ciclo; (e) PETG no 5º ciclo.	85
Figura 46 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 260°C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG	86
Figura 47 - Gráfico da Curva de perda de massa para temperatura 280°C.....	86
Figura 48 - Amostras na temperatura de 280°C: (a) PLA no 2º ciclo; (b) PEAD no 2º ciclo; (c) ABS no 2º ciclo; (d) PP no 4º ciclo; (e) PETG no 4º ciclo.	88
Figura 49 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 280°C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.....	89
Figura 50 - Medição do diâmetro do filamento ABS amarelo nas temperaturas 210°C e 205°C: (a) temperatura 210°C; (b) temperatura 210°C; (c) temperatura 205°C; e (d) temperatura 205°C.....	92
Figura 51 - Medição do diâmetro do filamento com ABS reciclado.....	93
Figura 52 - Medição do diâmetro do filamento ABS branco reciclado: (a) temperatura 210°C; (b) temperatura 215°C; (c) temperatura 220°C; e (d) temperatura 220°C.	93
Figura 53 - Medição do diâmetro do filamento ABS virgem.....	94
Figura 54 - Medição do diâmetro do filamento PP reciclado: (a) temperatura 170°C; e (b) temperatura 175°C.	95
Figura 55 - Medição do diâmetro do filamento do PEAD com puxador a temperatura de 290°C.	96
Figura 56 - Medição do diâmetro do filamento PLA laranja reciclado.....	97
Figura 57 - Filamentos com mistura de polímeros: (a) PEAD com ABS; (b) ABS com PEAD; (c) ABS com PEAD.	97
Figura 58 - Gráfico da Representação das médias e desvio padrão da medição do filamento: (a) ABS reciclado na cor amarelo; (b) ABS reciclado na cor	

natural; (c) ABS reciclado na cor branca; (d) PP reciclado na cor vermelho; e (e) PEAD reciclado na cor azul	98
Figura 59 - Máquina de ensaio mecânico de tração.	103
Figura 60 - Corpos de prova de tração impressos de PEAD reciclado e PEAD virgem (da esquerda para a direita)	105
Figura 61 - Máquina de ensaio mecânico de flexão.	106
Figura 62 - Resultado da microdureza na análise microscopia: (a) ABS Virgem 50%; (b) ABS Virgem 35%; (c) ABS Reciclado 50%; (d) ABS Reciclado 35%; (e) PETG Virgem 50%; (f) PETG Virgem 35%; (g) PETG Reciclado 50%; (h) PETG Reciclado 35%; (i) PLA Virgem 50%; (j) PLA Virgem 35%; (k) PLA Reciclado 50%; (l) PLA Reciclado 35%; (m) PP Virgem 50%; (n) PP Reciclado 50%.	108
Figura 63 - Modelo do puxador.....	121
Figura 64 - Representação gráfica do G-Code da peça impressa.	122
Figura 65 - Projeto elétrico de alimentação do motor do puxador	122
Figura 66 - Processo de fabricação do Puxador: (a) Impressão; (b) Peças Impressas; (c) Montagem; (d) Puxador Pronto.....	123
Figura 67 - Processo de montado do puxador com a extrusora.....	124
Figura 68 - Corpos de prova impresso ABS reciclado com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.	125
Figura 69 - Corpos de prova impresso ABS reciclado com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.	125
Figura 70 - Corpos de prova impresso ABS virgem com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão..	126
Figura 71 - Corpos de prova impresso ABS virgem com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.	126
Figura 72 - Corpos de prova impresso PETG virgem com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.	127
Figura 73 - Corpos de prova impresso PETG virgem com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.	127
Figura 74 - Corpos de prova impresso PETG reciclado com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.	128
Figura 75 - Corpos de prova impresso PETG reciclado com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.	128
Figura 76 - Corpos de prova impresso PLA virgem com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão..	129
Figura 77 - Corpos de prova impresso PLA virgem com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão..	129
Figura 78 - Corpos de prova impresso PLA reciclado com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.	130

- Figura 79 - Corpos de prova impresso PLA reciclado com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão. 130
- Figura 80 - Corpos de prova impresso PP virgem com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.. 131
- Figura 81 - Corpos de prova impresso PP reciclado com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.. 131
- Figura 82 - Amostras finais após os ensaios de tração: (a) ABS Virgem 50%; (b) ABS Virgem 35%; (c) ABS Reciclado 50%; (d) ABS Reciclado 35%; (e) PETG Virgem 50%; (f) PETG Virgem 35%; (g) PETG Reciclado 50%; (h) PETG Reciclado 35%; (i) PLA Virgem 50%; (j) PLA Virgem 35%; (k) PLA Reciclado 50%; (l) PLA Reciclado 35%; (m) PP Virgem 50%; (n) PP Reciclado 50%..... 132
- Figura 83 - Amostras finais após os ensaios de flexão: (a) ABS Virgem 50%; (b) ABS Virgem 35%; (c) ABS Reciclado 50%; (d) ABS Reciclado 35%; (e) PETG Virgem 50%; (f) PETG Virgem 35%; (g) PETG Reciclado 50%; (h) PETG Reciclado 35%; (i) PLA Virgem 50%; (j) PLA Virgem 35%; (k) PLA Reciclado 50%; (l) PLA Reciclado 35%; (m) PP Virgem 50%; (n) PP Reciclado 50%..... 135
- Figura 84 - Amostras finais após os ensaios de impacto: (a) ABS Virgem 50%; (b) ABS Virgem 35%; (c) ABS Reciclado 50%; (d) ABS Reciclado 35%; (e) PETG Virgem 50%; (f) PETG Virgem 35%; (g) PETG Reciclado 50%; (h) PETG Reciclado 35%; (i) PLA Virgem 50%; (j) PLA Virgem 35%; (k) PLA Reciclado 50%; (l) PLA Reciclado 35%; (m) PP Virgem 50%; (n) PP Reciclado 50%..... 138
- Figura 85 - Amostras finais após os ensaios de dureza: (a) ABS Virgem 50%; (b) ABS Virgem 35%; (c) ABS Reciclado 50%; (d) ABS Reciclado 35%; (e) PETG Virgem 50%; (f) PETG Virgem 35%; (g) PETG Reciclado 50%; (h) PETG Reciclado 35%; (i) PLA Virgem 50%; (j) PLA Virgem 35%; (k) PLA Reciclado 50%; (l) PLA Reciclado 35%; (m) PP Virgem 50%; (n) PP Reciclado 50%..... 139

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Variável do processo de extrusão.....	32
Quadro 2 – Composição de alguns polímeros.....	34
Quadro 3 - Principais características e aplicabilidade de alguns polímeros.....	34
Quadro 4 - Vantagens e desafios da MA em relação à sustentabilidade.....	37
Quadro 5 - Principais estudos sobre propriedade mecânica.....	44
Quadro 6 - Características do moinho disponível na UDESC.....	51
Quadro 7 - Características da extrusora Filmaq3D.....	54
Quadro 8 – Temperaturas utilizadas para fabricação de filamento.....	57
Quadro 9 - Características dos principais equipamentos de extrusão.....	58
Quadro 10 - Características da impressora Zmorph disponibilizada no LAPA da PUC Goiás.....	62
Quadro 11 – Temperaturas de extrusão utilizada para impressão dos corpos de prova.....	63
Quadro 12 - Considerações do ensaio na temperatura 180 °c.....	73
Quadro 13 - Considerações finais do ensaio na temperatura 200°c.....	76
Quadro 14 - Considerações finais do ensaio na temperatura de 220 °c.....	79
Quadro 15 - Considerações finais do ensaio na temperatura 240 °c.....	82
Quadro 16 - Considerações finais do ensaio na temperatura 260 °c.....	85
Quadro 17 - Considerações finais do ensaio na temperatura 280 °c.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades poliméricas do PET e PETG.....	35
Tabela 2 - Valores dos polímeros em grânulos.	59
Tabela 3 - Parâmetros dos processos e níveis atribuídos.....	63
Tabela 4 - Etapas dos ensaios de propriedades mecânica.	64
Tabela 5 - Massa final de cada ciclo na temperatura 180 °C.....	72
Tabela 6 - Massa final de cada ciclo na temperatura de 200 °C.....	75
Tabela 7 - Massa final de cada ciclo na temperatura de 220 °C.....	78
Tabela 8 - Massa final de cada ciclo na temperatura de 240 °C.....	81
Tabela 9 - Massa final de cada ciclo na temperatura de 260 °C.....	84
Tabela 10 - Massa final de cada ciclo na temperatura de 280 °C.....	87
Tabela 11 - Média de espessura em milímetros do filamento ABS reciclado na cor amarelo.	91
Tabela 12 - Média de espessura em milímetro do filamento ABS reciclado na cor natural.	92
Tabela 13 - Média de espessura em milímetro do filamento ABS reciclado na cor branca.....	93
Tabela 14 - Média de espessura em milímetros do filamento ABS virgem.	94
Tabela 15 - Média de espessura em milímetros do filamento PP reciclado na cor vermelho.	95
Tabela 16 - Média de espessura em milímetros do filamento PEAD reciclado na cor azul.	96
Tabela 17 - Média de espessura em milímetros do filamento PLA reciclado na cor laranja.	96
Tabela 18 - Custo do valor de Energia com o valor do grânulo.....	99
Tabela 19 – Payback simples.....	100
Tabela 20 – Resultado da medição da massa das amostras.....	101
Tabela 21 – Medição da densidade dos polímeros.....	102
Tabela 22 - Resultados da medição do ensaio de tração.	104
Tabela 23 - Valores obtidos a partir das curvas tensão versus deformação para PEAD a diferentes temperaturas de impressão.....	105
Tabela 24 - Resultados da medição do ensaio de flexão.	106
Tabela 25 - Resultados da medição do ensaio de dureza.	109
Tabela 23 - Força máxima de tração.	133
Tabela 24 - Área da seção transversal da amostra.....	133
Tabela 25 - Tensão máxima.....	134
Tabela 26 - Dados coletados da força máxima.....	136
Tabela 27 - Valor da área da seção transversal.	136
Tabela 28 - Valor da área da seção transversal.	137
Tabela 29 – Valor adquirido de HV de cada amostra.....	140
Tabela 30 - Área da seção da média com os dados HV – kfg/mm ²	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho auxiliado por computador)
CHDM	Ciclo Hexano Dimetilenotereftalato
CNC	<i>Computer Numerical Controlled</i> (Computador Numérico Controlado)
CP	Corpo de Prova
DS	Desenvolvimento Sustentável
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por Fusão e Deposição)
3D	Impressora Tridimensional
g	Gramas
GPa	Giga Pascal
kgf	Quilograma força
J	Joule
LOM	<i>Limited Object Manufacturing</i> (Manufatura de Objeto Laminado)
MA	Manufatura Aditiva
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
MT	Manufatura Tradicional
NC	Material Nano-Composto
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetos de Desenvolvimento Sustentável
PC	Polycarbonato
PCL	<i>Polycaprolactone</i> (Polycaprolactona)

PD	Produção Digital Direta
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PETG	Poliestireno Modificado com Glicol
PLA	Ácido Polilático
PP	Polipropileno
PR	Prototipagem Rápida
PVC	Policloreto de Polivinila
SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i> (Estereolitografia)
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> (Sinterização Seletiva a Laser)
STL	<i>Standard Triangle Language</i> (Linguagem Triangular Padrão)
TGA	<i>Thermogravimetric Analysis</i> (Análise Termogravimétrica)

1 INTRODUÇÃO

Este estudo aborda a perspectiva da inovação tecnológica em influenciar positivamente no desenvolvimento sustentável. Para tanto, é necessário tratar da viabilidade técnica na fabricação de filamentos com o uso de material reciclado, que contribui com a redução de descartes de resíduos nos aterros e depósitos públicos de lixo e, assim, favorecer o meio ambiente. A pertinência deste estudo advém do fato de que atualmente, as indústrias estão atentas às mudanças de mercado, especialmente, a partir das inovações tecnológicas, com o propósito de agregar valor ao processo produtivo e contribuir com as diretrizes sustentáveis.

É relevante descrever como a indústria enfrenta atualmente desafios para reduzir o impacto ambiental na produção. Enquanto isso, a Manufatura Aditiva (MA) está ganhando cada vez mais espaço na indústria de modo geral, com os mais diversos produtos criados a partir de polímeros virgens e reciclados. Há uma redução significativa no impacto ambiental que pode ser obtida escolhendo materiais como, por exemplo, Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) reciclados. Quando se trata de propriedades mecânicas e térmicas, o material reciclado tem se mostrado quase tão bom quanto alternativas virgens que levam a várias possibilidades de implementar esses tipos de materiais nas diversas indústrias (CLARO e CLARO, 2014).

A partir da consonância entre a necessidade e a inovação surge a tecnologia de impressão 3D dentro do processo de MA, identificada também como fabricação aditiva, manufatura aditiva por camadas, manufatura digital direta, manufatura instantânea, a qual abrange uma ampla variedade de tecnologias da produção em conformidade com a

norma *American Society for Testing and Materials (ASTM) F2792 (2010)*, Gibson *et al.* (2010) e Volpato *et al.* (2017).

Nesse contexto, a norma ASTM F2792 (2010) define o termo MA como um processo de fabricação de objetos, a partir de um modelo de desenho 3D com a junção de materiais realizados por camadas, diferentemente da metodologia de Manufatura Tradicional (MT).

A MA é caracterizada por um conjunto de inovações tecnológicas que proporcionam melhorias para a indústria, a partir de máquinas inteligentes e equipamentos, cujo intuito é o de controlar e auxiliar a produção (IVANOV *et al.*, 2013; NG *et al.*, 2015). Sua principal finalidade se encontra na integração rigorosa no processo de fabricação, na melhoria contínua, com foco nas atividades de agregar valor e evitar o desperdício (HOFMANN e MARCO, 2017).

Na prática, os processos de impressão em 3D são utilizados na criação de protótipos e peças finais, por meio de programas de auxílio em projetos, a exemplo do *Computer Aided Design (CAD)*¹, que desenvolvem objetos em 3D. Ainda, de programa de auxílio à manufatura, também conhecido como *Computer Aided Manufacturing (CAM)*. O CAM controla a impressão em camadas, desenvolvendo uma forma final por meio de processos de adição de material, cujo resultado vem se destacando pelo nível tecnológico (STEPHENS *et al.*, 2013; HUANG *et al.*, 2013; FORD e DESPEISSE, 2016; OSEJOS, 2016).

As impressões em 3D proporcionam um diferencial competitivo, atendendo a demanda crescente das indústrias por novas tecnologias, pois, implicam em uma produção mais flexível e ágil, ao possibilitar a criação de produtos cada vez mais personalizados

¹ É o nome genérico de sistemas computacionais (*software*) utilizados pela engenharia, geologia, geografia, arquitetura e *design* para facilitar o projeto e desenhos técnicos.

(HOFMANN e MARCO, 2017). Para os autores a produção industrial é impulsionada atualmente pela concorrência global e pela necessidade da produção rápida em relação às constantes mudanças de mercado. As indústrias estão investindo na MA visando a obtenção de diferenciais competitivos, mas que sejam também associados a uma contribuição ao meio ambiente, com os ganhos na diminuição de resíduos gerados durante a produção (CASAGRANDE, 2013; HAMOD, 2014; CHONG *et al.*, 2017).

Dentro do contexto de produção científica, a pesquisa trata do comparativo de insumos virgens e reciclados em peças produzidas na MA, portanto, indica a necessidade de contribuir com a literatura e buscar resposta à seguinte problemática: “Qual a viabilidade técnica na produção de insumos a partir de filamentos virgens e reciclados no processo de *Fused Deposition Modeling* (FDM)?”

A resposta para tal questão implicava na necessidade da pesquisa empírica, dado o considerável interesse da comunidade científica sobre o reaproveitamento de resíduos plásticos para a fabricação de filamentos, especialmente, quanto a sua utilização no processo de MA. Tal interesse se deve ao fato de que no Brasil, ainda são insuficientes as pesquisas acerca do assunto, razão pela qual, este estudo tem como objetivo apresentar uma análise para minimizar a produção de resíduos descartados no meio ambiente, por meio da reciclagem.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar as propriedades mecânicas de peças impressas com base no sistema de extrusão com a utilização de polímeros termoplásticos variados: ABS, Poli Ácido Lático (PLA), Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polipropileno (PP) e Poliestireno modificado com Glicol (PETG).

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos apresentados são:

- a. Caracterizar polímeros disponíveis por ensaios térmicos;
- b. Comparar o processo de fabricação de filamentos de polímeros virgens e reciclados, a fim de analisar a viabilidade técnica e econômica de reutilização de insumos;
- c. Fabricar peças com filamentos a partir de diferentes polímeros; e
- d. Avaliar a eficiência e o impacto na qualidade em relação às propriedades mecânicas e medição de massa, fazendo um comparativo com material virgem e reciclado.

1.2 Estrutura do trabalho

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, sendo que no primeiro serão abordados: a caracterização do problema, a justificativa, o problema da pesquisa e a definição dos objetivos. No segundo capítulo será apresentada a revisão bibliográfica, a qual fundamenta a pesquisa, a partir das definições e características da MA, e também estudos correlatos. No terceiro capítulo será abordada a metodologia, a qual contém todo o detalhamento do processo da pesquisa, que visa alcançar os objetivos propostos. No quarto capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios e análise dos achados. Por fim, no quinto capítulo, constam as conclusões do estudo, as limitações da pesquisa empírica e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo fornece a visão geral das tecnologias de MA, seu contexto, suas características e a descrição da aplicabilidade em algumas indústrias. Há também uma revisão de estudos anteriores sobre os aspectos da sustentabilidade. No capítulo é explorado, ainda, exemplos de literaturas correlatas. Tais exemplos destacam as indústrias que já implementaram a MA e as consequências da adoção dessa tecnologia, especialmente, nos aspectos da sustentabilidade dentro do sistema de manufatura mais amplo.

2.1 Manufatura Aditiva (MA)

Essa tecnologia é considerada uma das mais importantes inovações dos últimos anos, pois oferece a oportunidade de criar objetos mais complexos, com redução do *Lead Time*², podendo substituir algumas técnicas utilizadas na MT (HAO *et al.*, 2010; MANI *et al.*, 2014; KOHTALA, 2015; DILBEROGLU *et al.*, 2017; FORD e DESPEISSE, 2016).

Historicamente, com o desenvolvimento da MA, a primeira impressora desenvolvida foi a *Stereolithography Apparatus* (SLA) no ano de 1988. Dentre os diversos tipos de impressoras existentes para realizar a impressão 3D, tem-se: FDM desenvolvida pela Stratasys®, Sinterização Seletiva a Laser (SLS) criada pela DTM Corporation®, Laminação de Folhas (LOM) desenvolvida por Helisys®, dentre outros (LUO *et al.*, 2002; HUANG, LIU, MOKASDAR 2013; DILBEROGLU *et al.*, 2017).

² *Lead time* ou tempo de aprovisionamento ou ainda ciclo, em português europeu, é o período entre o início de uma atividade, produtiva ou não, e o seu término.

A MA para os autores como Hao *et al.* (2010), Petrick e Simpson (2013), Mani *et al.* (2014), Chen *et al.* (2015), Osejos (2016) e Volpato *et al.* (2017), apresentaram algumas vantagens nesse processo, dos quais destaca se: a complexidade das peças, criação de peças personalizadas, adaptação e acesso a novos nichos de mercado, utilização de um único equipamento para fabricação das peças, redução de peso e maior flexibilidade, redução de insumos e transporte para o abastecimento da cadeia de suprimentos, além da produção de pequenos lotes.

Apesar das vantagens que a MA oferece, também possui as limitações, conforme a abordagem dos autores como Berman (2012), Petrick e Simpson (2013), Huang *et al.* (2013), Osejos (2016) e Volpato *et al.* (2017), como por exemplo, a constatação de que a velocidade de fabricação das peças é lenta, quando comparada ao processo tradicional; o fato de que algumas impressoras 3D possuem um custo alto. Ainda, em relação à qualidade das peças, em razão de existirem algumas imperfeições devido à presença de vazios que podem ocorrer durante o processo de camada por camada.

Vale lembrar que o processo de fabricação da MA surgiu devido às limitações do *Computer Numerical Controlled* (CNC)³. Havia a necessidade de realizar uma configuração e um novo planejamento de todo o processo, principalmente em relação às partes mais complexas. No caso da geometria das peças, estas estavam sendo fabricadas por esta máquina e era necessário definir como seria realizada esta etapa para fabricar a peça conforme o desenho.

Por outro lado, o processo de impressão 3D é uma oportunidade para diversas áreas da indústria. Possibilitam facilitar a criação de protótipos na produção final e proporcionar a substituição do método tradicional (VOLPATO *et al.*, 2017). As indústrias, como a

³ É uma máquina de usinagem que possui vários estágios para fabricação de uma peça, o qual necessita de auxílio de operadores para reposicionar a peça dentro de uma máquina (GIBSON *et al.*, 2010).

automotiva, a médica, a de energia, da aeronáutica, de produtos elétricos, de joias, da engenharia civil e da arquitetura já adotaram esta tecnologia. No entanto, alguns setores ainda possuem a visão de que a MA não é viável quando implantada no processo produtivo (SREENIVASAN *et al.*, 2010).

Volpato *et al.* (2017) realizou um estudo em 127 indústrias e verificou quais os setores que já aplicaram a tecnologia MA em seu processo produtivo, obtendo os seguintes resultados: 29% peças funcionais, 18% encaixe e montagem, 10% modelos de molde para protótipo, 10% auxílio visual, 9% modelos de fundição de metal, 9% modelos de apresentação, 9% pesquisas e educação, 4% componentes para ferramentas e 2% outros tipos de áreas que não foram identificadas, conforme demonstrado na Figura 1.

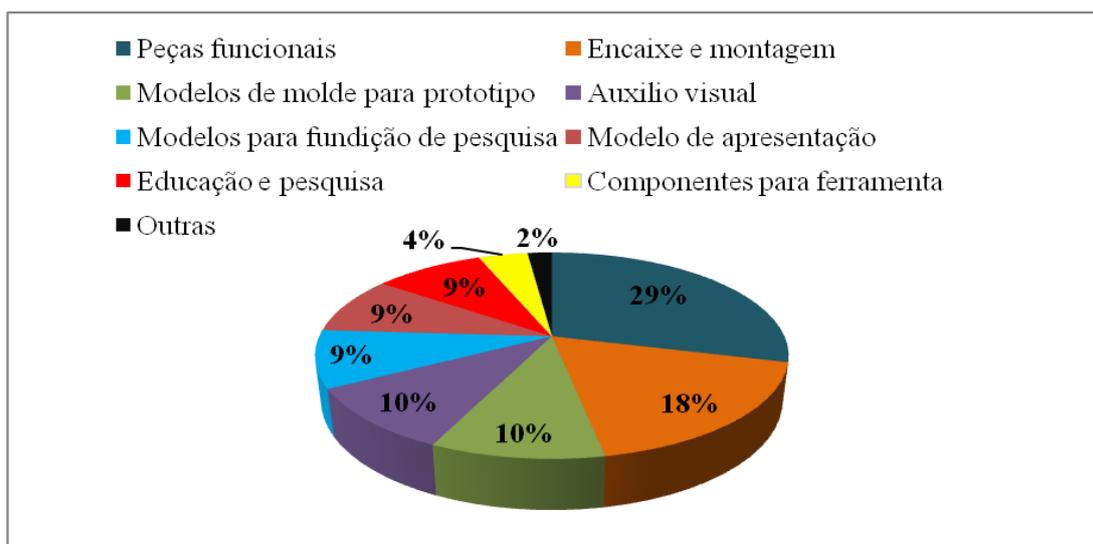


Figura 1 – Gráfico dos setores de aplicação de indústrias na MA.

Fonte: Volpato *et al.* (2017).

Nota-se que alguns setores, além das indústrias, já estão optando implantar a MA por oferecer um produto de qualidade e atender às necessidades dos clientes de forma mais rápida que a MT. Vale ressaltar que este tipo de tecnologia está se popularizando, e situações em que estão se demonstrando adequadas a outros segmentos, tais como para

o uso doméstico, ora pelas vias da customização, ora por meio da produção de brinquedos em geral, além do setor de confeitaria.

Essa versatilidade está baseada nos pontos que diferenciam as tecnologias da MA em relação a MT, como: o aspecto físico quanto ao tipo de método, a rugosidade da borda da peça, resistências química e mecânica, velocidade de impressão, volume e tempo de impressão, necessidade de suporte, possibilidade de múltiplas cores, dentre outros tipos de materiais. Se diferenciam também quanto ao seu desenvolvimento, o qual, no caso do MA é composto por oito etapas, conforme destacado na Figura 2 (MARTINS *et al.*, 2010; GIBSON *et al.*, 2010; GIORDANO, 2012; RAULINO *et al.*, 2013; VOLPATO *et al.*, 2017).

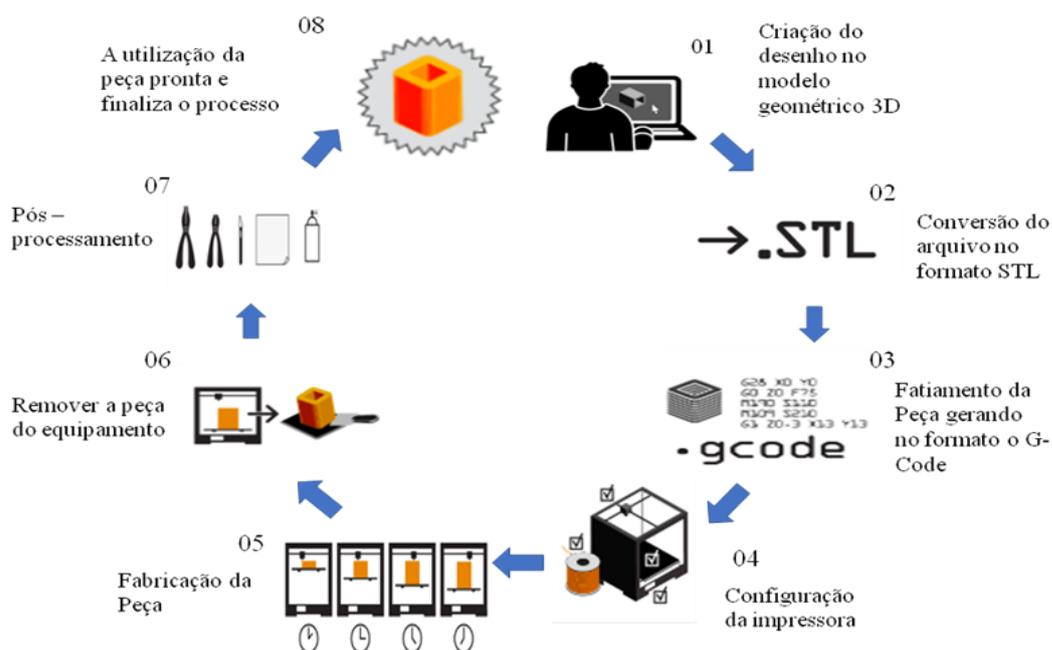


Figura 2 - Etapas dos processos de MA.

Fonte: Autora (2018).

Quanto ao processo, a MA é composto pelas seguintes etapas:

1º Criação de um desenho com o auxílio do *Software CAD* que realiza uma representação de um modelo tridimensional;

2º Conversão do modelo 3D para o formato de um arquivo *Standard Tessellation Language* (STL);

3º Esse arquivo é transferido para outro *software* como, por exemplo, o *Voxelizer*, *Slicer*, *Kisslicer*, *Cura*, *Inventor*, dentre outros, que realizam o fatiamento de toda peça, mostrando como será realizada a impressão camada por camada, determinando os parâmetros do objeto impresso, como a espessura da camada, a velocidade para realizar a impressão e qual o tipo de insumo que será utilizado gerando o arquivo G-Code;

4º Preparando a impressora caso haja necessidade de realizar a calibração do equipamento;

5º É a etapa de construção do objeto em um processo automatizado, correspondendo ao momento de imprimir a peça desejada em que não há necessidade de supervisionar o processo na maioria dos casos;

6º Após a conclusão da peça, ela deve ser removida do equipamento quando houver o resfriamento da mesa;

7º Ao realizar a retirada da peça algumas podem ter a necessidade da retirada de suportes que foram impressos; e

8º A peça está pronta para ser utilizada.

O diferencial nos processos de impressão em 3D da MA é a matéria prima que pode ser utilizada e o seu método de formação ser por camadas. A Figura 3 apresenta de forma resumida os processos abordados por Gibson *et al.* (2010), Petrovic *et al.* (2011), Osejos (2016), Dilberoglu *et al.* (2017) e Volpato *et al.* (2017).

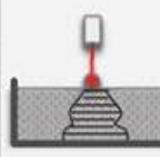
	Material Extrusão	Foto Polimerização	Pó cama Fusão	Folha de Laminação
FIGURA				
PROCESSO	Deposição de um material fundido por um cabeçote de extrusor realizando camada por camada	Aplicação de uma luz Ultra Violeta (UV) para curar um polímero fotocurável por um laser	Fusão de pó por um feixe laser passando por um armazenamento, derretendo toda a região selecionada	A junção das camadas pode ser feita por colagem ou ligação adesiva, ligação térmica e soldagem
MATERIAIS	Filamentos de polímeros termoplásticos	Resinas Líquidas, Polímeros Fotosensíveis	Polímeros, Cerâmicas e Metais	Papel, Metal e Polímeros
NOME	FDM	SLA	SLS	LOM

Figura 3 - Diferença entre os tipos de impressões 3D na MA.

Fonte: Adaptado de Gibson *et al.* (2010), Petrovic *et al.* (2011), Osejos (2016), Dilberoglu *et al.* (2017) e Volpato *et al.* (2017).

Os maiores ganhos entre os processos de impressão estão na preocupação com desperdício da matéria prima (PICESOTWARE, 2014).

Tais processos acarretarão para o futuro a substituição por completo da MT pela MA em diversas situações, agregando diversos benefícios para a indústria, a partir dos vários ganhos tecnológicos ao processo de produção em todos os segmentos industriais (BERMAN, 2012).

2.2 Manufatura Aditiva por extrusão

O processo tecnológico que será abordado neste estudo é a *Fused Deposition Modeling* (FDM), que é um dos mais utilizados para a fabricação de protótipos por meio do método de extrusão de filamentos, a qual foi desenvolvida em 1988, patenteada e comercializada em 1992 pela empresa Stratasys®. Na Figura 4 é apresentado o esquema deste processo (GIBSON *et al.*, 2010; VOLPATO *et al.*, 2017).

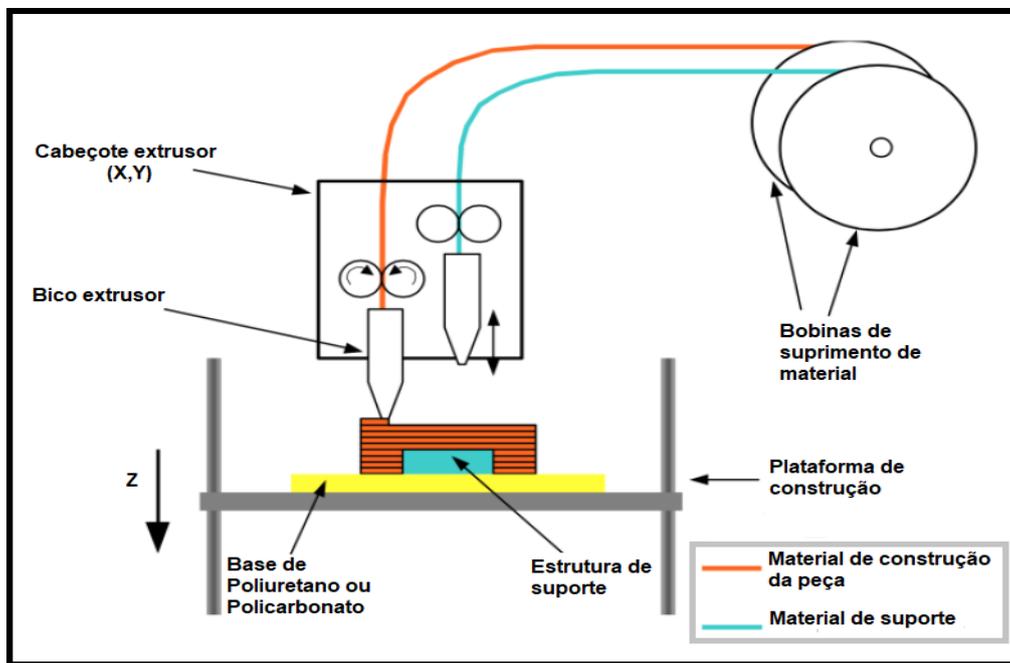


Figura 4 - Etapas do processo FDM da Stratasys.

Fonte: adaptado de Volpato *et al.* (2017).

O processo de impressão FDM é composto por um cabeçote extrusor que se movimentava no plano horizontal no eixo X e Y, depositando o filamento derretido que passa pelo processo de extrusão sobre a plataforma aquecida que se desloca para baixo, representando assim o eixo Z. O material derretido é depositado sob camada que vai se aderindo em todas as camadas, imprimindo a peça até o final (PEREIRA, 2014; VOLPATO *et al.*, 2017).

Segundo Hossain *et al.* (2013) e Volpato *et al.* (2017) os principais parâmetros que controlam o processo baseado em extrusão são: a largura do filamento⁴, a espessura da camada, número de contornos, a distância entre as linhas de preenchimento e contorno, também conhecidas por *raster* (BRANDÃO e SANT'ANNA, 2005). Conforme Figura 5.

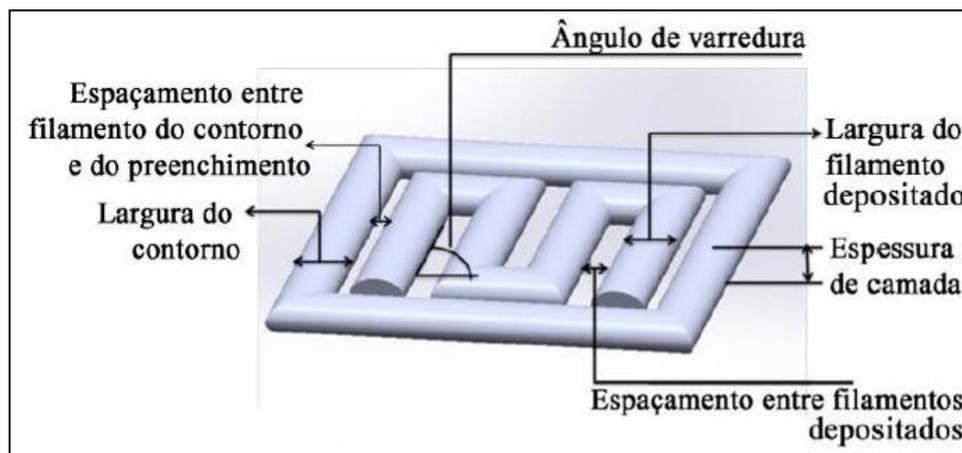


Figura 5 - Parâmetros do processo FDM.
Fonte: Hossain *et al.* (2013).

Além destes parâmetros há outro fator importante que é a temperatura do bico de extrusão e da base, que variam de acordo com cada tipo de matéria prima que será utilizada neste processo (MAGALHÃES, 2010).

Volpato *et al.* (2017) e Lima (2009) descreveram algumas estratégias para o processo de preenchimento interno para construção da peça, conforme a Figura 6, tais como:

- a. Preenchimento: é caracterizado por diversos tipos possíveis de trajetória, podendo ser do tipo zigue-zague, linear, colmeia de abelha, concêntrico, retilíneo, curva de Hilbert, cordas arquimedeanas, espiral octogonal, entre outros;
- b. Contorno: preenchimento da peça por meio da repetição do contorno de forma concêntrica; e

⁴ Corresponde a alteração do diâmetro do bico.

- c. Contorno e preenchimento: é uma combinação das duas estratégias de preenchimento iniciando com contorno e finalizando com preenchimento.

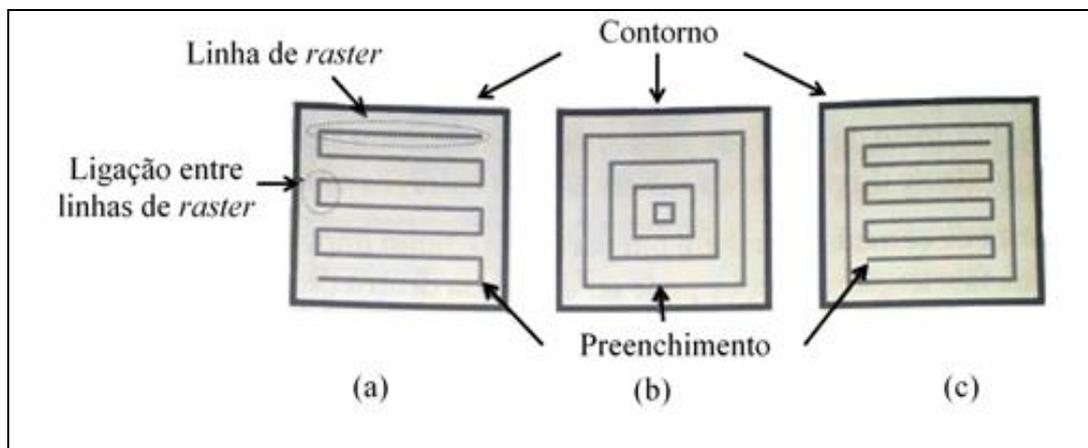


Figura 6 - Padrões de estratégias de preenchimento das camadas no processo de extrusão: (a) Peça com um contorno e preenchimento do tipo linear (b) Peça preenchida de forma concêntrica com contornos e (c) Combinação de preenchimento com linhas de contorno e linear.

Fonte: Volpato *et al.* (2017).

As principais variáveis para a qualidade interna e externa das peças criadas por este tipo de impressão é a partir da extrusão. Sendo que existem outras características que podem afetar a qualidade, que estão divididas em quatro grupos, como apresentado no Quadro 1 (VOLPATO *et al.*, 2017).

Quadro 1 - Variável do processo de extrusão.

Operação	Máquina	Geometria	Material
Espessura do fatiamento	Diâmetro do bico	Comprimento do setor	Viscosidade
Largura do filamento depositado	Taxa de alimentação do material (filamento)	Estrutura de suporte	Rigidez do filamento
Velocidade do cabeçote	Velocidades do parafuso extrusor	Quantidade de trechos de preenchimento	Flexibilidade
Temperatura de extrusão	Vazão	Tempo entre deposição de camadas	Condutividade térmica
Temperatura de mesa	Aquecimento	Tempo de aquecimento da mesa	Condutividade térmica
Padrão de preenchimento	Convecção do interior	-	Características do ligante

Fonte: Volpato *et al.* (2017)

2.2.1 Polímeros utilizados como matéria prima na FDM

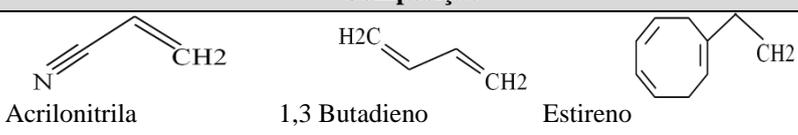
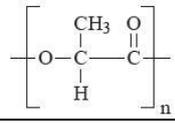
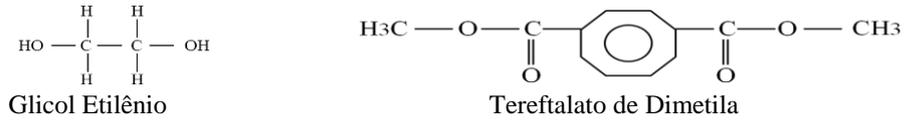
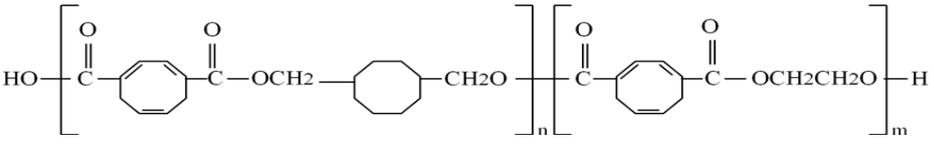
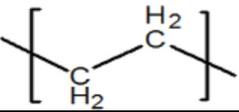
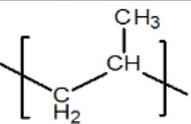
A FDM utiliza como matéria prima os polímeros termoplásticos na forma de filamentos enrolados em bobina. Estes polímeros são compostos por cadeias de moléculas, as quais, quando submetidas a elevadas temperaturas, tomam formas que são estabilizadas em temperaturas ambientes. Razão pela qual, verifica-se a possibilidade de se realizar o processo de reciclagem diversas vezes, devido às características do material que é flexível e resistente (PARENTE, 2006; SANTOS, 2006; HAMOD, 2014).

Esses polímeros termoplásticos são compostos por duas fases, dependendo do grau de intermoleculares: a estrutura amorfa que é responsável pelas propriedades elásticas dos materiais, e a estrutura cristalina responsável pelas propriedades mecânicas de resistência ao impacto, bem como às altas e baixas temperaturas (HAMOD, 2014).

Dentre os tipos de polímeros mais utilizados no processo FDM, estão: ABS e PLA (BORAH, 2014), porém, Hausman e Horne (2014), Hunt *et al.* (2015), Kreiger *et al.* (2014) e Horvath e Cameron (2015) apresentaram outros tipos de polímeros que podem ser usados para impressão, como: PET, PEAD e o PP.

O estudo aqui apresentado aborda três (PEAD, PP e o PETG) dos principais tipos de polímeros mais comercializados. Tais opções foram baseadas no baixo custo e na facilidade em serem processadas várias vezes (ABIPLAST, 2018). Mas incluiu também os polímeros ABS e o PLA, por serem os polímeros mais utilizados no processo de impressora FDM. Em ambos os casos, o objetivo é apresentar as características de propriedades mecânicas e a temperatura de extrusão para realizar a impressão de uma peça. O Quadro 2 apresenta a estrutura molecular de alguns polímeros que estão sendo estudado nesta pesquisa como ABS, PLA, PETG, PEAD e o PP.

Quadro 2 – Composição de alguns polímeros.

Polímero	Composição
ABS	 <p>Acrilonitrila 1,3 Butadieno Estireno</p>
PLA	
PETG	 <p>Glicol Etilénio Tereftalato de Dimetila</p>  <p>PET + 1,4 Ciclohexanodimentanol</p>
PEAD	
PP	

Fonte: Adaptado por Wiebeck e Harada (2005) e Castelli (2012).

O Quadro 3, apresenta as características e a aplicabilidade de cada polímero de acordo com cada temperatura de fusão e de aquecimento para iniciar o processo de impressão, de acordo com alguns estudos.

Quadro 3 - Principais características e aplicabilidade de alguns polímeros.

Tipo de Polímero	Características	Aplicabilidade	Temperatura para MA		Autor
			Fusão	Mesa	
ABS	Oferece uma ótima resistência química e térmica, sendo um material rígido e resistente quanto ao impacto, altas e baixas temperaturas, é de fácil manuseio, com um ótimo brilho, é um material inflamável e solúvel em alguns solventes orgânicos.	Revestimento de refrigeradores, eletrodomésticos, brinquedos, e filamentos para impressoras 3D.	220 – 260 °C	80 – 110 °C	Castelli (2012), Hamod (2014), Albuquerque (2014), Horvath e Cameron (2015), Steinle (2016)

Cont.

Tipo de Polímero	Características	Aplicabilidade	Temperatura para MA		Autor
PLA	O material é biodegradável, resistente e apto para moldar peças no processo de extrusão, injeção, sendo uma fonte renovável e que se degrada na natureza.	Embalagens alimentícias, canetas, tampas, copos, bandejas e filamentos de impressão 3D.	160 - 220 °C	70 - 100 °C	Lim <i>et al.</i> (2008), Brito (2012), Castelli (2012), Soares (2012), Bijarimi (2012), Horvath e Cameron (2015)
PEAD	Resistente ao impacto e alta temperatura, tendo um baixo custo, possui boa resistência química e é flexível e de fácil manuseio.	Garrafas flexíveis, brinquedos, cosméticos, caixas de alimentos e bandejas.	160 – 260 °C	70 - 100 °C	Chong et al. (2017), Castelli (2012), Bastian (2012), Hamod (2014)
PP	Baixa densidade, baixo custo, é um material rígido resistente à impactos e altas temperaturas, é fácil para ser moldado, com excelentes propriedades elétricas, com resistência à luz ultravioleta.	Embalagens de alimentos, peças automotivas, placas de produtos eletrônicos, garrafas e malas.	200 – 220 °C	30 – 70 °C	Harada (2004), Araujo (2010), Castelli (2012), Gelhausen <i>et al.</i> (2018)
PETG	PET modificado com alto teor de Glicol para reduzir a cristalinidade e aumentar a resistência quanto ao impacto e à substâncias químicas, é um material de baixo custo, flexível e de fácil manuseio.	Embalagens de alimentos, pára-brisa, proteção de máquinas e prateleiras.	235 – 255 °C	20 – 85 °C	Wiebeck e Harada (2005) e Locker (2018)

Fonte: Autora (2018).

O PETG é um polímero amorfo obtido quando se adiciona um monômero⁵ com o alto teor de Ciclo Hexano Dimetilenotereftalato (CHDM), permitindo-o ter uma melhor resistência o que aumenta sua ductilidade. Com essa modificação, o polímero apresenta algumas propriedades que facilitam seu manuseio, permitindo que o material seja mais resistente. O PETG possui, ainda, um alto valor de cristalinidade (WIEBECK e HARADA, 2005). Conforme a Tabela 1 é possível comparar as propriedades poliméricas do PET e o PETG.

Tabela 1 - Propriedades poliméricas do PET e PETG.

Características	PET	PETG
Densidade (g/cm ³)	1,15	1,27
Ponto de fusão (°C)	180	250
Temperatura de transição vítrea (°C)	75	88

Fonte: Wiebeck e Harada (2005).

⁵ E uma pequena molécula que pode ligar-se a outros monômeros formando moléculas maiores denominadas polímeros.

Quanto ao PET, apesar de ser o polímero mais reciclado do mundo, a reciclagem utilizada é a mecânica, por ser o processo mais barato e passar por diversos ciclos. As etapas da reciclagem são as seguintes: trituração do material, lavagem e secagem com temperatura de 160°C com a permanência de no mínimo 5 horas, para eliminar todo o líquido do material; desumidificação, para retirar toda a umidade do ar que foi provocado pela etapa de secagem; e o reprocessamento do material que pode ser pelo método de sopro, injeção e/ou extrusão, dando origem a uma peça ou grânulos (WIEBECK e HARADA, 2005).

Um processo importante a ser descrito sobre os polímeros é o da reciclagem, que traz vários benefícios para a sociedade de modo geral, e para o meio ambiente, particularmente. Dentre os benefícios, destacamos a redução do número de resíduos eliminados nos aterros (MANI *et al.*, 2014). Como exemplo dessa redução, tem-se a associação da MA ao processo FDM, que utiliza como matéria prima os filamentos termoplásticos, e estes materiais podem ser alcançados a partir da reciclagem de polímeros, produzindo um novo filamento aplicado na MA.

Vale lembrar, que o processo de reciclagem envolve o reprocessamento de resíduos plásticos em novos ou diferentes produtos, como por exemplo, a fabricação de filamentos para impressoras 3D. Por conseguinte, conta com algumas etapas como: a coleta de resíduos plásticos, a separação, a limpeza do material de acordo com cada termoplástico, secagem, trituração e por último o processo de extrusão (HAMOD, 2014).

2.3 Manufatura Aditiva a partir da visão sustentável

Explorar o tema MA por meio das lentes da sustentabilidade industrial fornece a compreensão mais abrangente das implicações contributivas à sustentabilidade, a partir

dos sistemas industriais sustentáveis. As contribuições do processo da MA ao meio ambiente fazem com que as organizações se sintam atraídas por seus benefícios. O resultado desse interesse repercute em investimentos, cujos objetivos estão no âmbito social e ambiental, mas também pela possibilidade de tornarem-se mais competitivas no mercado. As empresas que possuem essa preocupação, e trabalham em prol da sustentabilidade, almejam benefícios ambientais, sociais e econômicos (CLARO e CLARO, 2014).

Nesse sentido, os estudos de Ford e Despeisse (2016) contemplam uma discussão que aponta para as vantagens e consequentes desafios a serem ainda enfrentados nas questões que envolvem a sustentabilidade no processo de MA. Essa ambivalência pode ser identificada como contribuições positivas ao longo do ciclo de vida dos produtos, conforme Quadro 4.

Quadro 4 - Vantagens e desafios da MA em relação à sustentabilidade.

	Vantagens	Desafios
Reestruturação do produto	Custo e tempo reduzido e melhor durabilidade do produto	Integrar considerações de sustentabilidade usando <i>design</i> para o meio ambiente
Processamento de entrada de material	Maior eficiência de recursos da matéria prima	Eliminar a contaminação do material
Componente e fabricação de produtos	Fabricação sob encomenda	Confiabilidade das tecnologias, alto custo da máquina
Uso do Produto	Melhor funcionalidade e durabilidade	Desempenho incerto de produtos durante o ciclo de vida
Reparação	Redução de resíduos durante o processo de reparo	Benefícios dos produtos e serviços baseados na MA, implementando sistema de manutenção
Reciclagem	Melhoria da eficiência dos materiais e uso de produtos reciclado	Educar os consumidores sobre a reciclagem de plástico MA

Fonte: adaptado de Ford e Despeisse (2016)

Entretanto, Ford e Despeisse (2016) e Osejos (2016) discordam de ganhos da MA ao meio ambiente, em relação aos estudos apresentados por Kohtala (2015), Mani *et al.* (2014) e Huang *et al.* (2013) os quais defendem que a MA reduz o impacto ambiental. Ford e Despeisse (2016) e Osejos (2016) afirmam que o ciclo de vida das peças impressas por esta tecnologia dependerá da especificação de cada peça, do tipo de impressora 3D e do tipo de insumo que foi utilizado para ser processada.

Percebe-se, portanto, para além das controvérsias, que os processos de impressão 3D trazem consigo mudanças conceituais em organizações cuja a preocupação esteja voltada ao meio ambiente, e também, naquelas em que a reciclagem do material representa uma alternativa sustentável. Exemplos de efetividade no quesito sustentabilidade, mostram ter havido a redução de 70% de impacto ambiental, quando utilizada a fabricação aditiva em comparação à fabricação tradicional (HUANG *et al.*, 2013; KREIGER *et al.*, 2014; MANÇANARES, 2016).

Desse modo, fazer com que a inovação tecnológica contribua para o desenvolvimento sustentável, em geral, e para a sociedade que exige componentes de melhoria contínua, em particular, exigirá ainda maior clareza na conceituação do próprio processo de inovação, seja na identificação de barreiras à inovação ou no desenvolvimento de pesquisas científicas (ANADON *et al.*, 2016). No entanto, a literatura raramente é explícita quanto aos problemas específicos enfrentados na produção, e na busca em promover o desenvolvimento sustentável por meio do processo de produção.

Nesse contexto, a adoção de MA anuncia o futuro em que a cadeia de valor é mais curta, mais localizada, mais colaborativa e que oferece benefícios significativos de sustentabilidade (FORD e DESPEISSE, 2016). De forma elucidativa, enumerou se três desses benefícios conforme os autores Ford e Despeisse (2016):

- a) Melhoria na eficiência de recursos: benefício alcançado nas fases de produção e uso, pois esses processos e produtos de manufatura podem ser reprojatados para MA;
- b) Maior vida útil do produto: benefício alcançado por meio de abordagens técnicas, como reparo, remanufatura e reforma, e padrões socioeconômicos mais sustentáveis em relações mais estreitas entre produtores e consumidores;
- c) Cadeia de valor reconfigurada: benefícios alcançados por essas - cadeias de suprimentos - serem mais curtas e simples, produção mais localizada, modelos de distribuição inovadores e novas colaborações.

No entanto, apesar dos benefícios descritos acima serem prospectivos, a MA ainda não foi suficientemente explorada do ponto de vista sustentável. Embora possa ser uma facilitadora e uma força motriz que resulte na sustentabilidade industrial, as consequências de sua implementação no sistema industrial podem levar a um cenário alternativo inadequado. Por tal cenário, por exemplo, poderia haver uma demanda dos clientes por produtos personalizados e uma taxa mais alta de obsolescência do produto, que se combinadas, acarretariam em um aumento no consumo de recursos.

Até o momento, há poucos estudos que abordem amplamente as implicações de sustentabilidade na MA (GEBLER *et al.*, 2014, KOHTALA, 2015); alguns estão focados na questão do consumo que utiliza de material e energia (BAUMERS *et al.*, 2011, FALUDI *et al.*, 2015), porém, quando se trata dos impactos da MA na sustentabilidade, os estudos abordam de maneira superficial.

2.3.1 Processo de extrusão de plástico

O processo de extrusão é considerado uma das técnicas mais utilizadas na indústria de reciclagem de plástico. O processo é constituído por um funil, responsável por

armazenar e conduzir plástico triturado até o canal de extrusão. Chegando ao canal de extrusão, o material é forçado por um parafuso, geralmente helicoidal, por uma matriz que determina o diâmetro do filamento gerado. O filamento extrudado é resfriado e enrolado em uma bobina, conforme a Figura 7 (HAMOD, 2014; PEREIRA, 2014; RODRIGUES, 2017).

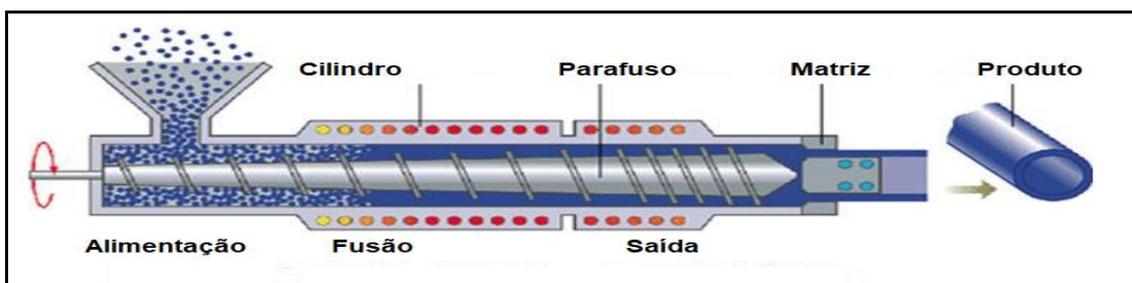


Figura 7 - Esquema do processo de extrusão.

Fonte: adaptado de Abiplast (2014).

No momento da extrusão, em alguns casos, há necessidade da utilização de ferramenta denominada puxador de filamento. A principal função dessa ferramenta é a de ajustar a espessura final do filamento, pois, o polímero ao passar pela extrusão pode sofrer pressões residuais dentro da matriz, aumentando seu diâmetro após sua saída.

Este equipamento é composto por dois cilindros paralelos revestidos por uma superfície emborrachada, que conta com o auxílio de um motor com a velocidade controlada de acordo com a saída da matriz da extrusora, para que possa puxar o filamento e atingir o diâmetro ideal de 1,75 mm ou de 3,00 mm. A Figura 8 apresenta os componentes de um puxador (RODRIGUES, 2017).

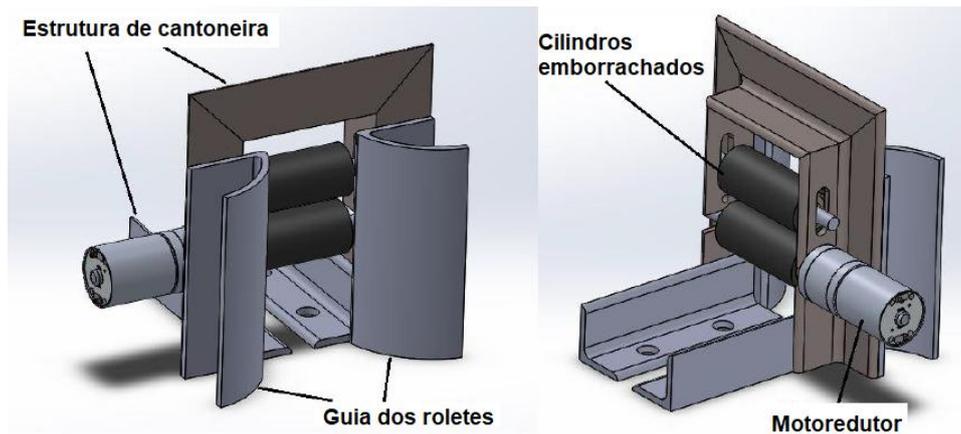


Figura 8 - Esquema do componente do puxador.

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2017).

Após a montagem do puxador, o processo completo da extrusora ocorre conforme a Figura 9. O equipamento apresenta diversas aplicações importantes na manufatura de produtos obtidos a partir do referido processo, dentre os quais são utilizados nas indústrias para fabricação de tubos, folhas de plásticos, sacolas, mangueiras, chapas e também para filamentos com diâmetro de 1,75 mm e 3,00 mm, geralmente utilizados na impressora 3D (KANTOVISCKI, 2011; FLEMING *et al.*, 2012; HAMOD, 2014).

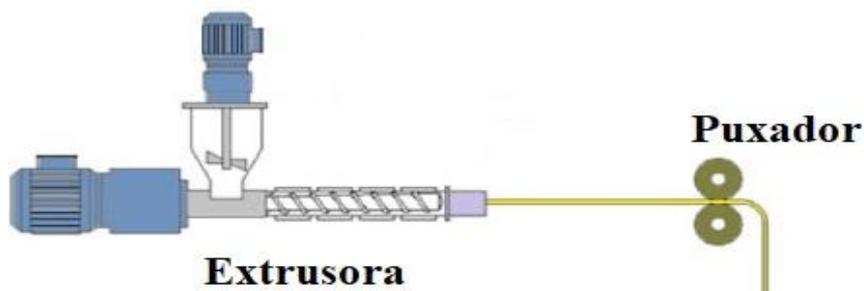


Figura 9 - Esquema do processo de extrusora com puxador.

Fonte: adaptado de Fleming *et al.* (2012).

Há outros aspectos importantes, a exemplo da comercialização de filamentos, que se tornou um nicho de mercado promissor, notadamente, após a popularização das impressoras 3D, por ser considerada de baixo custo. A matéria prima é utilizada para a fabricação de qualquer tipo de peça, sendo capaz de oferecer produtos personalizados

em pequenas quantidades e com ótima qualidade (BERMAN, 2012; GEBLER *et al.*, 2014; NOVOA e ALMEIDA, 2016).

2.4 Trabalhos correlatos

Para o embasamento deste estudo, foi necessário buscar literaturas relacionadas ao objeto aqui estudado, como exemplo, o estudo de Santana (2015) que apresentou a utilização de um equipamento baseado em extrusão. Nele, o autor afirma que utilizou o insumo PLA na cor natural e amarela, o estudo contou ainda com o auxílio de um microscópio e não apresentou efeitos significativos em relação a qualidade da peça fabricada. Os defeitos encontrados foram os vazios na peça impressa, na união entre alguns pontos da peça, provocados pelo filamento. Defeitos que ocorreram devido aos problemas na alimentação do material, o que reforça a importância da qualidade da união entre os filamentos.

Osejos (2016) descreveu as características dos filamentos ABS e PLA com diversificação de cores. Utilizando – se um microscópio foi detectada uma deformação uniforme em todas as peças de teste, e isso demonstrou boa aderência entre as camadas da peça.

Novoa (2014) apresentou o estudo sobre a influência das condições das peças impressas com o polímero PEAD utilizando o processo FDM com três temperaturas e parâmetros de controle, a espessura da camada foi constante e foi detectado que nesse tipo de polímero é possível realizar impressão, sem que ocorra qualquer alteração na qualidade da peça final.

O estudo desenvolvido por Hamod (2014), objetivou determinar os parâmetros para fabricação de filamentos com os resíduos de polímero PEAD reciclado, a partir da comparação entre ABS, PLA e PEAD, e foi percebido que o PEAD reciclado é adequado para fabricação de filamento, por ser o polímero com as características

semelhantes ao PLA. Em ambos os casos não houve diferença quanto à qualidade da peça impressa.

Chong *et al.* (2017) apresentaram avaliação da viabilidade na fabricação de um filamento de impressão 3D utilizando polímero PEAD reciclado. Na realização do experimento foram utilizados três tipos de materiais: PEAD em *flakes*, o qual foi triturado com um auxílio de um moinho, o PEAD em grânulos e o ABS virgem em grânulos, a fim de proporcionar comparação. Esses grânulos passaram pela extrusora *Filastruder* com uma matriz de 3,00 mm e notou-se que a fabricação de filamentos é uma opção viável, ainda, dentre os resultados satisfatórios, destaca-se o diâmetro dos filamentos produzidos, que ficaram na faixa de 2,93 mm a 3,17 mm com variação de 0,22 mm a 0,30 mm.

Bleijerved (2014) realizou alguns experimentos para fabricação de filamentos com os polímeros PLA, PEAD, PP e o PET, provenientes de material reciclado, e demonstrou que há possibilidade de impressão em 3D. Ainda, que o PLA e o PEAD são totalmente aceitáveis, inversamente ao PP, que apresentou bolhas no filamento durante o processo, ainda assim, o resultado após a impressão da peça foi satisfatório.

Outro experimento realizado pelo Bleijerved (2014) foi com o material PET, em que não foi possível fabricar o filamento para ser utilizado na impressora 3D, pois durante o processo obteve a mistura de PET amorfo e PET cristalizado. Essa ocorrência não levou a um resultado homogêneo, e com isso constatou-se que antes de passar pelo processo de extrusão, esse material deve passar por uma etapa especial para realizar a secagem e cristalizar os *flakes*. A Figura 10 apresenta os resultados encontrados por Bleijerved (2014).

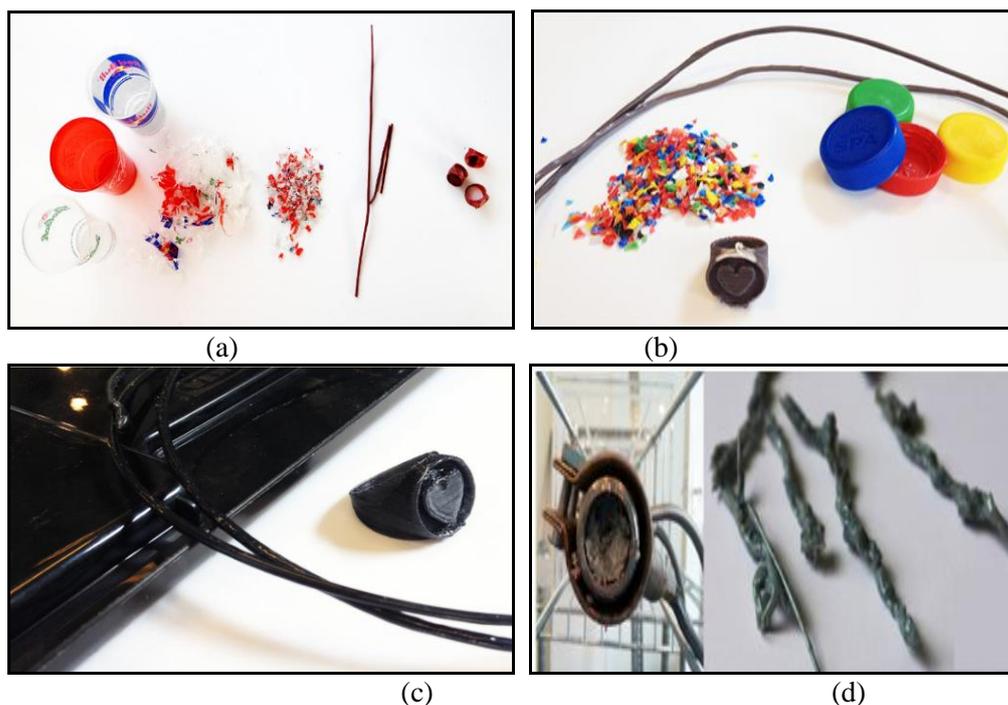


Figura 10 - Filamento fabricado por resíduos de plásticos: (a) PLA; (b) PEAD; (c) PP; e (d) PET.

Fonte: Bleijerveld (2014).

A análise da propriedade mecânica por meio dos ensaios de tração e flexão tem sido bastante discutida na literatura, visando avaliar a qualidade das peças impressas com tipos diferentes de polímeros (Quadro 5).

Quadro 5 - Principais estudos sobre propriedade mecânica.

Autor	Tipo de Polímero	Análise	Conclusão
Novoa (2014)	PEAD	Avaliou o comportamento mecânico com os ensaios de tração, em que os corpos de prova impressos com três diferentes temperaturas foram ensaiados até a ruptura.	Neste ensaio foi encontrado que os corpos de prova tiveram um comportamento irregular de deformação até a ruptura, devido a característica da impressão, ou seja, a forma que foram fabricadas por empilhamento até construir a peça.
Santana (2015)	PLA	Foram fabricados corpos de prova com três diferentes temperaturas, com velocidade e espessura para serem submetidos em um ensaio mecânico de flexão em três pontos, com o objetivo de obter a resistência máxima a ruptura.	O ensaio de flexão realizado com o PLA natural apresentou um comportamento mais rígido, portanto, mais frágil, e notou-se que a construção das camadas não deformou após aplicação de carga no ensaio. Já, o ensaio de flexão com o PLA amarelo, houve a separação das camadas conforme a aplicação da força durante o ensaio.

Cont.

Autor	Tipo de Polímero	Análise	Conclusão
Osejos (2016)	ABS e PLA	Na impressão do corpo de prova foram utilizados 5 tipos de estratégias de preenchimento para os ensaios de flexão e de tração, e para os ensaios de tração foi utilizado velocidade constante de 50 mm/min.	O ensaio de flexão de PLA mostrou que o preenchimento diagonal obteve a melhor resistência. Já, o ensaio de tração apresentou o preenchimento sólido com melhor resistência. O ensaio de tração de ABS com o preenchimento quadrado obteve a melhor resistência, e de flexão o preenchimento circular apresentou o melhor resultado.
Anderson (2017)	PLA	Analisou as propriedades mecânicas de ensaios de tração, dureza, módulo de elasticidade e cisalhamento em comparação com o material virgem e reciclado.	Ao realizar os ensaios percebeu que com o filamento reciclado a tração e a dureza foram reduzidas, já o cisalhamento aumentou e o módulo de elasticidade e ficou inalterado em comparação com o filamento virgem, foram encontrados diferenças em relação aos resultados das propriedades mecânicas, ou seja, os resultados dos ensaios do corpo de prova reciclado sempre foi mais baixo que o virgem.
Li <i>et al.</i> (2017)	PLA	Foram fabricados corpos de prova PLA com uma diversificação de parâmetros, e analisou as propriedades mecânicas de ensaio de tração.	Ao realizar o ensaio, percebeu-se que os resultados de tração dependem da espessura da camada, e a velocidade que foi utilizada para impressão.
Haq <i>et al.</i> (2017)	PCL, PLA	Foi realizada a mistura do polímero PLA e PCL com 30 a 70%. Após esta mistura, foram fabricados corpos de prova para realizar testes de tração, flexão e impacto.	Ao realizar o ensaio, foi adicionado de 30 a 70% de PLA e PCL, e notou-se que o corpo de prova com adição de 30% de PLA e 70% de PCL, foi o que teve a maior força quanto ao impacto, à resistência a tração e flexão, sendo a formulação que possui a melhor resistência mecânica com esta porcentagem de mistura de polímeros feita.

Fonte: Autora (2018).

Além dos já citados, outros estudos analisaram também a caracterização do material por meio da Análise Termogravimétrica (TGA), utilizando o equipamento Analisador Térmico Simultâneo, com a temperatura de 25 °C a 700 °C (MRÓZ *et al.*, 2013; NOVOA, 2014; BOPARAI *et al.*, 2016; WOJTYLA *et al.*, 2017; GKARTZOU *et al.*, 2017; JIANG, SMITH, 2017; ZHAO *et al.*, 2018, DUL *et al.*, 2018), e STA 449 F1 Jupiter® com a temperatura de 30 °C a 700 °C (SANTANA, 2015), ambos com a taxa

de aquecimento de 10 °C/min, na atmosfera de nitrogênio, a fim de obter a temperatura inicial e a máxima de degradação e a perda de massa de cada polímero.

Kodjie *et al.* (2006) realizaram o ensaio de TGA para avaliar a estabilidade térmica do PEAD, e notou que o PEAD puro começa ter perda de massa de 5% na temperatura de 369 °C, e na temperatura acima de 490 °C já entra no estado de degradação. Já o estudo de Gomes *et al.* (2013) apresentou que o início de degradação inicia-se em torno da temperatura de 400 °C.

Boparai *et al.* (2016) realizaram ensaio de TGA fazendo um comparativo com três tipos de polímeros ABS, Nylon puro, e um material Nano-Composto (NC) à base de Nylon, e constatou se que o início de degradação para estes polímeros e que para o ABS a temperatura de 430 °C, para o Nylon puro 449 °C e para o NC a temperatura de 462 °C, e concluiu que o material NC possui a melhor eficiência em comparação com o ABS e o Nylon puro, devido à temperatura de degradação ser mais elevada.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Trata-se de pesquisa com abordagem quantitativa e qualitativa com base em estudo experimental (MIGUEL, 2012). É apresentada neste capítulo a sequência metodológica da pesquisa, juntamente com os materiais e métodos aplicados nos ensaios, a partir de estratégias para avaliar os parâmetros de preenchimento e temperatura de extrusão para cada tipo de polímero.

Visando atender aos objetivos propostos, o estudo empírico foi dividido em três etapas. Na primeira foi realizado o estudo das características dos polímeros disponíveis para a realização da pesquisa. Na segunda foi realizada a fabricação do filamento com material virgem e reciclado, e a análise da viabilidade econômica. E por último, foi realizada a análise da qualidade das peças impressas, utilizando o filamento fabricado, avaliando as propriedades mecânicas, realizando um comparativo de material virgem e reciclado quanto aos parâmetros de preenchimento.

O fluxo metodológico de desenvolvimento da pesquisa é apresentado na Figura 11.

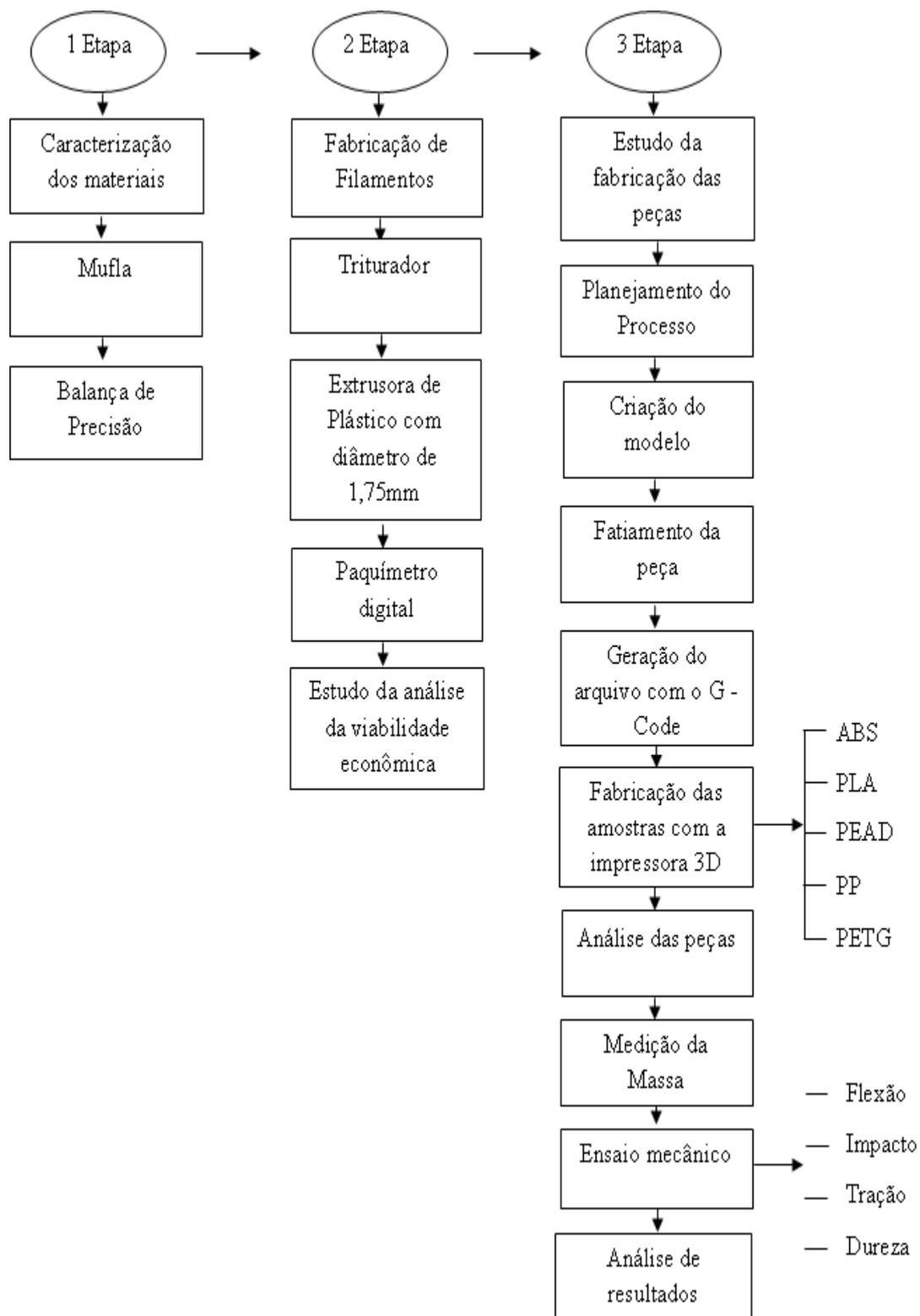


Figura 11 - Diagrama de etapas da pesquisa empírica.
Fonte: Autora (2018).

3.1 Caracterização dos materiais

Para a realização deste estudo o primeiro passo foi a caracterização dos materiais termoplásticos (ABS, PLA, PP, PEAD e o PETG), disponíveis para execução da pesquisa. Foi necessária a adaptação para que atendesse ao objetivo de analisar a perda de massa mediante ao teste com o equipamento Mufla (Figura 12). Esta ação implicou no aquecimento da amostra, e sequencialmente, utilizou-se a balança de precisão para medir se haveria perda após o resfriamento da amostra. Os equipamentos utilizados para avaliação das características físicas do material, durante o processo, foram os disponíveis no laboratório de Química localizado na área III da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás).



Figura 12 - Equipamentos utilizados: (a) Mufla; e (b) Balança de precisão.

Fonte: Autora (2018).

A caracterização dos materiais ocorreu entre os dias 03 e 18 de julho de 2018, no laboratório de Química da PUC Goiás, Goiânia, GO, Brasil, em que foram realizados 10 (dez) ciclos para cada polímero, com as seguintes temperaturas (180 °C, 200 °C, 220 °C, 240 °C, 260 °C, e 280 °C) com o tempo de aquecimento de 30 minutos e de resfriamento de 10 minutos para cada amostra. Para cada tipo de polímero foi utilizado

um “cadinho⁶” de cerâmica, revestido pequena molécula que pode ligar-se a outros monômeros formando moléculas maiores denominadas polímeros. o de papel alumínio, em que ocorreu a medição do peso de cada um e em seguida foram adicionados 20 gramas de grânulos de polímero para cada temperatura (Figura 13).

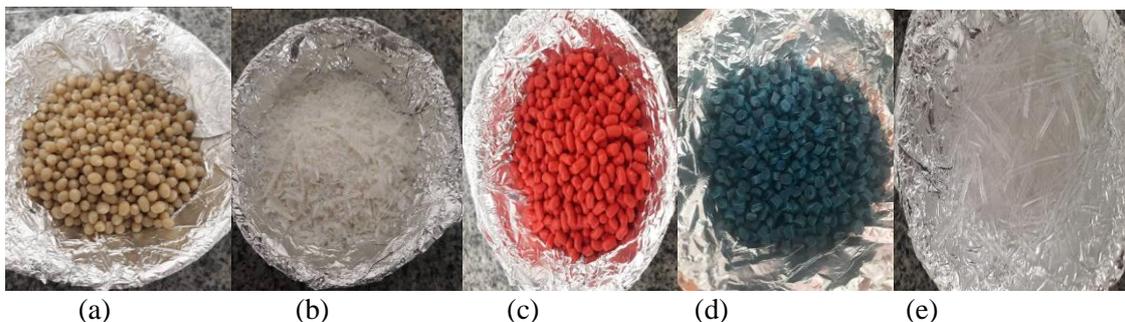


Figura 13 - Grânulos de polímeros utilizados para caracterização: (a) ABS; (b) PLA; (c) PP; (d) PEAD; e (e) PETG.

Fonte: Autora (2018).

Após o processo de aquecimento e resfriamento das amostras foi realizada a pesagem para verificar a perda da massa em cada ciclo, e estes dados foram armazenados em planilha do *Microsoft Excel*® a fim de comparar cada ciclo para cada polímero. Os resultados deste estudo são discutidos na seção 4.

3.2 Fabricação dos filamentos

Esta etapa foi dividida em duas partes, sendo que a primeira está relacionada à preparação da amostra, e a segunda, com processo de extrusão, ou seja, com a fabricação do filamento.

⁶ É um recipiente em forma de pote fabricado de cerâmica, resistente a altas temperaturas.

3.2.1 Preparação das amostras

Foi utilizado um moinho tipo Willey de Rotor Vertical que possui quatro facas do modelo SP-31 (Figura 14) e o Quadro 6 apresenta a Ficha Técnica do equipamento no laboratório de Processamento de Polímeros - Observatório da Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC), na unidade de Joinville, realizado em 17 e 18 de maio de 2018, para triturar o material ABS e o PLA que foram provenientes de outras prototipagens, conforme Figura 15.

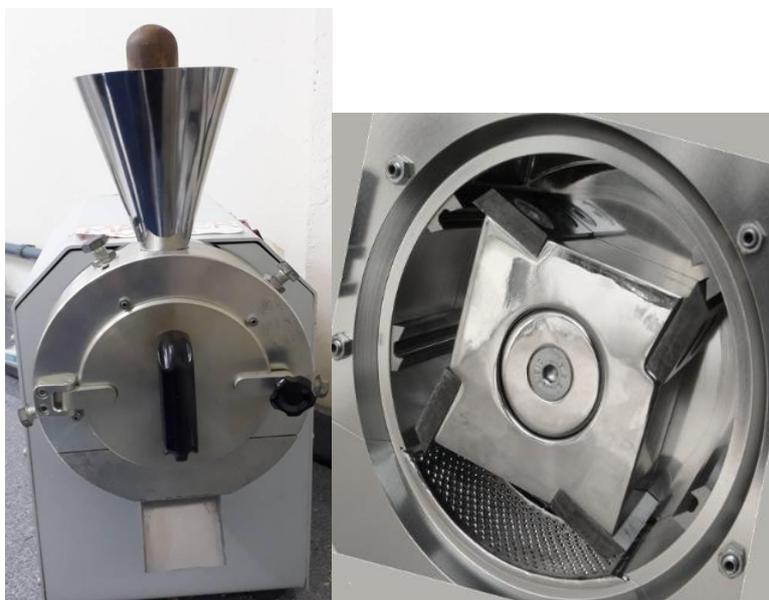


Figura 14 - Moinho de 4 facas.
Fonte: Autora (2018).

Quadro 6 - Características do moinho disponível na UDESC.

Características	Unidade	Valor
Marca	-	Solab
Modelo	-	Willey de Rotor Vertical
Referencia	-	SP - 31
Facas fixas	un	4
Facas moveis	un	4
Potência	W	2000
Tensão máxima de alimentação	V	220
Capacidade de moagem	g	500
Funil de aço com entrada	mm	35

Fonte: Forlabexpress (2018).



Figura 15 - Material para ser triturado: (a) ABS amarelo; (b) ABS vermelho; (c) ABS verde; (d) ABS cinza; (e) ABS preto; (f) ABS natural; e (g) PLA natural.
Fonte: Autora (2018).

Na Figura 16 são apresentados os resíduos ABS e PLA provenientes de outras prototipagens, passados no moinho para que fosse processado e transformando em filamento para impressora 3D.

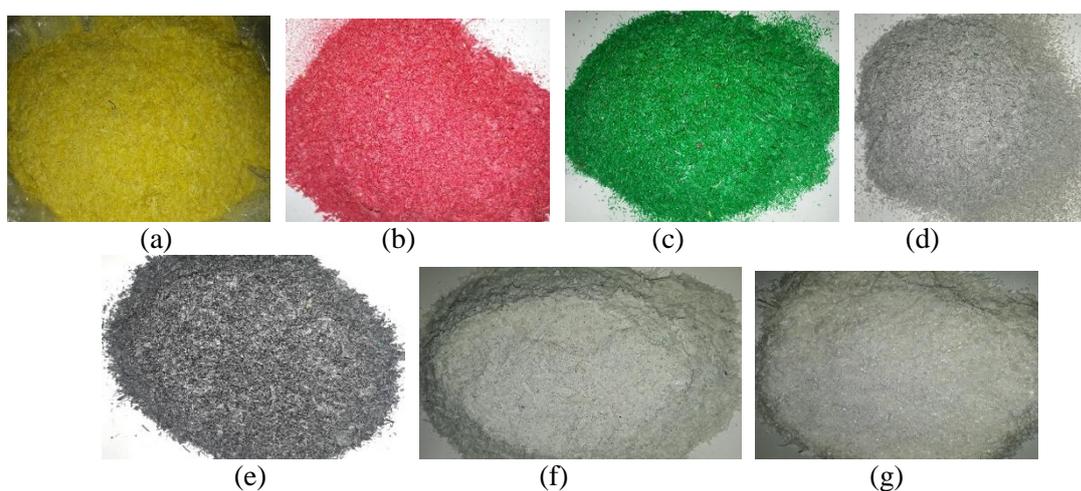


Figura 16 - Resíduos de prototipagem triturado: (a) ABS amarelo; (b) ABS vermelho; (c) ABS verde; (d) ABS cinza; (e) ABS preto; (f) ABS natural; e (g) PLA natural.
Fonte: Autora (2018).

Foi disponibilizado pela empresa 'Interativa Reciclagem', localizada na cidade de Joinville-SC, o material em grânulos (ABS, PLA e o PP) reciclados, e pela empresa

‘Filmaq3D’, localizada na cidade de Curitiba-PR, o ABS virgem. A empresa ‘Polímeros César’, localizada na cidade de Aparecida de Goiânia-GO, disponibilizou o material PEAD, o filamento PETG virgem e reciclado e o PLA virgem foram adquiridos pela empresa ‘3DLAB’, e o filamento do polímero PP virgem foi adquirido pela empresa ‘3DX filamentos’. A Figura 17 apresenta todas as amostras utilizadas nos experimentos.

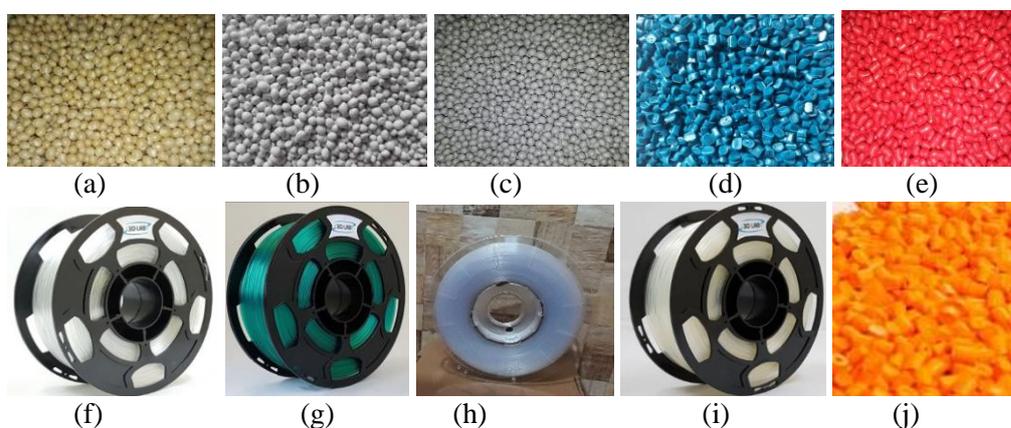


Figura 17 - Materiais utilizados nos experimentos: (a) ABS natural; (b) ABS branco; (c) ABS cinza; (d) PEAD azul; (e) PP vermelho; (f) PETG translucido; (g) PETG verde (h) PP natural; (i) PLA natural; e (j) PLA laranja.

Fonte: Autora (2018).

3.2.2 Processo de extrusão

A fabricação do filamento ocorreu entre os dias 28 de maio e 4 de julho de 2018. Para tanto, foi utilizado a extrusora Filmaq3D STD, com o bico de saída com a dimensão de 1,75 mm (Figura 18), e no Quadro 7 é apresentada a Ficha Técnica do equipamento.

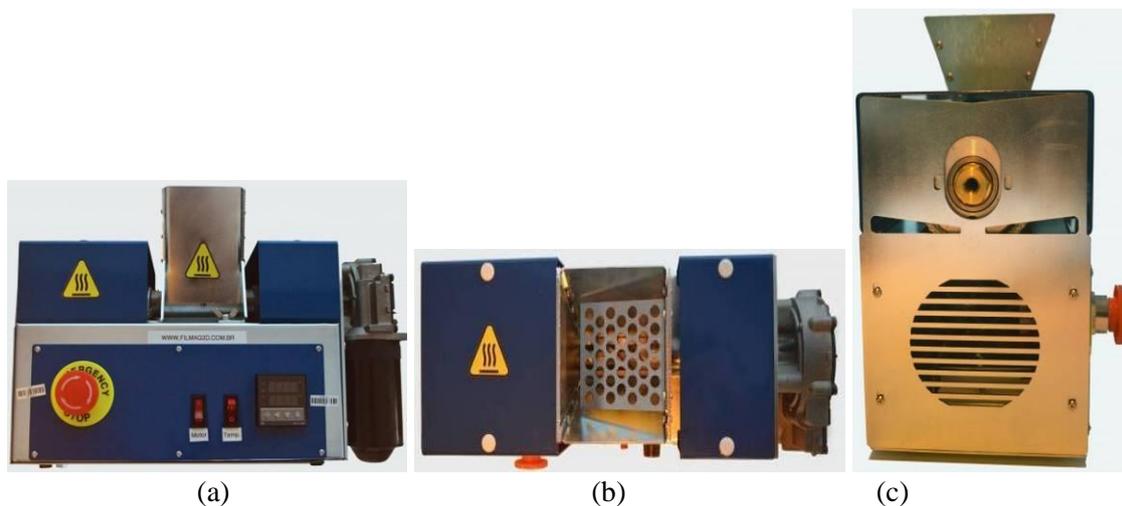


Figura 18 - Extrusora Filmaq 3D (a) extrusora; (b) funil; (c) matriz de saída.
Fonte: Autora (2018).

Quadro 7 - Características da extrusora Filmaq3D.

Características	Unidade	Valor
Marca	-	Filmaq 3D STD
Tensão máxima de alimentação	V	220
Temperatura máxima	°C	400
Taxa de extrusão	g/h	350
Taxa de extrusão	m/min	2,2
Matriz	mm	1,75 / 3,00
Tamanho da entrada de material	mm	3,5
Potência	W	500
Comprimento	mm	500
Largura	mm	310
Altura	mm	355
Patente	n	2020150287742-4

Fonte: Filmaq3D, (2018).

Conforme a saída do filamento da extrusora é necessário medir a espessura, para a obtenção da dimensão de 1,75 mm, pois mesmo utilizando uma matriz para esta espessura, o filamento pode ter alteração quanto a sua dimensão, devido a qualidade do material, a temperatura utilizada, e a velocidade da saída da matriz, pois tudo isso pode influenciar na espessura.

Foi estabelecida a espessura de 1,75 mm, por ser um filamento com a menor dimensão para que possa ser trabalhada na impressora Zmoph. Para a medição, foi utilizado o Paquímetro Digital da marca Messen (Figura 19).



Figura 19 - Paquímetro digital.
Fonte: Autora (2018).

Alguns polímeros necessitam da utilização de um equipamento capaz de tracionar o filamento a fim de esticar o fio até o diâmetro de 1,75 mm (RODRIGUES, 2017). Para atender a essa necessidade, foi desenvolvido o puxador conforme pode ser visto no Apêndice A, que proporcionava manter a distância de aproximadamente 1 metro da extrusora (Figura 20).

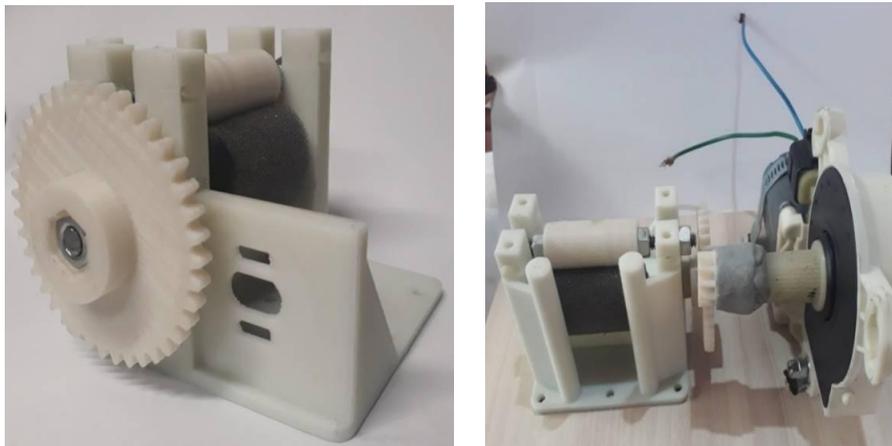


Figura 20 - Puxador para tracionar o filamento.
Fonte: Autora (2018).

Após a preparação dos polímeros, o material foi adicionado ao bocal da extrusora para que o processo tivesse início, apesar das recomendações do fabricante como Filmaq3D, Cesar Polímeros, Interativa Reciclagem e de alguns estudos como Harada (2004), Chong *et al.* (2017), Araujo (2010), Bastian (2012), Castelli (2012), Soares (2012), Hamod (2014), Steinle (2016) e Gelhausen *et al.* (2018) notou-se que experimentalmente:

- a. No polímero ABS a temperatura recomendada é de 220 °C (CASTELLI, 2012; HAMOD, 2014; STEINLE, 2016), e atendeu a temperatura para fabricação do filamento com o material virgem, mas houve a necessidade de reduzir para 205 °C para fabricação do material reciclado;
- b. No PP a temperatura recomendada é de 200 °C (HARADA, 2004; ARAUJO, 2010; CASTELLI, 2012; GELHAUSEN *et al.*, 2018), mas houve a necessidade de reduzir para 165 °C;
- c. No PEAD a temperatura indicada é de 210 °C (CHONG *et al.*, 2017); BASTIAN, 2012; CASTELLI, 2012; HAMOD, 2014), mas houve a necessidade de aumentar para 290 °C; e
- d. No PLA é recomendada a temperatura de 190 °C (CASTELLI, 2012; SOARES, 2012), e atendeu para a fabricação de filamento com material reciclado.

Na maioria dos casos houve a necessidade de redução da temperatura para ajustar o diâmetro do filamento. A provável razão para essa redução de temperatura durante a fabricação de filamento deve-se ao fato de que a utilização de um equipamento industrial talvez a temperatura maior na indústria deve – se ao fato de se ter uma maior distância entre a extrusora e o puxador. (Veja Figura 21).



Figura 21 - Extrusora de filamento para impressora 3D.
Fonte: LGTM (2018).

Não foi possível comparar esse equipamento com a extrusora utilizada, pois a mesma não possui controlador de velocidade, trabalha apenas com uma temperatura, e não precisa do tanque para resfriamento. Os polímeros utilizados como ABS, PLA e PP não necessitam da utilização do puxador, somente com o PEAD houve a necessidade do puxador para atender a dimensão do filamento.

O Quadro 8 apresenta as temperaturas encontradas após os experimentos para fabricação de filamento, atendendo a dimensão de 1,75 mm de filamento, com qualidade para ser utilizado na impressão de peças.

Quadro 8 – Temperaturas utilizadas para fabricação de filamento.

Polímero	Temperatura de extrusão
ABS – Virgem	220 °C
ABS – Reciclado	205 – 210 °C
PLA – Virgem	180 °C
PLA – Reciclado	185 °C
PP – Virgem	175 °C
PP – Reciclado	175 °C
PEAD – Reciclado	290 °C

Fonte: Autora (2018).

3.2.3 Análise de custos do filamento

Este estudo pretende contribuir com a redução de custos na aquisição de matéria prima para as empresas e instituições de ensino, atendendo um dos objetivos deste estudo, que foi verificar a viabilidade da reutilização de material reciclada para fabricação de filamentos para impressora 3D, com objetivo da redução de resíduos descartados no meio ambiente.

Com isso, foi feito uma cotação para verificar os principais fornecedores do equipamento de extrusão para fabricação de filamentos para impressora 3D, conforme é apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 - Características dos principais equipamentos de extrusão.

Modelo	Temperatura Máxima	Dimensão do equipamento (cm)	Preço
 Filabot	450 °C	46 x 18 x 23	R\$ 10.144,94
 DNA	250 °C	41 x 12 x 21	R\$ 1.933,35
 Filastruder	250 °C	46 x 10 x 15	R\$ 1.217,84
 FilaFab	250 °C	49 x 16 x 24	R\$ 4.694,67
 Filaq3D	400 °C	50 x 30 x 35	R\$ 2.900,00

Fonte: Autora (2019).

Ao analisar os preços dos equipamentos notou – se que os equipamentos Filabot, DNA, Filastruder e Filafab teriam o custo com imposto mais um alto valor de frete, pois não fornecidas no Brasil. Com isso, o equipamento escolhido para esta análise foi a Filmaq3D, o seu valor já esta embutido o valor do imposto cobrado por ser uma fornecedora localizada em Curitiba – PR – Brasil.

Será realizado o potencial da economia do processo de fabricação de filamentos com material reciclado, conforme mostra na Tabela 2 o valor do quilo do material em grânulos.

Tabela 2 - Valores dos polímeros em grânulos.

Material	Valor (kg)
ABS (reciclado)	R\$ 6,40
PLA (reciclado)	R\$ 7,20
PEAD (reciclado)	R\$ 3,50
PP (reciclado)	R\$ 3,20

Fonte: Autora (2019).

Conforme a ficha técnica disponibilizada pelo equipamento, mostra uma média da taxa de extrusão 0,350 kg/h. Desse modo, considerando o custo de energia elétrica de R\$ 1,041/kWh e para uma produção de 1,0 kg de filamentos que será utilizado uma média de 2.5 h.

Para calcular o valor do custo de energia elétrica para fabricação de filamentos, será utilizada a seguinte equação:

$$CEF = CE \times Ch \quad (1)$$

Onde o CEF representa o custo de energia para fabricação de filamentos, CE e o custo de energia por hora, e o C representa a quantidade de horas consumida. Será analisado também o valor *payback* simples para saber quantos quilos de filamentos para ter o retorno do investimento, com a seguinte equação. :

$$PBS = \frac{I}{A} \quad (2)$$

Onde o I é o valor do investimento inicial, e o A representa o valor gasto evitado para a fabricação de 1 quilo de filamento. Estes resultados serão apresentados na seção 4.

3.3 Estudo da fabricação de peças

Foi realizada a elaboração dos corpos de prova para a pesquisa, entre os dias 20 e 21 de junho de 2018, utilizando para tanto o *Software Autodesk Inventor*® versão 2018. Esta etapa do estudo visou definir a geometria da peça teste, sendo adotada a geometria proposta pela norma ASTM 6152 (1992), para ensaios de tração (Figura 22a). Os ensaios de flexão (Figura 22 b) consistiram em um retângulo padrão com as seguintes dimensões (80 x 20 x 4) mm e foi utilizada a norma ASTM D790 (2003), os ensaios de impacto (Figura 22 c) consistiram em um entalhe em V considerada o Charpy tipo A, com as dimensões de (55 x 10 x 9,5) mm utilizando a norma ASTM D6110 (2004), e por último, para fazer a análise microscópica óptica, medição da massa, densidade e dureza utilizando a norma ASTM E92 (2003) consistiram de um cubo com as dimensões (30 x 30 x 30) mm (Figura 21d).

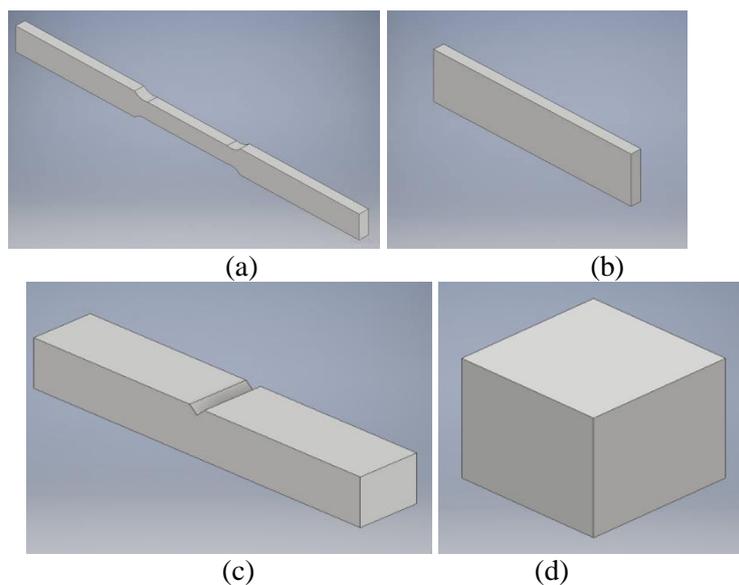


Figura 22 - Modelos de corpo de prova: (a) tração; (b) flexão; (c) impacto; e (d) massa, densidade e dureza.

Fonte: Autora (2018).

Após a criação o arquivo foi salvo em STL e encaminhado para o *Software Voxelizer*® (64-bit), a fim de realizar o fatiamento das peças, e implantar os parâmetros que fossem estabelecidos quanto à estratégia e o percentual de preenchimento (Figura 23).

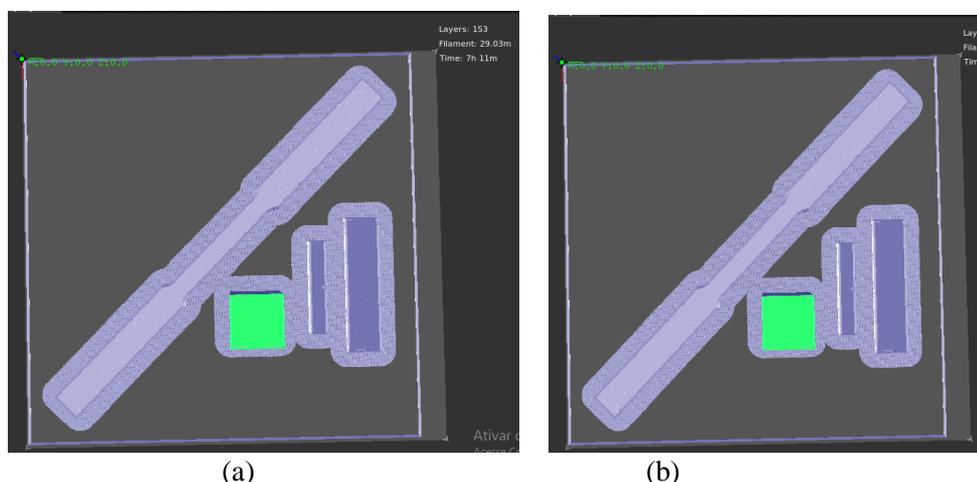


Figura 23 - Representação gráfica do G-Code do corpo de prova impresso: (a) 50% de preenchimento; e (b) 35% de preenchimento.

Fonte: Autora (2018).

O *Software Voxelizer*® (64-bit), após gerar o G-Code dos corpos de prova, disponibilizou as seguintes informações: para os corpos de prova com 50% de preenchimento utilizará aproximadamente 19.50 metros de filamento com tempo estimado de 7h 51min, e com o preenchimento de 35% é utilizado 16.80 metros de filamento com um tempo estimado de 6h9 min, dados aqui considerados como aproximados.

3.3.1 Procedimentos para fabricação da peça

Para realizar a impressão dos corpos de prova, utilizou-se a impressora 3D a partir do processo FDM com o modelo Zmorph (Figura 24). O Quadro 10 apresenta a Ficha Técnica do equipamento com cabeçotes de extrusora de plástico 1,75 mm, disponível no Laboratório de Prototipagem Avançada (LAPA) na PUC Goiás. Nesta etapa da pesquisa, foi realizado o estudo de parâmetros estabelecidos como o tipo de material e a

porcentagem de preenchimento, para analisar as propriedades mecânicas, buscando investigar a influência sobre a qualidade dos filamentos adjacentes que compõe a estrutura final da peça.



Figura 24 - Impressora Zmorph.
Fonte: Zmorph (2018).

Quadro 10 - Características da impressora Zmorph disponibilizada no LAPA da PUC Goiás.

Características	Descrição
Marca	Zmorph
Cabeçote	Extrusor de plástico 1,75 mm e 3,00 mm
Matéria prima	ABS, PLA, PEAD, PP, PETG e Nylon
Temperatura máxima da extrusora	255 °C
Temperatura máxima de aquecimento da mesa	150 °C
Velocidade de impressão	40 mm/s até 120 mm/s
Dimensão da máquina	530 x 555 x 480 mm
Área de trabalho (comprimento, largura e altura)	250 x 235 x 165 mm
Dimensões de cabeçote	135 x 115 x 55 mm
Qualidade de impressão recomendada	0,20 mm altura de camada
Extrusão	Alimentação direta de material
Software	Voxelizer

Fonte: Zmorph (2018).

Foram estabelecidos dois parâmetros: a porcentagem de preenchimento e a classificação do material, com cinco amostras para cada tipo de filamento para auxiliar nesta análise (Tabela 3). Os parâmetros fixos estabelecidos para cada corpo de prova impressos foram a espessura da camada de 0,2 mm, a velocidade de impressão 70 mm/s, a estratégia de preenchimento *honeycomb* (casinha de abelha), o diâmetro do filamento 1,75 mm e o número de camadas 4.

Tabela 3 - Parâmetros dos processos e níveis atribuídos.

Parâmetros	Níveis	
Preenchimento (%)	50%	35%
Classificação do Material	Virgem	Reciclado

Fonte: autora (2018).

O Quadro 11 apresenta as temperaturas de extrusão e mesa, utilizadas para impressão dos corpos de prova, de acordo com as temperaturas indicadas por alguns estudos.

Quadro 11 – Temperaturas de extrusão utilizada para impressão dos corpos de prova.

Material	Temperatura de extrusão	Temperatura de Mesa	Data da impressão
ABS	230 °C	70 °C	03 à 10 de Julho de 2018
PETG	255 °C	80 °C	11 à 16 de julho de 2018/ 19 de dezembro de 2018/ 07 à 09 de janeiro de 2019
PLA	200 °C	70 °C	11 à 18 de dezembro de 2018
PP	230 °C	70 °C	14 à 18 de janeiro de 2018

Fonte: Autora (2018).

Não foi possível realizar a impressão no LAPA do corpo de prova com o polímero PP, pois havia necessidade de uma placa de 1 mm de PP ou Policloreto de Polivinila (PVC) como base para que o material aderisse sobre a mesa. Com isso foi feita a impressão pela empresa “*Só ares 3d projects*” utilizando a temperatura de extrusão de 230 °C e a temperatura da mesa 70 °C, com o suporte da placa de PP.

Com base nos parâmetros determinados e nos níveis estabelecidos foram organizados quatro processos, sendo que para cada ensaio foram realizados cinco corpos de prova para obtenção de resultados, cujo intuito é o da comparação de um resultado com o outro.

3.3.2 Análise das propriedades mecânicas

Após a impressão dos corpos de prova foram realizadas as análises das propriedades mecânicas, a partir da medição de massa, densidade, tração, flexão, impacto e dureza. Estes ensaios foram realizados em parceria com o Laboratório de Materiais e Processos

de Fabricação da UFG e do Laboratório de Química da PUC Goiás. Os ensaios de propriedades mecânicas dos corpos de prova foram realizados entre os dias 08, 18 e 19 de julho, 03 de agosto de 2018 e 31 de janeiro de 2019, 01, 04 e 05 de fevereiro de 2019 (Tabela 4).

Tabela 4 - Etapas dos ensaios de propriedades mecânica.

Ensaio	Dia	Horário	Tempo
Massa	18 de Julho de 2018 / 04 de Fevereiro de 2019	09:00 até 12:00 h	3 horas
Densidade	19 de Julho de 2018 / 04 de Fevereiro de 2019	14:00 até 14:30h	30 minutos
Impacto	19 de julho de 2018 / 31 de Janeiro de 2019	14:35 h até 15:05h	30 minutos
Flexão	20 de julho de 2018 / 1 de Fevereiro de 2019	15:10 h até 17:00h	1 hora e 50 minutos
Tração	03 de agosto de 2018 / 31 de Janeiro de 2019	14:00 h até 16:00h	2 horas
Dureza	08 de agosto de 2018 / 05 de Fevereiro de 2019	08:45 h até 12:00h	2 horas e 45 minutos

Fonte: Autora (2018).

Com os resultados obtidos, por meio da análise de propriedade mecânica, foi realizada comparação com os dados de literaturas disponíveis (JOHNSON *et al.* 2014; SANCHEZ *et al.* 2014; SANTANA, 2015; OSEJOS, 2016).

3.3.2.1 Medição da massa e densidade

Na medição da massa foi utilizado, como corpo de prova, um cubo com as dimensões (30 x 30 x 30) mm, com o objetivo de constatar a quantidade de material utilizado para realizar a impressão da peça. Utilizou-se também, uma balança analítica SHIMADZU AUX 220 (Figura 12b), com uma resolução de 0,0001 g, disponibilizado pelo Laboratório de Química da PUC Goiás. Posteriormente, à medição de massa, os dados foram coletados e armazenados na planilha do *Microsoft Excel*® e realizada a análise de densidade para verificação da qualidade da peça.

3.3.2.2 Ensaio de tração

No ensaio de tração foi impresso um corpo de prova, de acordo com a norma ASTM 6152 (1992), que consistiu na aplicação de carga crescente na peça testada, com o propósito de analisar a variação do comprimento até a ruptura (GARCIA *et al.*, 2012). O equipamento utilizado para elaboração deste ensaio foi uma máquina universal de ensaios mecânicos SHIMADZU, modelo UH - F600knx (Figura 25).



Figura 25 - Equipamento para ensaio de tração.
Fonte: Autora (2018)

O equipamento tem um par de garras que permite segurar a amostra a ser testada e aplicar carga puxando as amostras até serem quebradas, usando velocidade constante de 7 mm/min. Os resultados do ensaio de tração disponibilizados no *Software* Trapezium, versão 1.0.2, foram inseridos na planilha do *Microsoft Excel*® disponibilizada pelo Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação da UFG.

3.3.2.3 Ensaio de flexão

Para o ensaio de flexão foram utilizados corpos de provas impressos no formato de retângulo, com as dimensões (80 x 20 x 4) mm, de acordo com a norma ASTM D790

(2003), que consistiu na aplicação da carga no centro da peça (GARCIA *et al.*, 2012). O equipamento tem um bico de ponta, em que foi aplicada carga sobre as amostras até que fossem quebradas. O equipamento utilizado para elaboração deste ensaio foi uma máquina universal de ensaios mecânicos SHIMADZU modelo UH - F600knx (Figura 26).



Figura 26 - Equipamento para ensaio de flexão.
Fonte: Autora (2018).

Os resultados do ensaio de flexão foram disponibilizados no *Software* Trapezium, versão 1.0.2, e transferidos para a planilha do *Microsoft Excel*® disponibilizada pelo Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação da UFG.

3.3.2.4 Ensaio de impacto

Para o ensaio de impacto foi utilizados corpos de prova impressos com um entalhe em V, com as dimensões de (55 x 10 x 9,5) mm, conforme norma ASTM D6110 (2004), via método *Charpy* foi realizado por um equipamento *Impact Tester*, quando o pêndulo é liberado da altura de 60 cm para realizar a medição da energia que o corpo de prova terá absorvido.

Após este impacto a energia absorvida pelo corpo de prova é determinada pela diferença entre a altura inicial e a altura final, correspondendo à energia de impacto (GARCIA *et al.*, 2002). A Figura 27 apresenta o processo.

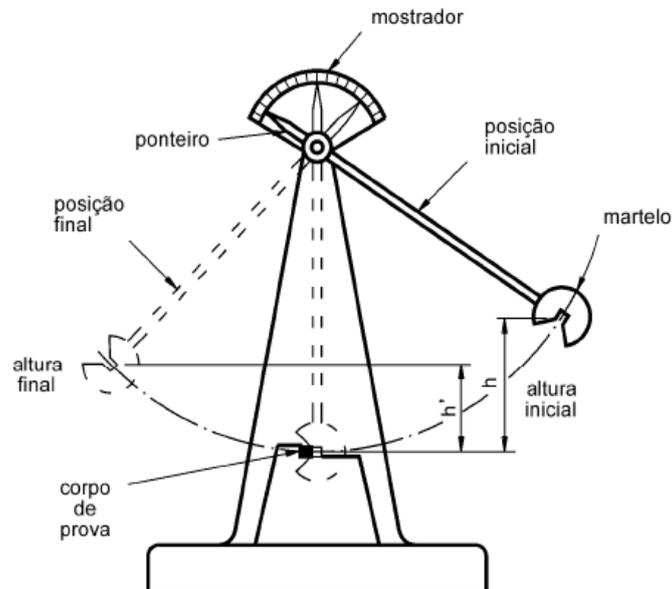


Figura 27 - Ensaio de impacto.
Fonte: Garcia *et al.* (2002).

O ensaio de impacto utilizando o método *Charpy* foi realizado em um equipamento *Impact Tester* do modelo EQIM-C-300i disponibilizado pelo Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação da UFG (Figura 28), em que o pêndulo de 30 cm é liberado em queda livre de uma altura fixa de 60 cm, após a queda o mostrador permite determinar qual a energia que foi absorvida para o rompimento do corpo de prova, por meio da diferença entre a altura inicial e a altura final atingida pelo pêndulo após ser liberado em queda livre.

A altura fixa de 60 cm e a velocidade da aplicação de carga de 2 m/s são fatores que influenciam os resultados disponibilizados ao realizar os ensaios (CALLISTER, 2012).

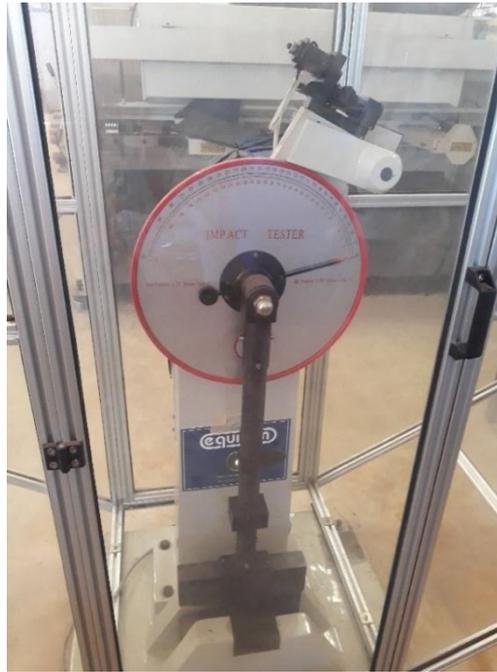


Figura 28 - Equipamento para ensaio de impacto.
Fonte: Autora (2018).

3.3.2.5 Ensaio de dureza

No ensaio de dureza foram utilizados corpos de prova impressos, no formato de um cubo com as dimensões de (30 x 30 x 30) mm, de acordo com a norma ASTM E92 (2003), e se baseou no método Vickers, que consiste na aplicação e retirada da carga na superfície da impressão para fazer a medição por microscópio óptica, sendo este acoplado junto ao equipamento digital que disponibiliza o valor da dureza Vickers (GARCIA *et al.*, 2012).

Esse ensaio consiste em aplicar força por meio de carga pré-estabelecida, mediante um penetrador de diamante, equipamento este que não deforma a peça. O esquema da Figura 29 apresenta como foi realizado o ensaio de microdureza pelo método Vickers.

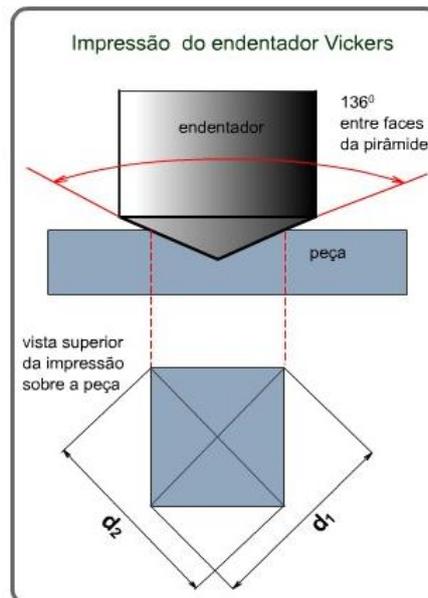


Figura 29 - Esquema do ensaio de microdureza.
Fonte: Cim (2018).

Foi realizado o ensaio de dureza em um equipamento Durômetro para Dureza Vickers HM-210/HM-220 (Figura 30a), sendo aplicada carga com 1 kgf para o material ABS 50% de preenchimento de material reciclado. Nesse momento, foi possível visualizar a camada no microscópio acoplado. Ação que utiliza marcação manual. Entretanto, detectou-se que a carga aplicada foi alta, expandindo toda a camada. Por tais razões, constatou-se a impossibilidade de conclusão do ensaio, conforme Figura 30b.

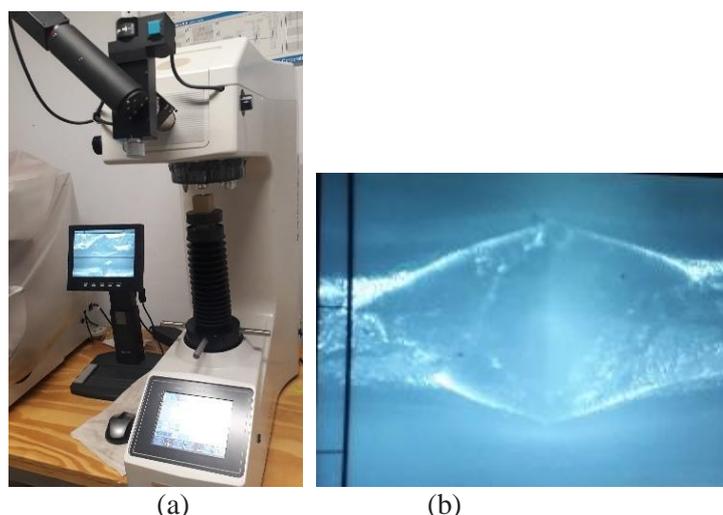


Figura 30 - Ensaio de Dureza no Durômetro do modelo Vickers: (a) equipamento; (b) análise microscopia.

Fonte: Autora (2018).

Com as falhas ocorridas durante o ensaio de Durômetro para Dureza Vickers, notou-se que o ensaio de Micro-Dureza Vickers HM-210/HM-220, proporcionaria melhores resultados, pois atende um valor de carga bem menor. Com isso, definiu-se a utilização de força de 0,1 kgf aplicando força em 4 segundos, a carga é aplicada em um intervalo de 10 segundos e logo em seguida a retirada da carga em 4 segundos, para verificar a carga suportada pela unidade de área do penetrador. Após aplicação da carga realizou-se uma área de seleção para análise microscópica, para fazer a medição das diagonais da indentação. Após, a leitura o equipamento microdurômetro calculou a média aritmética para encontrar o valor da dureza. Este equipamento foi disponibilizado pelo Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação da UFG (Figura 31).

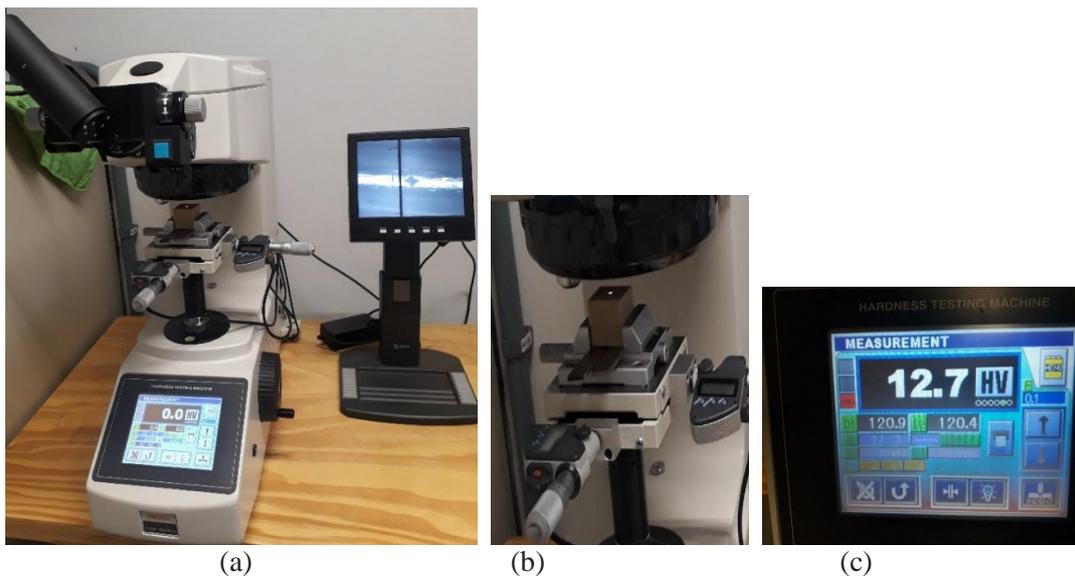


Figura 31 - Equipamento para ensaio de dureza: (a) equipamento; (b) marcação da amostra; e (c) resultado.

Fonte: Autora (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos pelos ensaios descritos no capítulo anterior, em relação à caracterização do material, fabricação de filamentos, subsidiando assim, o alcance dos objetivos propostos na dissertação.

4.1 Caracterização dos materiais

Foram avaliados os polímeros ABS, PLA, PEAD, PP e o PETG, com as seguintes temperaturas (180 °C, 200 °C, 220 °C, 240 °C, 260 °C, e 280 °C), com um aquecimento de 30 minutos e de resfriamento de 10 minutos para cada ciclo. Foram aquecidos em 10 ciclos para as temperaturas estabelecidas para identificar perda na massa e alteração quanto ao seu formato e cor.

A Figura 32 e Tabela 5 apresentam as curvas das perdas de massa na temperatura de 180 °C, para os 10 ciclos de aquecimento e resfriamento das amostras.

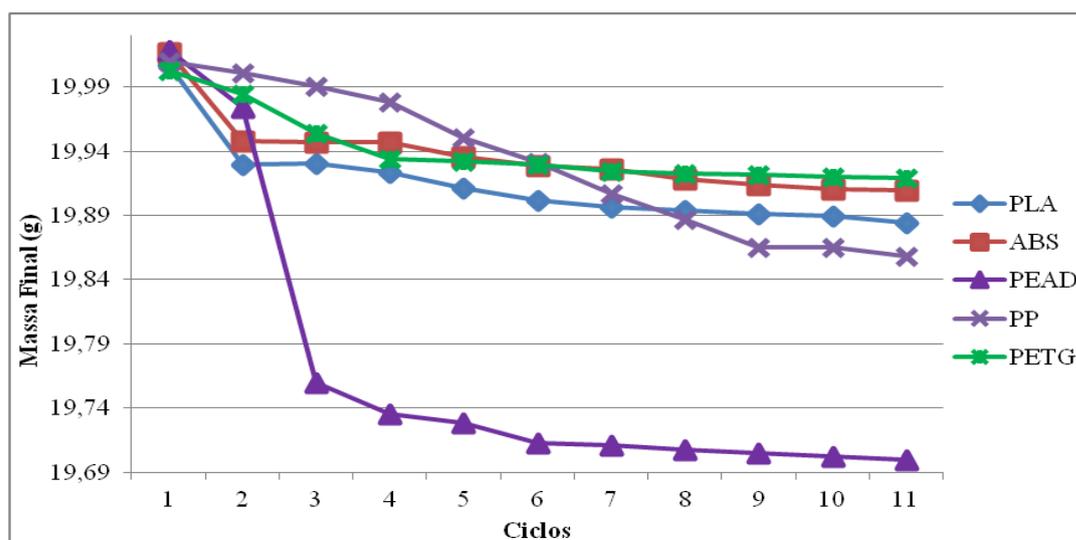


Figura 32 - Gráfico das curvas de perda de massa na temperatura de 180 °C.
Fonte: Autora (2018).

Tabela 5 - Massa final de cada ciclo na temperatura 180 °C.

Material	PLA (g)	%	ABS (g)	%	PEAD (g)	%	PP (g)	%	PETG (g)	%
Início	20,0073	-	20,0170	-	20,0186	-	20,0102	-	20,0029	-
1º Ciclo	19,9306	0,3834	19,9481	0,3442	19,9740	0,2228	20,0015	0,0435	19,9845	0,0920
2º Ciclo	19,9297	0,0045	19,9473	0,0040	19,7598	1,0724	19,9908	0,0535	19,9538	0,1536
3º Ciclo	19,9233	0,0321	19,9467	0,0030	19,7350	0,1255	19,9785	0,0615	19,9342	0,0982
4º Ciclo	19,9110	0,0617	19,9360	0,0536	19,7284	0,0334	19,9507	0,1391	19,9324	0,0090
5º Ciclo	19,9015	0,0477	19,9289	0,0356	19,7125	0,0806	19,9313	0,0972	19,9297	0,0135
6º Ciclo	19,8969	0,0231	19,9261	0,0140	19,7106	0,0096	19,9069	0,1224	19,9243	0,0271
7º Ciclo	19,8937	0,0161	19,9182	0,0396	19,7078	0,0142	19,8873	0,0985	19,9231	0,0060
8º Ciclo	19,8917	0,0101	19,9141	0,0206	19,7045	0,0167	19,8652	0,1111	19,9222	0,0045
9º Ciclo	19,8893	0,0121	19,9104	0,0186	19,7021	0,0122	19,8650	0,0010	19,9201	0,0105
10º Ciclo	19,8841	0,0261	19,9095	0,0045	19,6993	0,0142	19,8586	0,0322	19,9194	0,0035
Total de Perda	0,1232	0,6169	0,1075	0,5379	0,3193	1,6017	0,1516	0,7601	0,0835	0,4181
Média de massa final	19,9052	-	19,9285	-	19,7434	-	19,9236	-	19,9344	-
Média da perda de massa	0,0123	-	0,0107	-	0,0319	-	0,0152	-	0,0084	-
Desvio padrão	0,0173	-	0,0154	-	0,0831	-	0,0548	-	0,0203	-
Variância	0,0005	-	0,0004	-	0,0043	-	0,0001	-	0,0001	-

Fonte: Autora (2018).

O PEAD obteve a maior perda 1,0724% de massa a partir do 2º ciclo, mas em seguida estabilizou esta perda. E, após os 10 ciclos teve a perda de 1,6017% de massa. Nos demais polímeros como PLA, ABS, PP e o PETG a perda de massa foi constante, com exceção do PP que a partir do 4º ao 9º ciclo teve o aumento maior de perda e foi o segundo polímero que perdeu mais massa entre os 10 ciclos equivalente a 0,7601%. O PETG foi o polímero que obteve a menor perda de massa equivalente a 0,4181%.

Analisando também a variância de perda de massa, percebe-se que a maior variância equivalente foi 0,0043 g de perda de massa foi com o PEAD. Já, o PP e o PETG obteve a menor variância de 0,0001 g de perda de massa, ou seja, não há perda de massa significativa na temperatura de 180 °C entre os 10 ciclos realizados.

Durante o ensaio de caracterização, pode se obter os seguintes resultados (Quadro 12), situação em que se constatou que os polímeros PLA, PEAD e o ABS nessa temperatura

começam ter alterações na cor final a partir do 7º ciclo para o PLA, 8º ciclo para o PEAD e 10º ciclo para o ABS. Já o PP e o PETG não tiveram alteração na sua cor final suportando os 10 ciclos, conforme apresenta na Figura 33. Entretanto, ambos tiveram alteração no formato, como o PLA, PETG e o PP que derreteram por completo, transformados em pasta, o PEAD e o ABS os grânulos se expandiram.

Quadro 12 - Considerações do ensaio na temperatura 180 °C.

Material	PLA	ABS	PEAD	PP	PETG
Cor inicial	Branco	Bege	Azul	Vermelho	Transparente
Cor Final	Amarelado	Bege escuro	Algumas partes verdes	Não teve alteração na cor	Não teve alteração na cor
Houve mudança no formato? Como?	Os grânulos derreteram de forma parcial, nisso todo o material grudou	Os grânulos apenas juntaram, deixando o material com mais brilho	Os grânulos expandiram deixando o material com mais brilho e volume	Os grânulos derreteram por completo transformando em uma pasta	Os grânulos derreteram por completo transformando em um aspecto de resina
É possível reutilizar o material em no máximo quantos ciclos?	A partir do 3º ciclo tem início a alteração na cor, podendo ser reutilizado por até 7 vezes	A partir do 6º ciclo tem início a alteração na cor, podendo ser reutilizado até 10 vezes	A partir do 5º ciclo tem início a alteração na cor, podendo ser reutilizado por até 8 vezes	Pode ser reutilizado por 10 vezes	Pode ser reutilizado por 10 vezes

Fonte: Autora (2018).

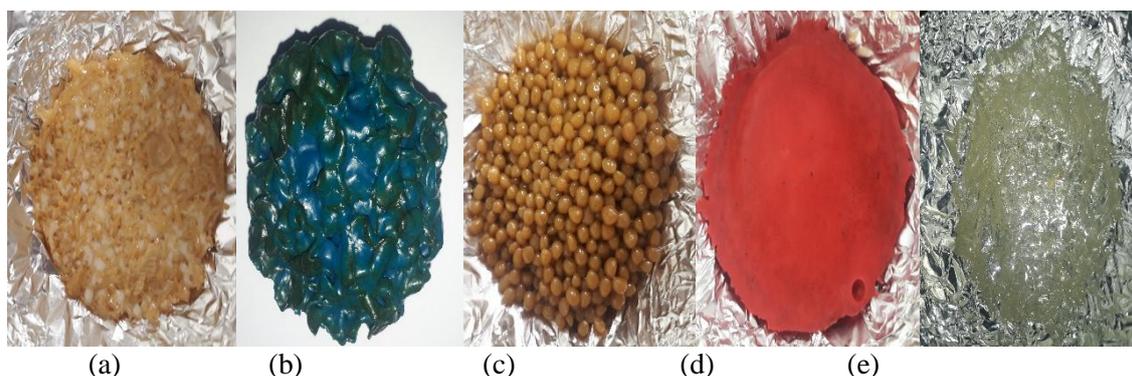


Figura 33 - Amostras na temperatura de 180 °C: (a) PLA no 7º ciclo; (b) PEAD no 8º ciclo; (c) ABS no 10º ciclo; (d) PP no 10º ciclo; (e) PETG no 10º ciclo.

Fonte: Autora (2018).

A Figura 34 corresponde aos resultados finais da amostra dos polímeros após ter sido aquecido em 10 ciclos na temperatura de 180 °C.

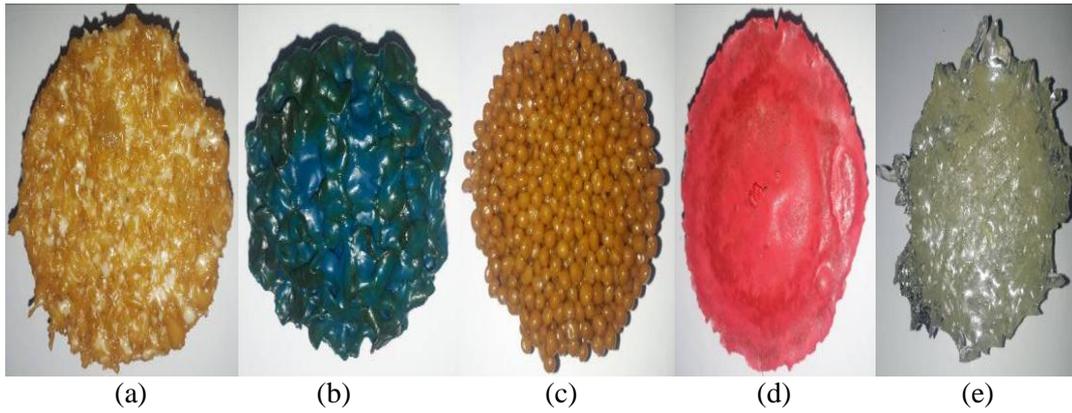


Figura 34 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 180°C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.

Fonte: Autora (2018).

A Figura 35 e Tabela 6 apresentam as curvas das perdas de massa na temperatura de 200 °C para os 10º ciclos de aquecimento e resfriamento das amostras.

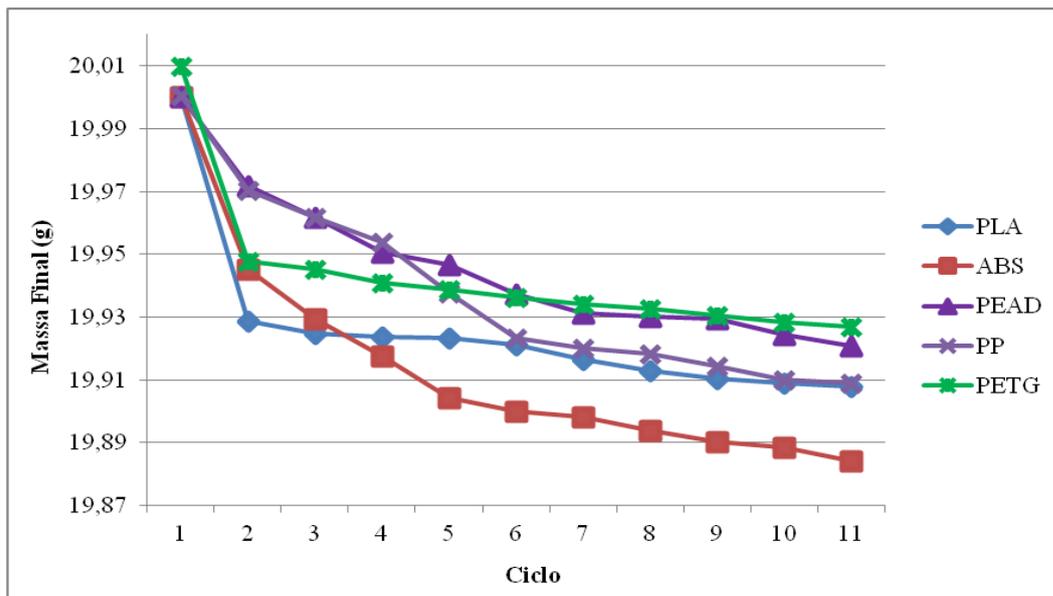


Figura 35 - Gráfico das curvas de perda de massa na temperatura 200 °C.

Fonte: Autora (2018).

Tabela 6 - Massa final de cada ciclo na temperatura de 200 °C.

Material	PLA (g)	%	ABS (g)	%	PEAD (g)	%	PP (g)	%	PETG (g)	%
Início	20,0001	-	20,0002	-	20,0004	-	20,0006	-	20,0099	-
1º Ciclo	19,9289	0,3560	19,9453	0,2745	19,9720	0,1420	19,9703	0,1515	19,9478	0,3103
2º Ciclo	19,9249	0,0201	19,9295	0,0792	19,9617	0,0516	19,9617	0,0431	19,9453	0,0125
3º Ciclo	19,9239	0,0050	19,9176	0,0597	19,9507	0,0551	19,9538	0,0396	19,9408	0,0226
4º Ciclo	19,9234	0,0025	19,9045	0,0658	19,9469	0,0190	19,9377	0,0807	19,9388	0,0100
5º Ciclo	19,9211	0,0115	19,9001	0,0221	19,9374	0,0476	19,9235	0,0712	19,9363	0,0125
6º Ciclo	19,9164	0,0236	19,8983	0,0090	19,9312	0,0311	19,9201	0,0171	19,9341	0,0110
7º Ciclo	19,9131	0,0166	19,8941	0,0211	19,9302	0,0050	19,9184	0,0085	19,9328	0,0065
8º Ciclo	19,9103	0,0141	19,8904	0,0186	19,9294	0,0040	19,9145	0,0196	19,9306	0,0110
9º Ciclo	19,9092	0,0055	19,8884	0,0101	19,9243	0,0256	19,9102	0,0216	19,9283	0,0115
10º Ciclo	19,9078	0,0070	19,8842	0,0211	19,9208	0,0176	19,9089	0,0065	19,9269	0,0070
Total de Perda	0,0923	0,4619	0,1160	0,5812	0,0796	0,3986	0,0917	0,4593	0,0830	0,4152
Média de massa final	19,9179	-	19,9052	-	19,9405	-	19,9319	-	19,9362	-
Média perda de massa	0,0092	-	0,0116	-	0,0080	-	0,0092	-	0,0083	-
Desvio padrão	0,0075	-	0,0197	-	0,0169	-	0,0225	-	0,0070	-
Variância	0,0005	-	0,0003	-	0,0001	-	0,0001	-	0,0004	-

Fonte: Autora (2018).

Para a temperatura de 200 °C foram detectados outros resultados, nos quais o ABS a partir do 2º ciclo obteve a perda de massa de 0,0792%, sendo a maior dentre as analisadas nesta etapa. Constatamos ainda, que o ABS foi o polímero que nos 10 ciclos obteve a maior perda de massa, correspondente a 0,5812%. O PEAD foi o polímero que obteve a menor perda com 0,3986% de massa, entre os 10 ciclos realizados.

Na análise de variância de perda de massa, nota-se que a maior variância equivalente a 0,0005 g de perda de massa foi com o PLA. E a menor variância de 0,0001 g de perda de massa com os polímeros PEAD e o PP, ou seja, não há perda significativa de massa na temperatura de 200 °C entre os 10 ciclos realizados.

Nesse contexto, o Quadro 13 apresenta as conclusões obtidas durante a execução do ensaio de caracterização dos materiais, situação em que se constatou que os polímeros nessa temperatura começam a ter alterações na cor final, suportam até o 7º ciclo para o PLA, 5º ciclo para o PEAD e 10º ciclo para o ABS, PP e o PETG. Entretanto, as

exceções são o PP e o PETG, que não tiveram alteração na sua cor final após os 10 ciclos, conforme apresenta a Figura 36. Ressalta-se, que todos, entretanto, tiveram alteração no formato, como o PLA, PETG e o PP que se derreteram por completo, e o PEAD e ABS os grânulos se expandiram.

Quadro 13 - Considerações finais do ensaio na temperatura 200 °C.

Material	PLA	ABS	PEAD	PP	PETG
Cor inicial	Branco	Bege	Azul	Vermelho	Transparente
Cor Final	Amarelo escuro	Bege escuro	Algumas partes verdes	Não teve alteração na cor	Não teve alteração na cor
Houve mudança no formato? Como	Os grânulos derreteram, nisso todo o material grudou e começou a carbonizar parcialmente	Os grânulos começaram a dilatar deixando o material com mais brilho	Os grânulos expandiram, e iniciou o processo de carbonização	Os grânulos derreteram transformando em uma pasta com umas bolhas pretas por cima como se fosse uma película de carbonização	Os grânulos derreteram por completo transformando em um aspecto de resina
É possível reutilizar o material em no máximo quantos ciclos?	A partir do 2º ciclo tem início a alteração na cor, podendo ser reutilizado por até 7 vezes	A partir do 5º ciclo teve início a alteração na cor. O material pode ser reutilizado até 10 vezes	A partir do 3º ciclo iniciou a alteração na cor ficando com películas esverdeadas. O material pode ser reutilizado em até 5 vezes	A partir do 7º ciclo apareceram películas pretas. O material pode ser reutilizado até 10 vezes	Pode ser reutilizado em 10 vezes

Fonte: Autora (2018).



Figura 36 - Amostras na temperatura de 200 °C: (a) PLA no 7º ciclo; (b) PEAD no 5º ciclo; (c) ABS no 7º ciclo; (d) PP no 10º ciclo; (e) PETG no 10º ciclo.

Fonte: Autora (2018).

A Figura 37 corresponde aos resultados finais da amostra dos polímeros após ter sido aquecido em 10 ciclos na temperatura de 200 °C.

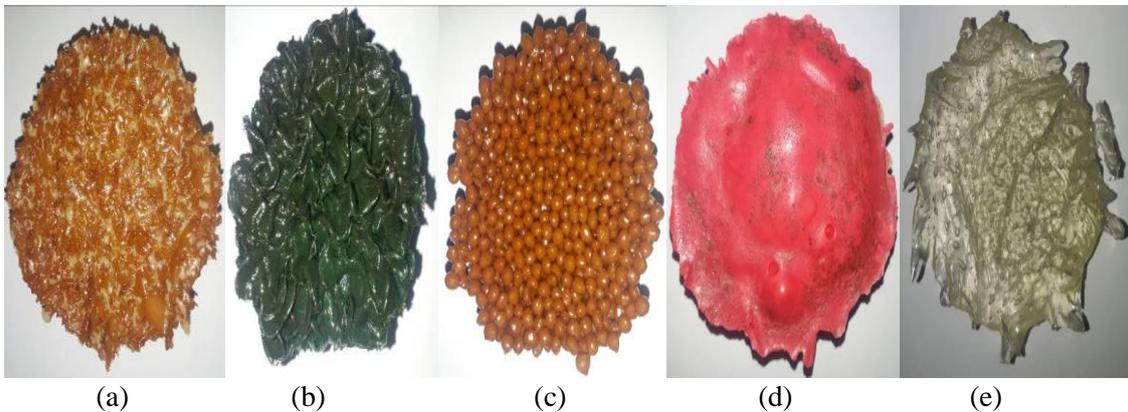


Figura 37 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 200 °C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.

Fonte: Autora (2018).

A Figura 38 e Tabela 7 apresentam as curvas das perdas de massa na temperatura de 220 °C para os 10 ciclos de aquecimento e resfriamento das amostras.

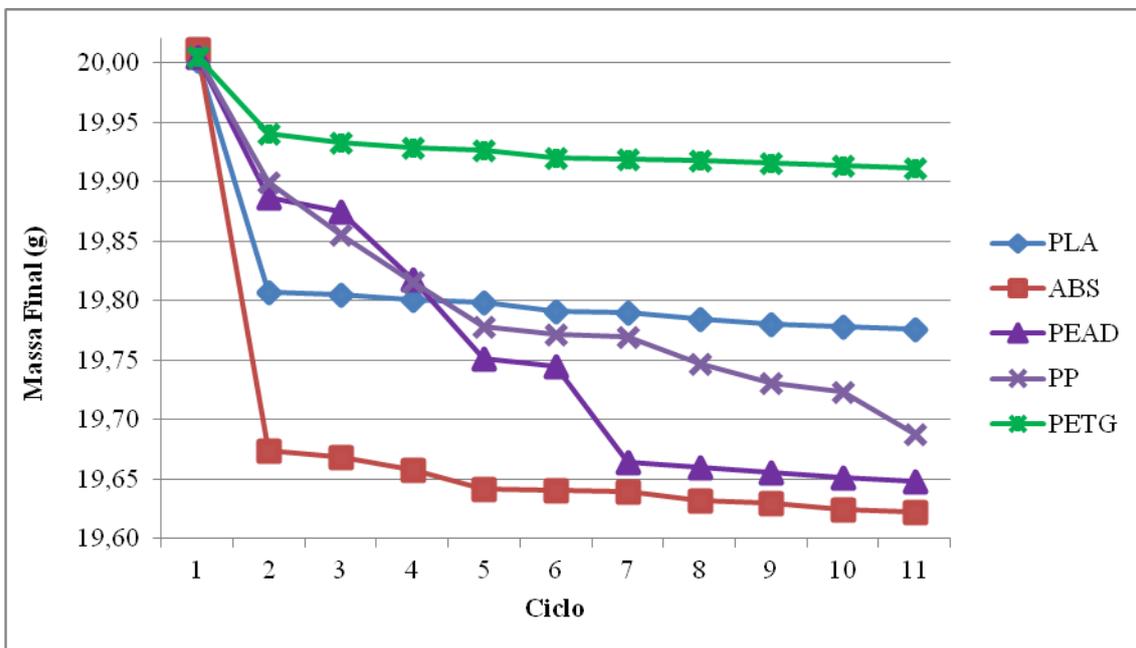


Figura 38 - Gráfico das curvas de perda de massa na temperatura 220 °C.

Fonte: Autora (2018).

Tabela 7 - Massa final de cada ciclo na temperatura de 220 °C.

Material	PLA (g)	%	ABS (g)	%	PEAD (g)	%	PP (g)	%	PETG (g)	%
Início	20,0015	-	20,0018	-	20,0048	-	20,0045	-	20,0046	-
1º Ciclo	19,8073	0,9709	19,6738	1,6399	19,8863	0,5924	19,8997	0,5239	19,9400	0,3229
2º Ciclo	19,8005	0,0343	19,6683	0,0280	19,8753	0,0553	19,8551	0,2241	19,9326	0,0371
3º Ciclo	19,8005	0,0000	19,6583	0,0508	19,8183	0,2868	19,816	0,1969	19,9288	0,0191
4º Ciclo	19,7989	0,0081	19,6421	0,0824	19,7513	0,3381	19,7777	0,1933	19,9267	0,0105
5º Ciclo	19,7914	0,0379	19,6404	0,0087	19,7446	0,0339	19,7714	0,0319	19,9199	0,0341
6º Ciclo	19,7899	0,0076	19,6397	0,0036	19,6645	0,4057	19,7692	0,0111	19,9186	0,0065
7º Ciclo	19,7843	0,0283	19,6323	0,0377	19,6601	0,0224	19,7475	0,1098	19,9179	0,0035
8º Ciclo	19,7804	0,0197	19,6301	0,0112	19,6552	0,0249	19,7311	0,0830	19,9157	0,0110
9º Ciclo	19,7785	0,0096	19,6247	0,0275	19,6511	0,0209	19,7231	0,0405	19,9134	0,0115
10º Ciclo	19,7757	0,0142	19,6227	0,0102	19,6485	0,0132	19,6882	0,1769	19,9115	0,0095
Total de Perda	0,2258	1,1306	0,3891	1,8999	0,3563	1,7935	0,3163	1,5915	0,0931	0,4659
Média de massa final	19,7907	-	19,6432	-	19,7355	-	19,7779	-	19,9225	-
Média da perda de massa	0,0226	-	0,0756	-	0,0710	-	0,0598	-	0,01844	-
Desvio padrão	0,0108	-	0,0179	-	0,0951	-	0,0637	-	0,0092	-
Variância	0,0036	-	0,0104	-	0,0017	-	0,0009	-	0,0004	-

Fonte: Autora (2018).

Na temperatura de 220 °C detectou se também outros resultados, como o ABS, que a partir do 2º ciclo teve a perda de 0,0280% de massa e foi o polímero que entre os 10 ciclos obteve a maior perda de 1,8999% de massa. O PEAD foi o segundo polímero com a maior perda com 1,7935% no final dos 10 ciclos, sendo que no 6º ciclo apresentou perda, cuja medida foi de 0,4057% de perda de massa. O PETG que teve a menor perda equivalente a 0,4659% de massa.

Verificando a variância de perda de massa, percebe-se que a maior variância equivalente a 0,0104 g de perda de massa foi com o ABS. E o polímero PETG obteve a menor variância de 0,0004 g de perda de massa, ou seja, não há perda significativa de massa na temperatura de 220 °C entre os 10 ciclos realizados.

Nesse sentido, o Quadro 14 apresenta os resultados durante a execução do ensaio de caracterização de materiais, em que se constatou que os polímeros ao chegar em um

determinado ciclo começam a ter alteração na cor, isso comprova que nessa temperatura suportam em média até o 7º ciclo para o PLA, 4º ciclo para o PEAD, 6º ciclo para o ABS e 10º ciclo para o PP e o PETG. Nesta temperatura o único polímero que não teve alteração na cor final foi o PP, conforme a Figura 39. Além disso, todos os polímeros, como o PLA, PETG e o PP derreteram por completo, o PEAD entrou no processo de carbonização e no caso do ABS os grânulos se expandiram, ou seja, houve alteração de formato.

Quadro 14 - Considerações finais do ensaio na temperatura de 220 °C.

Material	PLA	ABS	PEAD	PP	PETG
Cor inicial	Branco	Bege	Azul	Vermelho	Transparente
Cor Final	Marrom	Marrom	Verde musgo	Não teve alteração na cor	Amarelo transparente
Houve mudança no formato? Como?	Os grânulos derreteram, nisso o material grudou e começou a carbonizar parcialmente	Os grânulos começaram a dilatar e escureceu a cor	Os grânulos expandiram, e iniciou o processo de carbonização na parte de cima do material	Os grânulos derreteram transformando em uma pasta com umas películas pretas	Os grânulos derreteram por completo transformando em um aspecto de resina
É possível reutilizar o material em no máximo quantos ciclos?	A partir do 2º ciclo tem início a alteração na cor, porém é possível ser reutilizado até 7 vezes	A partir do 4º ciclo iniciou a alteração na cor, porém é possível ser reutilizado até 6 vezes	A partir do 2º ciclo iniciou a alteração na cor ficando verde, porém é possível ser reutilizado até 4 vezes	A partir do 6º ciclo começaram aparecer as películas pretas, porém é possível ser reutilizado por 10 vezes	A partir do 5º ciclo começaram a escurecer, porém é possível ser reutilizado por até 10 vezes

Fonte: Autora (2018)

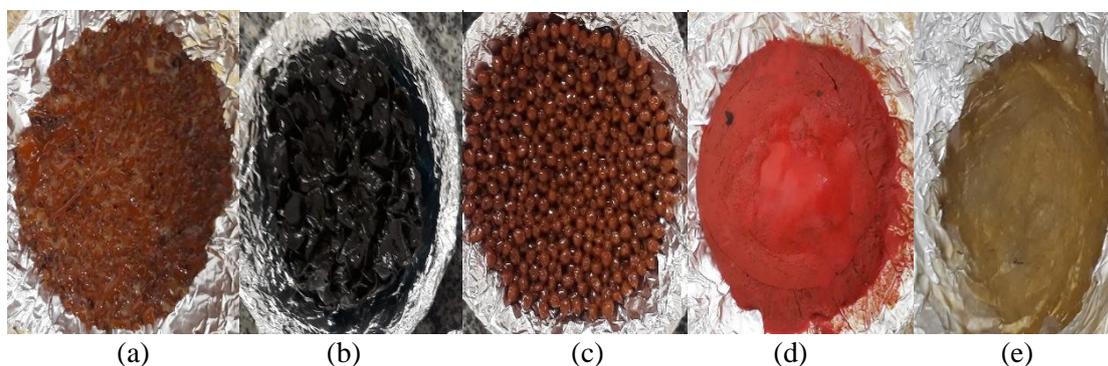


Figura 39 - Amostras na temperatura de 220 °C: (a) PLA no 7º ciclo; (b) PEAD no 4º ciclo; (c) ABS no 6º ciclo; (d) PP no 10º ciclo; (e) PETG no 10º ciclo.

Fonte: autora (2018).

A Figura 40 corresponde aos resultados finais da amostra dos polímeros após ter sido aquecido em 10 ciclos na temperatura de 220 °C.

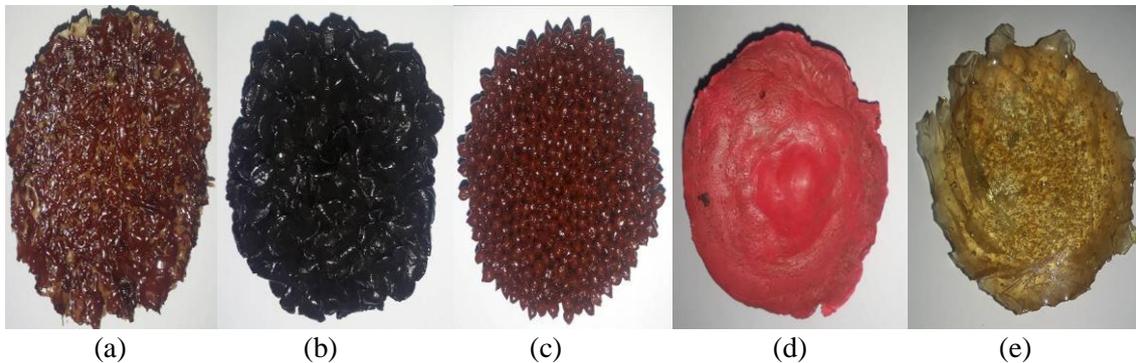


Figura 40 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 220 °C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.

Fonte: autora (2018).

A Figura 41 e Tabela 8 apresentam as curvas das perdas de massa na temperatura de 240 °C para os 10 ciclos de aquecimento e resfriamento das amostras.

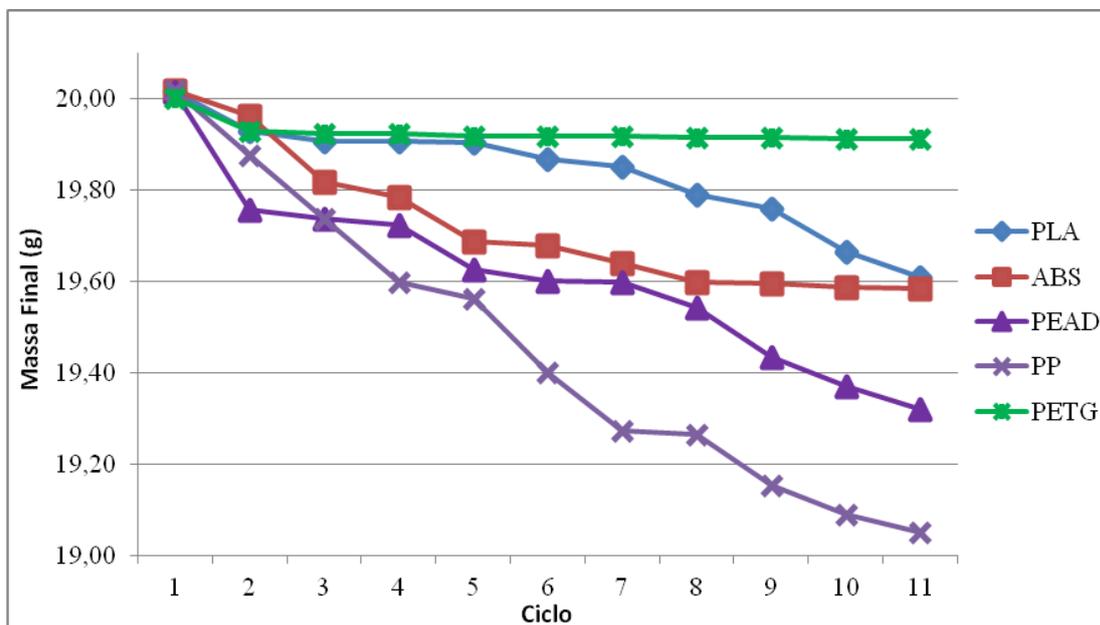


Figura 41 - Gráfico das curvas de perda de massa na temperatura 240 °C.

Fonte: Autora (2018).

Tabela 8 - Massa final de cada ciclo na temperatura de 240 °C.

Material	PLA (g)	%	ABS (g)	%	PEAD (g)	%	PP (g)	%	PETG (g)	%
Início	20,0046	-	20,0075	-	20,0001	-	20,0008	-	20,0081	-
1º Ciclo	19,9322	0,3619	19,9528	0,2734	19,9115	0,4430	19,8397	0,8055	19,9421	0,3299
2º Ciclo	19,8854	0,2348	19,8695	0,4175	19,8875	0,1205	19,7270	0,5681	19,9369	0,0261
3º Ciclo	19,8434	0,2112	19,8429	0,1339	19,7849	0,5159	19,7117	0,0776	19,9292	0,0386
4º Ciclo	19,834	0,0474	19,8343	0,0433	19,7714	0,0682	19,651	0,3079	19,9254	0,0191
5º Ciclo	19,8176	0,0827	19,8032	0,1568	19,766	0,0273	19,5761	0,3812	19,9235	0,0095
6º Ciclo	19,7139	0,5233	19,8019	0,0066	19,6828	0,4209	19,4324	0,7341	19,9193	0,0211
7º Ciclo	19,6893	0,1248	19,7821	0,1000	19,6672	0,0793	19,4307	0,0087	19,9167	0,0131
8º Ciclo	19,6674	0,1112	19,7679	0,0718	19,6402	0,1373	19,381	0,2558	19,9153	0,0070
9º Ciclo	19,661	0,0325	19,761	0,0349	19,639	0,0061	19,3646	0,0846	19,9108	0,0226
10º Ciclo	19,6424	0,0946	19,749	0,0607	19,6369	0,0107	19,3456	0,0981	19,9097	0,0055
Total de Perda	0,3622	1,8244	0,2585	1,2989	0,3632	1,8292	0,6552	3,3215	0,0984	0,4924
Média de massa final	19,7687	-	19,8165	-	19,7387	-	19,5460	-	19,9229	-
Média da perda de massa	0,0362	-	0,0259	-	0,0363	-	0,0655	-	0,0098	-
Desvio padrão	0,1053	-	0,0614	-	0,1023	-	0,1779	-	0,0108	-
Variância	0,0010	-	0,0006	-	0,0015	-	0,0032	-	0,0004	-

Fonte: Autora (2018).

Observou-se na temperatura de 240 °C que o polímero PP no 2º ciclo obteve a maior curva de perda com 0,5681% e no 6º ciclo com 0,7314% de perda de massa, porém, ao final dos 10 ciclos houve a perda equivalente 3,3215% de massa. O PETG foi o polímero que obteve a menor perda de massa cuja medida foi de 0,4924% de massa.

Pode se verificar também que a maior variância de perda de massa equivalente a 0,0032 g com o polímero PP. E, o PETG foi o polímero que obteve a menor variância equivalente a 0,0004 g de perda de massa. Percebe - se que, não há perda significativa de massa na temperatura de 240 °C entre os 10 ciclos realizados.

O Quadro 15 apresenta as conclusões evidenciadas durante a execução do ensaio de caracterização de materiais, em que se constatou que os polímeros nessa temperatura já apresentam alteração na cor logo no início dos ciclos. No caso do PLA, suporta até o 3º ciclo, o PEAD suporta até o 2º ciclo, o ABS 4º ciclo, para o PP suportam até o 6º ciclo e

para o PETG suportam até o 9º ciclo, conforme a Figura 42. Todos os polímeros sofreram alteração na sua cor final. Ambos tiveram alteração em seu formato, e no caso do PLA, ABS e o PEAD começaram a se carbonizar, enquanto o PP e PETG derreteram-se por completo.

Quadro 15 - Considerações finais do ensaio na temperatura 240 °C.

Material	PLA	ABS	PEAD	PP	PETG
Cor inicial	Branco	Bege	Azul	Vermelho	Transparente
Cor Final	Marrom	Marrom escuro para um tom de preto	Cinza	Vermelho terra	Amarelo transparente
Houve mudança no formato? Como	Os grânulos derreteram e começou a carbonizar	Os grânulos começaram a dilatar e começou a carbonizar	Os grânulos expandiram, e carbonizou a parte de cima do material	Os grânulos derreteram transformando em uma pasta	Os grânulos derreteram por completo transformando em um aspecto de resina
É possível reutilizar o material em no máximo quantos ciclos?	A partir do 2º ciclo começa ter alteração na cor, podendo ser reutilizado por até 3 vezes	A partir do 3º ciclo começou ter alteração na cor, podendo ser reutilizado por 4 vezes	A partir do 1º ciclo começou ter alteração na cor ficando verde. Apresentou a possibilidade de reutilização de até 2 vezes	A partir do 4º ciclo começou aparecer películas pretas. Pode ser reutilizado até 6 vezes	A partir do 3º ciclo começou a escurecer. Pode ser reutilizado até 9 vezes

Fonte: Autora (2018).



Figura 42 - Amostras na temperatura de 240 °C: (a) PLA no 3º ciclo; (b) PEAD no 2º ciclo; (c) ABS no 4º ciclo PEAD no 2º ciclo; (d) PP no 6º ciclo; (e) PETG no 9º ciclo.

Fonte: autora (2018).

A Figura 43 corresponde aos resultados finais das amostras dos polímeros após terem sido aquecidos em 10 ciclos na temperatura de 240 °C.

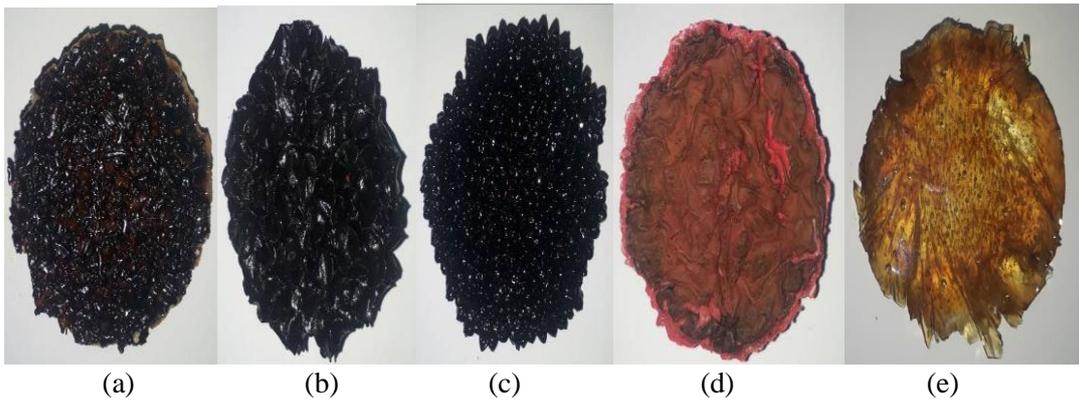


Figura 43 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 240 °C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.

Fonte: Autora (2018).

A Figura 44 e Tabela 9 apresentam as curvas das perdas de massa das amostras na temperatura de 260 °C para os 10 ciclos de aquecimento e resfriamento.

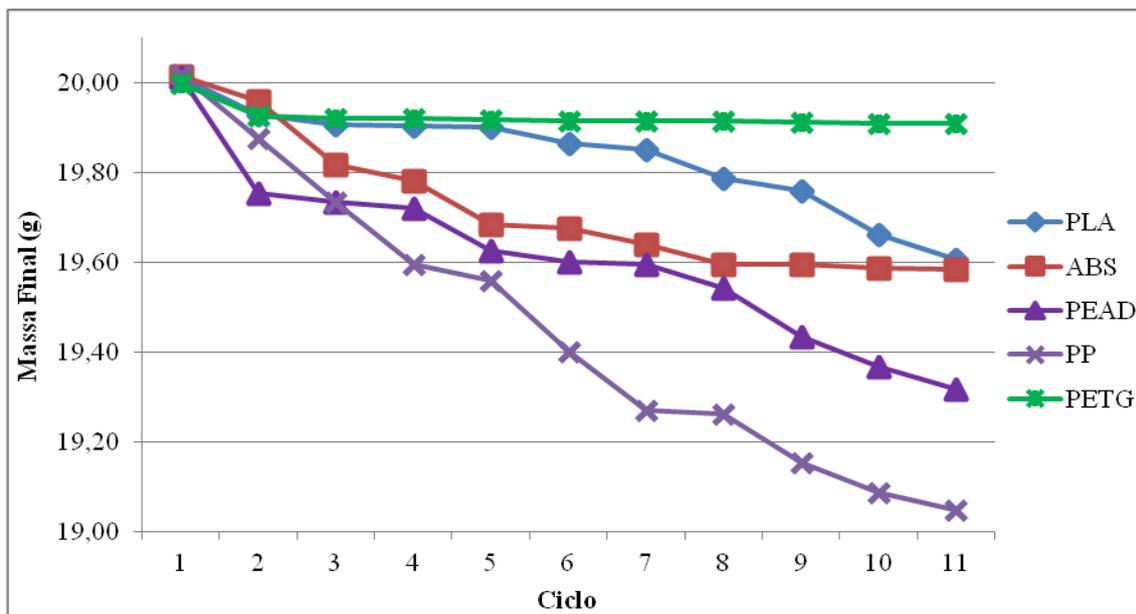


Figura 44 - Gráfico da Curva de perda de massa na temperatura de 260 °C.

Fonte: Autora (2018).

Tabela 9 - Massa final de cada ciclo na temperatura de 260 °C.

Material	PLA (g)	%	ABS (g)	%	PEAD (g)	%	PP (g)	%	PETG (g)	%
Início	20,0141		20,0170		20,0146		20,0180		20,0003	
1º Ciclo	19,9297	0,4217	19,9622	0,2738	19,7566	1,2891	19,8767	0,7059	19,928	0,3615
2º Ciclo	19,9073	0,1124	19,8182	0,7214	19,737	0,0992	19,7365	0,7053	19,9227	0,0266
3º Ciclo	19,9058	0,0075	19,7844	0,1706	19,7223	0,0745	19,5974	0,7048	19,9219	0,0040
4º Ciclo	19,9025	0,0166	19,6871	0,4918	19,6265	0,4857	19,5607	0,1873	19,9187	0,0161
5º Ciclo	19,8674	0,1764	19,6776	0,0483	19,6016	0,1269	19,4014	0,8144	19,9175	0,0060
6º Ciclo	19,8521	0,0770	19,6405	0,1885	19,5981	0,0179	19,2727	0,6634	19,9165	0,0050
7º Ciclo	19,7891	0,3173	19,5977	0,2179	19,5437	0,2776	19,2638	0,0462	19,9157	0,0040
8º Ciclo	19,7595	0,1496	19,596	0,0087	19,4351	0,5557	19,1541	0,5695	19,914	0,0085
9º Ciclo	19,6637	0,4848	19,5874	0,0439	19,3691	0,3396	19,0885	0,3425	19,9122	0,0090
10º Ciclo	19,6093	0,2767	19,5844	0,0153	19,3188	0,2597	19,0492	0,2059	19,9114	0,0040
Total de Perda	0,4048	2,0400	0,4326	2,1801	0,6958	3,5258	0,9688	4,9450	0,0889	0,4448
Média de massa final	19,8186	-	19,6936	-	19,5709	-	19,4001	-	19,9179	-
Média da perda de massa	0,0405	-	0,0433	-	0,0696	-	0,0969	-	0,0089	-
Desvio padrão	0,1108	-	0,12551	-	0,15539	-	0,2830	-	0,0051	-
Variância	0,0011	-	0,0021	-	0,0056	-	0,0029	-	0,0005	-

Fonte: Autora (2018).

Constatou-se que o PP na temperatura de 260 °C, obteve a maior perda após os 10 ciclos de aquecimento, alcançando 4,9450% de perda de massa, e que do 1º ao 3º ciclo e do 5º ao 6º ciclo a perda de massa foi a maior durante todo o aquecimento. O PETG obteve a menor perda com 0,4448% de massa.

Analisando a variância de perda de massa, percebe-se que a maior variância equivalente a 0,0056 g de perda de massa foi com o PEAD. Já o PETG obteve a menor variância de 0,0005 g de perda de massa, nota-se que não há perda significativa de massa na temperatura de 260 °C entre os 10 ciclos realizados.

No Quadro 16 se encontra descrita as conclusões obtidas durante a execução do ensaio de caracterização de materiais, cuja constatação foi que os polímeros nessa temperatura já apresentam alteração na cor e mudança no formato logo no início dos ciclos, como o PLA e o ABS, que suportam até o 3º ciclo sem alterações, 2º ciclo para o PEAD, 6º

ciclo para o PP e 5º ciclo para o PETG. Constatou ainda, que a partir destes ciclos, os polímeros já apresentam alteração na cor, conforme a Figura 45. Todos tiveram alteração no formato, como o PLA, ABS, PEAD e o PP, que entraram em processo de carbonização, e o PETG derreteu se por completo e transformou-se em resina.

Quadro 16 - Considerações finais do ensaio na temperatura 260 °C.

Material	PLA	ABS	PEAD	PP	PETG
Cor inicial	Branco	Bege	Azul	Vermelho	Transparente
Cor Final	Marrom	Preto	Preto	Vermelho terra	Amarelo transparente
Houve mudança no formato? Como?	Os grânulos derreteram e carbonizaram	Os grânulos começaram a dilatar e carbonizaram	Os grânulos expandiram, e carbonizaram	Os grânulos derreteram transformando em uma pasta, criando uma película com bolhas em cima	Os grânulos derreteram por completo transformando em um aspecto de resina
É possível reutilizar o material em no máximo quantos ciclos?	A partir do 2º ciclo começa ter alteração na cor, podendo ser reutilizados até 3 vezes	A partir do 2º ciclo começou a apresentar alteração na cor. Pode ser reutilizado até 3 vezes	A partir do 1º ciclo começaram a apresentar alteração na cor, tornando esverdeada. Pode ser reutilizado até 2 vezes	A partir do 4º ciclo começou a apresentar películas pretas. Pode ser reutilizado até 6 vezes	A partir do 2º ciclo começaram a ter alteração na cor. Pode ser reutilizado até 5 vezes

Fonte: Autora (2018).

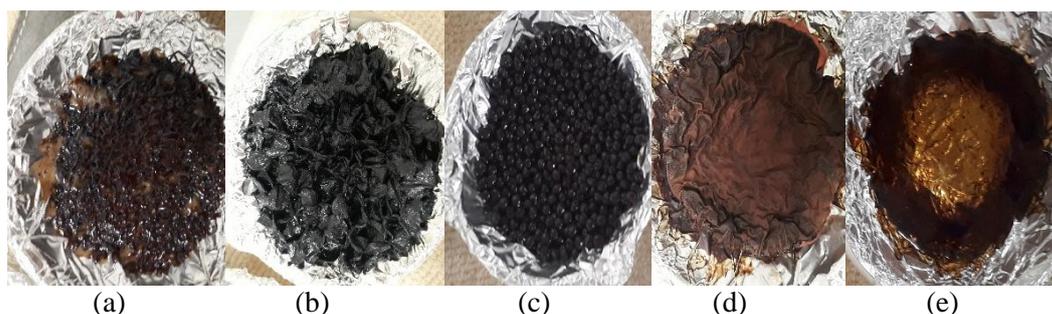


Figura 45 - Amostras na temperatura de 260 °C: (a) PLA no 3º ciclo; (b) PEAD no 2º ciclo; (c) ABS no 3º ciclo; (d) PP no 6º ciclo; (e) PETG no 5º ciclo.

Fonte: Autora (2018).

A Figura 46 corresponde aos resultados finais da amostra dos polímeros após serem aquecidos em 10 ciclos na temperatura de 260 °C.

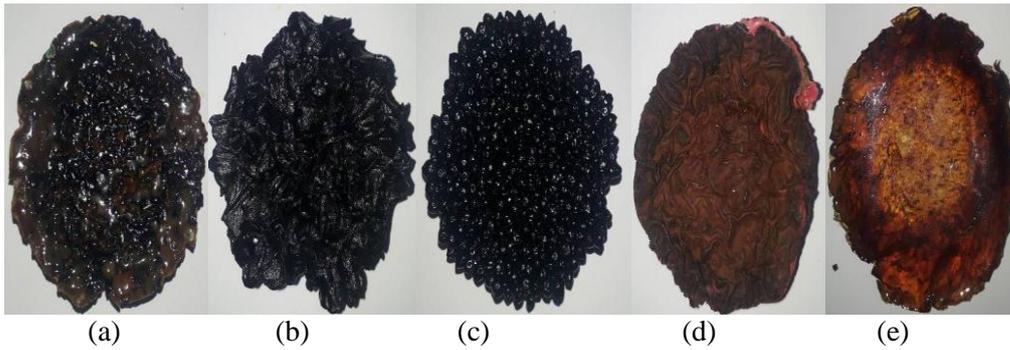


Figura 46 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 260 °C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.

Fonte: Autora (2018).

A Figura 47 e Tabela 10 apresentam as curvas das perdas de massa na temperatura de 280 °C para os 10 ciclos de aquecimento e resfriamento das amostras.

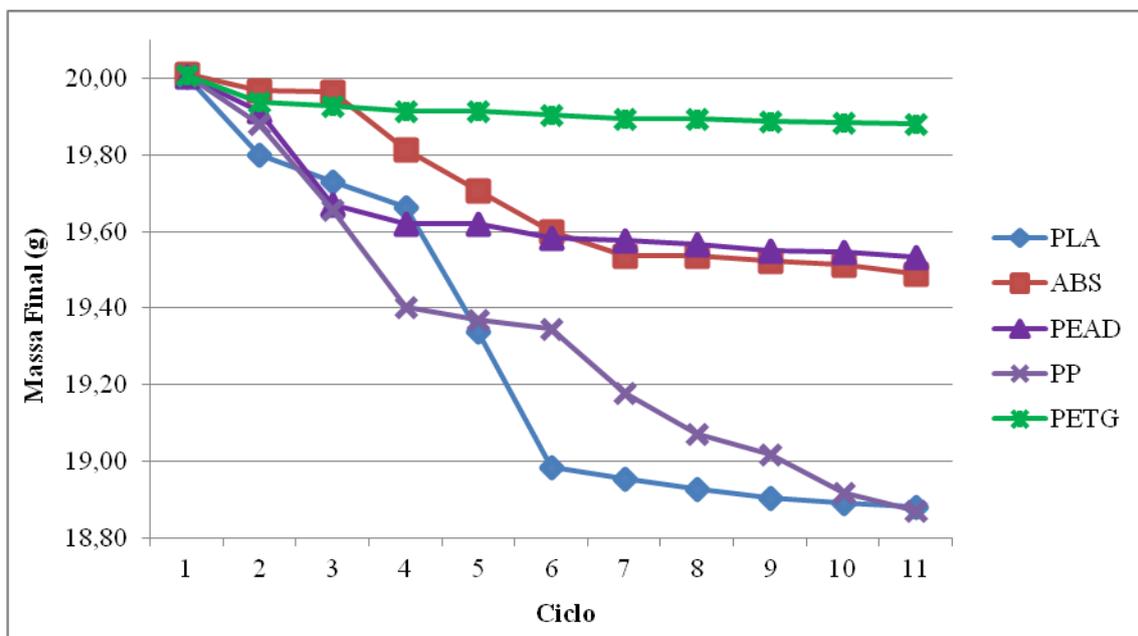


Figura 47 - Gráfico da Curva de perda de massa para temperatura de 280 °C.

Fonte: Autora (2018).

Tabela 10 - Massa final de cada ciclo na temperatura de 280 °C.

Material	PLA (g)	%	ABS (g)	%	PEAD (g)	%	PP (g)	%	PETG (g)	%
Início	20,0043		20,0119		20,0075		20,009		20,0101	
1° Ciclo	19,8025	1,0088	19,9679	0,2199	19,9150	0,4623	19,8835	0,6272	19,9393	0,3538
2° Ciclo	19,7305	0,3636	19,9674	0,0025	19,6710	1,2252	19,6580	1,1341	19,9292	0,0507
3° Ciclo	19,6658	0,3279	19,8136	0,7703	19,6223	0,2476	19,4026	1,2992	19,9159	0,0667
4° Ciclo	19,3402	1,6557	19,7074	0,5360	19,6219	0,0020	19,3702	0,1670	19,9147	0,0060
5° Ciclo	18,9833	1,8454	19,6022	0,5338	19,5849	0,1886	19,3452	0,1291	19,9054	0,0467
6° Ciclo	18,9544	0,1522	19,5384	0,3255	19,5762	0,0444	19,1803	0,8524	19,8963	0,0457
7° Ciclo	18,9269	0,1451	19,5380	0,0020	19,5678	0,0429	19,0703	0,5735	19,8948	0,0075
8° Ciclo	18,9042	0,1199	19,5231	0,0763	19,5521	0,0802	19,0166	0,2816	19,8892	0,0281
9° Ciclo	18,8913	0,0682	19,5149	0,0420	19,5478	0,0220	18,9184	0,5164	19,8867	0,0126
10° Ciclo	18,8802	0,0588	19,4902	0,1266	19,5329	0,0762	18,8720	0,2453	19,8834	0,0166
Total de Perda	1,1241	5,7456	0,5217	2,6348	0,4746	2,3915	1,1370	5,8258	0,1267	0,6345
Média de massa final	19,2079	-	19,6663	-	19,6192	-	19,2717	-	19,9055	-
Média da perda de massa	0,1124	-	0,0522	-	0,0475	-	0,1137	-	0,0127	-
Desvio padrão	0,3869	-	0,1875	-	0,1120	-	0,3256	-	0,0189	-
Variância	0,0177	-	0,0029	-	0,0055	-	0,0065	-	0,0004	-

Fonte: Autora (2018).

Foi verificado que o PP e o PLA na temperatura de 280 °C foram os polímeros que obtiveram a maior perda de massa, situação em que o PP perdeu nos 10 ciclos 5,8258% de perda de massa, já o PLA obteve uma perda de 5,7456%. O PETG foi o polímero que obteve a menor perda de massa cuja medida foi de a 0,6345% de massa.

Verificando também a variância de perda de massa, nota-se que o polímero PLA obteve a maior variância cujo valor de 0,0177 g de perda de massa entre os ciclos. Já o PETG obteve a menor variância de 0,0004 g de perda de massa, ou seja, não há perda de massa significativa na temperatura de 280 °C, entre os 10 ciclos realizados.

O Quadro 17 apresenta as conclusões durante a execução do ensaio de caracterização dos materiais, em que se constatou que os polímeros para esta temperatura têm alteração e mudança no formato no início do ciclo, onde todos os polímeros ao final do 10º ciclo

já estavam todos carbonizados. O ABS, PLA e o PEAD ainda suportam até o 2º ciclo, o PP e o PETG suportam até o 4º ciclo, conforme a Figura 48.

Quadro 17 - Considerações finais do ensaio na temperatura 280 °C.

Material	PLA	ABS	PEAD	PP	PETG
Cor inicial	Branco	Bege	Azul	Vermelho	Transparente
Cor Final	Preto	Preto	Preto	Marron	Laranjado queimado
Houve mudança no formato? Como?	Os grânulos derreteram e carbonizaram	Os grânulos começaram a dilatar e carbonizar	Os grânulos expandiram, e carbonizaram	Os grânulos derreteram transformando em uma pasta, criando uma película com bolhas em cima	Os grânulos derreteram por completo transformando em um aspecto de resina mas carbonizaram
É possível reutilizar o material em no máximo quantos ciclos?	A partir do 1º ciclo começa ter alteração na cor. O polímero pode ser reutilizado em até 2 vezes	A partir do 1º ciclo começou ter alteração na cor. O polímero pode ser reutilizado até 2 vezes	A partir do 1º ciclo começou ter alteração na cor, dando ao polímero um tom esverdeado. O polímero pode ser reutilizado até 2 vezes	A partir do 1º ciclo surgiram películas pretas. O polímero pode ser reutilizado até 4 vezes	A partir do 1º ciclo tem início o processo de alteração na cor. O polímero pode ser reutilizado até 4 vezes

Fonte: Autora (2018).

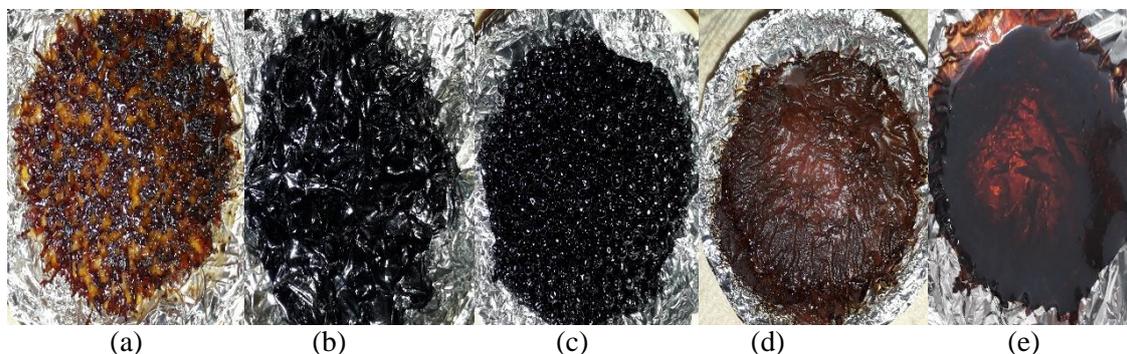


Figura 48 - Amostras na temperatura de 280 °C: (a) PLA no 2º ciclo; (b) PEAD no 2º ciclo; (c) ABS no 2º ciclo; (d) PP no 4º ciclo; (e) PETG no 4º ciclo.

Fonte: Autora (2018).

A Figura 49 corresponde aos resultados finais da amostra dos polímeros após serem aquecidos em 10 ciclos na temperatura de 280 °C.

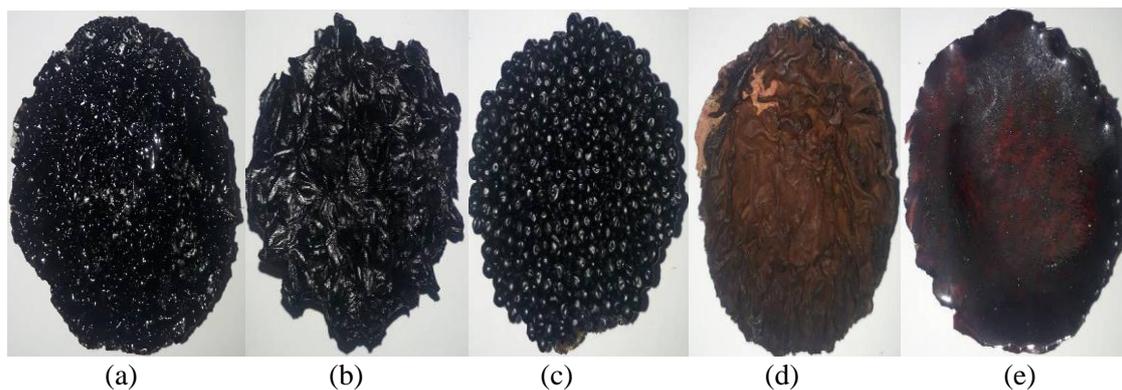


Figura 49 - Amostras finais após os 10 ciclos na temperatura de 280 °C: (a) PLA; (b) PEAD; (c) ABS; (d) PP; (e) PETG.

Fonte: Autora (2018).

Os resultados obtidos nesta análise mostraram que na temperatura de 280 °C, os polímeros não podem ser reaproveitados por vários ciclos, pois, o PLA, ABS e o PEAD suportam apenas até o 2º ciclo, já, o PP e o PETG suportam apenas até o 3º ciclo. Outro resultado importante foi que em todas as temperaturas a perda de massa do PETG foi a menor em comparação com os demais polímeros. O polímero PP na temperatura de 260 °C obteve a maior perda de massa em comparação com as demais temperaturas.

No ensaio de aquecimento e resfriamento foi analisado o formato das amostras, situação em que apenas o ABS foi o único material que não se liquefez em todos os ciclos e temperaturas, ou seja, os grânulos apenas começaram a dilatar o seu formato, mas não chegou a derreter. O PP, a partir do primeiro ciclo já derreteu, transformou-se em pasta e o PETG em resina. No PEAD todos os grânulos se expandiram transformando-se em pasta, mas foi possível visualizar que os grânulos se abriram e com o PLA o material liquefez, porém, foi possível visualizar alguns *flakes* do material.

A temperatura que proporcionou a maior perda de massa foi de 280 °C com o polímero PP, com 5,8286%, mas à temperatura de 260 °C o PP também apresentou uma perda expressiva, alcançando 4,9450%. À temperatura 240 °C também foi o PP que apresentou a maior perda, com índice de 3,3215%. À temperatura de 220 °C a maior

perda foi com o polímero ABS com 1,8999%; e aos 200 °C, o material que teve a maior perda de massa foi o polímero ABS, com 0,5812%. Aos 180 °C, o material com a maior perda foi o polímero PEAD, com 1,6017%. Nota-se que a temperatura de 200 °C, comparativamente, foi a que obteve a menor perda de massa.

Outro ponto de destaque do experimento, é que, em todas as temperaturas às quais os polímeros foram expostos, não houve perda de massa significativa. Exemplos que validam esta afirmativa são que a temperatura que alcançou a maior variância foi a de 280 °C, com o polímero PLA, equivalente a 0,0177 g de perda de massa, mesmo índice do PEAD e do PP à temperatura de 200 °C. Ainda, o PP e o PETG alcançaram o mesmo percentual de perda de massa - 0,001 g - à temperatura de 180 °C. Constata-se, portanto, que apesar de haver variância da perda de massa, ela é inexpressiva, não chega a 1 g, generalizadamente. Assim, não há perda de massa significativa no decorrer dos 10 ciclos.

4.2 Fabricação do filamento

Durante o experimento da fabricação do filamento foram testados quatro tipos de polímeros. Como o ABS, foi realizado o experimento com material virgem e reciclado, PEAD, PP e o PLA com materiais reciclados utilizando uma matriz de 1,75 mm.

Após ser encontrada a temperatura ideal para fabricação do filamento, foi necessário realizar a medição para validar a tolerância dimensional do filamento. De acordo com Costa (2015) a tolerância ideal para o diâmetro do filamento varia entre 0,05 mm à 0,07 mm, desta forma, deseja-se que a tolerância do filamento produzido seja aproximadamente de 0,05 mm.

Foi realizada a medição do diâmetro a cada 5 cm de filamento, e quando era necessário realizava a redução ou aumento da temperatura, aguardava-se 3 minutos para que a extrusora atingisse e estabilizasse na temperatura desejada. Foram realizadas as medições com o auxílio de um paquímetro digital de resolução de 0,01 mm para cada amostra, totalizando em:

- a. No polímero ABS reciclado na cor amarelo - 25 medições;
- b. No ABS reciclado natural - 25 medições;
- c. No ABS virgem - 25 medições;
- d. No ABS reciclado na cor branco - 25 medições;
- e. No PP reciclado - 25 medições; e
- f. No PEAD - 40 medições.

Para o polímero ABS reciclado na cor amarela, o resultado das medições pode ser visto na Tabela 11, em que se apresentam as medições em diferentes pontos no filamento para cada temperatura testada.

Tabela 11 - Média de espessura em milímetros do filamento ABS reciclado na cor amarelo.

Dimensão do filamento (mm)	Temperatura				
	200 °C	205 °C	210 °C	215 °C	220 °C
Teste 1	1,81	1,74	1,76	1,54	1,48
Teste 2	1,67	1,66	1,69	1,43	1,36
Teste 3	1,71	1,69	1,71	1,50	1,37
Teste 4	1,72	1,70	1,68	1,42	1,41
Teste 5	1,82	1,75	1,73	1,56	1,41
Média	1,75	1,71	1,71	1,49	1,41
Máximo	1,82	1,75	1,76	1,56	1,48
Mínimo	1,67	1,66	1,68	1,42	1,36
Desvio Padrão	0,066	0,037	0,032	0,063	0,047

Fonte: Autora (2018).

A temperatura ideal para fabricação do filamento utilizando material proveniente de prototipagem é na temperatura de 205 °C e 210 °C, pois, a oscilação do diâmetro foi aceitável atingindo o desejado de 1,75 mm. Conforme apresentado na Figura 50.

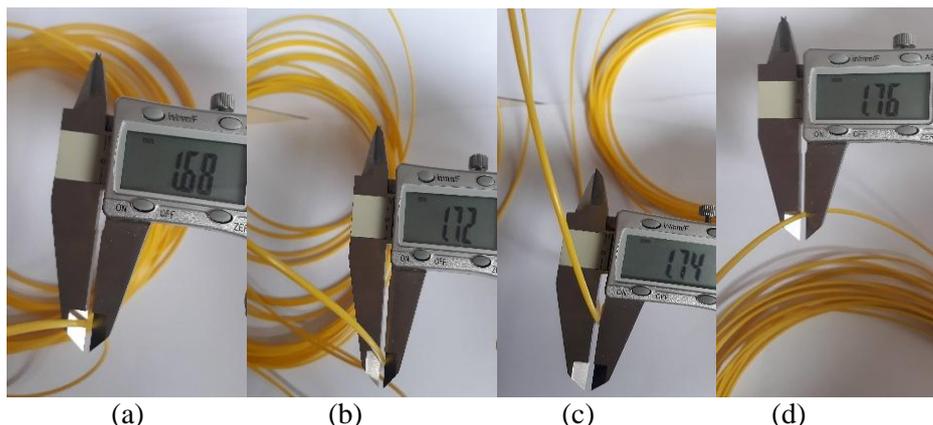


Figura 50 - Medição do diâmetro do filamento ABS amarelo nas temperaturas 210°C e 205°C: (a) temperatura 210°C; (b) temperatura 210 °C; (c) temperatura 205°C; e (d) temperatura 205 °C. Fonte: Autora (2018).

Para o polímero ABS reciclado na cor natural, o resultado das medições pode ser visto na Tabela 12, que apresenta as medições em diferentes pontos no filamento para cada temperatura testada.

Tabela 12 - Média de espessura em milímetro do filamento ABS reciclado na cor natural.

Dimensão do filamento (mm)	Temperatura				
	200 °C	205 °C	210 °C	215 °C	220 °C
Teste 1	1,59	1,69	1,80	1,84	1,91
Teste 2	1,64	1,73	1,79	1,88	1,93
Teste 3	1,64	1,79	1,81	1,83	1,90
Teste 4	1,66	1,74	1,78	1,81	1,97
Teste 5	1,69	1,77	1,89	1,82	1,92
Média	1,64	1,74	1,81	1,84	1,93
Máximo	1,69	1,79	1,89	1,88	1,97
Mínimo	1,59	1,69	1,78	1,81	1,90
Desvio Padrão	0,036	0,038	0,044	0,027	0,027

Fonte: Autora (2018)

O polímero reciclado de cor natural na temperatura de 205 °C foi a correta para que o filamento atingisse um diâmetro entre 1,69 mm e 1,77 mm, conforme apresentado na Figura 51.



Figura 51 - Medição do diâmetro do filamento com ABS reciclado.
Fonte: Autora (2018).

O polímero ABS reciclado na cor branca pode ser visto na Tabela 13, em que se apresentam as medições em diferentes pontos no filamento para cada temperatura testada.

Tabela 13 - Média de espessura em milímetro do filamento ABS reciclado na cor branca.

Dimensão do filamento (mm)	Temperatura				
	200 °C	205 °C	210 °C	215 °C	220 °C
Teste 1	2,00	2,01	2,19	1,97	1,71
Teste 2	2,02	2,10	2,13	1,80	1,78
Teste 3	2,18	2,06	2,10	1,88	1,77
Teste 4	2,16	2,09	2,14	1,90	1,73
Teste 5	2,17	2,04	2,12	1,92	1,75
Média	2,11	2,06	2,14	1,89	1,75
Máximo	2,18	2,10	2,19	1,97	1,78
Mínimo	2,00	2,01	2,10	1,80	1,71
Desvio Padrão	0,09	0,04	0,03	0,06	0,03

Fonte: Autora (2018).

Para o polímero ABS reciclado na cor branca, a temperatura ideal para fabricação do filamento é de 220 °C (Figura 52).

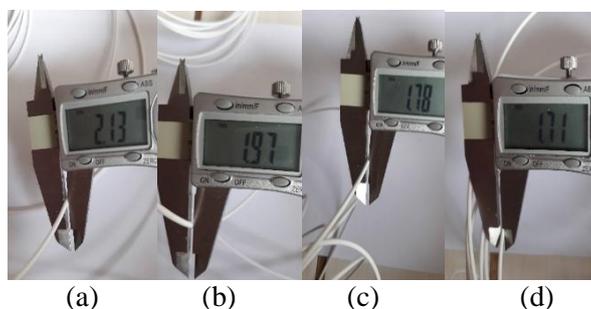


Figura 52 - Medição do diâmetro do filamento ABS branco reciclado: (a) temperatura 210 °C; (b) temperatura 215 °C; (c) temperatura 220 °C; e (d) temperatura 220 °C.

Fonte: Autora (2018).

No polímero ABS virgem as medições podem ser vistas na Tabela 14 em diferentes pontos no filamento para cada temperatura testada.

Tabela 14 - Média de espessura em milímetros do filamento ABS virgem.

Dimensão do filamento (mm)	Temperatura 220 °C				
Teste 1	1,72	1,76	1,73	1,75	1,77
Teste 2	1,78	1,72	1,71	1,70	1,68
Teste 3	1,79	1,75	1,72	1,69	1,67
Teste 4	1,66	1,72	1,74	1,70	1,79
Teste 5	1,68	1,79	1,80	1,72	1,75
Média	1,73				
Máximo	1,80				
Mínimo	1,66				
Desvio padrão	0,04				

Fonte: Autora (2018).

A fabricação do filamento com o polímero ABS virgem, utilizando a temperatura inicialmente de 220 °C foi possível atingir o diâmetro entre 1,72 mm e 1,76 mm, como apresentado na Figura 53.



Figura 53 - Medição do diâmetro do filamento ABS virgem.

Fonte: Autora (2018).

Para o polímero PP reciclado na cor vermelha, o resultado das medições pode ser visto na Tabela 15 em diferentes pontos no filamento para cada temperatura testada.

Tabela 15 - Média de espessura em milímetros do filamento PP reciclado na cor vermelho.

Dimensão do filamento (mm)	Temperatura				
	165 °C	180 °C	175 °C	180 °C	190 °C
Teste 1	1,43	2,03	1,78	2,03	2,08
Teste 2	1,32	1,92	1,69	1,92	2,10
Teste 3	1,45	1,98	1,68	1,98	2,07
Teste 4	1,41	2,00	1,77	2,00	2,02
Teste 5	1,39	1,99	1,75	1,99	2,05
Média	1,40	1,98	1,73	1,98	2,06
Máximo	1,45	2,03	1,78	2,03	2,10
Mínimo	1,32	1,92	1,68	1,92	2,02
Desvio Padrão	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03

Fonte: Autora (2018).

Para o polímero PP a temperatura ideal foi entre 170 °C e 175 °C para fabricação do filamento, para atingir dimensão de 1,75 mm, conforme apresentado na Figura 54 (a-b).

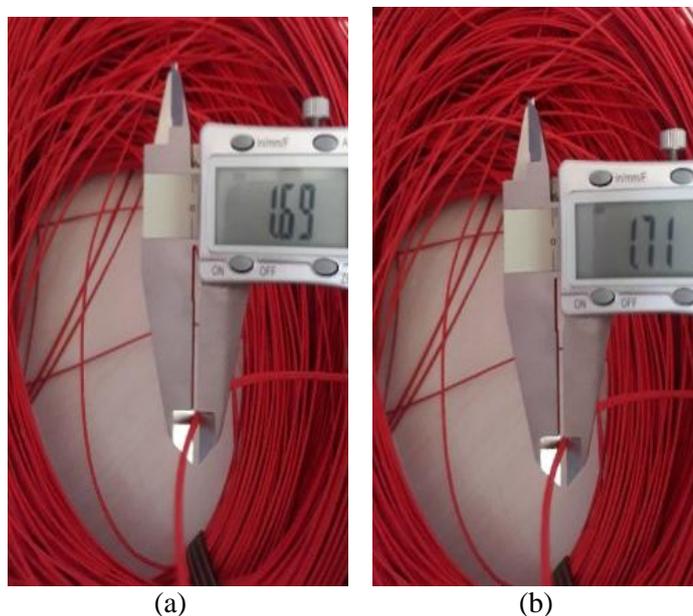


Figura 54 - Medição do diâmetro do filamento PP reciclado: (a) temperatura 170°C; e (b) temperatura 175 °C.

Fonte: Autora (2018).

Para o polímero PEAD reciclado na cor azul, o resultado das medições pode ser visto na Tabela 16, em diferentes pontos no filamento para cada temperatura testada.

Tabela 16 - Média de espessura em milímetros do filamento PEAD reciclado na cor azul.

Dimensão do filamento (mm)	Temperatura						
	250 °C	260 °C	270 °C	275 °C	280 °C	285 °C	290 °C
Teste 1	1,36	1,44	1,60	1,65	1,65	1,63	1,71
Teste 2	1,32	1,48	1,59	1,68	1,70	1,66	1,73
Teste 3	1,33	1,48	1,56	1,66	1,71	1,71	1,75
Teste 4	1,33	1,49	1,77	1,68	1,77	1,69	1,74
Teste 5	1,37	1,37	1,75	1,69	1,79	1,67	1,76
Média	1,34	1,45	1,65	1,67	1,72	1,67	1,74
Máximo	1,37	1,49	1,77	1,69	1,79	1,71	1,76
Mínimo	1,32	1,37	1,56	1,65	1,65	1,63	1,71
Desvio Padrão	0,02	0,05	0,10	0,02	0,06	0,03	0,02

Fonte: Autora (2018)

Pode-se observar que a temperatura ideal para fabricação do filamento utilizando material reciclado foi na temperatura de 290 °C, representado pela Figura 55.



Figura 55 - Medição do diâmetro do filamento do PEAD com puxador a temperatura de 290 °C.

Fonte: Autora (2018).

O polímero PLA reciclado na cor laranja, o resultado das medições pode ser visto na Tabela 17, em diferentes pontos no filamento para cada temperatura testada.

Tabela 17 - Média de espessura em milímetros do filamento PLA reciclado na cor laranja.

Dimensão do filamento (mm)	Temperatura				
	190 °C				
Teste 1	1,72	1,76	1,73	1,75	1,77
Teste 2	1,78	1,72	1,70	1,67	1,68
Teste 3	1,71	1,75	1,72	1,73	1,64
Teste 4	1,77	1,74	1,72	1,71	1,77
Teste 5	1,67	1,79	1,76	1,74	1,75
Média	1,73				
Máximo	1,79				
Mínimo	1,84				
Desvio padrão	0,04				

Fonte: Autora (2018).

Na fabricação do filamento com o polímero PLA na cor laranja reciclado, a temperatura indicada pela literatura é de 190 °C, e foi possível realizar a fabricação do filamento atingindo o diâmetro entre 1,72 mm e 1,75 mm, como apresentado na Figura 56.



Figura 56 - Medição do diâmetro do filamento PLA laranja reciclado.

Fonte: Autora (2018).

Durante a execução destes experimentos, constatou-se que no canal de alimentação da extrusora ficaram armazenados resíduos dos materiais, e para eliminar todo este material, é necessário deixar a extrusora funcionando em média de 15 a 20 minutos para que todo o material seja descartado. Ainda que os grânulos não se misturam, sendo possível visualizar no material a diferença dos polímeros. Como apresentam a Figura 57, filamentos com mistura de polímeros, não foram possíveis a utilização deste material, pois, engrossam e formam bolhas.

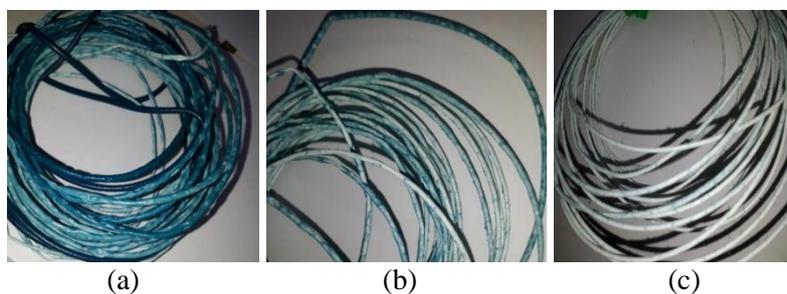


Figura 57 - Filamentos com mistura de polímeros: (a) PEAD com ABS; (b) ABS com PEAD; (c) ABS com PEAD.

Fonte: Autora (2018).

Com base nas medições do filamento realizado para cada temperatura associado ao tipo de polímero, foi possível identificar que não há diferenças significativas entre as temperaturas testadas. A Figura 58 apresenta as médias e o desvio padrão destas medições para cada temperatura, com exceção do filamento ABS virgem e o PLA reciclado em que, ambos, a média foi de 1,73 mm e o desvio padrão 0,04 mm, utilizando uma única temperatura indicada pela literatura (CASTELLI, 2012; SOARES, 2012; HAMOD, 2014; STEINLE, 2016), como o ABS virgem na temperatura de 220 °C e o PLA reciclado na temperatura de 185 °C.

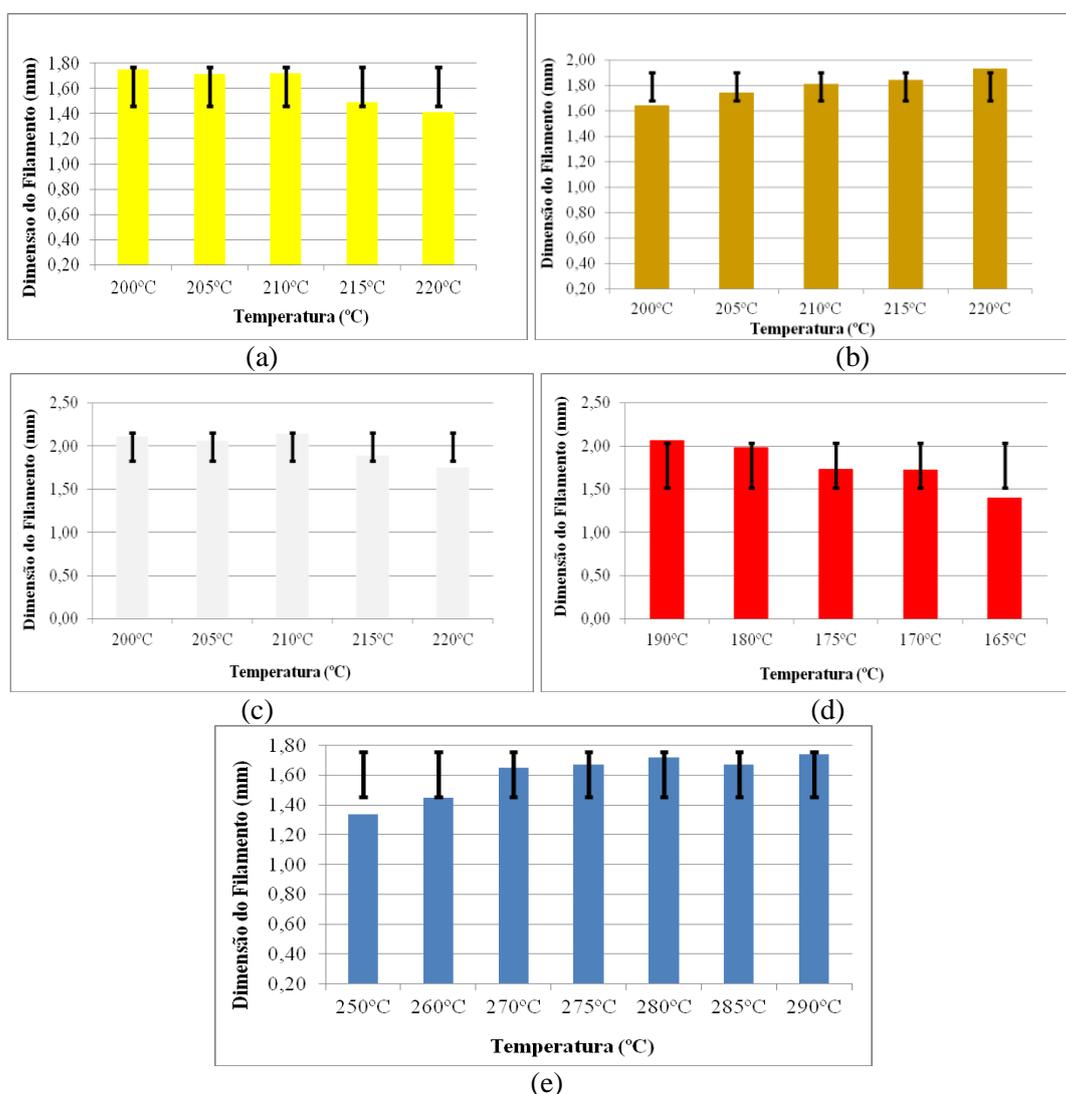


Figura 58 - Gráfico da Representação das médias e desvio padrão da medição do filamento: (a) ABS reciclado na cor amarelo; (b) ABS reciclado na cor natural; (c) ABS reciclado na cor branca; (d) PP reciclado na cor vermelho; e (e) PEAD reciclado na cor azul.

Fonte: Autora (2018).

Neste trabalho foi determinado o diâmetro do filamento de 1,75 mm para ser utilizado na impressora do LAPA, sendo aceitável uma variação de aproximadamente 0,05 mm. Nos Quadros 17 à 23 são apresentadas as variações de 1,68 mm a 1,81 mm do diâmetro aceitas ao longo do comprimento do filamento. Estas podem provocar vazios no interior das peças impressas, podendo influenciar nos resultados mecânicos. Todos os corpos de provas impressos com os polímeros e parâmetros estabelecidos apresentaram vazios entre os filamentos, conforme será apresentado nas análises microscópicas pelo ensaio de dureza no item 4.3.2.5.

De acordo com Huang (2014), as variações do diâmetro do filamento ao longo de todo o comprimento do material, é uma das causas principais que podem provocar defeitos durante a impressão da peça. Pois, a peça vai ter presença de vazios, impactando quanto ao peso, densidade e a resistência mecânica.

Após todos os experimentos realizados foi constatada a viabilidade da fabricação do filamento com material reciclado, e que este demonstrou ter qualidade, atendendo as dimensões do filamento para que possa ser utilizado na impressora 3D do tipo FDM.

4.2.1 Análise de custo

Após a análise de custo elaborada, foi possível verificar como apresenta na Tabela 18 o custo para fabricação de 1 quilo do filamento.

Tabela 18 - Custo do valor de Energia com o valor do grânulo.

Material	Equação	Valor (kg)
ABS (reciclado)	R\$ 2,60 + R\$ 6,40 =	R\$ 9,00
PLA (reciclado)	R\$ 2,60 + R\$ 7,20 =	R\$ 9,80
PEAD (reciclado)	R\$ 2,60 + R\$ 3,50 =	R\$ 6,10
PP (reciclado)	R\$ 2,60 + R\$ 3,20 =	R\$ 5,80

Fonte: Autora (2019).

Considerando o preço médio da bobina de 1 kg de filamento do ABS atualmente é de R\$ 95,00, e para o PLA R\$ 130,00, percebe que a produção do filamento atinge uma econômica de aproximadamente cerca de 88%.

Avaliando o investimento pelo método *payback* simples (PBS) (Tabela 19) para fabricação do filamento, significa que após a fabricação de aproximadamente 33,72 kg de ABS ou 24,13 kg de PLA, o equipamento será quitado, gerando lucros à partir desta produção.

Tabela 19 – *Payback* simples.

Material	Equação	Valor do <i>Payback</i>	Quantidade de filamentos (kg)
ABS (reciclado)	$R\$ 95,00 - R\$ 9,00 = 86,00$	$PBS = 2900 / 86,00 =$	33,72
PLA (reciclado)	$R\$ 130,00 - R\$ 9,80 = 120,20$	$PBS = 2900 / 120,20 =$	24,13

Fonte: Autora (2018)

Isso mostra que além da redução de resíduos descartados no meio ambiente, mostra que o custo do filamento fabricado a partir do material reciclado é inferior ao custo daquele produzido e comercializado como material virgem.

4.3 Estudo da fabricação da peça

Nesta etapa foram realizadas as impressões do corpo de prova, para serem submetidos a análise das propriedades mecânicas para verificar qual dos polímeros possui a maior resistência mecânica. As figuras que apresentam os corpos de provas impressos encontram-se no Apêndice B.

As impressões do corpo de prova com o polímero PEAD não foram possíveis realizar no LAPA, pois, a temperatura máxima da impressora para extrusão é de 260 °C, e mesmo atingindo esta temperatura o material não estava aquecendo o suficiente para

iniciar a impressão. Outro problema encontrado é que o material não estava aderindo sobre a mesa, por isso foi preciso uma placa de PP para que o material pudesse aderir sobre a mesa. Mas o estudo de Novoa (2014) e Angatkina (2018) realizou estudo com este material realizou a impressão dos corpos de prova, para submeter ao ensaio mecânico de tração.

4.3.1 Medição de massa

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos na medição da massa, o valor médio e seu respectivo desvio padrão para cada parâmetro estabelecido.

Tabela 20 – Resultado da medição da massa das amostras.

Tipo de material	P.	Massa (g)								
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
ABS V.	50%	24,1801	24,1965	24,1777	24,1573	24,0817	24,1587	0,0452	24,1965	24,0817
ABS V.	35%	22,1471	22,2099	22,2624	22,2178	22,1934	22,2061	0,0417	22,2624	22,1471
ABS R.	50%	28,4169	28,6027	28,6272	28,6025	28,4585	28,5416	0,0965	28,6272	28,4169
ABS R.	35%	21,4247	21,5408	21,4436	21,4200	21,5837	21,4826	0,0748	21,5837	21,4200
PETG V.	50%	33,2900	35,2412	33,3497	34,3800	35,3503	34,3222	0,9895	35,3503	33,2900
PETG V.	35%	27,2376	27,2959	27,2412	27,2790	27,2195	27,2546	0,0316	27,2959	27,2195
PETG R.	50%	35,7391	35,5642	35,9633	35,6054	35,5876	35,6919	0,1662	35,9633	35,5642
PETG R.	35%	28,1843	28,3594	28,1764	28,3784	28,1884	28,2574	0,1021	28,3784	28,1764
PLA V.	50%	27,2542	27,5534	27,7132	27,5199	27,6522	27,5386	0,1767	27,6592	25,4553
PLA V.	35%	22,6313	22,6592	22,4553	22,4583	22,5928	22,5594	0,0966	22,6592	22,4553
PLA R.	50%	25,7791	25,8412	25,6623	25,7439	25,6985	25,7450	0,0697	25,8412	25,6623
PLA R.	35%	23,2474	23,4589	23,4566	23,2452	23,9583	23,4733	0,2910	23,9583	23,2452
PP V.	50%	13,9813	13,9812	-	-	-	13,9813	0,0001	13,9813	13,9812
PP R.	50%	11,9412	11,9233	-	-	-	11,9323	0,0127	11,9412	11,9233

Fonte: Autora (2019).

Notou - se que o valor máximo da massa dos corpos de prova (CP) impressos, indicaram que o PETG reciclado 50% correspondeu ao índice de 35,9633 g localizado no corpo de prova 3. E o PP reciclado com 50% de preenchimento apresentou o valor mínimo de massa de 11,9233 g localizado no corpo de prova 2.

4.3.2 Análise das propriedades mecânicas

Com objetivo de avaliar o comportamento mecânico dos filamentos fabricados, foi realizada a medição da densidade e alguns ensaios de tração, flexão, impacto e dureza, comparados com os materiais virgens e reciclados, em que segundo Bellehumer *et al.* (2004), a qualidade do diâmetro do filamento e a união entre as camadas da peça feitas no processo FDM, podem interferir nos resultados das propriedades mecânicas.

4.3.2.1 Medição da densidade

Os resultados obtidos na medição de densidade dos CP impressos, que foram feitos pelo valor da massa dividido pelo volume do objeto, com os polímeros ABS e o PETG e seus parâmetros classificados encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 – Medição da densidade dos polímeros.

Tipo de material	P.	Massa (g)					Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5				
ABS V.	50%	0,8956	0,8962	0,8955	0,8947	0,8919	0,8948	0,0017	0,8962	0,8919
ABS V.	35%	0,8203	0,8226	0,8245	0,8229	0,8220	0,8224	0,0015	0,8245	0,8203
ABS R.	50%	1,0525	1,0594	1,0603	1,0594	1,0540	1,0571	0,0036	1,0603	1,0525
ABS R.	35%	0,7935	0,7978	0,7942	0,7933	0,7994	0,7957	0,0028	0,7994	0,7933
PETG V.	50%	1,2330	1,3052	1,2352	1,2733	1,3093	1,2712	0,0366	1,3093	1,2330
PETG V.	35%	1,0088	1,0110	1,0089	1,0103	1,0081	1,0094	0,0012	1,0110	1,0081
PETG R.	50%	1,3237	1,3172	1,3320	1,3187	1,3181	1,3219	0,0062	1,3320	1,3172
PETG R.	35%	1,0439	1,0503	1,0436	1,0511	1,0440	1,0466	0,0038	1,0511	1,0436
PLA V.	50%	1,0094	1,0205	1,0264	1,0193	1,0242	1,0199	0,0065	1,0264	1,0094
PLA V.	35%	0,8382	0,8392	0,8317	0,8318	0,8368	0,8355	0,0036	0,8392	0,8317
PLA R.	50%	0,9548	0,9571	0,9505	0,9535	0,9518	0,9535	0,0026	0,9571	0,9505
PLA R.	35%	0,8610	0,8688	0,8688	0,8609	0,8873	0,8694	0,0108	0,8873	0,8609
PP V.	50%	0,5178	0,5178	-	-	-	0,5178	0,0000	0,5178	0,5178
PP R.	50%	0,4423	0,4416	-	-	-	0,4419	0,0005	0,4423	0,4416

Fonte: Autora (2019).

A densidade do CP indicou que o PETG reciclado, com 50% de preenchimento,

apresentou a maior média de 1,3219 g/cm³, em comparação com os demais testes. E, o PP reciclado com 50% de preenchimento apresentou a menor média de 0,4419 g/cm³ em comparação com os demais ensaios.

4.3.2.2 Ensaio de tração

Os resultados descritos na Tabela 22 correspondem aos valores obtidos nos ensaios de tração (Figura 59), apresentando o valor da média e o respectivo desvio padrão, em que os corpos de prova passaram do ensaio até a ruptura. No Apêndice C são apresentados os resultados coletados durante o ensaio e como ficaram os corpos de prova após a realização do ensaio.



Figura 59 - Máquina de ensaio mecânico de tração.
Fonte: Autora (2019).

Tabela 22 - Resultados da medição do ensaio de tração.

Tipo de material	Limite de Resistência a tração [MPa]									
	P.	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
ABS V.	50%	29,2727	28,7192	28,2657	29,0142	17,8340	26,6212	4,9264	29,2727	17,8340
ABS V.	35%	27,9681	27,3476	19,1877	27,5458	0,0000	25,5123	4,2243	27,9681	19,1877
ABS R.	50%	32,7170	33,4833	24,9971	25,2760	32,4068	29,7760	4,2545	33,4833	24,9971
ABS R.	35%	19,9200	28,7156	27,7104	26,8305	18,5545	24,3462	4,7359	28,7156	18,5545
PETG V.	50%	44,6492	43,7862	27,5818	35,3127	36,1876	37,5035	6,9912	44,6492	27,5818
PETG V.	35%	31,5018	32,5017	41,3084	32,2414	32,7467	34,0600	4,0787	41,3084	31,5018
PETG R.	50%	49,1174	28,1847	27,2776	24,6523	35,1316	32,8727	9,8723	49,1174	24,6523
PETG R.	35%	33,4862	39,0201	30,8228	41,0902	0,0000	28,8839	16,6665	41,0902	30,8228
PLA V.	50%	40,2518	26,8360	35,7701	34,7582	30,5991	33,6432	5,1246	40,2518	26,8340
PLA V.	35%	27,8049	25,7916	23,3680	22,7170	21,7822	24,2927	2,4608	27,8049	21,7822
PLA R.	50%	22,4508	25,5068	28,1847	27,2776	0,0000	20,6840	11,7680	28,1847	22,4508
PLA R.	35%	24,1200	17,7076	26,1120	19,4978	0,0000	22,8441	10,3474	26,7831	17,7076
PP V.	50%	7,7379	12,2808	0,0000	0,0000	0,0000	10,0093	3,2123	12,2808	7,7379
PP R.	50%	11,6706	12,6517	0,0000	0,0000	0,0000	12,1612	0,6938	12,6517	11,6706

Fonte: Autora (2019).

Observou-se que o material PETG reciclado, com 50% de preenchimento, foi o material que obteve o maior limite de resistência à tração de 49,1174 MPa de tensão, no respectivo CP 1. O material que obteve o menor limite de resistência à tração foi o PP virgem com 50% com valor de 7,7379 MPa de tensão no CP 1, e o ABS virgem com 35% e o PETG, reciclado com 50%, houve falha, em que o material não se prendeu na máquina de maneira correta, ocasionando a interrupção durante o ensaio no respectivo CP 5, não sendo possível obter nenhuma informação.

Durante o ensaio o material PP, virgem com 50%, de preenchimento foi o material que obteve o maior limite de deslocamento de 15 cm e não se rompeu, pois havia chegado ao limite máximo do equipamento.

De acordo com Novoa (2014), as impressões de amostras para ensaio de tração seguindo a norma ASTM D638, determinam três temperaturas diferentes de extrusão: 220 °C, 240 °C e 260 °C, obtendo os seguintes resultados a partir das curvas de tensão e deformação, conforme mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 - Valores obtidos a partir das curvas tensão versus deformação para PEAD a diferentes temperaturas de impressão.

Amostra	Força Máxima (N)	Limite de escoamento (MPa)	Módulo elástico (MPa)
PEAD – 220°C	282 ± 3,1	31,1 ± 0,36	648 ± 56,2
PEAD – 240°C	297 ± 5,8	32,0 ± 0,32	669 ± 38,9
PEAD – 260°C	300 ± 11,7	32,5 ± 1,1	689 ± 25,2

Fonte: Novoa (2014).

Pode-se observar que o valor de tensão do escoamento nas três situações ficou em torno de 32 MPa e o módulo de elasticidade variando de 649 – 684 MPa. Devido à impressão dos corpos de prova ter sido realizada por uma impressora FDM, que pode ocasionar pequenos vazios no interior de toda peça, e isso pode ter influenciado na deformação até a ruptura, as amostras do PEAD 220 °C e PEAD 240 °C apresentaram a menor resistência quanto à tração em comparação com o PEAD 260 °C (NOVOA, 2014).

O Estudo Angatkina (2018), após ter submetido o ensaio de tração, notou-se que três das cinco amostras impressas do PEAD virgem quebraram, já, para o caso do material reciclado as cinco amostras não romperam, conforme mostra na Figura 60. O valor máximo de tensão do PEAD virgem é de 15,6 MPa e o valor máximo de tensão do PEAD reciclado é de 16,4 MPa, portanto o material reciclado apresentou ter maior resistência quanto a tração (ANGATKINA, 2018).



Figura 60 – Corpos de prova de tração impressos de PEAD reciclado e PEAD virgem (da esquerda para a direita).

Fonte: Angatkina (2018).

4.3.2.3 Ensaio de flexão

Os resultados descritos na Tabela 24 correspondem aos valores de tensão máxima disponibilizados no ensaio de flexão (Figura 61). O Apêndice D apresenta os resultados coletados durante o ensaio, e como ficaram os CP após a realização do ensaio.



Figura 61 - Máquina de ensaio mecânico de flexão.
Fonte: Autora (2019).

Tabela 24 - Resultados da medição do ensaio de flexão.

Tipo de material	Tensão máxima [MPa]							Desvio		
	P	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Padrão	Máximo	Mínimo
ABS V.	50%	2,2006	2,1362	2,1613	2,2137	2,0874	2,1598	0,0509	2,2137	2,0874
ABS V.	35%	2,2507	2,1040	2,2137	2,1505	2,1577	2,1753	0,0574	2,2507	2,1040
ABS R.	50%	3,0923	3,0303	2,8682	3,0577	2,5535	2,9204	0,2224	3,0923	2,5535
ABS R.	35%	1,5104	1,4436	1,3494	1,4305	1,4114	1,4291	0,0580	1,5104	1,3494
PETG V.	50%	3,7968	3,8409	3,5870	3,6883	3,7003	3,7227	0,0995	3,8409	3,5870
PETG V.	35%	3,1483	3,0589	2,8598	2,8598	2,8265	2,9507	0,1438	3,1483	2,8265
PETG R.	50%	0,0000	4,2486	4,2523	4,4144	4,1390	4,2637	0,1134	4,4144	4,1390
PETG R.	35%	5,0485	5,0498	5,0164	4,7826	4,8506	4,9496	0,1244	5,0498	4,7826
PLA V.	50%	2,4771	2,3759	2,4963	2,3270	2,3711	2,4095	0,0733	2,4963	2,3270
PLA V.	35%	3,9888	3,8648	3,9888	3,8576	3,5883	3,8576	0,1636	3,9888	3,5883
PLA R.	50%	4,0555	3,4023	3,2283	4,0198	3,6491	3,6710	0,3668	4,0555	3,2283
PLA R.	35%	2,9301	2,6584	3,6925	3,9096	3,5807	3,3543	0,5334	3,9096	2,6584
PP V.	50%	1,4901	1,3328	0,0000	0,0000	0,0000	1,4114	0,1113	1,4901	1,3328
PP R.	50%	1,6834	1,7939	0,0000	0,0000	0,0000	1,7386	0,0781	1,7939	1,6834

Fonte: Autora (2019).

Ao analisar os resultados obtidos no ensaio de flexão, percebeu-se que o polímero PETG, reciclado com 35% de preenchimento, obteve a maior tensão de ruptura no CP 2 com 5,0498 MPa, e o polímero que obteve a menor tensão de ruptura foi o polímero PP virgem com 50% de preenchimento no CP 2 com 1,3328 MPa, sendo que durante o ensaio o CP houve flexão, e após a realização retornou o seu formato.

4.3.2.4 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto foi realizado em cinco CP, para cada polímero e parâmetro estabelecido, em que a altura final atingida pelo pêndulo foi de 60 cm, sendo que somente as amostras do ABS reciclado 50% e 35% de preenchimento e as amostras do PP virgem 50% foram amostras que não separou. Porém, todos obtiveram um resultado zerado em todos os casos, mostrando que as amostras impressas não têm resistência ao impacto devido ao equipamento ser mais utilizado para metais. O Apêndice E, apresenta os corpos de prova após a realização do ensaio.

4.3.2.5 Ensaio de dureza

Como a peça foi criada em camadas utilizando filamento no diâmetro espessura de 1,75 mm, a área de impressão foi realizada manualmente, selecionando a parte que tivesse o menor índice de vazios entre as camadas pela análise microscópica, como apresentado na Figura 62.

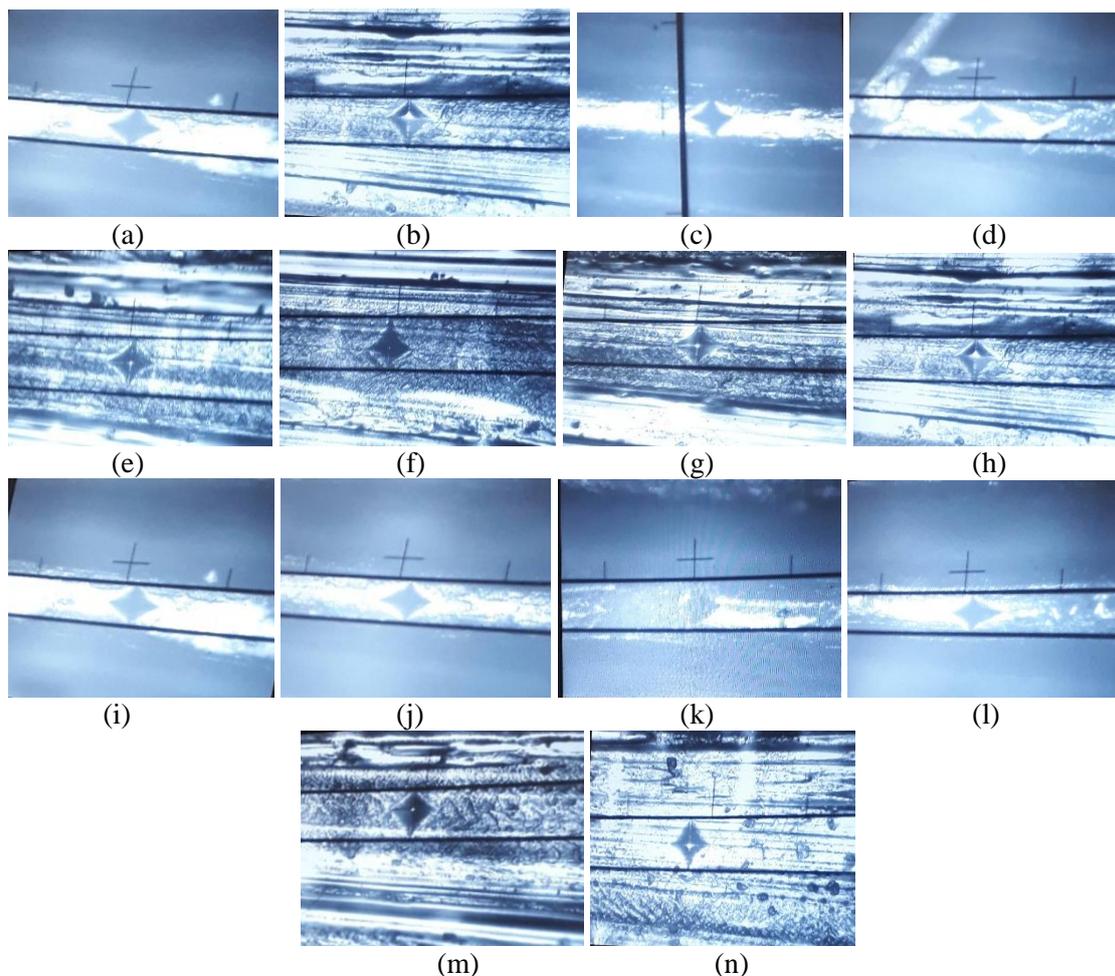


Figura 62 - Resultado da microdureza na análise microscopia: (a) ABS Virgem 50%; (b) ABS Virgem 35%; (c) ABS Reciclado 50%; (d) ABS Reciclado 35%; (e) PETG Virgem 50%; (f) PETG Virgem 35%; (g) PETG Reciclado 50%; (h) PETG Reciclado 35%; (i) PLA Virgem 50%; (j) PLA Virgem 35%; (k) PLA Reciclado 50%; (l) PLA Reciclado 35%; (m) PP Virgem 50%; (n) PP Reciclado 50%.

Fonte: Autora (2019).

De acordo com Volpato *et al.* (2017) peças impressas por FDM são fabricadas por filamentos depositados e por isso pode haver presença de vazio causado por falhas em toda estrutura da peça. As imagens microscópicas realizadas durante a execução do ensaio de microdureza, notou – se que o PETG virgem com 50% de preenchimento foi o que obteve o menor índice de vazio entre as camadas na área de impressão, já o ABS virgem com 35% de preenchimento, e o PP reciclado com 50% de preenchimento notou se um vazio entre as camadas em toda parte selecionada da camada.

Os valores obtidos podem ser vistos no Apêndice F, e os resultados descritos na Tabela 25 correspondem à média e o respectivo desvio padrão disponibilizado no ensaio de dureza.

Tabela 25 - Resultados da medição do ensaio de dureza.

Tipo de material	P	Média [GPa]	Desvio Padrão
ABS V.	50%	140,6274	12,4162
ABS V.	35%	130,0362	11,6158
ABS R.	50%	147,0998	16,4973
ABS R.	35%	132,9782	9,9912
PETG V.	50%	116,5030	9,3395
PETG V.	35%	129,2516	5,9409
PETG R.	50%	110,6190	5,4336
PETG R.	35%	106,3041	5,8265
PLA V.	50%	179,2656	12,7750
PLA V.	35%	199,6634	15,7914
PLA R.	50%	200,4479	13,1497
PLA R.	35%	215,5502	12,0386
PP V.	50%	59,6244	7,7961
PP R.	50%	68,8427	11,5077

Fonte: Autora (2019).

O polímero PLA reciclado com 35% de preenchimento apresentou a maior média de 215,5502 GPa de microdureza quando comparado aos demais polímeros. O PP virgem com 50% de preenchimento foi o polímero que apresentou a menor média de 59,6244 GPa de microdureza, e o número de vazios da amostra quanto ao PP e o PLA diminuíram em comparação aos demais. Porém, foi possível visualizar pequenas falhas em toda a região da amostra selecionada.

Após aplicação da carga, esse equipamento precisou de um microscópio acoplado, permitindo obter a área de impressão, tornando possível selecionar manualmente qual a área com o menor índice de vazios naquela amostra para se obter os resultados. Feito isso, notou-se que a trajetória de como foram realizadas as camadas entre os filamentos depositados e a oscilação da dimensão dos filamentos também pode ter provocado estes vazios, podendo contribuir com os resultados mecânicos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa objetivou analisar as propriedades mecânicas de peças impressas com base no sistema de extrusão com a utilização de polímeros termoplásticos, como: ABS, PLA, PEAD, PP e PETG. Para tanto, foi realizado um estudo de caracterização dos materiais, em que a partir do aquecimento e resfriamento da amostra em seis temperaturas e dez ciclos para cada temperatura, verificou-se numericamente a perda de massa em todos os ciclos.

Percebeu-se que os polímeros suportam em média seis ciclos nas temperaturas de 180°C a 240 °C, na temperatura 260 °C e 280 °C suportam no máximo três ciclos cada polímero. Nesta etapa, observou - se que todos os polímeros se degradaram mudando a sua cor e o seu formato, e o polímero que mais sofreu alteração foi o PEAD, pois, na temperatura 220 °C ficou carbonizado.

Observou-se ainda, que a temperatura relacionada à maior perda de massa em comparação com as demais foi 280 °C com o polímero PP, com 5,8256% de perda de massa. Já a temperatura que teve a menor perda foi em 200 °C em comparação com os demais, como por exemplo, o polímero ABS com perda de 0,5812% de massa. Nota-se que de acordo com a variação da perda de massa, em que apenas na temperatura de 280 °C com o polímero PLA, é que se obteve a maior variância de 0,0177 g de perda de massa. Portanto, mostra-se que não houve perda de massa significativa nas seis temperaturas que foram analisadas, e que não chegou há um percentual de 5% de perda de massa.

Em relação à viabilidade técnica de fabricação de filamentos a partir de resíduos reciclados, os resultados mostraram que os mesmos são totalmente viáveis em relação à

qualidade do filamento e dimensões estabelecidas do filamento com 1.75 mm, sendo possível realizar a impressão de peças com esse material.

Outro análise feita, foi a viabilidade econômica da fabricação de filamento, que com a avaliação do *payback* simples mostrou que a utilização do equipamento para fabricação do filamento é bastante vantajosa, gerando uma economia de aproximadamente cerca de 88% no custo da matéria prima, e obtêm o retorno do investimento com uma produção de aproximadamente 30 kg de filamentos.

O ensaio de propriedade mecânica realizado nesta pesquisa mostra que o PETG reciclado é o melhor material, apresentando 50% de preenchimento estabelecido para ser trabalhado, pois, possibilitou mais oportunidade de impressão de peças com a melhor resistência mecânica.

Notou-se, também, que apesar do material reciclado possibilitar a fabricação de filamentos atingindo a dimensão estabelecida de 1,75 mm, o mesmo apresenta característica rissada devido às perdas de propriedades que ele sofre no decorrer do processo. Ocorreram perdas durante a impressão, pois, o material ficou mais denso e conseqüentemente houve a quebra no meio da impressão, causando o entupimento no bico da impressora.

Limitações da Pesquisa e Sugestões para trabalhos futuros

A pesquisa apresentou como limites:

Foi realizada uma estatística geral no trabalho, com o objetivo de apresentar a quantidade de peças impressas e a quantidade que foram descartadas, com isso obteve os seguintes resultados, que foram impressos um total de 326 peças, porém ocorreram

78 perdas durante a impressão, esta perda tem três motivos para as falhas que ocorreram durante a impressão, provocando estes descartes.

O primeiro motivo foi devido à queda de energia, que interrompeu a impressão dos corpos de prova por duas vezes. Já, o segundo foi relacionado aos problemas de aderência das peças impressas sobre a mesa, ou seja, a mesa estava suja e mesmo utilizando o *spray* para fixar o material na mesa não houve aderência. E, a terceira e última falha, foi devido ao rompimento do material no bico de extrusão, sendo provocado devido à variação do diâmetro do filamento.

E como sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar a caracterização com um número maior de massa de cada polímero como, por exemplo, 200 g e realizar 50 ciclos para verificar se terá um aumento ou não de perda de massa.
- Realizar o ensaio de TGA, e o ensaio espectroscopia no infravermelho para fazer comparação com os resultados.
- Analisar o termocromismo para verificar o que acontece com a alteração na cor.
- Realizar a impressão de cada polímero variando a porcentagem de preenchimento e o tipo de preenchimento.
- Realizar o ciclo de cada polímero como: a fabricação do filamento, impressão dos corpos de prova, realizar ensaios mecânicos e em seguida triturar todo o material impresso, e refazer este ciclo novamente para verificar se há alguma alteração quanto às propriedades mecânicas ao passar pelo processo de reciclagem.
- Realizar o ensaio mecânico de impacto com um equipamento para materiais de baixa resistência.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST. **Processo de transformação para materiais plásticos**. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/download/links/links%202014/apresentacao_sobre_transformacao_vf.pdf> Acessado em 19 de abril de 2018.
- ALBURQUERQUE, A J. *Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas*. 2014. 138 f. TCC- Curso de Ingeniería en Tecnologías Industriales, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidade Carlos III de Madrid, Madri, 2014.
- ANGATKINA, K. *Recycling of HDPE from MSW waste to 3D printing filaments*. 2018. 58 f. Materials Processing Technology, Degree Thesis, 2018.
- ASTM D 790. AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 790: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials**. United States, 2003.
- ASTM D 638. AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. United States, 2014.
- ASTM D 6110. AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6110: Standard test methods for determining the charpy impact resistance of notched specimens of plastics**. United States, 2004.
- ASTM D 6152. AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6152: Standard test methods of tensile of metallic materials**. United States, 1992.
- ASTM E92. AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E92: Standard test methods for Vickers hardness of metallic materials**. United States, 2003.
- ASTM F 2792. AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2792: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**. United States, 2010.
- ANADON, L. D., CHAN, G., HARLEY, A. G, et al. *“Making technological innovation work for sustainable development”*. **PNAS**, august 12, 2016.
- ANDERSON, I. *“Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid”*. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 4, n. 2, p. 110-115, 2017.
- ARAÚJO, J. F., VOLPATO, N., DE CAMARGO, P. A. B. **Estudo de propriedades mecânicas do polipropileno moldado por injeção em insertos de resinas**. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, UTFPR. Manaus, 2010.

- BASTIAN, A. *A device to recycle thermoplastics for applications in 3D printing*. 2012. Disponível: <<http://andreasbastian.com/Ember-1>> Acesso em: 29 de março de 2018.
- BAUMERS, B., TUCK, C. J., WILDMAN, R., *et al.* *Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter?* 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266421536_Energy_inputs_to_additive_manufacturing_Does_capacity_utilization_matter>. Acesso em: 28 jul. 2018
- BERMAN B. “3-D printing: The new industrial revolution”. **Business Horizons**, v. 55, p. 155–162, 2012.
- BIJARIMI, M., AHMAD, S., RASID, R. “Mechanical, thermal and morphological properties of PLA/PP melt blends”. In: **International Conference on Agriculture, Chemical and Environmental Sciences (ICACES 2012)**. 2012. p. 6-7.
- BLEIJERVELD, B. “Plastics that can be recycled for 3-D printing. Retrieved July, v. 4, p. 2014, 2014”. Disponível: <<http://www.perpetualplasticproject.com/blog/2014/5/30/plastics-recycled-for-3dprinting#comments-outer-wrapper>> Acesso em: 01 de abril de 2018.
- BOPARAI, K. S., SINGH, R., FABBROCINO, F. *et al.*, “Thermal characterization of recycled polymer for additive manufacturing applications”. **Composites Part B: Engineering**, v. 106, p. 42-47, 2016.
- BORAH, S. “3D printer filament length monitor”. **International Journal of Science, Technology and Society**, v. 2, n. 5, p. 129-132, 2014.
- BRANDÃO, F., SANT’ANNA, D. R. Influência da **Estratégia de Fabricação de Peças Prototipadas em FDM no Alongamento e na Resistência à Tração**. XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2005, Ilha Solteira – SP.
- BRITO, G. F., AGRAWAL, P., ARAÚJO, E. M, *et al.* “Tenacificação do poli (ácido lático) pela adição do terpolímero (etileno/acrilato de metila/metacrilato de glicidila)”. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 22, n. 2, 2012.
- CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Grupo Gen-LTC, 2012.
- CASAGRANDE, M. V. S. Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida FDM. **Projeto de graduação–UFRJ/Escola Politécnica**, 2013.
- CHEN, D., HEYER S., IBBOTSON, S., *et al.*, “Direct Digital Manufacturing: Definition, Evolution, and Sustainability Implications”. **Journal of Cleaner Production**, 2005. doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.009.
- CHONG, S., PAN, G. T., KHALID, M., *et al.*, “Physical characterization and pre-assessment of recycled high-density polyethylene as 3D printing material”. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 25, n. 2, p. 136-145, 2017.

CIMM. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6560-teste-da-microdureza#.W4iN_ehKjIW> Acesso em: 29 ago. 2018.

CLARO, P. B. O., CLARO, D. P. Sustentabilidade estratégica: existe retorno no longo prazo? **R.Adm.**, São Paulo, v.49, n.2, p.291-306, abr./maio/jun. 2014.

COSTA, G. M. **Controle de diâmetro na produção de filamento para impressoras 3D**. Brasil, 2015.

CURA. Disponível em: <<https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>> Acesso em: 04 set. 2018.

DILBEROGLU, U. M., GHAREHPAGAH, B., YAMAN, U., *et al.*, “*The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0*”. **Procedia Manufacturing**, v.11, p.545-554, 2017.

DUL, S., FAMBRI, L., PEGORETTI, A. “*Filaments production and fused deposition modelling of ABS/carbon nanotubes composites*”. **Nanomaterials**, v. 8, n. 1, p. 49, 2018.

ENEL. Disponível em: <<https://www.eneldistribuicao.com.br/ce/TaxasETarifas.aspx>> Acesso em: 07 set. 2018.

FALUDI, J., BAYLEY, C., BHOGAL, S., *et al.*, “*Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment*”. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 1, p. 14-33, 2015.

FILABOT. Disponível em: <<https://www.filabot.com/collections/filabot-core/products/filabot-original-ex2>> Acesso em: 07 set. 2018.

FILAFAB. Disponível em: <<http://d3dinnovations.com/filafab/>> Acesso em: 07 set. 2018.

FILASTRUDER. Disponível em: <<https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit>> Acesso em: 07 set. 2018.

FILMAQ3D. Disponível em: <https://www.filmaq3d.com.br/index.php?route=product/product&path=17&product_id=79> Acesso em: 29 ago. 2018.

FLEMING, R. R., PARDINI, L. C., ALVES, N. P., *et al.*, Avaliação de blendas de PAN/Polímeros biodegradáveis por calorimetria. **Revista Matéria**, v. 17, n.1, p.909 – 918, 2012.

FORD, S., DESPEISSE, M. “*Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges*”. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1573-1587, 2016.

FORLAB EXPRESS. Disponível em: <<https://www.forlabexpress.com.br/moinho-de-faca-tipo-willy-medio-solab>>. Acesso em: 29 ago. 2018.

GARCIA, A., SPIM, J. A., DOS SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Livros Técnicos e científicos, 2012.

GELHAUSEN, M. G., FEUERBACH, T., SCHUBERT, A., *et al.*, “3D - printing for chemical process laboratories I: materials and connection principles”. **Chemical Engineering & Technology**, v. 41, n. 3, 2018.

GIBSON, I., ROSEN, D.W., STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. Springer, 2010.

GIORDANO, V. “**La Finitura Superficiale in Fused Modeling**”. Tese de Doutorado – Sapienza Università di Roma, Roma, 2012.

GKARTZOU, E., KOUMOULOS, E. P., CHARITIDIS, C. A. “Production and 3D printing processing of bio-based thermoplastic filament”. **Manufacturing Review**, v. 4, p. 1, 2017.

GEBLER, M; UITERKAMP, AJM; VISSER, C. “A global sustainability perspective on 3D printing Technologies”. **Energy Policy**, 2014.

GOMES, T., VISCONTE, L., PACHECO, E. Substituição da fibra de vidro por fibra de bananeira em compósitos de PEAD: Avaliação mecânica e térmica. *Polímeros*, v.23, nº 2, p. 206-211, UFRJ. Rio de Janeiro, 2013.

HAMOD, H. **Suitability of Recycled HDPE for 3D printing filament**. 2014. Degree Thesis – Degree Program: Plastics Technology, Arcada University of Applied Science, Finlandia, 2014

HAO, L., RAYMOND, D., STRANO, G, *et al.*, “Enhancing the Sustainability of Additive Manufacturing”. **ICRM – Green Manufacturing**, 2010.

HAQ, R. H A., RAHMAN, M. N. A., ARIFFIN, A. M. T., *et al.*, “Characterization and Mechanical Analysis of PCL/PLA composites for FDM feedstock filament”. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2017. p. 012038.

HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. Artliber, 2004.

HAUSMAN, K. K., HORNE, R. **3D printing for dummies**. John Wiley & Sons, 2017.

HOFMANN, E., RÜSCH, M. “Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics”. *Computers in Industry*, v. 89, p. 23-34, 2017.

HORVATH, J., CAMERON, R. **3D printing with mattercontrol**. Apress, 2015.

HOSSAIN, M. S., RAMOS, J., ESPALIN, D, *et al.*, “Improving tensile mechanical properties of FDM – Manufactured specimens via modifying build parameters”. In.: **International Solid Freeform Fabrication Symposium: An Additive Manufacturing Conference**. Austin, TX., v. 2013, p.380 – 392.

HUANG, S. H., LIU, P., MOKASDAR, A., et al., “*Additive manufacturing and its societal impact: a literature review*”. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, vol. 67, n. 5- 8, p. 1191-1203, 2013.

HUANG, B. *Alternate Slicing and Deposition Strategies For Fused Deposition Modelling*. 2014. Doctor of Philosophy – School of Engineering, Auckland University of Technology, 2014.

HUNT, E. J., ZHANG, C., ANZALONE, N., et al., “*Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. Resources*”. **Conservation and Recycling**, v. 97, p. 24-30, 2015.

INVENTOR. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/products/inventor/overview>> Acesso em: 04 set. 2018.

IVANOV, D, DOLGUI, A., SOKOLOV, B., et al., “*A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0*”. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 2, p. 386-402, 2016.

JIANG, D., SMITH, D. E. “*Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication*”. **Additive Manufacturing**, v. 18, p. 84-94, 2017.

JOHNSON, W. M., ROWELL, M., DEASON, B, et al., “*Comparative evaluation of an open-source FDM system*”. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 3, p. 205-214, 2014.

KANTOVISCKI, A. **Materiais Poliméricos: Módulo 2 – Processos de Transformação de Polímeros**. 2011. Disponível em: <<http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/automotiva/downloadsAutomot/d6matPolimMod2.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2018.

KISSLICER. Disponível em: <<http://www.kisslicer.com/>> Acesso em: 04 set. 2018.

KODJIE, S. L., LI, L., LI, B., et al., “*Morphology and crystallization behavior of HDPE/CNT nanocomposite*”. **Journal Macromolecular Science – TFG**, p. 231 – 243. USA. 2006.

KOHTALA, C. “*Addressing sustainability in research on distributed production: an integrated literature review*”. **Journal of Cleaner Production**, v. 106, p. 654-668, 2015.

KREIGER, M. A., MULDER, M. L., GLOVER, A. G, et al., “*Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament*”. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 90-96, 2014.

LGMT. Disponível em: <<http://www.lgmt.com.br/extrusora-filamento-impressora-3d>> Acesso em: 29 ago. 2018.

LI, H. WANG, T., SUN, J., *et al.* “*The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties*”. **Rapid Prototyping Journal**, v. 24, n. 1, p. 80-92, 2018.

LIM, L. T., AURAS, R., RUBINO, M. “*Processing Technologies for poly (lactic acid)*”. **Progress in Polymer Science**, v.33, n.8, p.820 – 852, 2008.

LIMA, M. V. A. **Modelo de Fatiamento Adaptativo para Prototipagem Rápida - Implementação no Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Pesquisa e Pós – Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

LOCKER, A. **PETG filament guide 2018: Explaine, compared & reviewed**. All 3 DP, 2018. Disponível: <<https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/#section-petg-filament-explained-and-compared>> Acesso em: 28 març. 2018.

LUO, R. C., TZOU, J. H., HSIEH, C. Y, *et al.*, “*The development of a thermal extrusion based rapid prototyping mechatronics system*”. In: **IECON 02 Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the. IEEE**. p.2237-2242. 2002.

MAGALHÃES, L. C. **A Influência dos Parâmetros Construtivos no Comportamento Mecânico de Peças Fabricadas pela Técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MANÇANARES, C. G. **Modelo de processo de avaliação para adoção de manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2016.

MANI, M., LYONS, K. W., GUPTA, S. K. “*Sustainability Characterization for Additive Manufacturing*”. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 119, 2014.

MARTINS, S. R. M., BRANILSON, L. S. C., HERMAN, A. L. Um Sistema CAM Para Máquinas de Prototipagem Rápida de Baixo Custo. In: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2010, Campina Grande-PB.

MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Elsevier, 2012.

MRÓZ, P., BIAŁAS, S., MUCHA, M., *et al.*, “*Thermogravimetric and DSC testing of poly (lactic acid) nanocomposites*”. **Thermochimica acta**, v. 573, p. 186-192, 2013.

NG, M., FLEMING, T., ROBINSON, M., *et al.*, “*Global, regional, and national prevalence of overweight and obesity in children and adults during 1980-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013*”. **Lancet**. v. 30, . n. 384, p. 766-81, 2014 doi: 10.1016/S0140-6736(14)60460-8.

NOVOA, D. M. C., ALMEIDA, J. R. M. Avaliação físico – química do PEAD processado pelo método de impressão 3D por modelagem por fusão e deposição – FDM. 22ºCBECiMat - **Congresso Brasileiro e Ciência dos Materiais**. Natal, 2016.

NOVOA, D. M. C. **Avaliação físico-química do polietileno de alta densidade processado pelo método de impressão 3D por modelagem por fusão e deposição FDM**. 2014. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

OSEJOS, J. V. M. *Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes*. 2016. Dissertação de Mestrado. Quito, 2016.

PARENTE, R. A. **Elementos estruturais de plástico reciclado**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

PEREIRA, F. D. A. S. **Desenvolvimento de um cabeçote para extrusão de filamento fundido aplicado a manufatura aditiva**. 2014. Dissertação de Mestrado, Campinas, 2014.

PETRICK, I. J., SIMPSON T. W. “*3D Printing Disrupts Manufacturing: How Economies of One Create New Rules of Competition*”. **Research-Technology Management**, v. 56, n. 6, p. 12–16, 2013.

PETROVIC, V., GONZALEZ, J. V .H., FERRANDO, O. J., et al., “*Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies*”. **International Journal of Production Research**, v. 49, v. 4, p. 1061–1079, 2011.

PICESOFTWARE. **Impresoras 3D el futuro hoy. Obtenido de impresoras 3D el futuro hoy**. Disponível: <<http://pice-software.com/DetalleBlog.aspx?b=%2018>>. Acesso em: 10 de março de 2018.

RAULINO, B. R., ALVARES, J. A., FERREIRA, J. C. F. Sistema coação para prototipagem rápida – influência dos parâmetros de fabricação no custo. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Penedo, Itatiaia – RJ, 2013.

RODRIGUES, L. F. B. **Análise do aproveitamento de polímeros recicláveis para obtenção de filamentos para impressora 3D**. Panambi, 2017.

SANCHEZ, F. A. C., BOUDAUD, H., MULLER, L., et al., “*Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing*”. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 9, n. 3, pp.151-167, 2014.

SANTANA, L. **Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA**. 2015. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2015.

SANTOS, A. M. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia**. 2006. Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2006.

SLICER. Disponível em: <<https://www.slicer.org/>> Acesso em: 04 set. 2018.

SOARES, F. C. **Laminados de Poli (Ácido Láctico)/Amido termoplástico recobertos com quitosana reticulada: obtenção e avaliação das propriedades físico – químicas.** 2012. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SREENIVASAN, R., GOEL, A., BOUELL, D. “*Sustainability issues in laser based additive manufacturing*”. **Physics Procedia**, 5, pp. 81-90, 2010.

STEINLE, P. “*Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings*”. **Journal of occupational and environmental hygiene**, v. 13, n. 2, p. 121-132, 2016.

STEPHENS, B., AZIMI, P., El Orch, Z., *et al.*, “*Ultrafine Particle Emissions From Desktop 3D Printers*”, **Atmospheric Environment**, Vol. 79, p. 334-339, 2013.

TECMUNDO. Disponível em: < <https://www.tecmundo.com.br/produto/121063-maquina-produz-filamentos-impressoras-3d-partir-plastico-reciclado.htm>> Acesso em: 07 set. 2018.

THINGIVERSE. 2015. Disponível em: <https://www.filmaq3d.com.br/index.php?route=product/product&product_id=79> Acesso em: 29 jul. 2018.

VOLPATO, N., MUNHOZ, A. L., J., COSTA, C. A., *et al.*, **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D.** Primeira Edição. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.

VOXELIZER. Disponível em: <<https://voxelizer.com/>> Acesso em: 29 jul. 2018.

WIEBECK, H., HARADA, J. **Plásticos de Engenharia: tecnologia e aplicações.** São Paulo, Artliber, 2005.

WOJTYŁA, S., KLAMA, P., BARAN, T. A impressão 3D é segura? Análise do tratamento térmico de termoplásticos: ABS, PLA, PET e nylon. **Revista de higiene ocupacional e ambiental**, v. 14, n. 6, p. D80-D85, 2017.

ZHAO, X. G., HWANG, K. J. LEE, D., *et al.*, “*Enhanced mechanical properties of self-polymerized polydopamine-coated recycled PLA filament used in 3D printing*”. **Applied Surface Science**, v. 441, p. 381-387, 2018.

ZMORPH3. Disponível em: <<https://support.zmorph3d.com/hc/enus/categories/20119-6109-ZMorph-2-0-SX>> Acesso em: 29 ago. 2018.

APÊNDICE A – FABRICAÇÃO DO PUXADOR

O puxador fabricado foi baseado no modelo disponível no site <https://www.thingiverse.com/>, que disponibiliza gratuitamente o *download* do arquivo com modelos de peças para impressão. A busca pelo projeto *Open Source* foi feita com a palavra-chave *filament puller*, e selecionou-se o arquivo de peças apresentado na Figura 63.

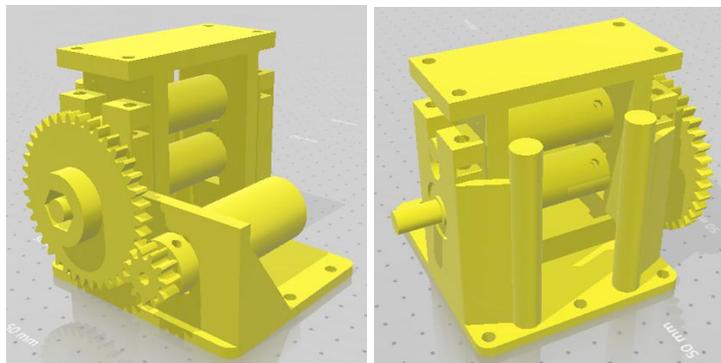


Figura 63 - Modelo do puxador.
Fonte: Thingiverse, 2015

Nesta fase é transferido o arquivo para o *software Voxelizer 64 Bit* a fim de realizar a programação da impressão da peça, definindo-se a espessura da camada, a velocidade da impressão, tipo de material que será utilizado, e a inserção de suportes. A simulação da peça impressa mostra que será utilizado 49 metros e 55 cm de filamento totalizando um gasto de 13 horas e 24 minutos para realizar a impressão da peça, seguindo os detalhes do arquivo no formato G-Code, apresentada na Figura 64.

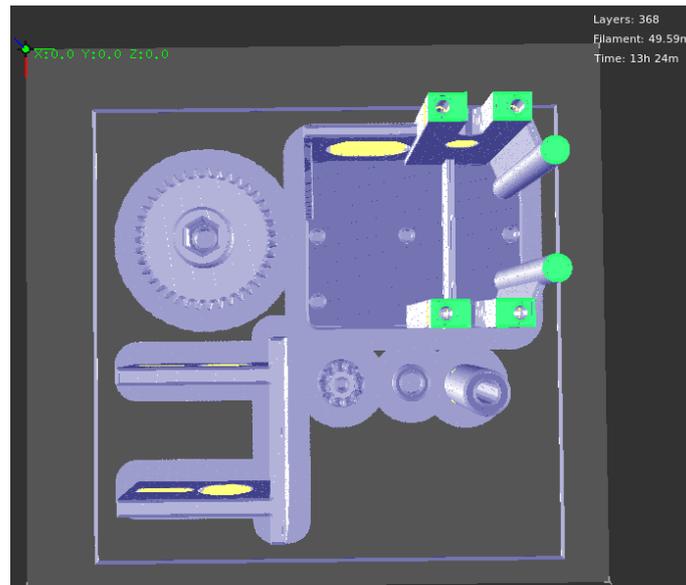


Figura 64 - Representação gráfica do G-Code da peça impressa.
Fonte: Autora (2018)

A fim de equiparar a velocidade do puxador com a da extrusora de filamento, estimou-se que com a redução de 3 volts, o motor passaria a rodar a 60 RPM, sendo assim foi realizado um projeto elétrico de alimentação para o motor do puxador utilizando o *software* Multisim 12.0 como apresentado na Figura 65, levando-se em consideração que o *sample coil* seja considerado o motor.

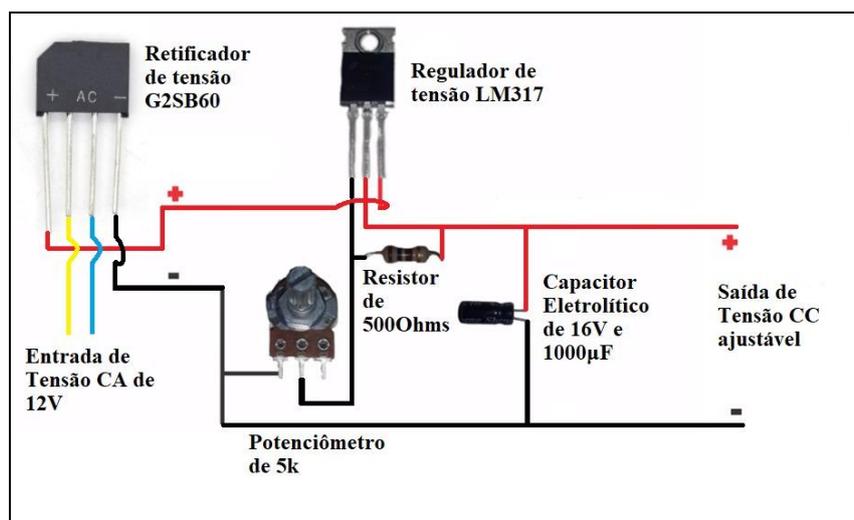


Figura 65 - Projeto elétrico de alimentação do motor do puxador.
Fonte: Autora (2018).

Para realizar a montagem do equipamento, foi necessário utilizar um motor de corrente contínua com 90 RPM e 12V, 6 porcas de 4 mm, 3 arruelas de 3 mm, 2 eixos com parafusos de 9 cm de comprimento e 4 mm de diâmetro, 1 rolo de espuma com 4 cm de comprimento.

Para este trabalho de fabricação do puxador foi usada uma impressora do tipo FDM, disponível no Laboratório de Prototipagem Avançado (LAPA) da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, utilizando o filamento ABS. Após a impressão das peças, foi realizada a montagem e a inserção da parte elétrica, conforme apresentado na Figura 66.

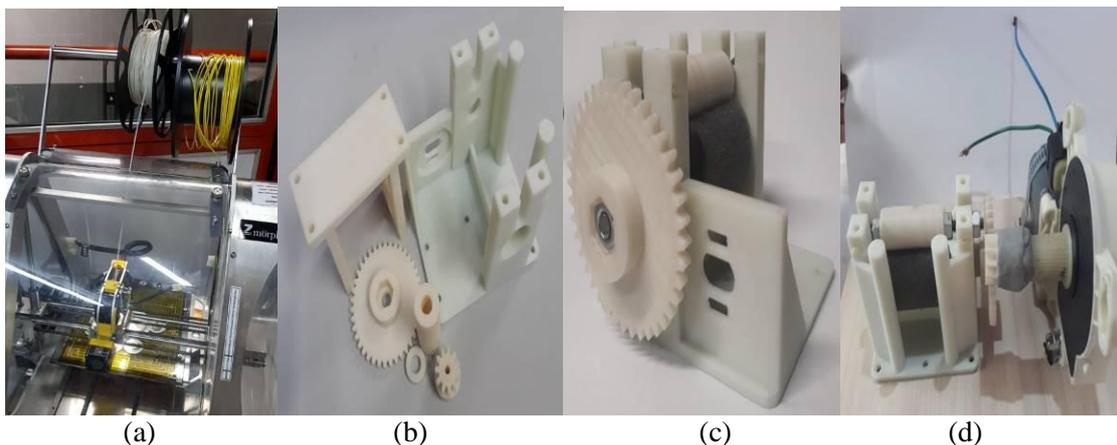


Figura 66 - Processo de fabricação do Puxador: (a) Impressão; (b) Peças Impressas; (c) Montagem; (d) Puxador Pronto.

Fonte: Autora (2018).

Após a montagem do puxador, foi realizada novamente a produção do filamento com o polímero PEAD, mas com o auxílio do puxador para verificar se seria possível chegar à dimensão esperada, determinando qual a temperatura e a distância da extrusora com o puxador, para que o material possa resfriar, evitando deformação pelo puxador, conforme representado pela Figura 67.



Figura 67 - Processo de montado do puxador com a extrusora.

Fonte: Autora (2018)

APÊNDICE B – FOTOS DOS CORPOS DE PROVAS IMPRESSOS

As Figuras 68 – 81 correspondem aos CP impressos para cada parâmetro.

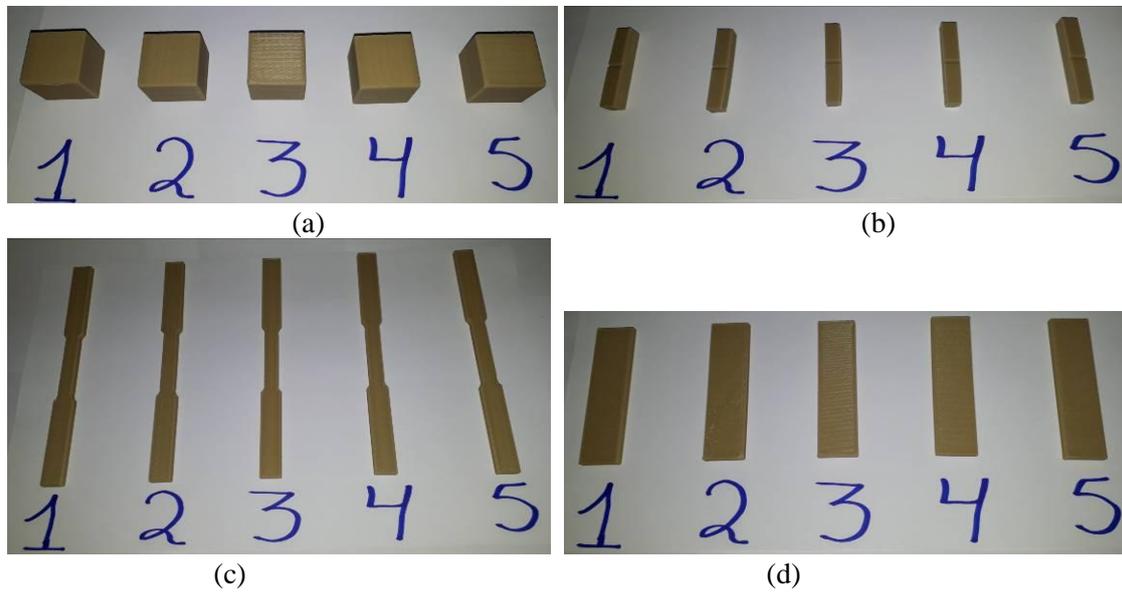


Figura 68 - Corpos de prova impresso ABS reciclado com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

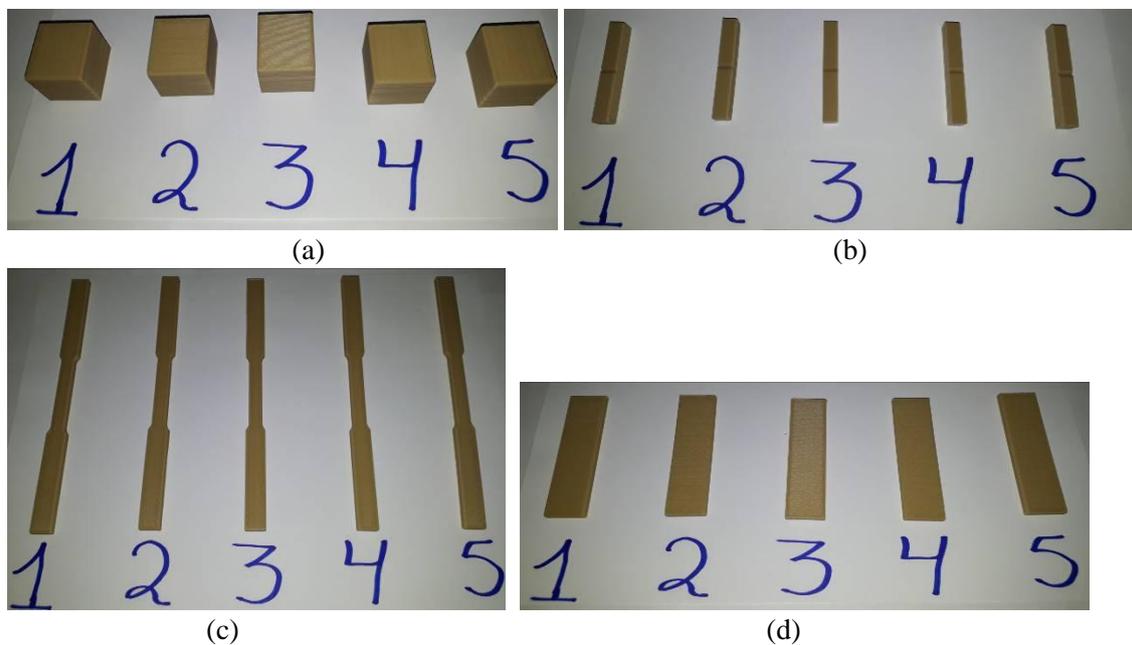


Figura 69 - Corpos de prova impresso ABS reciclado com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

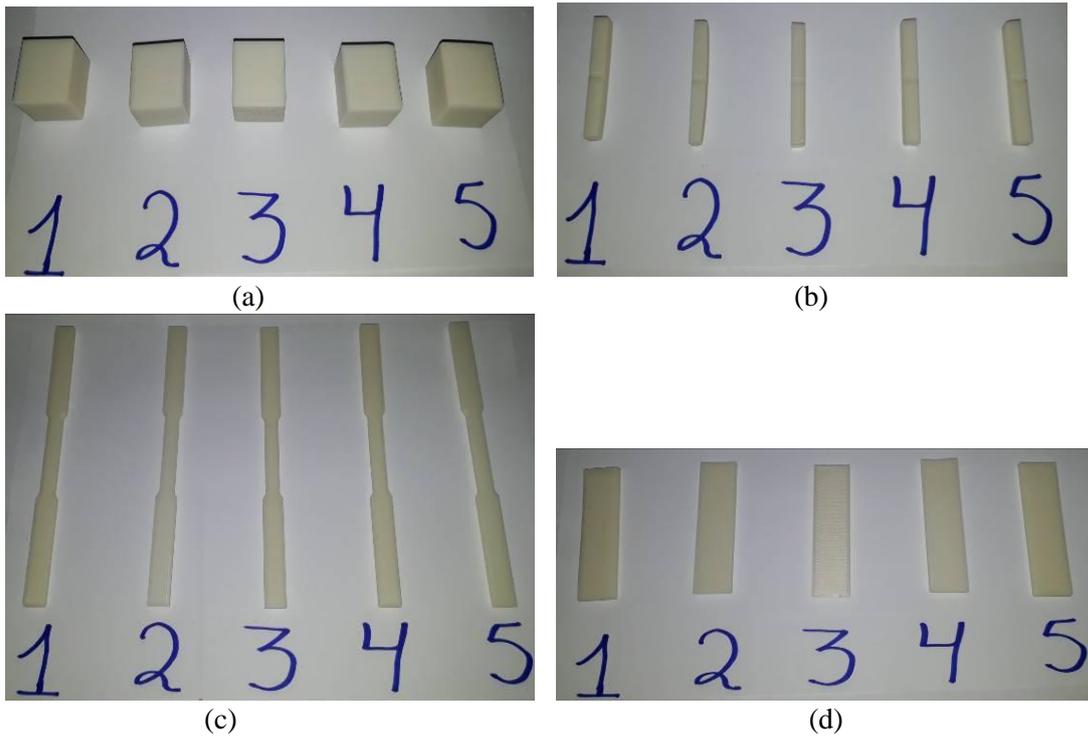


Figura 70 - Corpos de prova impresso ABS virgem com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

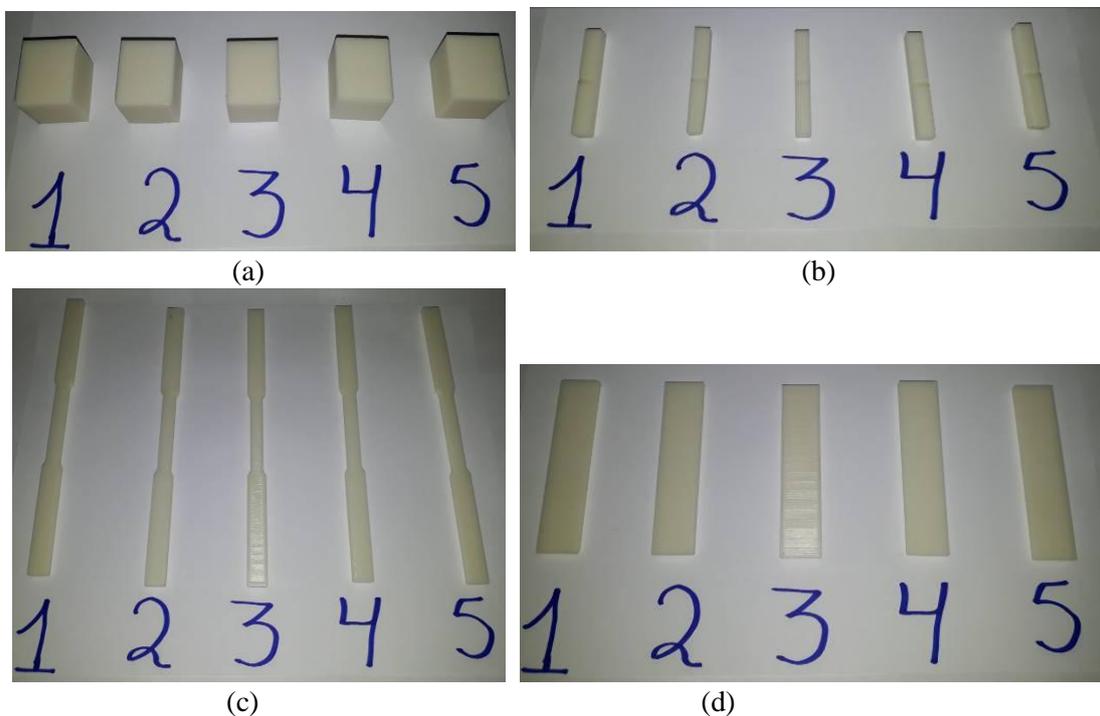


Figura 71 - Corpos de prova impresso ABS virgem com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

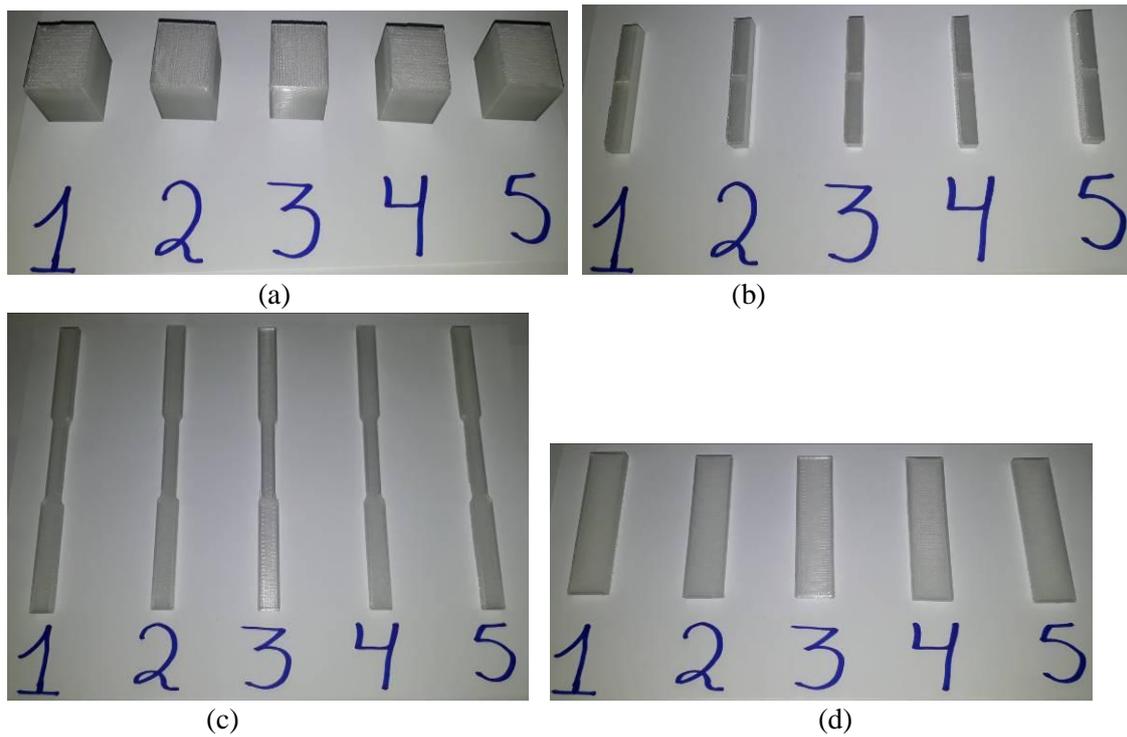


Figura 72 - Corpos de prova impresso PETG virgem com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

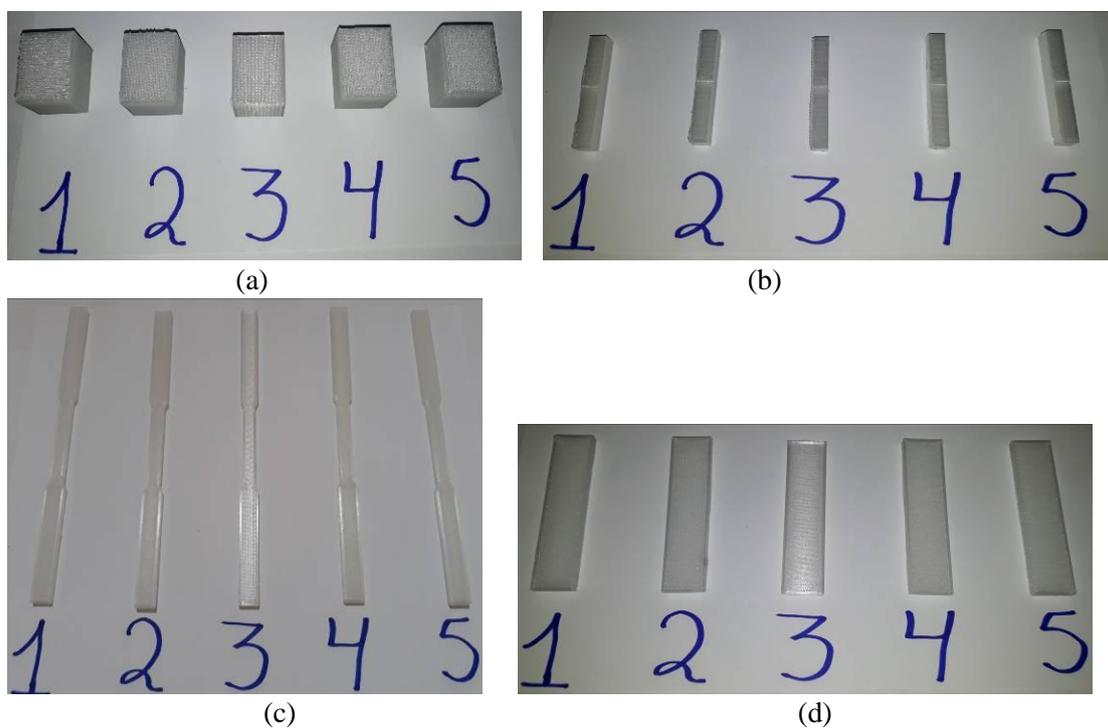


Figura 73 - Corpos de prova impresso PETG virgem com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

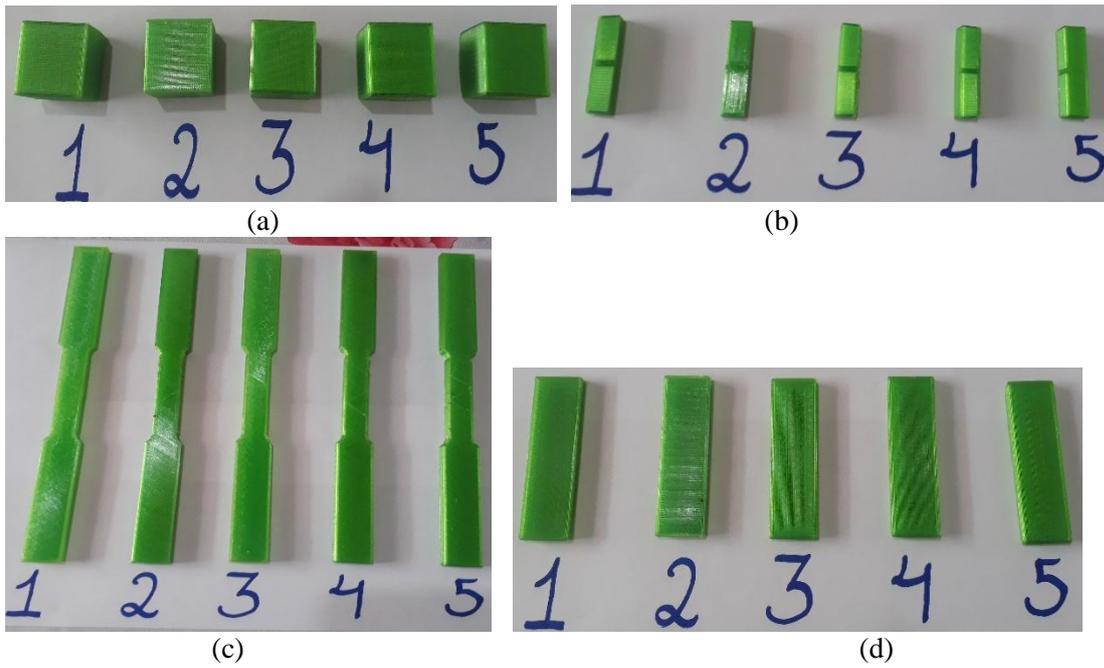


Figura 74 - Corpos de prova impresso PETG reciclado com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.
Fonte: Autora (2019).

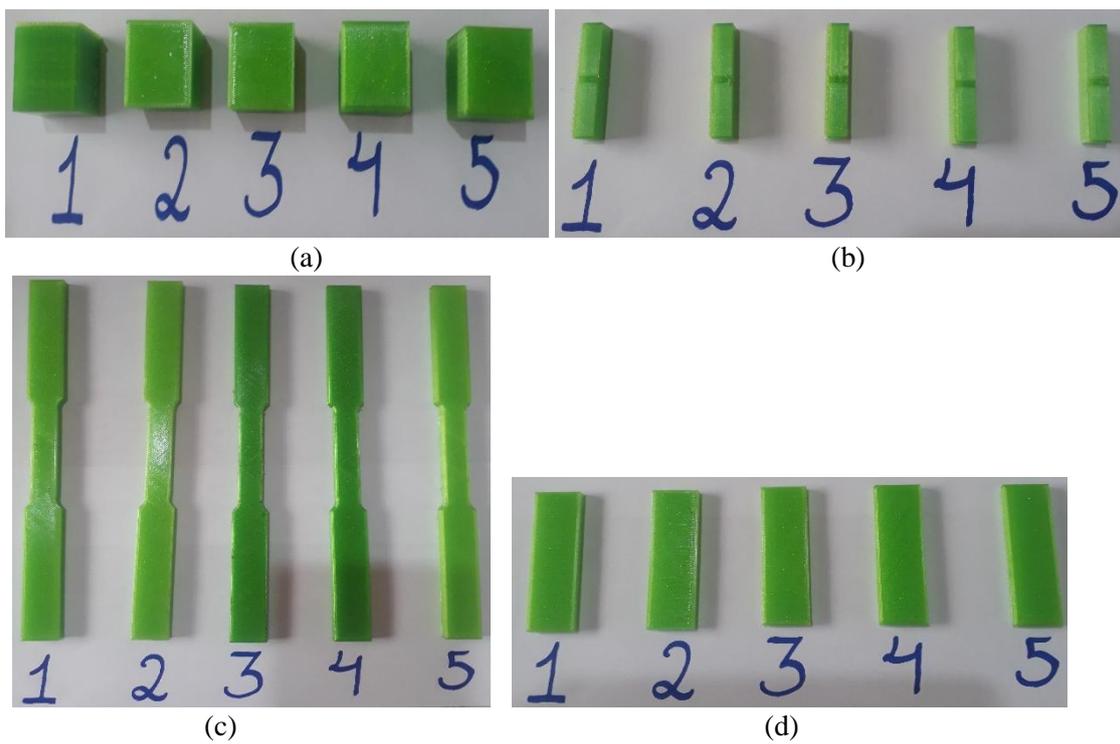


Figura 75 - Corpos de prova impresso PETG reciclado com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.
Fonte: Autora (2019).

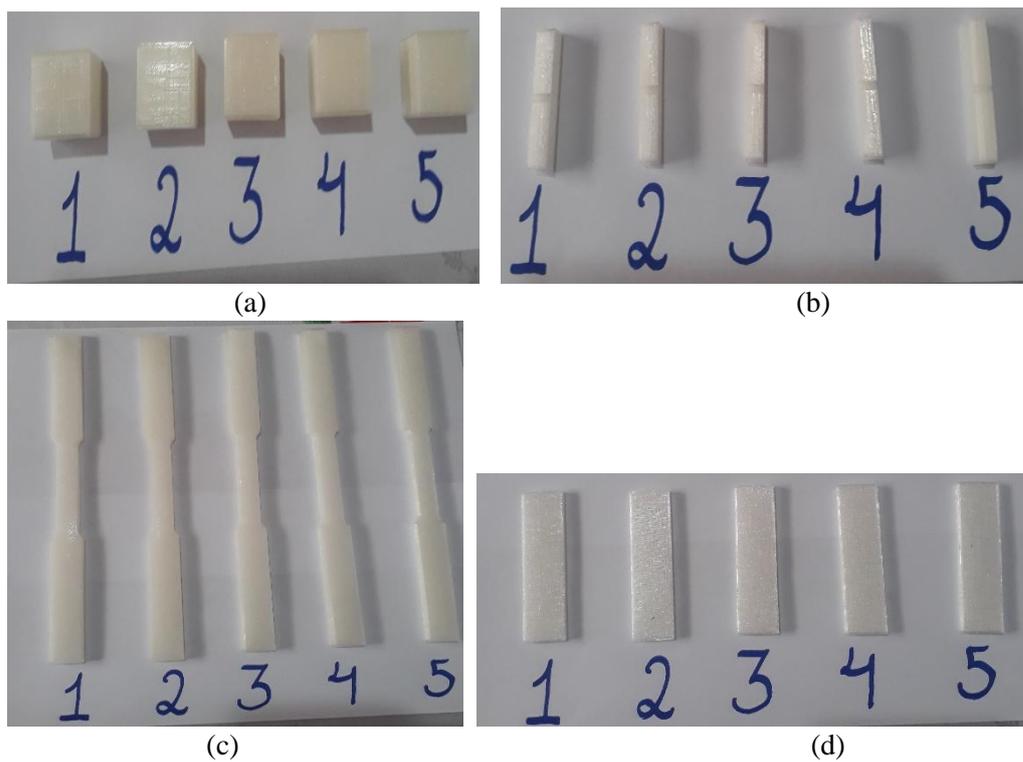


Figura 76 - Corpos de prova impresso PLA virgem com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

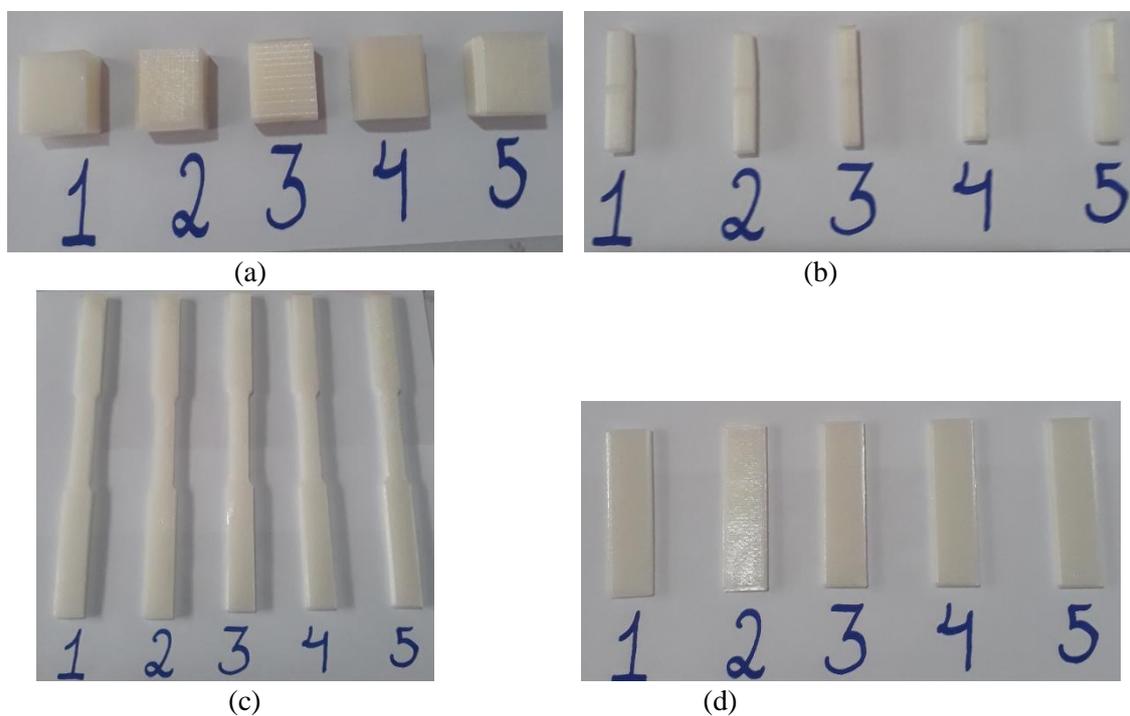


Figura 77 - Corpos de prova impresso PLA virgem com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

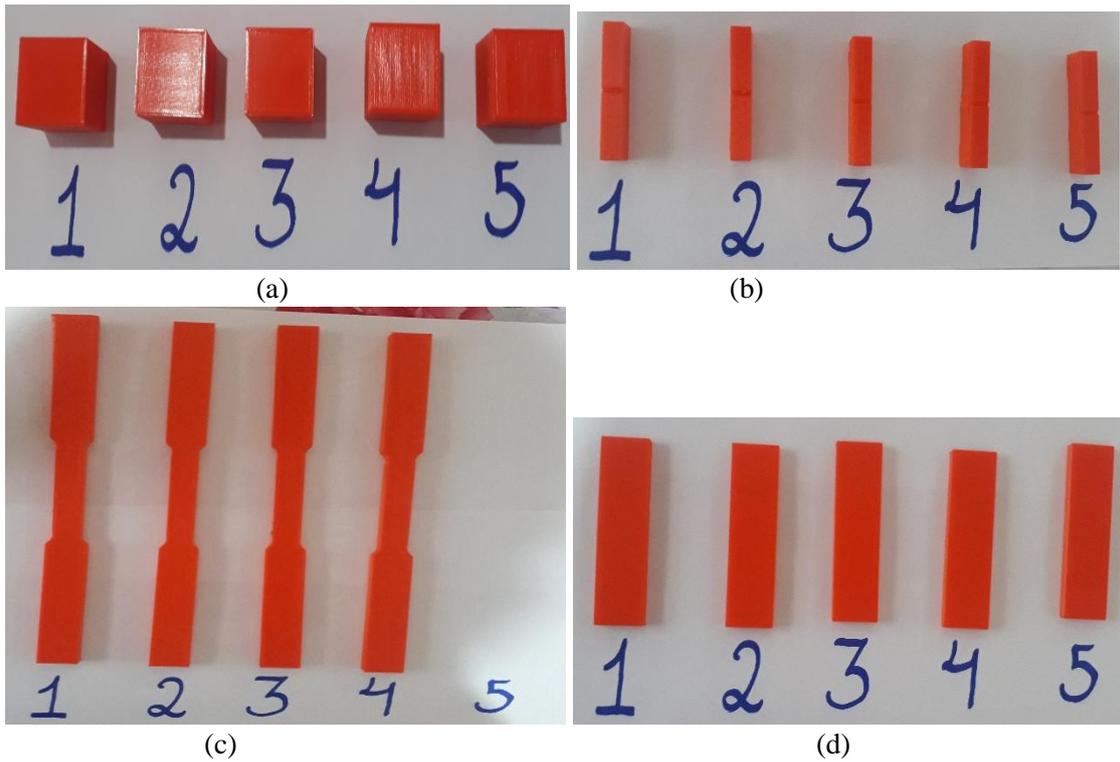


Figura 78 - Corpos de prova impresso PLA reciclado com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

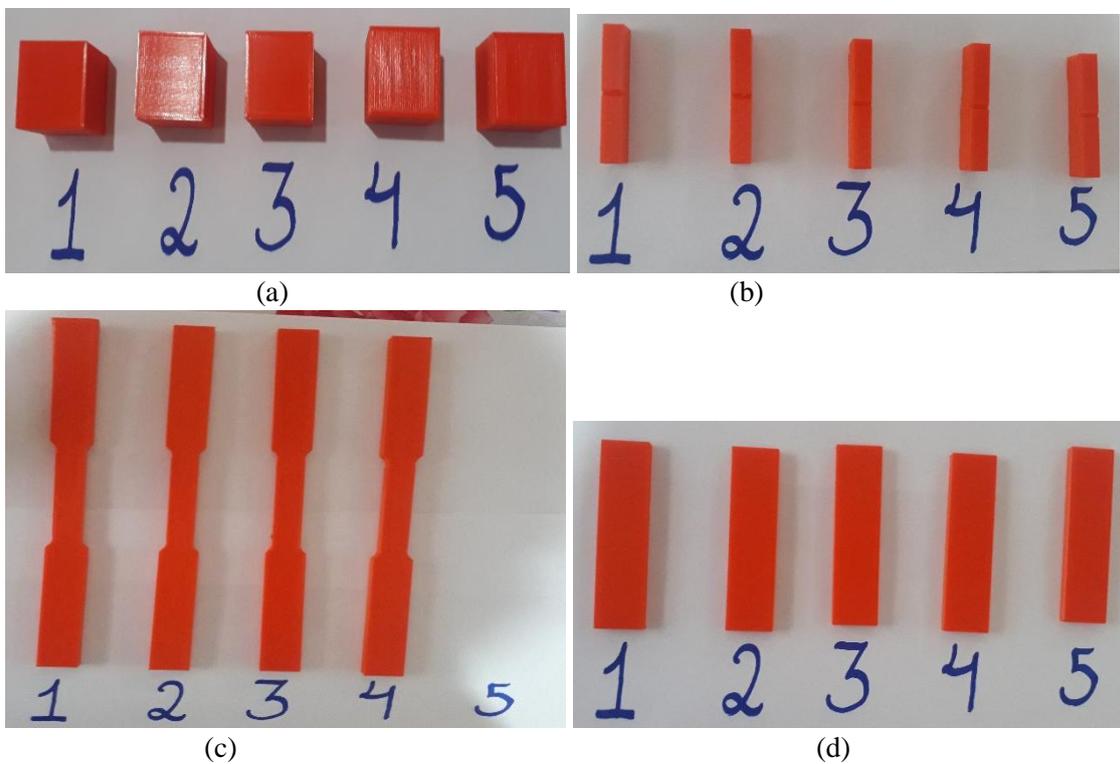


Figura 79 - Corpos de prova impresso PLA reciclado com 35% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

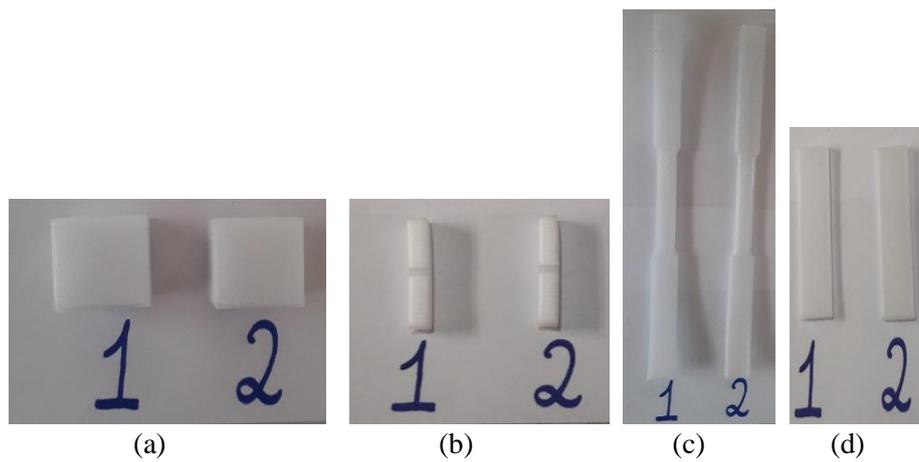


Figura 80 - Corpos de prova impresso PP virgem com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019)

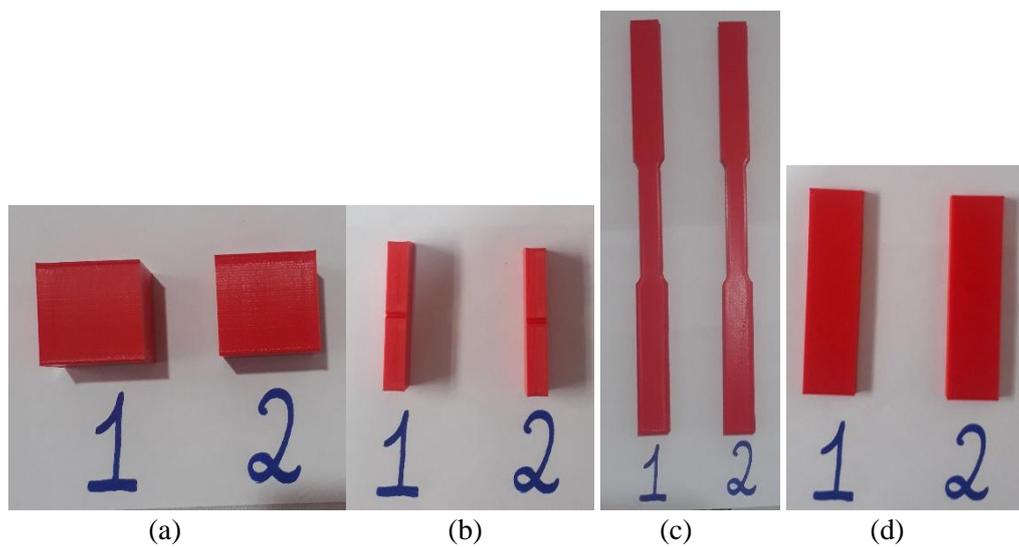


Figura 81 - Corpos de prova impresso PP reciclado com 50% de preenchimento: (a) medição de massa, densidade e dureza; (b) impacto; (c) tração; (d) flexão.

Fonte: Autora (2019).

APÊNDICE C – RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO

A Figura 82 corresponde aos resultados finais das amostras dos polímeros após o ensaio de tração.

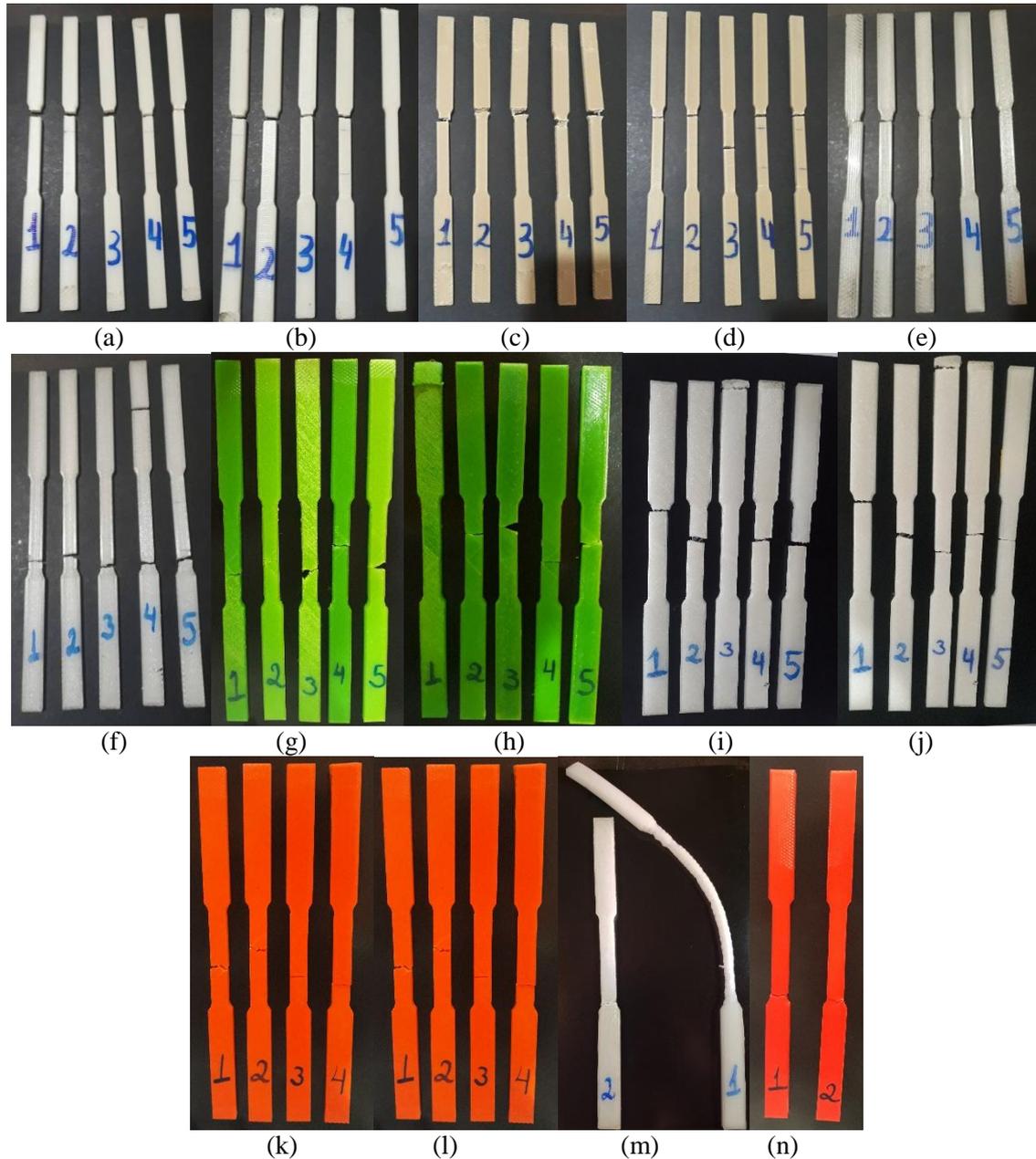


Figura 82 - Amostras finais após os ensaios de tração: (a) ABS Virgem 50%; (b) ABS Virgem 35%; (c) ABS Reciclado 50%; (d) ABS Reciclado 35%; (e) PETG Virgem 50%; (f) PETG Virgem 35%; (g) PETG Reciclado 50%; (h) PETG Reciclado 35%; (i) PLA Virgem 50%; (j) PLA Virgem 35%; (k) PLA Reciclado 50%; (l) PLA Reciclado 35%; (m) PP Virgem 50%; (n) PP Reciclado 50%.

Fonte: Autora (2019).

Resultados coletados durante o ensaio de tração, nas Tabela 23 a 26.

Tabela 26 - Força máxima de tração.

Tipo de material	Preenchimento	Força máxima [kN]				
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
ABS Virgem	50%	3,2932	3,2309	3,1799	3,2641	2,0063
ABS Virgem	35%	3,1464	3,0766	2,1586	3,0989	0,0000
ABS Reciclado	50%	3,6807	3,7669	2,8122	2,8436	3,6458
ABS Reciclado	35%	2,2410	3,2305	3,1174	3,0184	2,0874
PETG Virgem	50%	5,0230	4,9260	3,1030	3,9727	4,0711
PETG Virgem	35%	3,5440	3,6564	4,6472	3,6272	3,6840
PETG Reciclado	50%	5,5257	3,1708	3,0687	2,7734	3,9523
PETG Reciclado	35%	3,7672	4,3898	3,4676	4,6227	0,0000
PLA Virgem	50%	4,5283	3,0191	4,0242	3,9103	3,4424
PLA Virgem	35%	3,1281	2,9016	2,6289	2,5557	2,4505
PLA Reciclado	50%	2,5257	2,8695	3,1708	3,0687	0,0000
PLA Reciclado	35%	2,7135	1,9921	2,9376	2,1935	0,0000
PP Virgem	50%	0,8705	1,3816	0,0000	0,0000	0,0000
PP Reciclado	50%	1,3129	1,4233	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Autora (2019).

Tabela 27 - Área da seção transversal da amostra.

Tipo de material	Preenchimento	Área da seção transversal [mm ²]				
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
ABS Virgem	50%	80	80	80	80	80
ABS Virgem	35%	80	80	80	80	80
ABS Reciclado	50%	80	80	80	80	80
ABS Reciclado	35%	80	80	80	80	80
PETG Virgem	50%	80	80	80	80	80
PETG Virgem	35%	80	80	80	80	80
PETG Reciclado	50%	80	80	80	80	80
PETG Reciclado	35%	80	80	80	80	80
PLA Virgem	50%	80	80	80	80	80
PLA Virgem	35%	80	80	80	80	80
PLA Reciclado	50%	80	80	80	80	80
PLA Reciclado	35%	80	80	80	80	80
PP Virgem	50%	80	80	80	80	80
PP Reciclado	50%	80	80	80	80	80

Fonte: Autora (2019).

Tabela 28 - Tensão máxima.

Tipo de material	Preenchimento	Tensão máxima [kN/mm ²]				
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
ABS Virgem	50%	0,0293	0,0287	0,0283	0,0290	0,0178
ABS Virgem	35%	0,0280	0,0273	0,0192	0,0275	0,0000
ABS Reciclado	50%	0,0327	0,0335	0,0250	0,0253	0,0324
ABS Reciclado	35%	0,0199	0,0287	0,0277	0,0268	0,0186
PETG Virgem	50%	0,0446	0,0438	0,0276	0,0353	0,0362
PETG Virgem	35%	0,0315	0,0325	0,0413	0,0322	0,0327
PETG Reciclado	50%	0,0491	0,0282	0,0273	0,0247	0,0351
PETG Reciclado	35%	0,0335	0,0390	0,0308	0,0411	0,0000
PLA Virgem	50%	0,0403	0,0268	0,0358	0,0348	0,0306
PLA Virgem	35%	0,0278	0,0258	0,0234	0,0227	0,0218
PLA Reciclado	50%	0,0225	0,0255	0,0282	0,0273	0,0000
PLA Reciclado	35%	0,0241	0,0177	0,0261	0,0195	0,0000
PP Virgem	50%	0,0077	0,0123	0,0000	0,0000	0,0000
PP Reciclado	50%	0,0117	0,0127	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Autora (2019).

APÊNDICE D – RESULTADO DO ENSAIO DE FLEXÃO

A Figura 83 corresponde aos resultados finais das amostras dos polímeros após o ensaio de flexão.

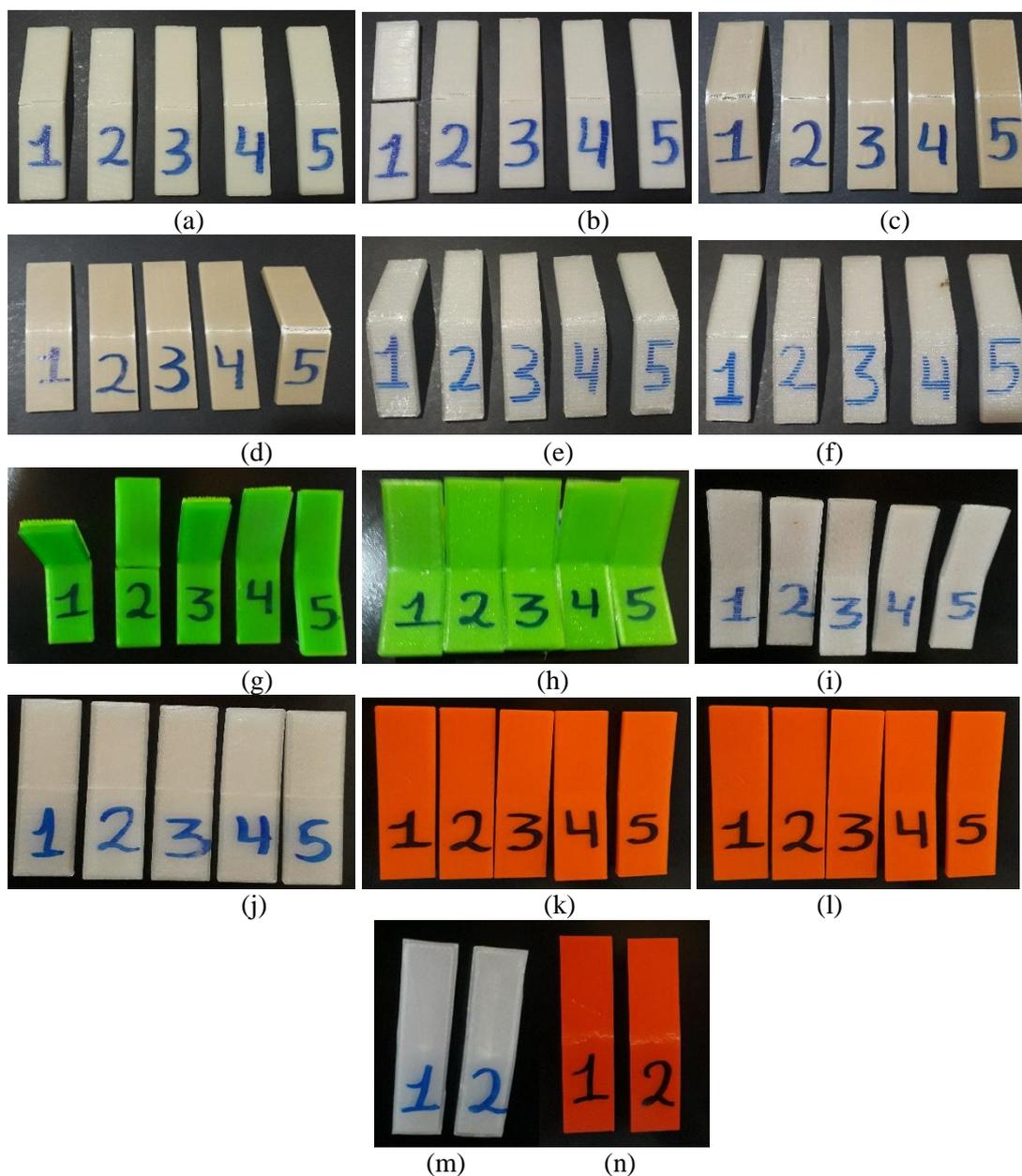


Figura 83 - Amostras finais após os ensaios de flexão: (a) ABS Virgem 50%; (b) ABS Virgem 35%; (c) ABS Reciclado 50%; (d) ABS Reciclado 35%; (e) PETG Virgem 50%; (f) PETG Virgem 35%; (g) PETG Reciclado 50%; (h) PETG Reciclado 35%; (i) PLA Virgem 50%; (j) PLA Virgem 35%; (k) PLA Reciclado 50%; (l) PLA Reciclado 35%; (m) PP Virgem 50%; (n) PP Reciclado 50%.

Fonte: Autora (2019).

Resultados coletados durante o ensaio de flexão, nas Tabela 26 a 28.

Tabela 29 - Dados coletados da força máxima.

Tipo de material	Preenchimento	Força máxima [kN]				
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
ABS Virgem	50%	0,1760	0,1709	0,1729	0,1771	0,1670
ABS Virgem	35%	0,1801	0,1683	0,1771	0,1720	0,1726
ABS Reciclado	50%	0,2474	0,2424	0,2295	0,2446	0,2043
ABS Reciclado	35%	0,1208	0,1155	0,1080	0,1144	0,1129
PETG Virgem	50%	0,3037	0,3073	0,2870	0,2951	0,2960
PETG Virgem	35%	0,2519	0,2447	0,2288	0,2288	0,2261
PETG Reciclado	50%	0,7194	0,3399	0,3402	0,3532	0,3311
PETG Reciclado	35%	0,4039	0,4040	0,4013	0,3826	0,3881
PLA Virgem	50%	0,1982	0,1901	0,1997	0,1862	0,1897
PLA Virgem	35%	0,3191	0,3092	0,3191	0,3086	0,2871
PLA Reciclado	50%	0,3244	0,2722	0,2583	0,3216	0,2919
PLA Reciclado	35%	0,2344	0,2127	0,2954	0,3128	0,2865
PP Virgem	50%	0,1192	0,1066	0,0000	0,0000	0,0000
PP Reciclado	50%	0,1347	0,1435	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Autora (2019)

Tabela 30 - Valor da área da seção transversal.

Tipo de material	Preenchimento	Área da seção transversal [mm ²]				
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
ABS Virgem	50%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
ABS Virgem	35%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
ABS Reciclado	50%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
ABS Reciclado	35%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
PETG Virgem	50%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
PETG Virgem	35%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
PETG Reciclado	50%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
PETG Reciclado	35%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
PLA Virgem	50%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
PLA Virgem	35%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
PLA Reciclado	50%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
PLA Reciclado	35%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
PP Virgem	50%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
PP Reciclado	50%	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5

Fonte: Autora (2019)

Tabela 31 - Valor da área da seção transversal.

Tipo de material	Preenchimento	Área da seção transversal [mm ²]				
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
ABS Virgem	50%	0,0022	0,0021	0,0022	0,0022	0,0021
ABS Virgem	35%	0,0023	0,0021	0,0022	0,0022	0,0022
ABS Reciclado	50%	0,0031	0,0030	0,0029	0,0031	0,0026
ABS Reciclado	35%	0,0015	0,0014	0,0013	0,0014	0,0014
PETG Virgem	50%	0,0038	0,0038	0,0036	0,0037	0,0037
PETG Virgem	35%	0,0031	0,0031	0,0029	0,0029	0,0028
PETG Reciclado	50%	0,0090	0,0042	0,0043	0,0044	0,0041
PETG Reciclado	35%	0,0050	0,0050	0,0050	0,0048	0,0049
PLA Virgem	50%	0,0041	0,0034	0,0032	0,0040	0,0036
PLA Virgem	35%	0,0029	0,0027	0,0037	0,0039	0,0036
PLA Reciclado	50%	0,0025	0,0024	0,0025	0,0023	0,0024
PLA Reciclado	35%	0,0040	0,0039	0,0040	0,0039	0,0036
PP Virgem	50%	0,0015	0,0013	0,0000	0,0000	0,0000
PP Reciclado	50%	0,0017	0,0018	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Autora (2019).

APÊNDICE E – RESULTADO DO ENSAIO DE IMPACTO

A Figura 84 corresponde aos resultados finais das amostras dos polímeros após o ensaio de impacto.



Figura 84 - Amostras finais após os ensaios de impacto: (a) ABS Virgem 50%; (b) ABS Virgem 35%; (c) ABS Reciclado 50%; (d) ABS Reciclado 35%; (e) PETG Virgem 50%; (f) PETG Virgem 35%; (g) PETG Reciclado 50%; (h) PETG Reciclado 35%; (i) PLA Virgem 50%; (j) PLA Virgem 35%; (k) PLA Reciclado 50%; (l) PLA Reciclado 35%; (m) PP Virgem 50%; (n) PP Reciclado 50%.

Fonte: Autora (2019).

APÊNDICE F – RESULTADO DO ENSAIO DE DUREZA

A Figura 85 corresponde aos corpos de prova impressos para cada parâmetro.

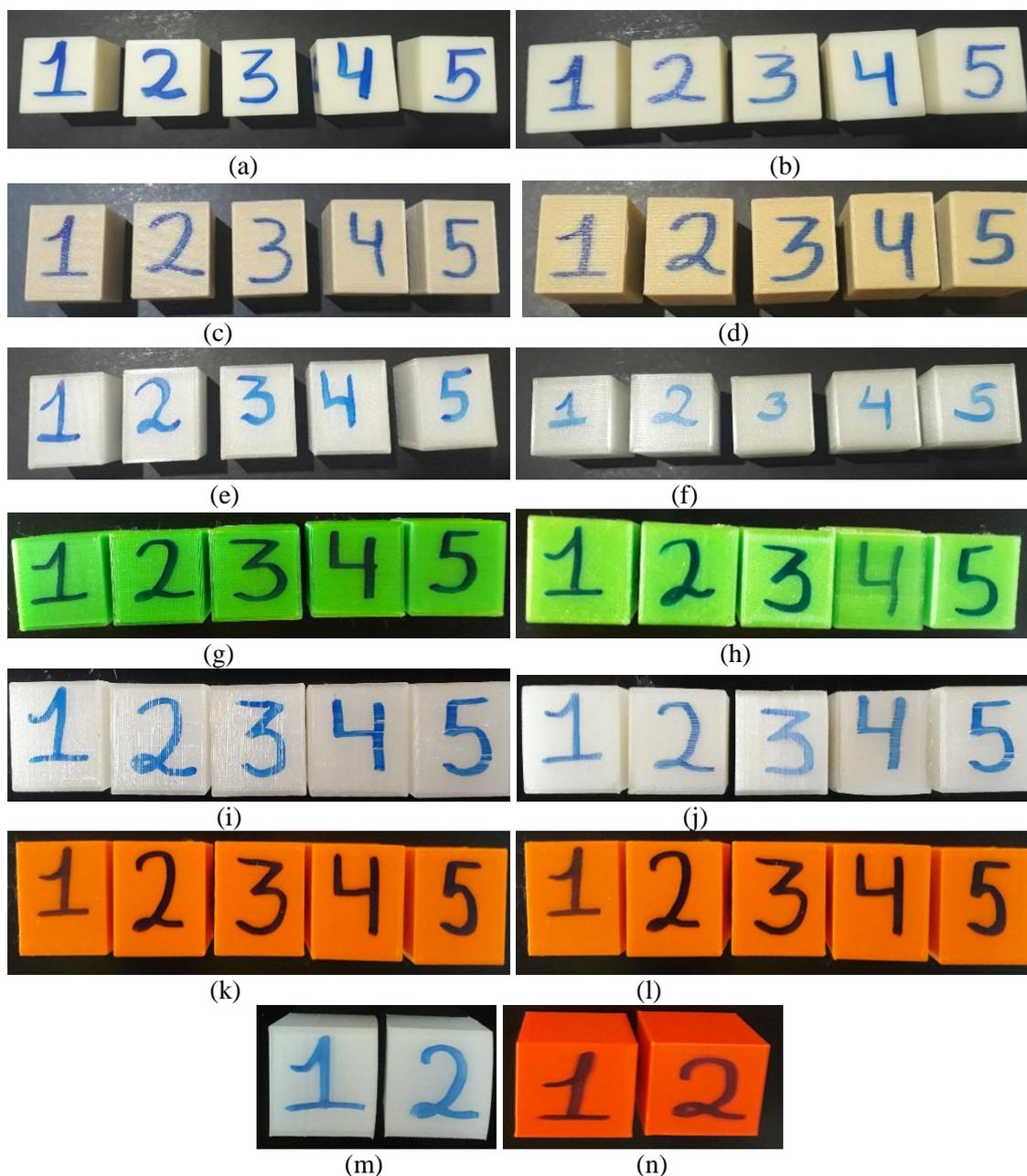


Figura 85 - Amostras finais após os ensaios de dureza: (a) ABS Virgem 50%; (b) ABS Virgem 35%; (c) ABS Reciclado 50%; (d) ABS Reciclado 35%; (e) PETG Virgem 50%; (f) PETG Virgem 35%; (g) PETG Reciclado 50%; (h) PETG Reciclado 35%; (i) PLA Virgem 50%; (j) PLA Virgem 35%; (k) PLA Reciclado 50%; (l) PLA Reciclado 35%; (m) PP Virgem 50%; (n) PP Reciclado 50%.

Fonte: Autora (2019).

Resultados coletados durante o ensaio de dureza, na Tabela 29 e 30.

Tabela 32 – Valor adquirido de HV de cada amostra.

Tipo de material	Preenchimento	kgf/mm ²				
		1	2	3	4	5
ABS Virgem	50%	16,1000	12,9000	15,1000	14,0000	13,6000
ABS Virgem	35%	13,3000	12,5000	12,6000	12,6000	15,3000
ABS Reciclado	50%	17,9000	14,5000	14,5000	14,6000	13,5000
ABS Reciclado	35%	14,5000	12,7000	12,3000	13,8000	14,5000
PETG Virgem	50%	11,2000	10,7000	13,1000	12,4000	12,0000
PETG Virgem	35%	13,1000	13,1000	12,4000	13,2000	14,1000
PETG Reciclado	50%	11,6000	11,3000	10,9000	12,0000	10,6000
PETG Reciclado	35%	10,4000	11,0000	10,1000	11,6000	11,1000
PLA Virgem	50%	17,6000	16,6000	18,4000	18,7000	20,1000
PLA Virgem	35%	19,0000	21,7000	21,8000	18,3000	21,0000
PLA Reciclado	50%	22,5000	19,5000	19,1000	20,2000	20,9000
PLA Reciclado	35%	22,2000	23,8000	20,5000	21,3000	22,1000
PP Virgem	50%	7,1000	5,9000	6,7000	5,4000	5,3000
PP Reciclado	50%	8,3000	7,8000	5,3000	6,5000	7,2000

Fonte: Autora (2019).

Tabela 33 - Área da seção da média com os dados HV – kfg/mm².

Tipo de material	Média [kgf/mm ²]	Desv Pad
ABS Virgem 50%	14,3400	1,2661
ABS Virgem 35%	13,2600	1,1845
ABS Reciclado 50%	15,0000	1,6823
ABS Reciclado 35%	13,5600	1,0188
PETG Virgem 50%	11,8800	0,9524
PETG Virgem 35%	13,1800	0,6058
PETG Reciclado 50%	11,2800	0,5541
PETG Reciclado 35%	10,8400	0,5941
PLA Virgem 50%	18,2800	1,3027
PLA Virgem 35%	20,3600	1,6103
PLA Reciclado 50%	20,4400	1,3409
PLA reciclado 35%	21,9800	1,2276
PP Virgem 50%	6,0800	0,7950
PP Reciclado 50%	7,0200	1,1735

Fonte: Autora (2019).