

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL**

JONAS MANTOVANI

**USO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS DE ACRILONITRILA BUTADIENO
ESTIRENO (ABS) ORIUNDOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E
ELETRÔNICOS (REEE) NA OBTENÇÃO DE FILAMENTOS PARA
IMPRESSÃO 3D**

Farroupilha

2023

CIP - Catalogação na Publicação

M293u Mantovani, Jonas, 1990-
 Uso de resíduos poliméricos de acrilonitrila butadieno estireno (ABS)
 oriundos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) na obtenção de
 filamentos para impressão 3D. / Jonas Mantovani -- 2023.
 xv, 71 f. : il. color. ; 30 cm.

 Dissertação (Mestrado) -- (Mestrado profissional em Tecnologia e
 Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência
 e tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, 2023.
 Orientador: Douglas Alexandre Simon.

 1. Resistência de materiais. 2. Polímeros. 3. Manufatura aditiva.
 I. Simon, Douglas Alexandre, orient. II. Título.

 CDU 2. ed.: 620.1

JONAS MANTOVANI

**USO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS DE ACRILONITRILA BUTADIENO
ESTIRENO (ABS) ORIUNDOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E
ELETRÔNICOS (REEE) NA OBTENÇÃO DE FILAMENTOS PARA
IMPRESSÃO 3D**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Materiais de Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon

Farroupilha

2023

JONAS MANTOVANI

**USO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS DE ACRILONITRILA BUTADIENO
ESTIRENO (ABS) ORIUNDOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E
ELETRÔNICOS (REEE) NA OBTENÇÃO DE FILAMENTOS PARA
IMPRESSÃO 3D**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Teofanes Foresti Girardi - UPF

Profa. Dra. Eveline Bischoff – PPGTEM/IFRS

Prof. Dr. Edson Francisquetti – PPGTEM/IFRS

Orientador: Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon – PPGTEM/IFRS

Apresentado em: 21 de março de 2023

Local da defesa: Farroupilha

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado e dado forças para a concretização deste trabalho. Sem ele, nada disso seria possível.

A minha família, por todo o apoio e compreensão necessários durante este período de estudo e dedicação.

Agradeço aos amigos e colegas do mestrado, que contribuíram de alguma forma na construção desta conquista, com aprendizados e experiências compartilhadas durante a trajetória do curso.

Ao orientador Prof. Dr. Douglas, pela amizade, apoio, e direcionamento do trabalho para que fosse possível o desenvolvimento do mesmo.

Agradeço ao IFRS (Campus Farroupilha) e seus colaboradores, pela infraestrutura disponibilizada e auxílio na realização dos ensaios de laboratório.

Ao IFRS (Campus Farroupilha) pela disponibilização dos Laboratórios de Caracterização de Materiais e de Transformação de Polímeros para realização dos ensaios.

A todos que, direta ou indiretamente auxiliaram de alguma forma a dar continuidade ao trabalho e não foram citados anteriormente, meus sinceros agradecimentos.

“Aprender é a única coisa de que a mente
nunca se cansa, nunca tem medo
e nunca se arrepende”.

Leonardo da Vinci

RESUMO

Dentre os diversos tipos de materiais descartados, os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) têm aumentado exponencialmente nos últimos anos por serem considerados obsoletos em um curto intervalo de tempo. Neste contexto, este trabalho objetiva avaliar a viabilidade de produção de um filamento para uso na impressão 3D, produzido com resíduos poliméricos oriundos das carcaças de monitores CRT e televisores. A caracterização espectroscópica realizada nos REEE revelou as diferenças encontradas na identificação dos polímeros nas carcaças em comparação com os resultados obtidos pela análise. Propriedades térmicas e reológicas se mostraram semelhantes ao Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) virgem. Os resíduos de ABS foram extrudados nas mesmas condições de virgem, se mostrando satisfatória, entretanto o método de resfriamento utilizado pós-extrusão, adicionou alta porosidade ao filamento. O processo de impressão por deposição de polímero fundido (FDM) dos corpos de prova se mostrou eficiente com a utilização do filamento reciclado, no entanto, foi percebida a presença porosidade nas peças. De maneira geral, as peças impressas com o filamento reciclado apresentaram propriedades mecânicas inferiores se comparadas às impressas com o ABS virgem, porém, os vazios identificados na impressão foram os fatores que mais influenciaram a resposta mecânica das amostras produzidas com o filamento reciclado, resultando em uma redução de aproximadamente 83% da resistência ao impacto. O filamento produzido a partir de REEE é adequado para aplicações de impressão 3D que exigem boa tolerância dimensional, sem a necessidade de elevadas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: REEE, Manufatura aditiva, ABS, resíduo pós-consumo.

ABSTRACT

Among the various types of discarded materials, electronic waste (e-waste) has been exponentially increasing in recent years due to its perceived obsolescence within a short time frame. In this context, the objective of this study is to evaluate the feasibility of producing a filament for use in 3D printing using polymer residues derived from CRT monitor and television casings. Spectroscopic characterization of the e-waste revealed differences in polymer identification in the casings compared to the results obtained from the analysis. Thermal and rheological properties were found to be similar to virgin Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). The ABS residues were extruded under the same conditions as the virgin material, yielding satisfactory results. However, the post-extrusion cooling method introduced high porosity into the filament. The fused deposition modeling (FDM) printing process of the test specimens proved to be efficient using the recycled filament, although porosity was observed in the printed parts. Overall, the printed parts using the recycled filament exhibited inferior mechanical properties compared to those printed with virgin ABS. The identified voids in the print had the most significant influence on the mechanical response of the samples produced with the recycled filament, resulting in an approximately 83% reduction in impact strength. The filament produced from e-waste is suitable for 3D printing applications that require good dimensional tolerance without the need for high mechanical properties.

Keywords: REEE, Additive manufacturing, ABS, post-consumer waste

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa e problema.....	2
1.2. Objetivo geral	3
1.2.1. Objetivos específicos	3
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1. Equipamentos elétricos e eletrônicos	4
2.2. Resíduos de Equipamentos elétricos e eletrônicos.....	5
2.3. Reciclagem dos REEE	6
2.4. Materiais Poliméricos	7
2.5. Manufatura Aditiva	8
2.5.1. Variáveis importantes da tecnologia FDM	13
2.6. Modelagem por deposição fundida (FDM).....	18
2.7. Acrilonitrila-Butadieno-Estireno.....	21
2.7.1. ABS na Impressão 3D.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1. Materiais	24
3.2. Método	25
3.3. Processamento.....	27
3.3.1. Coleta dos resíduos.....	27
3.3.2. Preparação do REEE	27
3.3.3. Extrusão do Filamento	28
3.3.4. Controle dimensional do filamento.....	29
3.3.5. Impressão 3D	29
3.3.6. Controle dimensional das amostras	34
3.4. Caracterização.....	35
3.4.1. Espectroscopia de Infravermelho.....	35
3.4.2. Propriedades Térmicas.....	35
3.4.3. Propriedades Reológicas	36
3.4.4. Propriedades Mecânicas	36
3.4.5. Propriedades Microscópicas.....	36
3.5. Imprimibilidade.....	37
4. RESULTADOS	38

4.1. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	38
4.2. Análises Termogravimétricas	41
4.3. Calorimetria Diferencial de Varredura	43
4.4. Propriedades reológicas	45
4.5. Propriedades mecânicas	48
4.5.1. Ensaio de Resistência à Tração.....	48
4.5.2. Resistência ao Impacto.....	51
4.6. Microscopia Ótica dos Filamentos	53
4.7. Variação no diâmetro dos filamentos.....	54
4.8. Microscopia Óptica do Corpo de Prova.....	55
5. CONCLUSÕES	59
5.1. Contribuição do trabalho	60
5.2. Possibilidades de trabalhos futuros	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO 1.....	69
ANEXO 2.....	70
ANEXO 3.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes nomenclaturas utilizadas para Manufatura aditiva (Adaptado de Volpato, 2017).....	9
Figura 2 – Esquema da Manufatura aditiva e suas características e técnicas (Adaptado de Jimenéz, 2019)	10
Figura 3 – Corpos de prova com níveis de preenchimento variados (Adaptado de 3D Matter, 2021)	14
Figura 4 – Padrões de preenchimento do software Ultimaker Cura, versão 5.0	14
Figura 5 – Orientações de preenchimento (Adaptado de Liu, Lei e Xing, 2019)	16
Figura 6 – Etapas principais da construção de um protótipo 3D. Modelo eletrônico (a-b) e Modelo físico (c-d) (Adaptado de Volpato, 2017).....	17
Figura 7 – Variações de altura de camada (Adaptado de Mccollum, 2021)	18
Figura 8 – Exemplo de Impressora 3D (FDM).....	19
Figura 9 – Ilustração do mecanismo de funcionamento pela técnica FDM (Adaptado de CARNEIRO, 2015).....	20
Figura 10 – Estrutura química do ABS e matriz SAN (Adaptado de PINTO, 2012)	21
Figura 11 – Separação das carcaças poliméricas dos demais materiais	24
Figura 12 – Fluxograma da Metodologia.....	26
Figura 13 – Fragmentos de peças utilizadas para análise de FTIR.	27
Figura 14 – Flocos de REEE	28
Figura 15 – Impressora 3D utilizada neste trabalho	30
Figura 16 – Corpo de prova de Resistência à tração	30
Figura 17 – Corpo de prova de Resistência ao impacto.....	31
Figura 18 – Impressão do Corpo de Prova. Mesa espelhada reflete parte da estrutura do equipamento.	34
Figura 19 - Espectro FTIR das carcaças	39
Figura 20 - Espectro FTIR das carcaças na faixa entre 900 e 2000 cm^{-1}	40
Figura 21 - Termograma da amostra r-ABS.	42

Figura 22 - DSC da amostra r-ABS sendo resfriamento em azul e segundo aquecimento em vermelho.	43
Figura 23 - Viscosidade das amostras de ABS puro e r-ABS	46
Figura 24 - Viscosidade complexa em função da Frequência Angular (ω) para r-ABS e ABS Puro	47
Figura 25 - Resultado do Módulo elástico de ABS (virgem) e r-ABS (reciclado)	49
Figura 26 - Tensão na Ruptura de ABS (virgem) e r-ABS (reciclado)	50
Figura 27 - Resultado ensaio de Resistência ao Impacto	52
Figura 28 - Análise microscópica da superfície externa do Filamento ABS Puro – (a) com aproximação de (2x) e (b) com (4x).	53
Figura 29 - Análise microscópica Filamento r-ABS (4x) (superfície externa) ...	54
Figura 30 - Corpo de prova de ensaio de Impacto do ABS comercial. Setas indicam presença de vazios.	56
Figura 31 - Superfície de fratura do corpo-de-prova de r-ABS. A imagem bCP's: (a) demonstra a fratura enquanto que (b) mostra um aumento considerável de vazios	57
Figura 32 - Comparação filamento reciclado (preto) e filamento comercial (amarelo)	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas de Impressão 3D, processamento, materiais e algumas vantagens e desvantagens de cada processo	11
Tabela 2 – Tipos de preenchimento e características (Adaptado de O'Connell, 2022)	15
Tabela 3 - Produtos, marcas e modelos utilizados.....	25
Tabela 4 – Dimensões do corpo de prova tipo gravata para o ensaio de tração.	30
Tabela 5 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de Impacto	31
Tabela 6 – Parâmetros do processo FDM configurado no Cura 5.0	32
Tabela 7 – Parâmetros de Temperatura de impressão do Material, Velocidade de impressão e resfriamento.....	33
Tabela 8 – Identificação dos materiais e resultado da caracterização (FTIR) ..	39
Tabela 9 - Pesquisas realizadas com autores informando os picos encontrados pela análise do FTIR.	41

LISTA DE ABREVIATURAS

- EEE – Equipamentos elétricos e eletrônicos
- REEE – Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos
- MA – Manufatura aditiva
- FDM – Modelagem por fusão e deposição
- ABS – Acrilonitrila-butadieno-estireno
- r-ABS – Polímero reciclado de acrilonitrila-butadieno-estireno
- CAD – Software computer-aided design
- PR – Prototipagem Rápida
- ASTM – Sociedade americana de testes e materiais
- CP's – Corpos de prova
- FTIR – Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier
- TGA – Análise termogravimétrica
- DSC – Calorimetria diferencial de varredura
- Tg – Temperatura de transição vítrea
- Tm – Transição de fusão cristalina

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, vivemos em uma sociedade do descartável, na qual não se deseja a produção de bens duráveis e reutilizáveis e, neste contexto de consumo de troca e descarte, a geração de resíduos é crescente a cada ano. Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) são os apresentam uma das mais elevadas taxas de crescimento, devido ao aumento da popularização dos equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE), além da acelerada obsolescência destes frente às novas tecnologias.

A grande preocupação sobre esta questão está ligada à forma de descarte desses equipamentos e os impactos que possivelmente podem causar ao ser humano, meio ambiente, lençóis freáticos, dentre outros, sendo geralmente considerados perigosos, por apresentarem em sua composição metais pesados como o chumbo e mercúrio. O consumidor final desconhece tais perigos ao gerar, reter e descartar os REEE de forma inadequada (LAVEZ; SOUZA; LEITE, 2011; TANSKANEN, 2013; MARKET ANALYSIS; IDEC, 2013).

Por outro lado, os materiais poliméricos estão ganhando espaço sobre os metais nos mais diversos segmentos, como peças de utilidades domésticas, peças de engenharia, eletroeletrônicos, construção civil, embalagens, entre outros. O advento da manufatura aditiva (MA) criou a possibilidade de incrementar os segmentos de uso dos polímeros, com a capacidade de produzir peças de formas geométricas complexas com ou sem garantia de propriedades mecânicas elevadas (ZAPORALLI, 2006 apud KUREK; SELLIN; GELSLEICHTER, 2009).

Como forma de mitigar os efeitos negativos do acúmulo destes resíduos no ambiente, a reciclagem mostra-se como uma alternativa sustentável. Os materiais termoplásticos possuem facilidade de serem reciclados, trazendo benefícios de economia para a indústria por meio da redução de custo para aquisição de matéria-prima (LONTRA, 2011).

Com o aumento da competitividade entre as empresas, a Impressão 3D começou a ser difundida nas indústrias, devido ao aperfeiçoamento dos processos, da qualidade dos produtos e a redução de custos e tempo de produção. O processo de impressão 3D, consiste na representação de um objeto virtual 3D em um objeto físico (DA CRUZ FERREIRA, 2016).

Existem diversos tipos de manufaturas aditivas, mas a técnica de modelagem por deposição de fundido, do inglês *fused deposition modeling* (FDM) é a mais utilizada para a construção de peças plásticas com grande liberdade geométrica, baixo investimento em equipamento e baixo custo de consumíveis. A FDM utiliza um filamento de polímero termoplástico como matéria-prima para a fabricação das peças, sendo os materiais mais comumente utilizados o Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e o Poli-ácido-láctico (PLA). (PEDROSA, 2015; SANTANA, 2015).

As propriedades do (ABS) o tornaram um dos materiais mais populares no processo de impressão 3D, pelo fato de ser um polímero de boa imprimibilidade (capacidade de ser impresso) e com boa precisão e estabilidade dimensional. Além disso, a qualidade das peças impressas com este material por meio do processo FDM, pode ser controlada com o ajuste de alguns parâmetros de impressão como o tipo e densidade de preenchimento, orientação de impressão, altura da camada, temperatura de impressão, velocidade de impressão, entre outros (AUMNATE et al., 2018).

Diante disso, este trabalho apresentará a capacidade de reciclagem de resíduos de EEE, em especial o (ABS) oriundos das carcaças poliméricas, a fim de produzir um filamento para utilização na impressora 3D através da técnica FDM. Serão avaliadas questões referentes ao potencial de produção do filamento por extrusão, imprimibilidade deste material em impressora FDM aberta, além das propriedades químicas, térmicas e reológicas deste frente ao filamento comercial.

1.1. Justificativa e problema

A geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos tornou-se um tema de grande preocupação na sociedade atual. Fatores como a redução do tempo de vida útil (chamada de obsolescência programada) e a velocidade com que ocorre os lançamentos de inovação tecnológica colaboram para a maior comercialização desses equipamentos e, por consequência, para a geração dos REEE. Contudo, grandes impactos ambientais são decorrentes do descarte inadequado desses resíduos no ambiente (DIAS, 2017).

A reciclagem possui um papel muito importante para a preservação do meio ambiente, sendo o primeiro passo para o reaproveitamento dos materiais pós-

consumo, ou seja, materiais descartados e com possibilidade de serem reutilizados, neste caso os EEE. A recuperação de resíduos sólidos poliméricos, por meio da fusão, é viável para a maioria dos polímeros que normalmente compõem a fração polimérica dos equipamentos elétricos e eletrônicos, tornando-se possível a sua reutilização.

Diante disso, este trabalho visa abordar o reaproveitamento de materiais poliméricos, oriundos das carcaças de equipamentos elétricos e eletrônicos, dada a grande produção e crescente geração destes resíduos, para a produção de um filamento reciclado para utilização na impressão 3D pela técnica FDM, apresentando uma nova proposta para o seu reuso.

1.2. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo investigar a viabilidade para a produção de um filamento reciclado de ABS a partir das carcaças poliméricas dos REEE para utilização na impressão 3D pelo método FDM.

1.2.1. Objetivos específicos

A fim de atingir o objetivo geral deste trabalho, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a viabilidade de produção do filamento na extrusora monorosca através dos resíduos poliméricos das carcaças;
- Realizar a impressão dos corpos de prova com os filamentos oriundos de REEE;
- Avaliar e comparar as propriedades mecânicas, químicas, térmicas, reológicas e microscópicas do material reciclado com o material comercial.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Equipamentos elétricos e eletrônicos

Com o surgimento de usuários cada vez mais exigentes, os avanços tecnológicos são necessários e inevitáveis. Os Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) são definidos como equipamentos que funcionam mediante a aplicação de correntes elétricas ou campos magnéticos (EPA-ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY, 2020), como televisores, rádios, telefones celulares, eletrodomésticos portáteis, todos os equipamentos de microinformática, entre outros. Estes equipamentos se tornaram essenciais para a nossa vida diária e são amplamente utilizados em nossas residências e escritórios.

Também em relação ao aumento do consumo de EEE, é possível identificar que a velocidade da redução da vida útil desses tipos de produtos está sofrendo uma aceleração, chegando a fazer com que esses produtos em alguns casos estejam 'obsoletos' mesmo antes de sair da loja, gerando para sociedade e meio ambiente consequências alarmantes (LAVEZ et al., 2011).

Os EEE são compostos basicamente por polímeros termoplásticos e seus compósitos que apresentam algumas propriedades importantes, como baixa densidade e resistência à corrosão, representando uma vantagem significativa quando comparado com outras classes de materiais, por exemplo, metais (LIU et al., 2018).

Segundo (FERREIRA et al., p. 17, 2012), estes equipamentos podem ser divididos em quatro classes:

Linha branca: composta por refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar;

Linha marrom: estão inseridos os monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras;

Linha azul: compreendem as batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras;

Linha verde: onde se encontram os computadores desktop e laptops, acessórios de informática, tablets e telefones celulares.

Segundo Siqueira e Marques (2012), a composição aproximada dos REEE é de 48% de ferro e aço, que compõe gabinetes e molduras; 21% de polímero, que compõe o gabinete, embalagem de cabos e placas de circuitos; 7% de cobre e 5% de alumínio que são utilizados em cabos; 5% de vidro de telas e mostradores, além de outros elementos, como madeira, borracha, cerâmica e outros metais não ferrosos, entre eles os metais pesados.

Diante disso, no estudo de Xavier e Lins (2018), os autores relatam que apesar desses resíduos serem caracterizados por uma ampla variedade de produtos e materiais que possuem elevado valor agregado, pouco se é aproveitado na recuperação como matéria-prima para os processos industriais.

2.2. Resíduos de Equipamentos elétricos e eletrônicos

O avanço da ciência e da tecnologia tem gerado uma nova categoria de produtos, os elétricos e eletrônicos. Por um lado, este avanço revolucionou o mundo com produtos baratos que facilitaram a vida das pessoas, por outro lado, essa evolução os torna rapidamente obsoletos. O resultado é uma quantidade enorme e crescente de produtos eletrônicos que acabam sendo descartados, pois muitas vezes é mais barato comprar um novo do que reparar ou atualizar um produto quebrado ou obsoleto (VEIT H.M., et al, 2006).

Os resíduos gerados a partir dos equipamentos eletroeletrônicos (EEE) são popularmente conhecidos como “lixo eletrônico” e representam uma parcela significativa dos resíduos sólidos gerados pela população mundial. Entre os anos de 2014 e 2016, Catão (2019) afirma que o volume de REEE cresceu aproximadamente 8% alcançando a marca de 44,7 milhões de toneladas de equipamentos eletroeletrônicos descartados no mundo. Esse aumento é devido ao consumo dos produtos eletroeletrônicos, que apresentam uma das mais elevadas taxas de crescimento do mundo, causada pela popularização e obsolescências destes equipamentos (Porto et al., 2020).

De acordo com o *Global E-waste monitor (2020)*, cerca de 53,6 milhões de toneladas de lixo eletrônico foram gerados em 2019 no mundo. Isso equivale a pouco mais de seis quilos para todas as pessoas do planeta. Apenas a Europa e os EUA contribuem para quase metade do total de lixo eletrônico gerado anualmente. Estima-

se que o volume total anual esperado para 2030, ultrapasse os 74 milhões de toneladas. A maior parte do crescimento vem de regiões emergentes. Até 2040, as emissões de carbono para a produção e uso de eletrônicos, incluindo dispositivos como PCs, laptops, monitores, smartphones e tablets (e sua produção) alcançará 14% do total de emissões globais.

2.3. Reciclagem dos REEE

Os resíduos poliméricos têm potencial de trazer grande impacto para o meio ambiente devido ao elevado tempo de degradação e descarte inadequado, causando poluição na cidade, ao ponto de contribuir com o foco de doenças e alagamento nas ruas com o entupimento dos bueiros (ALMEIDA, 2010).

Os REEE são desmontados e os materiais metálicos e cerâmicos são separados do material polimérico e direcionados para processo de recuperação ou incorporação em outros materiais. Através da reciclagem mecânica os polímeros podem ser identificados e separados por meio das simbologias existentes no material e posteriormente realizada a sua cominuição (redução de tamanho) (AL-SALEM; LETTIERI; BAEYENS, 2009)

As carcaças dos equipamentos eletrônicos normalmente são fabricadas ou podem conter polímeros com boas qualidades, como por exemplo, o ABS, o HIPS (poliestireno de alto impacto) e o PC (policarbonato), sendo a reciclagem mecânica, a principal solução para o reaproveitamento de resíduos poliméricos pós-consumo, na qual os resíduos são separados, triturados, lavados e reprocessados via extrusão, capaz de manter a estrutura química original (BiPRO, 2015).

No entanto, uma das principais dificuldades encontradas na reciclagem de resíduos plásticos é a imiscibilidade da grande maioria dos polímeros, o que dificulta a produção de materiais com propriedades mecânicas adequadas pela presença de contaminantes, mesmo que poliméricos (PRACELLA, M. 2017).

A eficiência no uso de materiais poliméricos é uma das questões mais importantes que nossa sociedade enfrenta em termos de desenvolvimento sustentável, devido em grande parte, ao tempo de decomposição dos materiais poliméricos no meio ambiente, ou seja, a sua gestão, reaproveitamento e reciclagem são metas a serem perseguidas por todos os setores envolvidos.

2.4. Materiais Poliméricos

Os materiais poliméricos podem ser classificados de diferentes maneiras, dependendo do objetivo de quem os classifica. As formas mais comuns de classificação são: do ponto de vista da estrutura química; do método de preparação; das características tecnológicas e do comportamento mecânico (MANRICH, 2005).

A aplicação de produtos à base de polímeros, em vários setores, tem estimulado, a nível mundial, a sua produção, tendo como consequência a geração de resíduos poliméricos. Em 2018, no mundo, foram gerados cerca de 250 milhões de toneladas de resíduos plásticos, sendo 70% direcionados para aterros, reciclagem ou unidade de recuperação de energia e, o restante, 30% descartados de forma inadequada (LIWARSKA-BIZUKOJC, 2021). Golwala et al. (2021) citam que aproximadamente 12 bilhões de toneladas métricas de resíduos plásticos serão lançados, anualmente, no ambiente até 2050.

Nos dias de hoje, existe uma quantidade enorme de materiais para utilização na fabricação de filamentos para impressão 3D. Como em todas as áreas, cada material é um material, isto é, podem ter propriedades totalmente diferentes e a sua escolha deve ser feita com base na sua aplicação.

Os filamentos produzidos por ABS, são os mais utilizados devido à sua praticidade e baixa necessidade de manutenção, simplificando o sistema de extrusão das impressoras (ABREU, 2017). As impressoras 3D utilizam filamentos dos mais variados tipos de materiais, sendo os mais consumidos:

- Poli (ácido polilático) (PLA) - derivado de fontes naturais como o amido de milho, produz objetos com alta qualidade superficial e proporciona facilidade de impressão em praticamente qualquer impressora.

- Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) - é um copolímero derivado do petróleo. É também muito utilizado devido à sua alta resistência mecânica e facilidade de melhorar o acabamento de peças impressas.

- Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG) - tem vantagem de oferecer uma excelente resistência a intempéries; possui propriedades resistentes a UV que mantêm a resistência do produto e evitam o amarelamento. (REDWOOD, SCHAFFER e GARRET, 2018).

O ABS e o PLA são os polímeros que ganham maior destaque, pois são materiais de alta disponibilidade, fácil processamento e baixo custo (SILVA, 2019).

2.5. Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (MA) ou impressão 3D é o processo de fabricação de objetos que ocorre por meio da adição sucessiva de material em camadas a partir de um modelo computacional 3D do componente, no qual esse modelo computacional é oriundo de um *software computer-aided design* (CAD). O processo que envolve a MA é automatizado, se desenvolvendo de maneira relativamente rápida, em comparação aos meios tradicionais de manufatura (VOLPATO, 2017).

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), (MA) é o termo formal para o que costumava ser chamada de prototipagem rápida. O termo Prototipagem Rápida (PR) é usado em muitas indústrias devida a sua aplicação ser na criação de modelos e representações do produto ou peça antes da versão definitiva, além de ser aplicável em testes de montagem e design.

De maneira geral, os processos de prototipagem rápida apresentam algumas vantagens com relação aos métodos convencionais, como fresamento e torneamento. Pode-se ressaltar como principais benefícios da PR a economia de tempo de execução e de custos na construção dos modelos.

Existem hoje diferentes grupos de técnicas de PR disponíveis comercialmente, dentre as quais a impressão 3D é a que vem ganhando destaque (GARCIA, 2010). Várias são as nomenclaturas utilizadas para definição de manufatura aditiva, a Figura 1 apresenta algumas das principais variações:

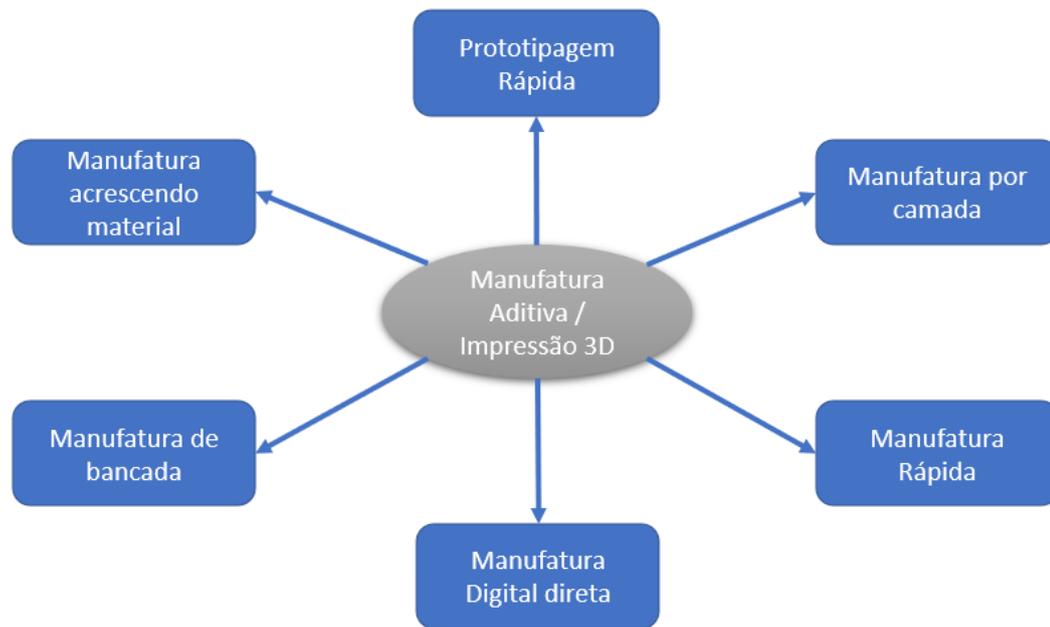


Figura 1 – Diferentes nomenclaturas utilizadas para Manufatura aditiva (Adaptado de Volpato, 2017)

Em comparação com os processos convencionais de fabricação, como fundição e usinagem, a MA está sendo considerada como uma técnica mais limpa de produção, pois não gera lascas e resíduos de remoção de material (BARWINKEL, S. 2016). Este processo de fabricação também é útil em muitas indústrias, como a aeroespacial, onde é utilizada especialmente para produzir componentes altamente complexos de aeronaves que são capazes de reduzir o consumo de combustível, ou no setor médico, onde são necessários produtos personalizados para cada tipo de situação.

Cada vez mais a indústria tem adaptado as impressoras 3D para o uso doméstico, melhorando a ergonomia e diminuindo as dimensões das máquinas, além de desenvolver interfaces de modelagem de objetos cada vez mais simples, para usuários menos qualificados.

Por ser o processo mais utilizado entre os processos de manufatura aditiva, o FDM apresenta diversas aplicações, que vão desde brinquedos infantis até aplicações na indústria aeroespacial, decorrente dos diversos materiais que podem ser utilizados nessas impressoras, promovendo a seleção das propriedades mecânicas de acordo

com a aplicação pretendida (MOREIRA, 2016). A Figura 2 apresenta um panorama melhor de aplicações da MA.

Existem diferentes tipos de tecnologias utilizadas para a manufatura aditiva, cada qual com seu propósito ou técnica específica. Garrett (2016) avalia que não existe um tipo de impressora 3D que apresenta todos as aplicações possíveis, logo, cada tipo de tecnologia busca atingir um objetivo em específico. A seguir, apresenta-se um esquema identificando os principais processos, técnicas, materiais, e modelos para obtenção de peças na MA, conforme a figura 2:

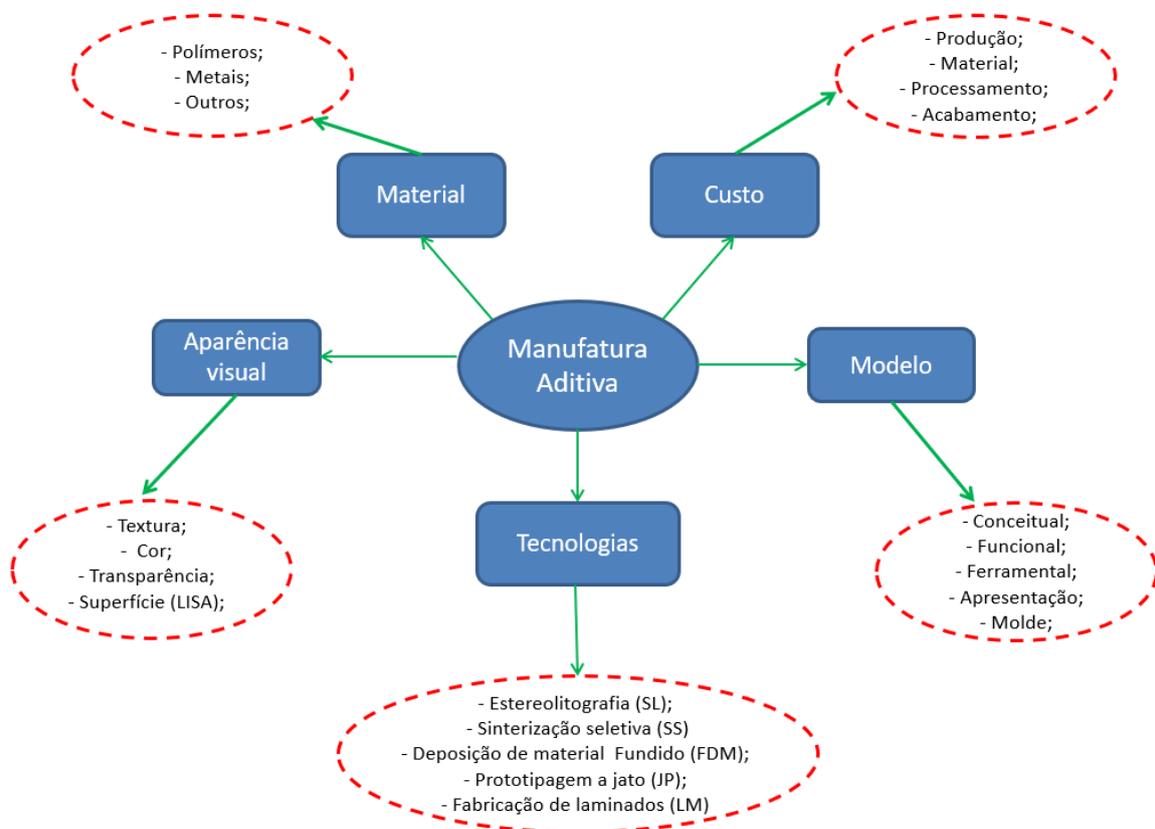


Figura 2 – Esquema da Manufatura aditiva e suas características e técnicas (Adaptado de Jimenéz, 2019)

Os Processos convencionais de fabricação de componentes, são baseados no uso de recursos e capacidade combinados com elementos de controle para alcançar elevados níveis de confiabilidade e precisão. O uso de sistemas durante o projeto de engenharia, fases de fabricação e simulação de um produto, combinadas com outras técnicas conseguem tornar o sistema de produção eficiente.

As primeiras classificações de Manufatura Aditiva levaram em conta o estado original do material a ser utilizado, se é sólido, líquido ou pó. Um dos pioneiros na classificação de processos, hierarquizando-os com base no material foi Kruth (1998), que propôs uma classificação dos principais processos e técnicas referentes a MA em 1991, conforme descrito no esquema da figura acima. Nela, é possível observar os diferentes recursos utilizados como tipos de materiais (metal, polímero), custos envolvidos com material, produção e processamento, além das diferentes tecnologias utilizadas conforme a aplicação ou interesse do usuário.

Na literatura é possível encontrar diferentes classificações com base no equipamento utilizado (Greul, 1997), em relação ao próprio processo de fabricação (Derby, 2003) e também referente a transformação dos materiais (Gibson, 2009).

Junto a isso, a ISO propôs, em seu trabalho de 2010, os dez processos relacionados com a impressão 3D, como: estereolitografia, sinterização a laser, fusão a laser, modelagem/fabricação de camada fundida, modelagem multijato, modelagem polyjet, impressão 3D, fabricação de laminados de camada, sinterização de máscara e processamento de luz digital.

A tabela 1 apresenta algumas características de processamento, medidas e materiais utilizados em cada uma das técnicas mais comuns utilizadas em MA, além de vantagens e desvantagens encontradas.

Tabela 1 - Técnicas de Impressão 3D, processamento, materiais e algumas vantagens e desvantagens de cada processo

Técnicas de Impressão 3D	Processamento	Medidas e materiais	Vantagens / Desvantagens
Estereolitografia (SL)	O material sofre solidificação ponto a ponto devido ao laser de fotopolimerização ser direcionado para a seção transversal 2D do plano do modelo (XY). A plataforma desce gradualmente (plano Z) de acordo com a altura da camada definida (Jacobs, 1992).	A espessura da camada varia entre 0,1 e 0,2 mm. A precisão em SL é +/- 0,2% (min. +/- 0,2 mm). Tamanho máximo do modelo: 2100x700x800mm. Podem ser utilizados os seguintes materiais: resinas epóxi-acrílicas, como por exemplo, (Poly1500, PP, protogen white, Flex 70B).	Boa qualidade e acabamento superficial. Grandes precisões e peças transparentes podem ser obtidas. Os equipamentos e materiais são de custo médio-alto. Como desvantagem, pode apresentar problemas para obter peças com cantilevers ou furos internos devido à dificuldade ou remoção dos suportes.

<p>Sinterização seletiva a laser (SLS)</p>	<p>Uma camada de pó é colocada e um laser de CO₂ a sinteriza nos pontos selecionados em uma seção transversal do modelo 2D (plano XY). A plataforma desce gradualmente (plano Z) de acordo com a altura da camada definida (U.S. Department of Energy, 1997).</p>	<p>A precisão em SLS é entre +/- 0,3 % (min. +/- 0,3 mm). A espessura mínima da camada é 0,08 mm. Tamanho máximo do modelo: 700x380x580mm. Alguns materiais que podem ser utilizados: Poliamida (PA), Poliamida de fibra de vidro (PA-GF), Alumida, TPU 92A-1.</p>	<p>As peças obtidas apresentam alta qualidade e precisão. Há uma grande quantidade de materiais para utilização. Não apresentam problemas para obter peças com cantilevers ou furos internos. Os equipamentos e materiais são de custo médio-alto.</p>
<p>Deposição de material fundido (FDM)</p>	<p>O fio é enrolado em torno de uma bobina e depositado passando pelo bico térmico que se move de acordo com o plano (XY). A plataforma desce gradualmente (plano Z) de acordo com a altura da camada definida (J. Russell and R. Cohn, 2012).</p>	<p>A espessura da camada é: 0,13 - 0,25 mm (ABS); 0,18 - 0,25 mm (ABSi); 0,18 - 0,25 mm (PC); 0,25 mm (PPSU); Tamanho máximo do modelo: 914x610x914mm. Podem ser utilizados os seguintes materiais: ABS, ABSi, ABS-M30, ABS-ESD7, PC-ABS, PC-ISO.</p>	<p>O equipamento possui um custo médio-baixo. Disponível também para ambientes domésticos. Possibilidade de eliminar suportes. Podem ser obtidas peças com boa qualidade e precisão.</p>
<p>Prototipagem a jato (JP)</p>	<p>O modelo é construído em uma cama cheia de pó. Através do bico, é injetado um aglutinado na superfície da cama de pó, que funde o pó de acordo com a geometria da seção transversal 2D do modelo. O pó é adicionado e nivelado com o auxílio de um rolo. Concluído o processo, o excesso de pó é aspirado da cama deixando o modelo limpo.</p>	<p>A espessura mínima da camada é entre 0,13 a 0,076 mm. Os materiais que podem ser utilizados são: cerâmicas, metais e polímeros.</p>	<p>Podem ser obtidas peças coloridas, com grande qualidade estética; Não são necessários suportes; Dificuldade em obter peças funcionais devido à fragilidade das peças obtidas; O custo do equipamento é médio-alto;</p>
<p>Fabricação de laminados (LOM)</p>	<p>Inventado em 2003 por MacCormack. A laminação por deposição seletiva é (SDL) não deve ser confundida com a tecnologia de fabricação de laminados (LOM). A LOM utiliza um laser, papel laminado e um adesivo que fixa o modelo no suporte. A técnica SDL trabalha depositando um adesivo na área selecionada (J. Nylund, U., 2015).</p>	<p>LOM: A espessura da camada é de 0,165 mm. O tamanho máximo do modelo é 170x220x145 mm. SDL: a espessura da camada corresponde à espessura do papel utilizado mais a da camada de adesivo.</p>	<p>São obtidas peças com alta qualidade e estética; As peças obtidas podem ser pintadas; O equipamento é de custo médio; Nenhuma parte funcional é obtida;</p>

2.5.1. Variáveis importantes da tecnologia FDM

Assim como outros processos de usinagem ou de fabricação, a modelagem por fusão e deposição (FDM) também possui parâmetros de entrada, que são relevantes para a condução adequada do processo de impressão 3D (VOLPATO, 2017).

Cunico (2015) define dez diferentes parâmetros de impressão para o processo de FDM: espessura, diâmetro do bico de extrusão, distância entre os filamentos, número de contorno, densidade de preenchimento, tipo de padrão de preenchimento, velocidade de extrusão, velocidade de deslocamento, temperatura de extrusão e material extrudado. A maioria desses padrões correlacionam-se; alguns têm maior impacto e influenciam diretamente no conceito final do produto em comparação a outros. Para o presente trabalho, apenas alguns parâmetros serão utilizados no estudo de flexão, tais como orientação de impressão, espessura de parede, geometria e densidade de preenchimento e altura entre camadas.

A seguir serão discutidas as características relevantes para definição do modelo em FDM, controlada pelo programa fatiador, como a geometria e densidade de preenchimento, além da orientação e altura da camada.

2.5.1.1. Geometria e Densidade de preenchimento

A geometria e a densidade do preenchimento são dois dos principais parâmetros que afetam a resistência de uma peça impressa, visto que, aumentar a densidade de preenchimento haverá um aumento resistência mecânica do objeto.

Na MA essa definição é realizada pelo *software fatiador (slicer)*, que cria os padrões de parede, níveis de preenchimento, altura de camadas, suportes e outras configurações relacionadas ao modelo 3D que será impresso.

A densidade de preenchimento também pode ser identificada como nível de preenchimento (FERNANDES, 2016). Isto significa que um nível de preenchimento de 0% caracteriza um objeto sem preenchimento, permanecendo com seu interior completamente vazio. No outro extremo, o nível de preenchimento 100% indica um objeto completamente preenchido. O preenchimento reforça a estrutura da peça, influenciando diretamente na resistência e peso do objeto final.

A escolha de um adequado nível de preenchimento no *slicer* depende da finalidade do projeto e da demanda de esforços (DE REZENDE MARTINS, 2021). A Figura 3 ilustra algumas variações do nível de preenchimento em um corpo de prova.

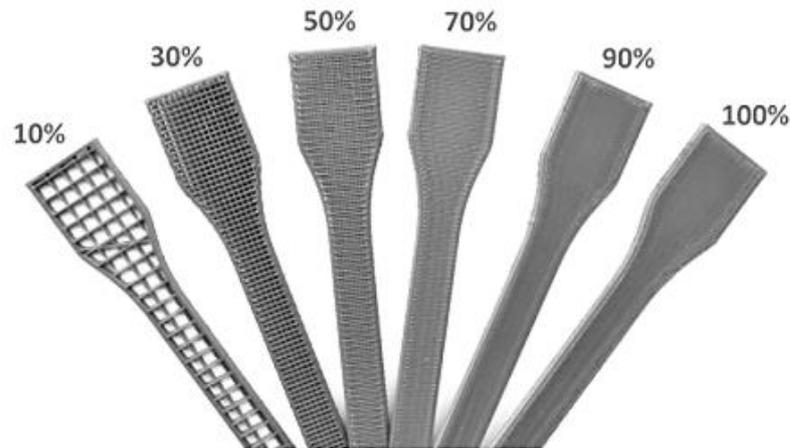


Figura 3 – Corpos de prova com níveis de preenchimento variados (Adaptado de 3D Matter, 2021)

A geometria de preenchimento, também denominada de tipo de preenchimento, representa a forma da estrutura dentro do objeto. Os diversos tipos de preenchimento formados por linhas e formas geométricas podem afetar o peso, o tempo de impressão e a resistência de uma peça. Alguns padrões de preenchimento são melhores que outros para determinadas aplicações (O'CONNELL, 2022).

A Figura 4 exemplifica alguns padrões de preenchimento disponibilizados pelo *software* Ultimaker Cura. A Tabela 2 apresenta características de diversos tipos de preenchimento utilizados na impressão 3D e suas principais características.

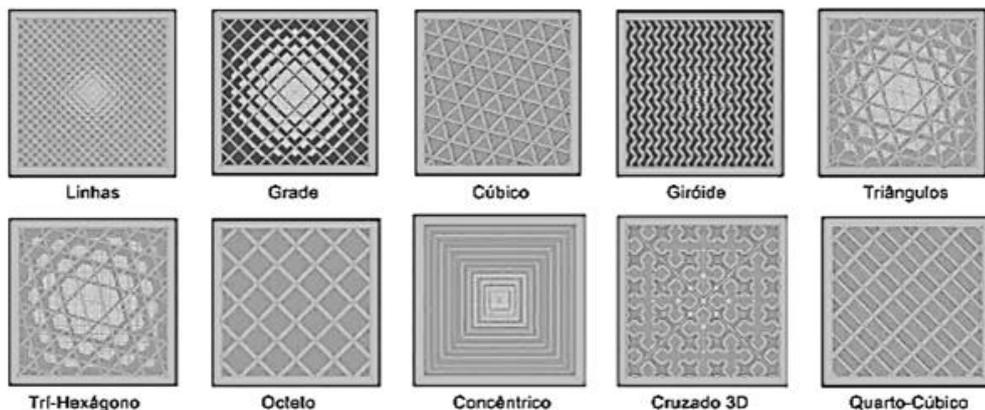


Figura 4 – Padrões de preenchimento do *software* Ultimaker Cura, versão 5.0

Tabela 2 – Tipos de preenchimento e características (Adaptado de O'Connell, 2022)

Tipo de preenchimento	Características
Linhas	Contém linhas impressas em uma direção (ao longo do eixo X ou Y). Este padrão de preenchimento oferece resistência em apenas duas dimensões, sendo ótimo para impressões rápidas. O padrão de linhas não usa muito material e mantém o peso bastante leve.
Grade	Semelhante em aparência às linhas, mas em vez de linhas unidirecionais, ele contém linhas bidimensionais a cada camada, com o dobro de espaço entre as linhas. Este padrão de grade consome uma quantidade média de material e leva um tempo médio para ser concluído.
Cúbico	Este padrão produz cubos empilhados, porém eles são inclinados em 45 graus em torno dos eixos X e Y, parecendo triângulos. O padrão fornece excelente resistência em três dimensões, porém leva mais tempo e consome mais material do que outros.
Giróide	Apresenta curvaturas irregulares côncavas que eventualmente se cruzam. Este padrão busca atingir um equilíbrio ideal entre resistência, material e tempo de impressão.
Favo de mel	Produz uma estrutura de favo de mel, criando um visual atraente. Esse padrão de preenchimento é bom para impressões semirrápidas que exigem resistência moderada e sem consumir muito material.
Triângulos	São linhas triangulares sobrepostas indo em três direções no plano XY. Esse padrão de preenchimento fornece resistência apenas em duas dimensões, apresentando bom resultado para impressões que precisam ser resistentes.
Tri-hexágono	Contém uma variedade de linhas indo nas três direções no plano XY, criando padrões hexagonais com triângulos entre eles. Este padrão de preenchimento fornece uma boa resistência sendo bastante satisfatório.
Octeto	Semelhante ao padrão cúbico, mas em vez de aumentar os triângulos inclinados, o padrão se materializa como quadrados. Esse padrão de preenchimento é excelente e útil para peças que exigem elevada resistência mecânica.
Concêntrico	Estrutura interna composta por linhas concêntricas que correspondem ao contorno de uma peça (ou seja, seus perímetros). Esse padrão é rápido de imprimir, bom para peças flexíveis e consome significativamente menos material do que a maioria dos padrões.

2.5.1.2. Orientação de preenchimento

A orientação do preenchimento determina qual o ângulo das linhas de preenchimento em relação aos movimentos de comando da impressora (no plano XY). É um parâmetro muito importante, pois ele tem influência direta nas propriedades mecânicas do objeto (SOUSA, 2022). A Figura 5 representa o preenchimento orientado em 0° , 90° , 45° e -45° .

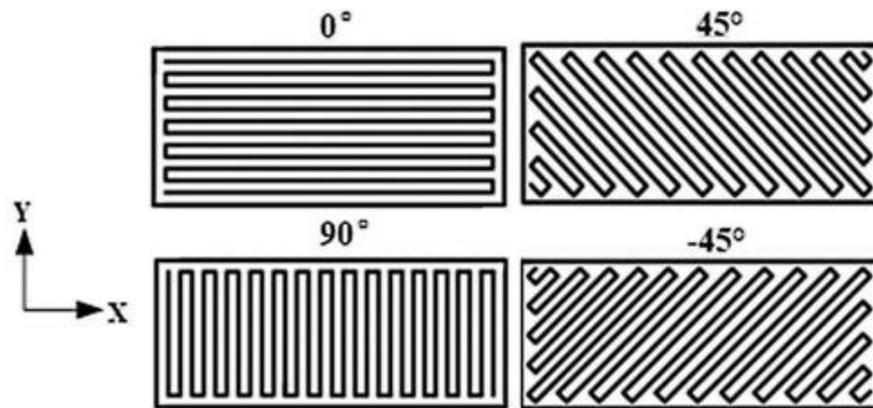


Figura 5 – Orientações de preenchimento (Adaptado de Liu, Lei e Xing, 2019)

Em um estudo realizado por Fernandes (2016), o autor verificou que as orientações de preenchimento de $0^{\circ}/90^{\circ}$ apresentam valores de resistência superiores do que as orientações de preenchimento de $45^{\circ}/-45^{\circ}$. Lovo e Fortulan (2016), realizaram um estudo das propriedades mecânicas de peças impressas em ABS por meio da manufatura aditiva. Nesse estudo os autores variaram a orientação de preenchimento das camadas, utilizando a norma ASTM D638-02a. A orientação $0^{\circ}/90^{\circ}$ apresentou o maior valor de tensão máxima de 32 Mpa, e a orientação $45^{\circ}/-45^{\circ}$ apresentou uma tensão máxima de 29 Mpa, enquanto a orientação única de 90° apresentou o menor valor de tensão máxima, de 15 Mpa.

As diferentes técnicas utilizadas para impressão tridimensional possuem etapas em comum de processo, iniciando com a modelagem do arquivo digital CAD com utilização de algum programa, na conversão do arquivo gerado em extensão do tipo "stl" e fatiamento do formato da peça e impressão de camada sobre camada formando o objeto final desejado (COUTINHO, 2017).

A figura 6 apresenta as etapas principais para a construção de um protótipo/peça em impressão 3D.

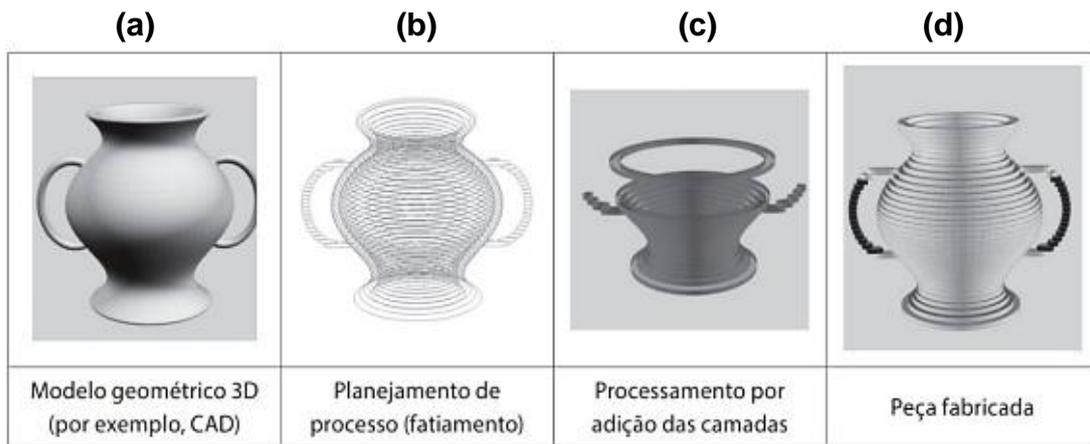


Figura 6 – Etapas principais da construção de um protótipo 3D. Modelo eletrônico (a-b) e Modelo físico (c-d) (Adaptado de Volpato, 2017)

Na impressão 3D, o produto é originário de um modelo computacional em três dimensões e, em seguida, o mesmo é convertido em coordenadas e transferido para a impressora que irá constituir o protótipo camada por camada até formar o objeto sólido tridimensional.

De acordo com Volpato (2017) o processo de fabricação através dessa tecnologia pode ser detalhado em 5 etapas. A primeira diz respeito a construção do modelo geométrico 3D que é realizado através de softwares CAD, como Solidworks, Blender, ThinkerCAD ou aparelhos de engenharia reversa como scanners, conforme a imagem 1a da Figura 6. A segunda é a conversão do modelo 3D para um formato específico de impressão 3D, geralmente o STL, esse tipo de formato transcreve a superfície de um objeto em formas geométricas de 3 dimensões, geralmente em uma malha de triângulo.

A terceira é o planejamento do processo (fatiamento), nessa etapa é feito a configuração do fatiamento da estrutura, posicionamento do modelo definido, a melhor estratégia de fabricação e configuração dos parâmetros da impressora, imagem 1b (VOLPATO, 2017). A quarta etapa é caracterizada pela automação do processo de fabricação, sendo necessário apenas a intervenção humana para garantir o suprimento de matéria prima, imagem 1c. A quinta e última é o Pós-processamento, são etapas após a construção da peça na máquina 3D que podem incluir: limpeza, remoção de estrutura de suporte, acabamento com outros processos de fabricação, imagem 1d (VOLPATO, 2017).

2.5.1.3. Altura da Camada

A altura da camada é outro parâmetro importante no processo de fabricação, e como o próprio nome diz, se refere à altura de cada camada da impressão. À medida que a altura da camada é diminuída, mais camadas deverão ser impressas, elevando o tempo de impressão das peças.

Ao definir a altura da camada, é necessário encontrar um equilíbrio adequado entre o tempo de impressão, os detalhes a serem feitos e a resistência mecânica da peça (O'CONNELL, 2021). A quantidade de camadas em que um objeto é dividido refere-se à resolução da impressora, sendo esse um parâmetro que pode ser alterado pelo usuário. Quanto maior for a resolução da impressora, melhor será a impressão das peças, sendo possível imprimir peças com excelente acabamento e precisão.

Para escolher a altura de camada, também deve-se levar em consideração o diâmetro do bico extrusor, a espessura do filamento e velocidade de impressão (ABREU, 2017; FERNANDES, 2016). A figura 7 apresenta as variações de altura da camada utilizadas na impressão 3D:

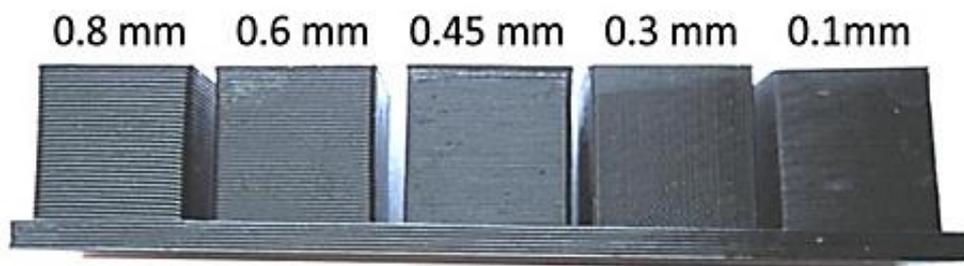


Figura 7 – Variações de altura de camada (Adaptado de Mccollum, 2021)

2.6. Modelagem por deposição fundida (FDM)

As impressoras do tipo FDM (figura 8) são as mais difundidas, representando uma parcela grande de máquinas nesse segmento. Estas impressoras são de simplicidade construtiva, operacional e aplicável para matéria-prima de baixo custo, favorecendo assim o custo-benefício deste equipamento. Além disso, o FDM é conhecido por produzir objetos de geometria complexa e alta velocidade de impressão, em comparação com outras técnicas de impressão 3D (GNANASEKARAN et al., 2017; BLOK et al., 2018; DIZON et al., 2018).

Segundo Sun et al. (2008), as peças fabricadas por FDM podem ser vistas como uma estrutura composta de filamentos parcialmente unidos. O processo requer mão de obra mínima e cada vez mais é utilizado para fabricar produtos personalizados para engenharia, aplicações médicas, entre outras. Uma vasta gama de materiais termoplásticos estão disponíveis no mercado para utilização na impressão 3D, incluindo o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PLA (Poliácido Láctico), PA (Poliamida), PET (Politereftalato de Etileno), dentre outros.

A figura 8, apresenta um exemplo de impressora 3D utilizando o processo FDM, onde é possível observar o filamento utilizado (matéria prima), a mesa para a acomodação e construção do objeto, além do visor para ajustes de parâmetros de processo:



Figura 8 – Exemplo de Impressora 3D (FDM)

No processo FDM, um filamento de polímero termoplástico é adaptado a um carretel que passa por cilindros de pressão onde é aquecido por uma unidade de controle de temperatura, passando para o estado fundido, onde então é extrudado por um bico de impressão que se move sobre uma plataforma ajustável, depositando o material camada por camada nos três eixos axiais (x, y, z) (CARNEIRO, 2015), conforme apresentado na figura 9:

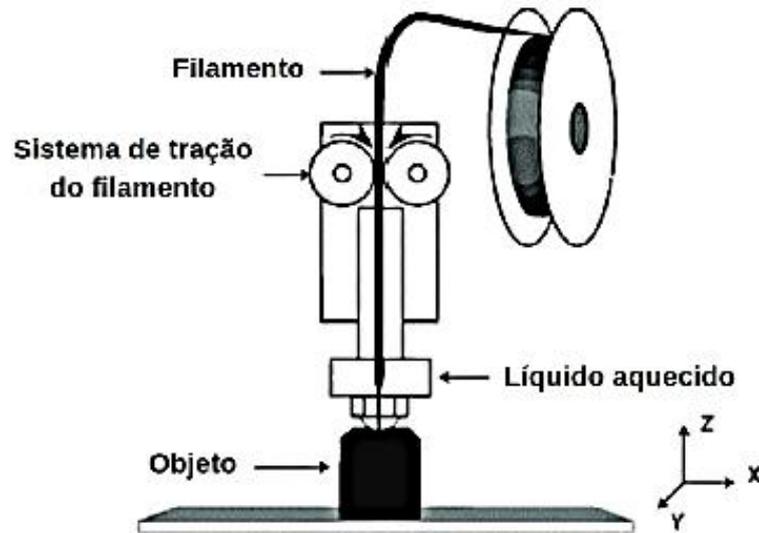


Figura 9 – Ilustração do mecanismo de funcionamento pela técnica FDM (Adaptado de CARNEIRO, 2015).

Para a impressão ser satisfatória, o próprio filamento deve ser fabricado com alta qualidade, pois a ação de alimentação (tensão e compressão) e fusão (aquecimento) necessita de boa estabilidade dimensional, além de exigir resistência à degradação térmica. Alguns modelos são relativamente complexos, com a presença de camadas suspensas, necessitando a impressão de estruturas de suporte para evitar deformações ou defeitos.

De acordo com Zhao et al. (2018), os materiais durante o processo de impressão estão sujeitos a variações térmicas que podem conduzir a efeitos de contração e formação de tensões residuais. Outros autores chamam atenção que a ação desses fenômenos pode gerar empenamento, delaminação das camadas, entre outras falhas nas peças. Por esta razão, as estruturas de suporte são utilizadas para garantir a integridade estrutural das peças fabricadas (LIOU, 2008; BRYDEN, 2014, VOLPATO, 2017).

Outro ponto a destacar é referente a velocidade de deposição ou da impressão. A velocidade de construção é lenta em função da limitação da taxa de extrusão, viscosidade do material e pelo diâmetro de abertura do bico de extrusão (SANTANA, 2015).

Portanto, a qualidade estrutural das peças é uma consequência dos vários parâmetros de extrusão do material. Para isso, é necessária uma análise prévia, do projeto e da fabricação da peça, para que a qualidade e a produtividade do processo sejam combinadas entre as variáveis de fabricação (RELVAS, 2018).

2.7. Acrilonitrila-Butadieno-Estireno

O Polímero vem da junção de duas palavras, poli (muitos) e meros (partes). São obtidos por meio de reações químicas de polimerização, formando estruturas moleculares a partir da repetição de meros, que são as pequenas unidades que se repetem formando a cadeia polimérica e as macromoléculas. As propriedades do material polimérico formado, são determinadas por meio do tamanho e da estrutura da molécula formada. Esse tipo de material pode ser orgânico ou inorgânico, natural ou sintético.

O copolímero termoplástico formado pelos meros acrilonitrila-butadieno-estireno é conhecido como (ABS) (BRASKEM, 2002). Este copolímero (ABS) é formado pela polimerização por emulsão ou massa da acrilonitrila e estireno na presença de polibutadieno. Por apresentar baixa resistência a intempéries, é mais recomendado para aplicações internas (LANDI, 2003).

O ABS é formado por uma matriz de estireno-acrilonitrila (SAN), com domínios esféricos compostos por borracha de polibutadieno e subinclusões de SAN nas partículas esféricas de polibutadieno (HIRAYAMA, 2015). A fórmula química do (ABS) é $(C_8H_8 - C_4H_6 - C_3H_3N)_n$ e seus meros estão representados na figura 10:

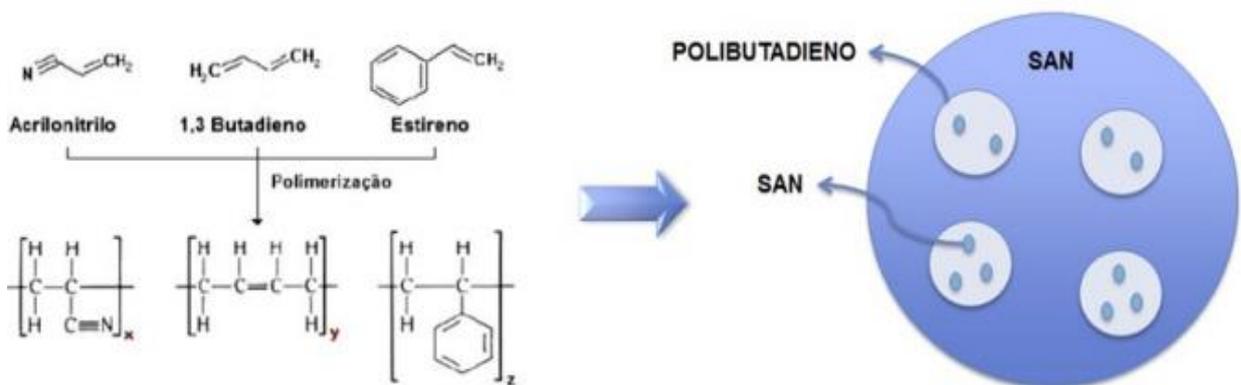


Figura 10 – Estrutura química do ABS e matriz SAN (Adaptado de PINTO, 2012)

É um polímero não-biodegradável a base de petróleo, sendo amplamente utilizado em processos de moldagem por injeção. Devido à sua temperatura de fusão ser relativamente baixa, é bastante aplicado na manufatura aditiva, pois apresenta

excelentes propriedades de processamento que facilitam a extrusão do filamento. A temperatura de impressão do ABS varia de 230 a 250°C (BRESEGHELLO, 2015).

As proporções no copolímero podem variar entre 15% a 35% de acrilonitrila, 5% a 30% de butadieno e 40% a 60% de estireno. O ABS combina a tenacidade, a resistência química e ao calor do acrilonitrila com a resistência ao impacto e a retenção das propriedades a baixa temperatura do butadieno, enquanto o estireno, por sua vez, contribui com rigidez, brilho superficial e facilidade de processamento (PINTO, 2012). Em termos de aplicações, o ABS é bastante empregado em peças estruturais e de boa aparência estética, como em aparelhos e utensílios de pequeno porte. Devido à sua combinação de propriedades, o ABS é amplamente utilizado nas indústrias automobilística e aeronáutica, em aparelhos eletrodomésticos e eletroeletrônicos, equipamentos de telecomunicação, brinquedos, entre outros (KUREK, 2008).

2.7.1. ABS na Impressão 3D

O ABS é amplamente utilizado na manufatura aditiva devido às suas características de processamento que facilitam sua aplicação em impressoras 3D de menor porte, presentes em laboratórios de prototipagem e fabricação digital devido à sua temperatura de fusão ser relativamente baixa e por apresentar excelentes propriedades de processamento que facilitam a extrusão do filamento. É um material fácil de ser usinado e fabricado, além de possuir boa resistência mecânica e bom acabamento final (WOJTYLA; KLAMA; BARAN, 2017).

De acordo com BLOK et al. (2018) o ABS quando impresso, tende a possuir um fator de encolhimento, principalmente devido a problemas de aderência e distorções ocasionados pela temperatura mais alta, juntamente com as características intrínsecas do material. A questão das temperaturas de impressão é crucial, que dependendo do tipo de material envolvido, se torna quesito chave para se atingir um modelo de boa qualidade. Não só a temperatura do modelo ou do suporte, como também a temperatura do ambiente de impressão e da base de impressão, que são de suma importância pra a qualidade final do modelo (FERNANDES, 2016).

Portanto, na impressão com ABS, normalmente é necessário um gabinete fechado para a impressora, de modo a manter o calor constante e bloquear as correntes de ar. Isso acontece porque o ABS é um material bastante sensível à

temperatura. Por isso, quando há correntes de ar ou mudanças de temperatura, as peças podem rachar enquanto são impressas.

A necessidade de controle dessas temperaturas se dá principalmente pelo quesito aderência, onde qualquer uma dessas variáveis se não estiver dentro da amplitude correta, ocorrerão problemas de falta de aderência, entre a base e o modelo, o que inviabiliza toda a impressão, ou entre o material recém fundido e a camada anterior, que provocará desde pequenos erros e perda de qualidade até a inutilização do modelo.

Uma característica determinante nas impressoras utilizando o processo FDM é a presença de porosidade no modelo, e isso se deve as variações de temperatura durante a impressão acarretando uma fraca adesão entre o modelo e o filamento (FERNANDES, 2016).

Outro ponto importante a destacar, é que o arrefecimento não é uniforme em toda a peça, onde os cantos têm tendência a resfriar mais depressa que o interior. Com isto, as partes que apresentam um arrefecimento mais rápido têm tendência a “descolar” da mesa e deformar o modelo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados, tanto de fontes comerciais como de fontes de REEE e a metodologia utilizada para transformação das carcaças de REEE em um filamento reciclado para impressão 3D. Por fim, são indicadas as caracterizações empregadas para determinar as propriedades e características dos materiais.

3.1. Materiais

Para a realização da etapa experimental foram utilizados os seguintes materiais:

1) ABS MG47F (fabricado pela Sabic), com fluidez de 5,6 g/10min (230°C/3,8 kg) foi utilizado para produzir filamento padrão comercial.

2) Resíduos de EEE oriundos de carcaças de equipamentos eletrônicos pós-consumo compreendendo monitores tipo CRT, televisores, teclados e impressoras, danificados ou obsoletos, coletados em uma loja de assistência técnica localizada na cidade de Nova Prata-RS.

Ao todo foram coletados 16 equipamentos de diferentes marcas e modelos, conforme indicado na tabela 3. Inicialmente, foi realizada a desmontagem e separação do material polimérico dos demais materiais (metálicos, cerâmicos, componentes de circuito eletrônico, etc.), conforme a figura 11, registrando também a identificação do polímero que continha na carcaça polimérica.



a) Carcaças monitores CRT b) Carcaças televisores c) Teclados e Impressora

Figura 11 – Separação das carcaças poliméricas dos demais materiais

Tabela 3 - Produtos, marcas e modelos utilizados.

Amostra	Produto/Marca /Modelo	Identificação no Produto
A1	Televisor Samsung tela plana (40")	PMMA + ABS
A2	Televisor Samsung tela plana (32")	PS + HIPS
A3	Televisor Sony tela plana (32")	PC + ABS
A4	Televisor Panasonic tela plana (32")	PS
A5	Televisor LG tela plana (49")	PS
B1	Televisor Semp Toshiba tubo (20")	PC
B2	Televisor Philco tubo (14")	PC
B3	Televisor CCE tubo (14")	PS
B4	Televisor CCE tubo (14")	PS
C1	Monitor AOC tela plana (15")	PC + ABS + PS
C2	Monitor ITAUTEC tela plana (15")	ABS
C3	Monitor PHILLIPS tubo (14")	PP
C4	Monitor SAMSUNG tela plana (14")	ABS
D1	Teclado C3TEC	Sem Identificação
D2	Teclado METRON	Sem Identificação
E1	Impressora HP / Officejet	HIPS

3.2. Método

Nesta seção serão apresentadas as etapas realizadas para a preparação e produção do filamento reciclado, desde a limpeza, trituração, secagem, moagem e extrusão, além da confecção dos corpos-de-prova (CPs) produzidos em polímero reciclado e comercial. As técnicas e procedimentos utilizados para a caracterização do polímero também serão descritas.

A seguir, será realizado o detalhamento das etapas de processamento e caracterização. Em termos de processamento, serão apresentadas as condições da coleta de resíduos, extrusão de filamento, impressão dos corpos de prova, além dos parâmetros de processo. Em termos de caracterização, serão descritas as análises espectroscópicas, térmicas, reológicas, mecânicas e microscópicas, conforme o Fluxograma da Metodologia, apresentado na figura 12.

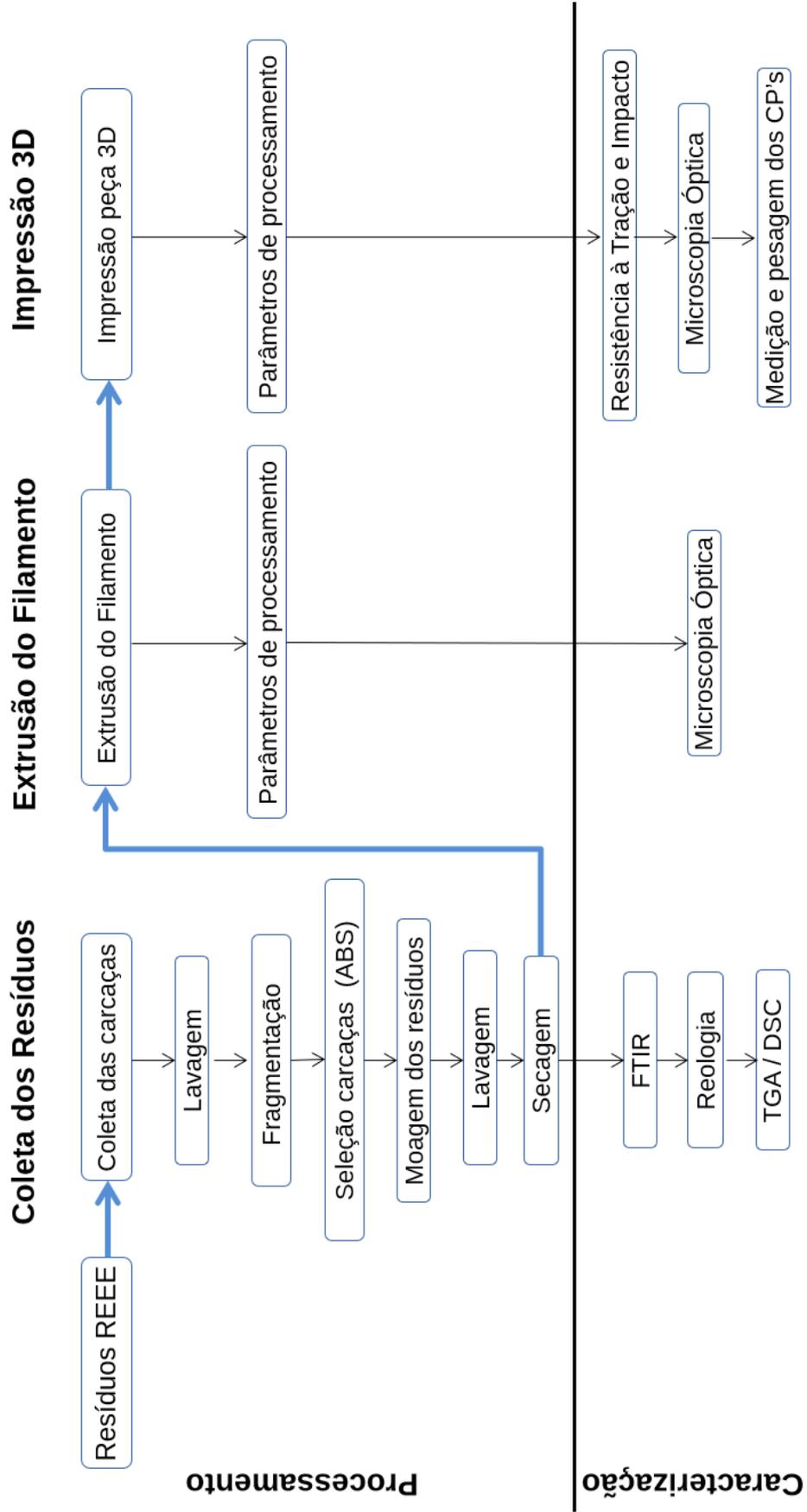


Figura 13 – Fluxograma da Metodologia

3.3. Processamento

3.3.1. Coleta dos resíduos

Inicialmente os resíduos coletados foram separados e lavados com o uso de água e sabão neutro para remoção das impurezas. Após, as carcaças foram fragmentadas em pequenos pedaços entre 5 a 15 cm de comprimento, conforme apresentado na figura 13, com o auxílio de um martelo de aço.

Os fragmentos foram então dispostos em uma superfície limpa para secagem por aproximadamente 48 horas à sombra. Em seguida, foram embalados e colocados em invólucros de plásticos limpos.



Figura 14 – Fragmentos de peças utilizadas para análise de FTIR.

3.3.2. Preparação do REEE

Nesta etapa foi executada a moagem dos fragmentos em um moinho de facas (Seibt S.A., modelo NGMS 1.5/85), até os resíduos atingirem dimensões entre 1 a 5 mm, conforme apresentado na Figura 14. Em seguida, os flocos foram secos em estufa a 80 °C durante 4 horas. Os pellets de ABS puro foram secos da mesma forma.

A secagem prévia antes da extrusão é sempre recomendada para polímeros higroscópicos, como o caso da maior parte dos REEE, pois a presença da umidade no processamento pode acelerar a degradação por hidrólise, sendo percebida como manchas, micas, escamas e até bolhas no material processado.



Figura 15 – Flocos de REEE

3.3.3. Extrusão do Filamento

A forma mais indicada de recuperação de materiais plásticos descartados é através da fusão e granulação desses materiais para que eles possam ser reutilizados. A extrusão é um processo amplamente utilizado na indústria de polímeros, consistindo em um processo onde o polímero é aquecido e forçado a sair por uma rosca sem fim através do orifício de uma matriz, tomando a sua forma. Os principais parâmetros que devem ser observados no processo de extrusão são o perfil da rosca, a velocidade de rotação e a temperatura de fusão dos materiais utilizados (ABIPLAST, 2014).

Nesta etapa, os flocos de ABS oriundo dos REEE foram aquecidos e extrudados em uma extrusora (Seibt S.A., modelo ES-18), com matriz circular de 2,0 mm de diâmetro, utilizando as faixas de temperaturas entre 155 °C e 180 °C, com matriz de 165 °C. Após a extrusão o filamento foi resfriado em uma banheira com água à temperatura ambiente, com medição constante do diâmetro do filamento para validar a tolerância dimensional.

No processo de extrusão, o diâmetro do filamento variou de 1,45 mm a 1,83 mm. Para isso, foi necessário realizar a separação dos segmentos adequados que possuíam diâmetro entre 1,65 e 1,75 mm para impressão dos CPs. O filamento foi bobinado após secagem e mantido ao abrigo de luz em invólucro até seu uso na impressão.

3.3.4. Controle dimensional do filamento

Após a produção dos filamentos, foi realizada a verificação no diâmetro do filamento, com o auxílio de um paquímetro universal em milímetros de resolução 0,05 mm. O filamento de REEE apresentou variação do diâmetro entre 1,45 mm e 1,83 mm. Para isso, foi necessário realizar a separação dos segmentos adequados, que possuíam diâmetro próximos entre 1,60 e 1,80 mm para impressão dos CPs. Logo após, o filamento foi bobinado e mantido ao abrigo de luz em invólucro até seu uso na impressão.

Os filamentos foram novamente mensurados em relação ao diâmetro, buscando observar os valores médios e a amplitude de variação. Foi percebida uma desuniformidade no filamento de r-ABS, com valor de diâmetro médio de 1,63 mm e amplitude de medidas entre 1,53 mm até 1,69 mm, ou seja, uma oscilação de 14mm. Ao analisar as medidas do diâmetro do ABS, este apresenta uma melhor estabilidade dimensional, variando de 1,76mm à 1,83mm, isto significa uma variação de 7mm, e um valor médio de 1,79 mm.

3.3.5. Impressão 3D

A impressão dos corpos de prova foi realizada em uma impressora tipo FDM de fabricação pela Mastre Automação, utilizando-se os filamentos de ABS comercial e o produzido com os REEE. A figura 15 apresenta a impressora utilizada no estudo.

A impressão das amostras foi realizada conforme a geometria definida pelas normas ASTM D638 – Tipo I para avaliação da resistência à tração e pela norma ASTM D256 para o ensaio de resistência ao impacto. Os valores correspondentes as dimensões apresentadas na Figura 16 estão listados na Tabela 4 com as respectivas tolerâncias. Bem como as medidas dos corpos de prova de resistência ao impacto na figura 17, onde os valores referenciais das dimensões estão listados na Tabela 5 com as respectivas tolerâncias.

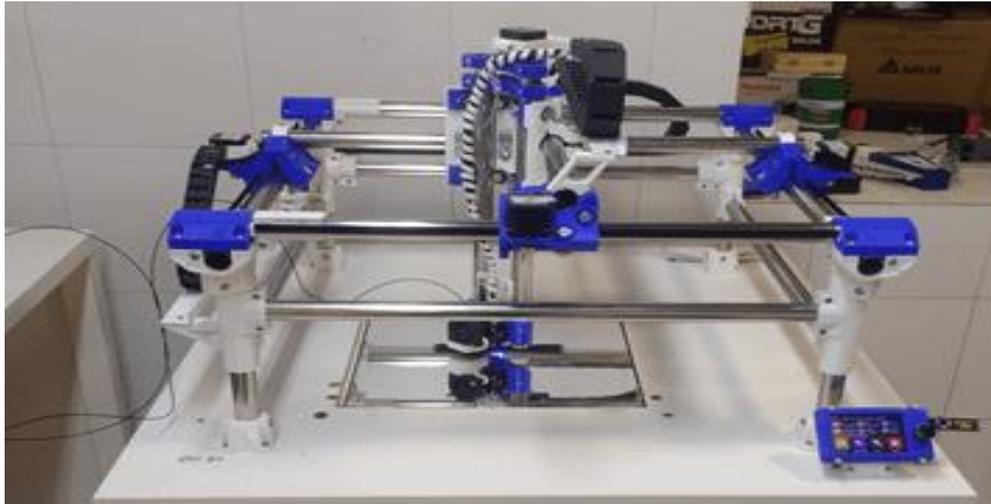


Figura 16 – Impressora 3D utilizada neste trabalho

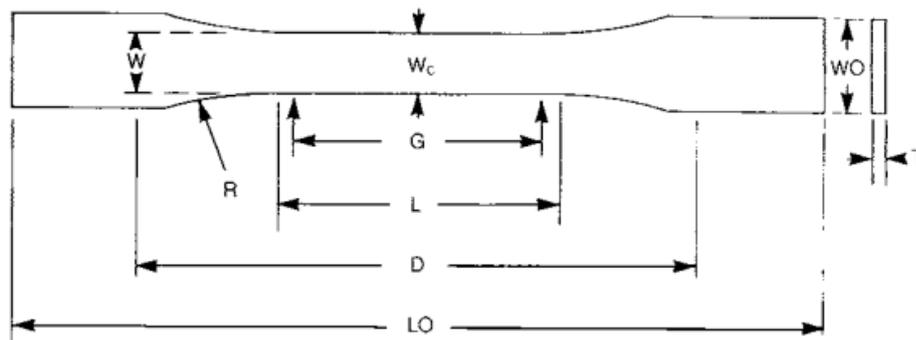


Figura 17 – Corpo de prova de Resistência à tração

Tabela 4 – Dimensões do corpo de prova tipo gravata para o ensaio de tração.

Dimensões do corpo de prova tipo gravata para o ensaio de tração.		
Dimensões	Tipo I (mm)	Tolerância (mm)
Wo- Largura total mínima	19	6,4
L - Comprimento da seção estreita	57	± 0,5
G - Comprimento do medidor	50	± 0,25
Lo - Comprimento total	165	-
G - Comprimento da seção estreita	57	± 0,5
D - Comprimento da seção intermediária	115	± 5,0
R - Raio do filete	76	± 1,0
T - Espessura	3,2	± 0,4

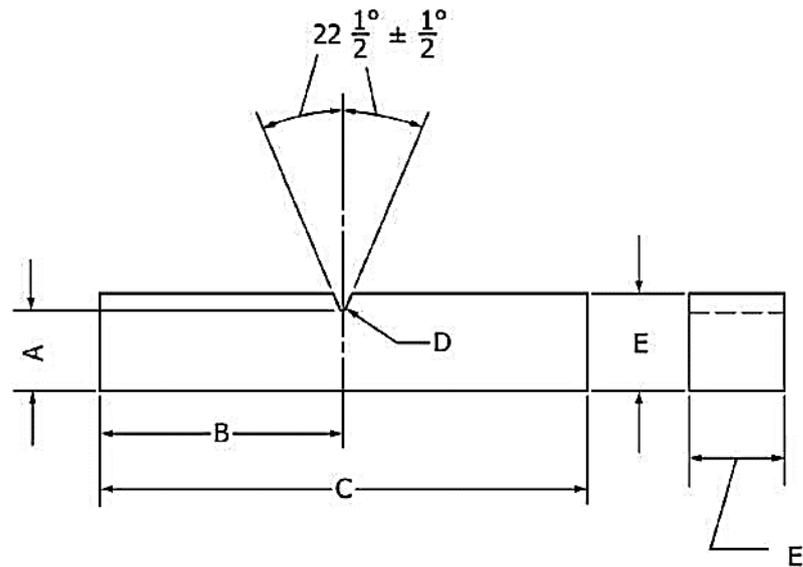


Figura 18 – Corpo de prova de Resistência ao impacto

Tabela 5 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de Impacto

Dimensões do corpo de prova para o ensaio de Impacto		
Dimensões	Tipo (mm)	Tolerância (mm)
A - Comprimento da seção estreita até o raio do entalhe	10,16	± 0,05
B - Comprimento da extremidade até o raio do entalhe	31,8	± 1,0
C - Comprimento total	63,5	± 2,0
D - Raio do entalhe	0,25	± 0,05
E - Espessura/ Largura	12,7	± 0,20

A confecção do modelo 3D para a configuração da impressão foi realizada no software Ultimaker Cura versão 5.0. Os parâmetros definidos para a impressão dos corpos-de-prova são apresentados na tabela 6:

Tabela 6 – Parâmetros do processo FDM configurado no Cura 5.0

Características	Medidas
Altura da camada	0,06 (mm)
Altura da camada inicial	0,3 (mm)
Espessura da linha	0,4 (mm)
Largura da linha de preenchimento	0,4 (mm)
Linha de camada inicial	100 (%)
Espessura da parede	0,8 (mm)
Espessura superior	0,8 (mm)
Espessura inferior	0,8 (mm)
Densidade de enchimento	100 (%)
Distância da linha de preenchimento	0,4 (mm)
Multiplicador de linha de preenchimento	1
Espessura da camada de preenchimento	0,06 (mm)

A densidade de preenchimento utilizada foi de 100% para representar o corpo de prova totalmente preenchido, similar à injeção do material. O preenchimento (*infill*) é a estrutura interna gerada capaz de aumentar a resistência da peça ao imprimir o interior de impressões 3D. O padrão de preenchimento afetará muito a velocidade de impressão, enquanto a densidade de preenchimento alterará drasticamente o tempo de impressão. Uma densidade de preenchimento mais alta aumentará a resistência da peça, mas também o tempo de impressão.

A altura da camada foi de 0,06 mm, além da espessura do topo ser de 0,8 mm e a espessura de linha de 0,4 mm. A altura de camada tem um impacto significativo na velocidade de saída das impressões. Quanto maior for a altura da camada, mais espessa será cada camada e, portanto, mais rápidas serão as impressões. No estudo de MAHMOOD et al., os autores recomendaram que ao invés de calcular a área transversal bruta impressa pelo processo de FDM, seria só necessário realizar a impressão excluindo os vazios, com densidade de preenchimento de 100%, onde se teria o resultado mais efetivo.

A tabela 7 apresenta os parâmetros de temperatura de impressão, velocidade de impressão e resfriamento utilizados na fabricação dos corpos de prova.

Tabela 7 – Parâmetros de Temperatura de impressão do Material, Velocidade de impressão e resfriamento

Temperatura de Impressão	
Temperatura de Impressão inicial	243 (°C)
Temperatura de Impressão	243 (°C)
Temperatura de impressão final	243 (°C)
Temperatura de construção inicial	110 (°C)
Temperatura de construção final	110 (°C)
Velocidade de Impressão	
Velocidade de impressão	40 (mm/s)
Velocidade de preenchimento	40 (mm/s)
Velocidade impressão da parede inicial	30 (mm/s)
Velocidade impressão da parede final	30 (mm/s)
Velocidade de viagem	120 (mm/s)
Velocidade da saia/aba	40 (mm/s)
Resfriamento e Retração do material	
Distância de retração	3,0 (mm)
Velocidade de retração	25 (mm/s)
Limite de velocidade do ventilador normal/máximo	10 (s)
Velocidade regular do ventilador na camada	2 (mm/s)
Velocidade regular do ventilador em altura	0,3 (mm)
Velocidade mínima	10 (mm/s)

Acima estão os parâmetros de temperatura adotados no processamento dos corpos de prova. A temperatura inicial definida para impressão dos corpos de prova foi de 243° C, pois encontra-se na faixa ideal de impressão 3D do ABS, que é entre 220° C e 260° C, se mantendo constante até o final da impressão. A velocidade de impressão permaneceu em torno de 40 mm/s e a temperatura da mesa de 110° C. A velocidade de retração foi de 25 mm/s e ajusta a velocidade com que a impressora puxa o filamento para trás (uma retração) antes do movimento de deslocamento. Muito lento você pode ficar com *strings* (cabelos de anjo) e bolhas em suas impressões.

Importante destacar é que não foi necessário o uso de resfriamento na impressão com filamento de REEE. A figura 18 mostra a impressora realizando a impressão dos corpos de prova. O processo inicia-se com a calibração da impressora onde é encontrado o “ponto zero” das coordenadas da mesa de impressão. Após, o braço de impressão vai até um ponto externo da mesa, onde é realizada a limpeza do bico de impressão (purga), para em seguida iniciar a impressão da peça.



Figura 19 – Impressão do Corpo de Prova. Mesa espelhada reflete parte da estrutura do equipamento.

Na pesquisa, para avaliação e análise dos resultados, foram impressos seis (6) corpos de prova (CPs) para realizar os ensaios de tração e sete (7) CPs para resistência ao impacto do ABS e r-ABS, de acordo com as normas ASTM D638 e ASTM D256, respectivamente.

Os corpos de prova foram impressos e identificados, onde foi realizada uma inspeção visual com o intuito de identificar possíveis defeitos. Não foi identificado nenhum defeito. À medida que os corpos de prova foram impressos, eles foram armazenados em um invólucro de plástico, para que eles não absorvessem umidade do ambiente.

3.3.6. Controle dimensional das amostras

Após a impressão dos corpos de prova foi realizada uma análise das dimensões de cada amostra com paquímetro universal em milímetros de resolução 0,05 mm, para verificar se ao término do processo de MA não houveram variações nas medidas finais, que pudessem extrapolar o limite determinado pelas normas descritas no subitem 3.3.4.

3.4. Caracterização

3.4.1. Espectroscopia de Infravermelho

Essa análise foi realizada com a finalidade de caracterizar quimicamente os grupos funcionais das amostras do ABS comercial, das carcaças provenientes de REEE. A espectroscopia na região do infravermelho também foi utilizada para verificar a ocorrência de possíveis interações ou modificações dos resíduos, além de identificar composição de misturas de polímeros. Com o auxílio de um estilete foi retirada uma pequena parte dos fragmentos das carcaças e analisados utilizando a técnica de Espectroscopia de Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), com o auxílio de um espectroscópio de reflexão total atenuado (FTIR-ATR) (Perkin Elmer, modelo Frontier) na faixa entre 600 a 4000 cm^{-1} . As características dos picos obtidos foram comparadas com base no banco de dados do equipamento e foi verificada a semelhança dos espectros com a literatura.

3.4.2. Propriedades Térmicas

Análise termogravimétrica (TGA) foi utilizada para investigar a taxa de decomposição do REEE e a quantidade de resíduo final após queima em atmosfera inerte. A análise de termogravimetria foi realizada nos fragmentos da carcaça, utilizando o equipamento TGA 4000 da Perkin Elmer de acordo com a norma ASTM D3850. As amostras foram caracterizadas na faixa de 30 °C a 995 °C em uma rampa de aquecimento de 20 °C/min, sob uma atmosfera de nitrogênio.

A análise de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) no filamento produzido foi usada para determinar as temperaturas de fusão (T_m) e transição vítrea (T_g). O teste foi realizado utilizando um equipamento DSC 6000 da Perkin Elmer de acordo com ASTM D3418, com aproximadamente 9 mg por amostra. Estas foram submetidas a um primeiro aquecimento até 220 °C e aclimatização por 3 minutos. Após foi feito um resfriamento até -30 °C e alimatado por 5 minutos, seguido de um segundo aquecimento até 220 °C. A rampa aquecimento e resfriamento foi sempre de 20 °C/min, sob uma atmosfera de nitrogênio.

3.4.3. Propriedades Reológicas

As propriedades viscoelásticas dinâmicas foram realizadas com um reômetro MCR102 (Anton Paar) usando geometria de placas paralelas com 25 mm de diâmetro. Foi mensurada a resposta reológica a uma varredura de frequência, na região viscoelástica linear, do REEE fundido a 250 °C. A faixa de medida compreende de 0,01 rad/s até 100 rad/s. Ensaios de varredura de frequência foram realizados a fim de mensurar o módulo elástico (G'), o módulo de perda (G''), e viscosidade complexa (η^*). G' representa a energia de deformação reversivelmente armazenado, enquanto G'' representa a quantidade de energia irreversivelmente emitida durante a deformação.

3.4.4. Propriedades Mecânicas

O teste de tração foi realizado conforme o método definido na norma ASTM D638-14. Este ensaio consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura (CANEVAROLO, 2003). Os ensaios foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos (ED/END) do IFRS, à temperatura ambiente e velocidade de ensaio de 10 mm/min. O teste foi conduzido em seis corpos-de-prova (CPs) para cada polímero (ABS puro e REEE), usando uma máquina de ensaio universal UTM 3382 (Instron, Estados Unidos) equipada com capacidade de carga de 10 KN.

O teste de impacto seguiu a norma padrão ASTM D256 para determinar a resistência ao impacto do pêndulo Izod em plásticos. O teste foi realizado à temperatura ambiente (23°C) em um equipamento Zwick (modelo D-7900), com um martelo de 1 J. Os entalhes nos corpos de prova foram feitos na impressão.

3.4.5. Propriedades Microscópicas

Para analisar a estrutura do filamento reciclado e virgem, foi utilizado o microscópio ótico Zeiss, modelo AxioScope 5 com câmera AxioCam ICc5 acoplada. Amostras ensaiadas pelos testes de tração e impacto, fabricados por FDM, foram selecionadas para análise, realizada utilizando-se de lentes focais de 2X e 4X e

acoplado diretamente a câmera.

A análise sobre microscopia óptica permite uma comparação entre as estruturas iniciais e após a fratura, possibilitando visualizar o modo de falha e aderência entre as camadas. Esta análise também possibilita visualizar a quantidade de vazios encontrados no interior dos corpos de prova padrão, fator de alta influência nos resultados de resistência a tração e impacto.

3.5. Imprimibilidade

Uma alternativa para viabilizar o alto custo da impressão 3D em larga escala é o desenvolvimento de materiais com propriedades que permitam atingir os diferentes critérios de imprimibilidade, assim como o desempenho mecânico e durabilidade, e que sejam ambientalmente sustentáveis. O conceito de printabilidade, capacidade de impressão ou “imprimível”, é intimamente relacionado com a processabilidade das peças e a qualidade do quão bem uma peça pode ser produzida com um determinado material.

Desse modo, como a pesquisa é voltada para o desenvolvimento de materiais para impressão, é avaliado se o mesmo possui uma boa capacidade de impressão, se é capaz de suportar bem as camadas, a aderência entre as camadas, e as propriedades como resistência à tração e ao impacto da peça impressa.

Uma boa aderência do material depositado com a superfície de impressão também é imprescindível para evitar empenamentos (ROBERSON, et al. 2015). Alguns parâmetros de impressão serão definidos conforme as propriedades do material, analisadas na TGA e DSC. A temperatura da mesa de impressão será definida conforme a temperatura de cristalização.

Para fins quantitativos, procedeu-se à medição das dimensões (largura, espessura) dos corpos de prova de resistência à tração tanto do material virgem quanto do reciclado, a fim de avaliar a estabilidade dimensional. Além disso, os corpos de prova foram pesados para possibilitar a comparação com o peso dos corpos de prova do teste de impacto, permitindo avaliar a variação de peso. As informações detalhadas sobre as dimensões e pesos dos corpos de prova estão apresentadas nos anexos 2 e 3.

4. RESULTADOS

A investigação das características dos REEE, por meio da mensuração da composição e das propriedades mecânicas e térmicas destes resíduos é fundamental para identificar as possíveis aplicações destes materiais. A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas análises e a discussão com a literatura, a fim de comparar os mesmos com estudos realizados e assim verificar a viabilidade de reutilização deste resíduo.

4.1. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As informações das amostras e os resultados da caracterização (FTIR) estão descritas conforme a tabela 8, onde foi possível perceber que a identificação do polímero na carcaça não condizia com a composição real do material em alguns casos. Diante disso, as amostras foram selecionadas com base no propósito do estudo, de utilizar somente o ABS como matéria prima para a produção do filamento para impressão 3D.

Através da tabela, após os resultados obtidos pela análise FTIR, foram escolhidas apenas as amostras A1, C2 e C4, pois foram as carcaças que apresentaram como resultados na análise espectroscópica por meio da busca no banco de dados do equipamento, semelhança nos espectros com o ABS.

As figuras 19 e 20, apresentam os espectros das três carcaças de REEE. Para se ter um melhor entendimento sobre os resíduos, foi definido dois tipos de engradamento. Um na região entre 4000 e 600 cm^{-1} (figura 19) e outro na região de 2000 e 900 cm^{-1} (figura 20). Através dessa análise, é possível se ter uma melhor visualização dos picos no espectro de absorção, correspondente à frequência de vibração de parte da molécula da amostra.

Tabela 8 – Identificação dos materiais e resultado da caracterização (FTIR)

SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS POR PRODUTO E IDENTIFICAÇÃO DO MATERIAL			
Amostra	Produto/Marca	Identificação Produto	Caracterização (FTIR)
A1	Televisor Samsung	PMMA + ABS	PC + ABS (*)
A2	Televisor Samsung	PS + HIPS	PP
A3	Televisor Sony	PC + ABS	PS
A4	Televisor Panasonic	PS	PS
A5	Televisor LG	PS	PS
B1	Televisor SempToshiba	PC	PS
B2	Televisor Philco	PC	PS
B3	Televisor CCE	PS	PS
B4	Televisor CCE	PS	PS
C1	Monitor AOC	PC + ABS + PS	PS
C2	Monitor ITAUTEC	PC + ABS	ABS (*)
C3	Monitor PHILLIPS	PP	PP
C4	Monitor SAMSUNG	ABS	ABS (*)
D1	Teclado C3TEC	Sem Identificação	PS
D2	Teclado METRON	Sem Identificação	PS
E1	Impressora HP	HIPS	PS

(*) Carcaças selecionadas para fabricação do filamento e impressão das amostras.

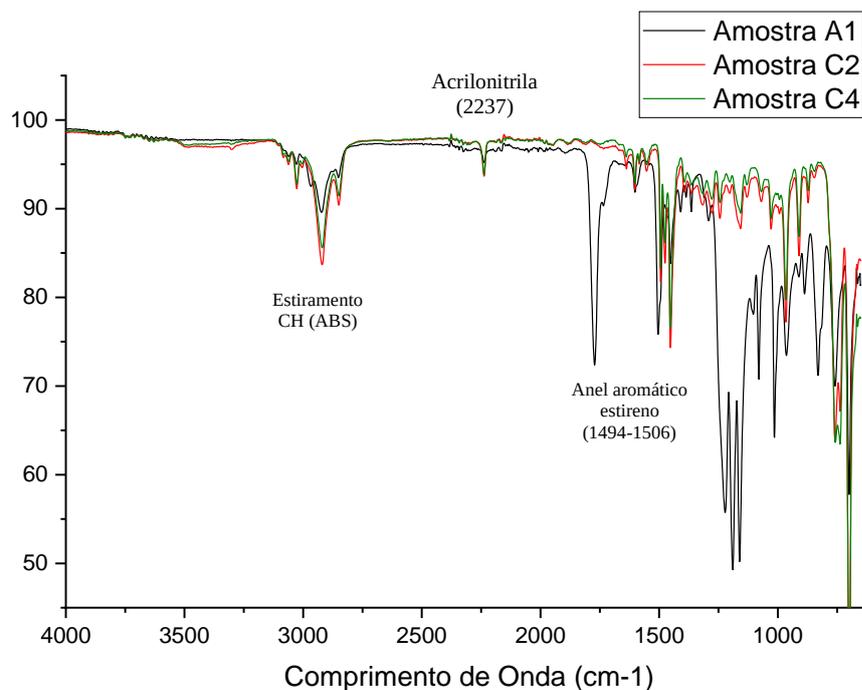


Figura 20 - Espectro FTIR das carcaças

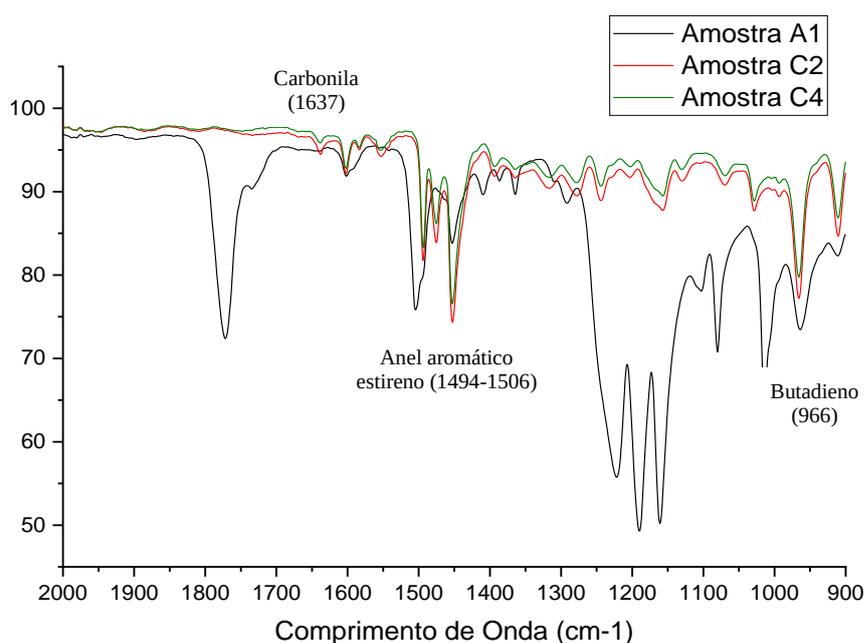


Figura 21 - Espectro FTIR das carcaças na faixa entre 900 e 2000 cm^{-1}

Como podemos observar nos espectros das amostras C2 e C4, foram identificados os picos de 2237 cm^{-1} referente ao grupo acrilonitrila, o pico de 1637 cm^{-1} que corresponde a estrutura da carbonila, os picos de 1494 e 1506 cm^{-1} pertencentes ao anel aromático do estireno, além da banda de 966 cm^{-1} , que se refere a fase polibutadieno do ABS, o que corrobora com os resultados de alguns estudos realizados envolvendo o polímero.

A tabela 9 apresenta a compilação dos picos encontrados nas amostras analisadas, comparando os dados com alguns autores.

A carcaça A1 apresenta picos semelhantes aos indicados na literatura para uma blenda composta por ABS e PC. Esta amostra passa a ser identificada como r-ABS/PC a partir deste momento, por apresentar picos característicos de ABS e PC, sendo eliminada do estudo, por apresentar uma blenda composta por dois materiais diferentes. As mudanças no número de onda ou alargamento dos picos são geralmente tidas como evidências de interações químicas entre os componentes de uma mistura e indicam algum grau de miscibilidade (Arnold, J. C. et al.; 2010).

Tabela 9 - Pesquisas realizadas com autores informando os picos encontrados pela análise do FTIR.

Picos (cm⁻¹)	Origem	Autores
2237	Acrilonitrila (ABS)	HARRIS, M.; et al., 2019
1637	Carbonila (ABS)	
1494	Anel aromático estireno (ABS)	
966	Fase butadieno (ABS)	AID, S.; et al., 2017
1494	Anel aromático estireno (ABS)	
2239	Acrilonitrila (ABS)	
3010 - 3110	Estiramento CH aromático (ABS)	FERREIRA, A. C.; et al., 2018
2237	Deformação axial C \equiv N (ABS)	
1602	Deformação angular C = N (ABS)	
1506	Deformação angular C - C (ABS)	
966	Deformação angular C=C (ABS)	
3010 - 3110	Estiramento CH aromático (ABS)	

Diante disso, a partir desta etapa, para dar continuidade ao trabalho, foram selecionadas somente as carcaças C2 e C4, que apresentavam picos característicos entre si, levando em consideração a semelhança entre os picos de ABS comercial e do ABS proveniente de REEE. As amostras C2 e C4 foram incorporadas e misturadas para a fabricação do filamento reciclado, sendo este identificado a partir dessa etapa, como r-ABS.

4.2. Análises Termogravimétricas

O comportamento térmico do REEE foi analisado aplicando-se as técnicas de análise termogravimétrica (TGA) que acompanha a perda e/ou ganho de massa da amostra em função do tempo ou temperatura e calorimetria diferencial de varredura

(DSC) que determina a diferença entre as temperaturas da amostra e de um material de referência termicamente inerte enquanto são submetidos a uma programação controlada de temperatura. A estabilidade térmica da amostra r-ABS está representada na figura 21. Conforme a análise, foi identificado na amostra apenas um único evento térmico, com início próximo de 400 °C e término em aproximadamente 490 °C, sendo o pico de decomposição em 455 °C (observado no pico da curva da derivada).

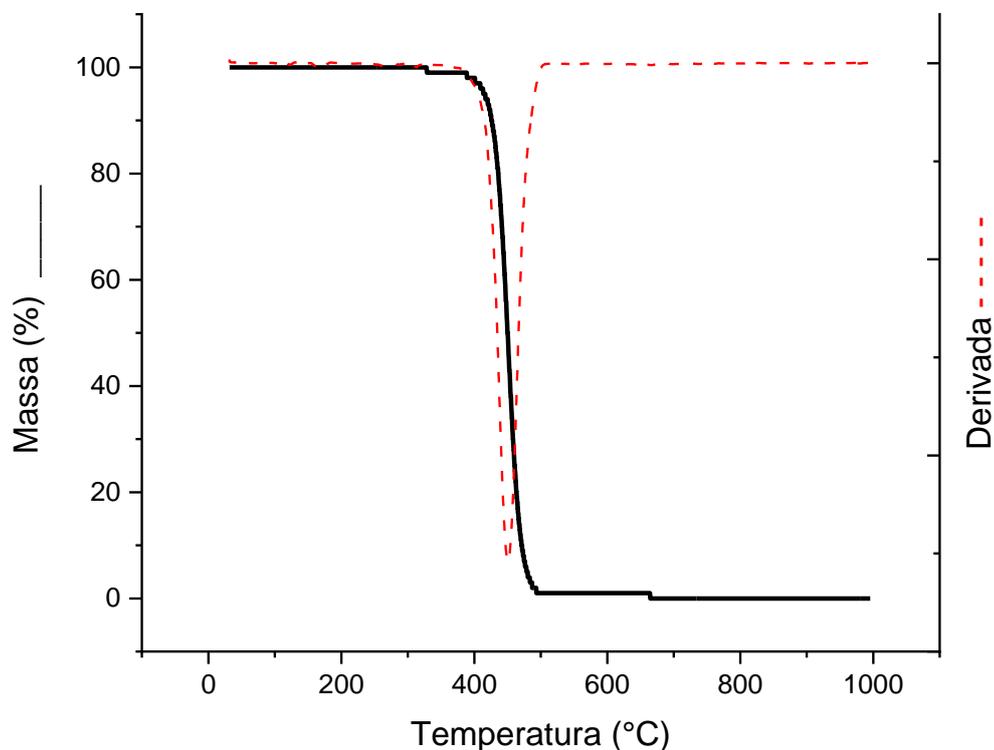


Figura 22 - Termograma da amostra r-ABS. Linha preta: Massa da amostra. Linha vermelha: Derivada da curva de massa.

De acordo com o estudo de (Jayanth e Senthil, 2019), em que os autores avaliaram a temperatura de degradação do ABS em comparação com um filamento composto por negro de fumo e ABS, encontraram como temperatura máxima de degradação do ABS puro em torno de 438,16 °C. Estes resultados possuem uma certa semelhança com os dados obtidos em nosso estudo, indicando a presença de ABS em nosso resíduo.

Ainda sobre os resultados, de acordo com (Simionescu et al., 2020), em que os pesquisadores realizaram um estudo experimental sobre o comportamento térmico e mecânico do ABS reciclado aprimorado com retardantes de chama, encontraram como resultados na análise de TGA, a temperatura máxima de decomposição em torno de 425°C para o ABS reciclado e perda de massa aos 472 °C, ou seja, um resultado inferior se comparado ao de nosso estudo, validando que o r-ABS oriundo das carcaças de REEE possui boas propriedades, uma vez que os resultados foram superiores aos encontrados no estudo acima citado.

4.3. Calorimetria Diferencial de Varredura

Os eventos térmicos ocasionados pelo aquecimento e resfriamento da amostra r-ABS são apresentados na figura 22, compilando as curvas de resfriamento (em azul) e segundo aquecimento (em vermelho).

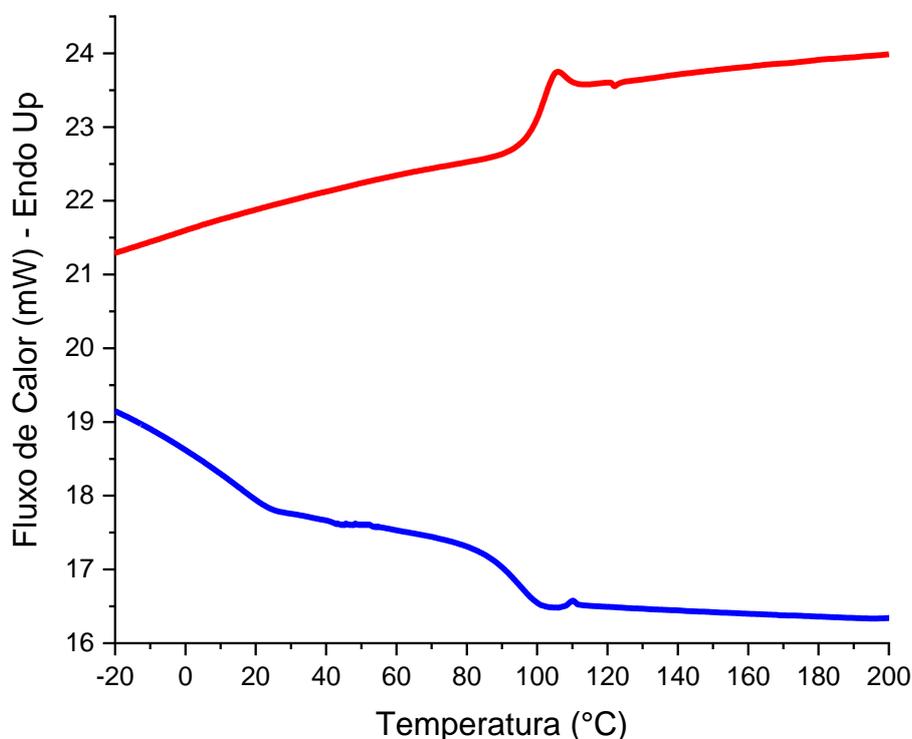


Figura 23 - DSC da amostra r-ABS sendo resfriamento em azul e segundo aquecimento em vermelho.

Foi identificado na amostra r-ABS apenas um pico correspondente a temperatura de fusão cristalina (T_m) em torno dos 115 °C, e temperatura de transição vítrea (T_g) em aproximadamente 102 °C, que se refere a fase acrilonitrila-estireno (SAN) do ABS, confirmando a ausência de um segundo polímero na composição da amostra analisada.

Segundo o estudo de Harris et al. (2019), onde os pesquisadores estudaram as propriedades térmicas e mecânicas de ABS aprimorado com polipropileno, encontraram como resultado de T_m (ABS) aproximadamente 111,8 °C e T_g de 100,2 °C para o ABS puro. Estes resultados possuem uma certa similaridade com o que encontramos no estudo.

Em outra pesquisa realizada por Ujfalusi et al. (2020), onde os autores detalharam a caracterização de ABS e PLA na manufatura aditiva, encontraram como resultados da análise de DSC para o ABS, a T_g em torno de 103,89 °C e T_m de 108,84 °C, indicando que a amostra de REEE é composta por ABS.

A determinação da temperatura de transição vítrea (T_g) é crucial para entender as propriedades de um material. Ela indica a temperatura à qual uma substância se transforma de um estado vítreo (duro e rígido) para um estado borrachudo. Muitos polímeros, por exemplo, termoplásticos, termofixos, borrachas, etc. são geralmente compostos de estruturas amorfas e cristalinas. Isso significa que exibem uma temperatura de transição vítrea (T_g), e uma temperatura de fusão (T_m). A temperatura de transição vítrea (T_g) é mais baixa do que a temperatura de fusão de um material cristalino.

Diante disso, com o uso da técnica de DSC, os valores obtidos de T_g para o material reciclado apresentaram uma pequena variação na temperatura quando comparado com o polímero puro, sem grandes mudanças que possa provocar implicações em suas propriedades. Com isso, pode-se concluir que há uma boa dispersão das partículas no r-ABS, inibindo a formação de aglomerados que poderiam causar irregularidades na matriz polimérica e assim prejudicar a mobilidade das cadeias.

4.4. Propriedades reológicas

A reologia é a ciência que estuda o fluxo de deformação dos materiais. Sabe-se que todos os materiais fluem, ainda que de forma variada. Este fluxo de deformação é conhecido como viscosidade e pode ser identificado por meio da análise da resposta da deformação ou tensões de um material. Isso se deve ao fato que cada material exige certa quantidade de energia e tempo para se deformar (BRETAS e D'AVILA, 2006).

A importância da reologia na área de polímeros está ligada intimamente as propriedades de escoamento, devido a correlação com os processos de transformação por injeção, extrusão, compressão, entre outros. A medida das propriedades reológicas é importante porque fornece informações sobre o efeito de aditivos e cargas, bem como as correlações entre suas propriedades morfológico-mecânicas (ML, et al., 2007).

O comportamento reológico de um polímero tem por base a definição de três tipos de materiais segundo BRETAS e D'ÁVILA (2010):

- Materiais viscosos (os quais, durante a deformação, dissipam o trabalho externo aplicado);
- Materiais elásticos (os quais armazenam o trabalho externo aplicado) e;
- Materiais viscoelásticos (dissipam e armazenam parte do trabalho externo aplicado).

Para determinar o regime viscoelástico linear, foram realizados os testes a uma frequência angular de 1 rad/s. A figura 23 apresenta a viscosidade em relação a taxa de cisalhamento para as amostras a uma temperatura de 250 °C. Nela, é possível observar a redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento:

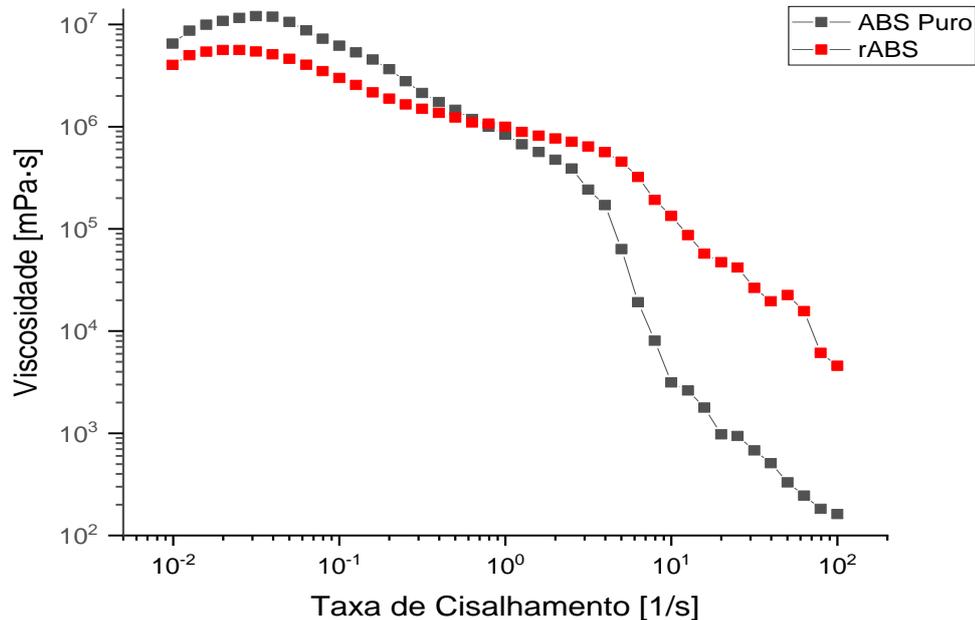


Figura 24 - Viscosidade das amostras de ABS puro e r-ABS

Analisando o gráfico acima, é possível observar que a viscosidade do r-ABS é inferior quando comparada ao ABS puro. Porém, com o aumento da taxa de cisalhamento, ocorreu uma redução na viscosidade, tanto para o material reciclado como para o puro até certo momento, na faixa do 10⁰ (1/s). Em seguida, a viscosidade do material reciclado se manteve em um patamar elevado quando comparado ao ABS puro, que apresentou uma redução brusca de viscosidade na faixa dos 10¹ (1/s) se reduzindo a até a faixa de 10² (1/s), indicando que o r-ABS é mais viscoso que o puro.

Segundo o estudo de (HUANG, et al., 2019), se o fundido possuir alta viscosidade, a extrusão se tornará difícil, e assim o processo de impressão 3D também falhará.

Os testes reológicos são capazes de refletir a fluidez dos materiais impressos pelo processo FDM, e portanto, servem como base de informações sobre a extrusão do material.

A figura 24 apresenta o módulo de armazenamento G' e módulo de perda G'' na frequência angular [rad/s] para o ABS puro e r-ABS.

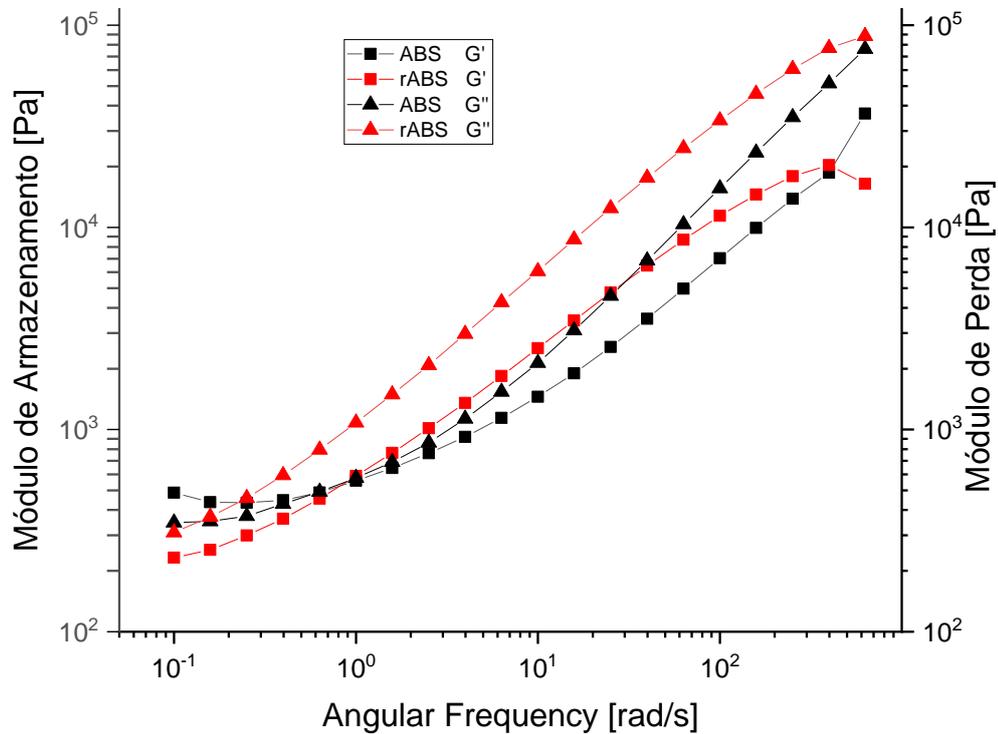


Figura 25 - Viscosidade complexa em função da Frequência Angular (ω) para r-ABS e ABS Puro

O ABS apresenta um comportamento terminal típico dos polímeros, onde G' tem forte dependência da frequência angular. Por comparação com resposta viscoelástica linear do ABS puro, foi evidenciado que o mesmo apresenta uma certa homogeneidade entre G' e G'' . Porém, o r-ABS é maior para a frequência angular maior que 1, predominando o caráter viscoso do polímero.

O módulo de armazenamento, denotado como G' , representa a porção elástica do comportamento viscoelástico, que descreve em partes o comportamento de estado-sólido da amostra, ou seja, é a capacidade do material armazenar energia de maneira elástica.

Nota-se no gráfico acima que os valores de G' em função da Frequência angular (ω), para valores maiores de frequência mostram que o polímero puro e o reciclado tendem a valores relativamente próximos, mostrando maior dependência em função de (ω). Para o módulo de perda G'' observa-se que há um comportamento semelhante ao visto no módulo de armazenamento G' , onde baixas frequências angulares também apresentaram valores próximos.

4.5. Propriedades mecânicas

A análise das propriedades mecânicas é de fundamental importância no processo de seleção para o projeto e qualidade de um produto. Neste tópico, verificamos o quão similares são os resultados mecânicos obtidos dos testes no filamento reciclado e tradicional.

A determinação das propriedades mecânicas de um material, incluindo resistência à tração, alongamento na ruptura e resistência ao impacto é crucial para seu uso na maior parte das aplicações (WENG, J. et al., 2016). O ensaio de tração é um experimento mecânico, que consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até sua ruptura (CARNEIRO, O. S., 2015). Segundo (DALCIN, 2007), este ensaio é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, pela vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais.

4.5.1. Ensaio de Resistência à Tração

Através do ensaio de tração dos corpos de prova, foi permitido coletar os dados de força aplicada e alongamento resultante durante o período do ensaio. Com isso, foi possível determinar os valores de resistência à tração. Os módulos de elasticidade obtidos tanto do material reciclado como do material virgem apresentaram resultados semelhantes, e estão melhor apresentados na figura 25.

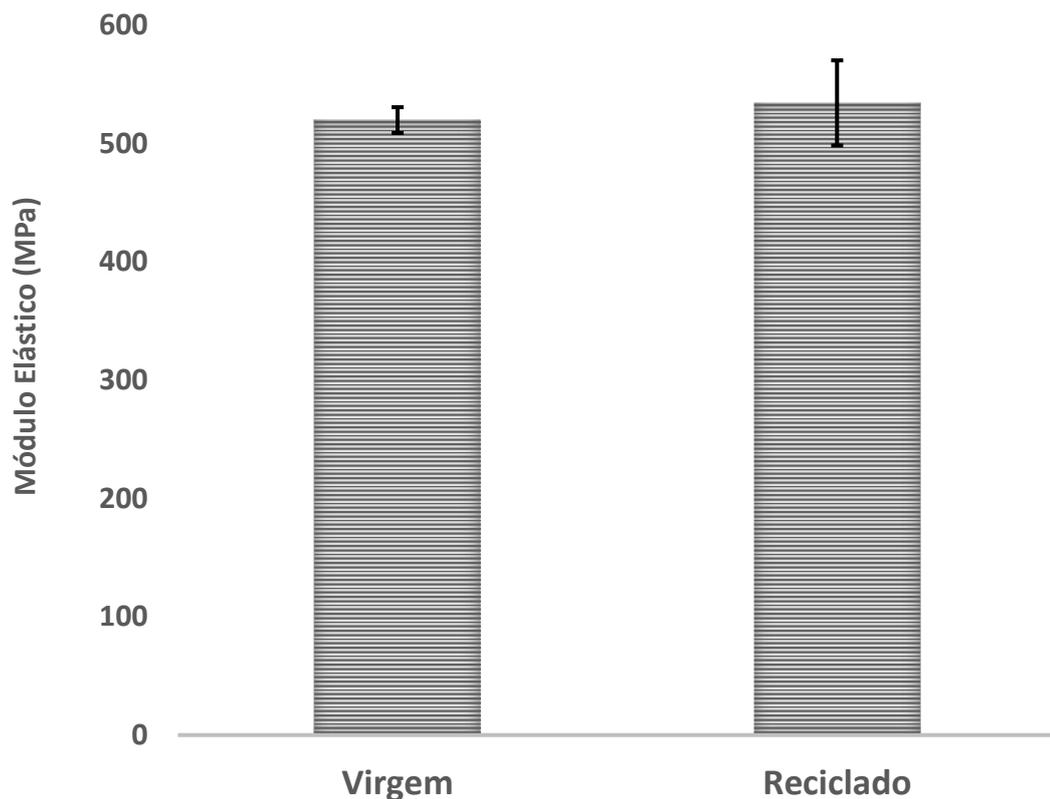


Figura 26 - Resultado do Módulo elástico de ABS (virgem) e r-ABS (reciclado)

O r-ABS teve como resultado de módulo elástico 534,3 Mpa e o virgem 519,8 Mpa, indicando uma certa similaridade entre os resultados de resistência entre os materiais, dado desvio padrão maior no reciclado. Ao analisar o gráfico, nota-se que o módulo elástico do material reciclado se mostrou semelhante ao do material virgem (puro), sem grandes diferenças, demonstrando as boas propriedades do material reciclado. Esse acréscimo no módulo elástico no r-ABS representa um aumento percentual do comprimento da peça sob tração, no momento da ruptura, exibindo boa elasticidade.

O conhecimento dos módulos elásticos é alvo da atenção de produtores e consumidores de materiais, organizações de pesquisa e agências governamentais, que possuem necessidades e aplicações distintas. Conseqüentemente, é necessário que haja uma consistência na maneira segundo a qual os ensaios são conduzidos e na interpretação de seus resultados.

Segundo (CARVALHO) a avaliação do comportamento mecânico de materiais poliméricos depende de vários fatores como, velocidade e temperatura de ensaio, da

condição ambiental da amostra, da geometria do corpo de prova, entre outros. Para a realização deste ensaio foram confeccionados seis corpos de prova para cada tipo de material. O propósito deste ensaio foi gerar valores referenciais de resistência das amostras para fins de comparação. Na figura 26, está representado o valor médio de tensão máxima de ruptura entre o material reciclado e virgem.

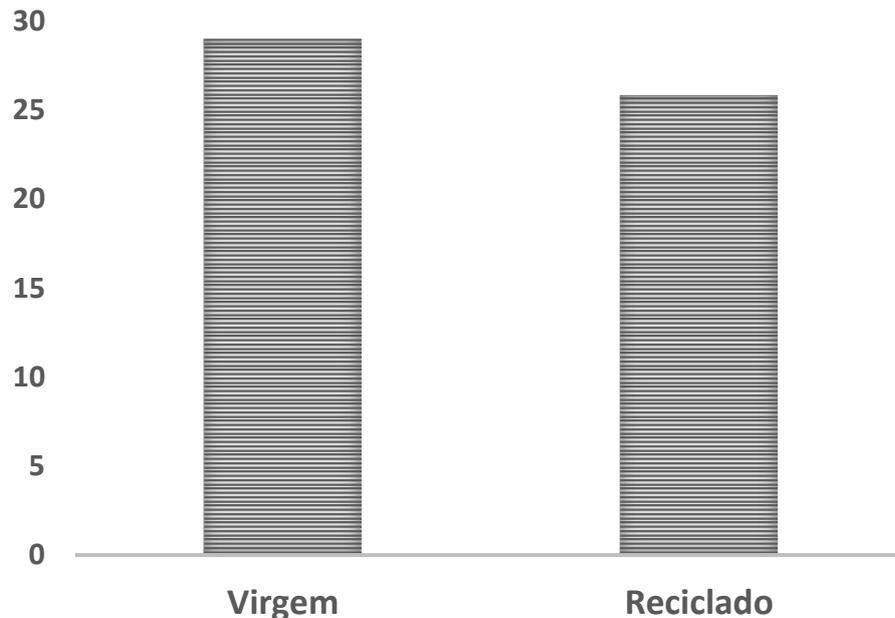


Figura 27 - Tensão na Ruptura de ABS (virgem) e r-ABS (reciclado)

A tensão máxima na ruptura é definida como sendo a força por unidade da área necessária para o rompimento do corpo de prova. É calculada dividindo a força de ruptura pela área da secção do corpo de prova.

Ao avaliarmos a tensão máxima até a ruptura de cada material, nota-se que tanto o material virgem como reciclado apresentaram resultados semelhantes, sem grandes diferenças, sendo o ABS virgem de 29 MPa e o r-ABS foi de 26 MPa. Geralmente, a ruptura por fluência de um polímero é o resultado da interação de um ou mais eventos, tais como deformação viscoelástica, ruptura de ligações primárias ou secundárias, escoamento por cisalhamento, deslizamento entre cadeias, formação e crescimento de vazios e colapso das fibras, com defeitos intrínsecos e externos, resultando na formação e crescimento de trincas e na ruptura final.

Corroborando com os resultados obtidos, Fernandez-Vicente et al. (2016), identificou que um nível mais alto de densidade de preenchimento na impressão FDM

resultou em uma menor quantidade de vazios no produto impresso e, conseqüentemente, uma maior resistência à tração. Entretanto, se avaliarmos somente as propriedades de tração desses materiais, sem considerar a propriedade de resistência ao impacto, é possível correr o risco de fabricar produtos frágeis.

Assim, é possível definir o material polimérico que terá melhor desempenho sob as condições finais de uso, garantindo o bom funcionamento durante a vida útil do produto.

4.5.2. Resistência ao Impacto

A resistência ao impacto é uma das propriedades mais importantes para o conhecimento do comportamento mecânico dos polímeros. É a medida da energia que o material consegue absorver, através de movimentos das suas cadeias moleculares, antes de quebrar. Os testes de resistência ao impacto mais comuns são os chamados testes pendulares. Nestes ensaios a amostra é atingida por um pêndulo de determinada massa, que é levantado a uma determinada altura, ou seja, com uma determinada energia potencial, provocando a deformação ou fratura do corpo de prova.

O ensaio de impacto do tipo Izod tem como finalidade mensurar a susceptibilidade relativa de um corpo de prova padrão mediante a solicitação ao impacto através de uma máquina de ensaio pendular (CANEVAROLO, 2003). Diversos autores descrevem que a degradação do poli butadieno é provocada devido a reações de cisão durante o processo de extrusão, que podem formar microestruturas que atuam como pontos concentradores de tensões levando, dessa forma, o material poderá desenvolver um comportamento de dúctil para frágil (TIGANIS, et al., 2002). A figura 27 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência ao impacto:

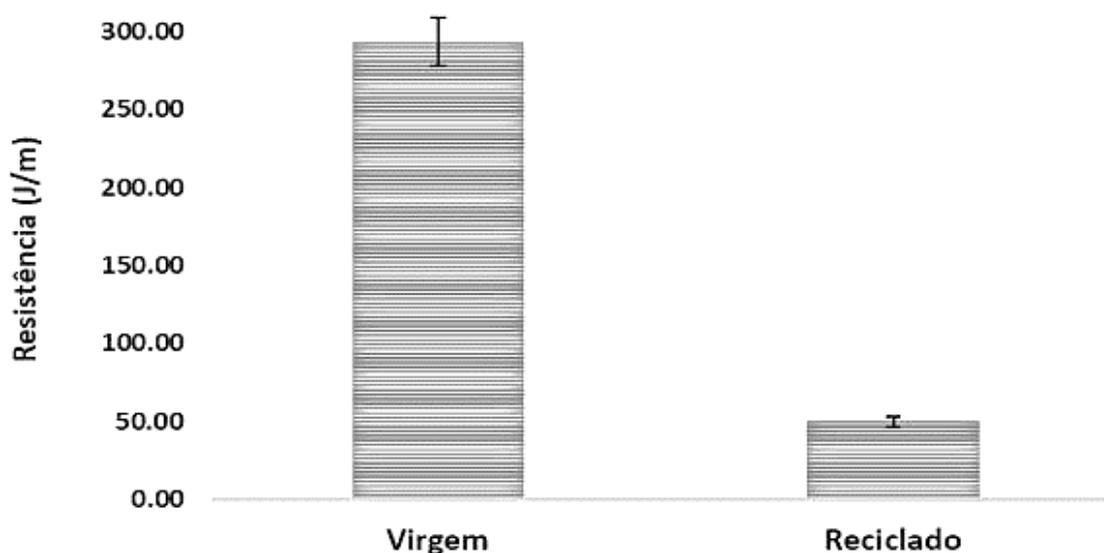


Figura 28 - Resultado ensaio de Resistência ao Impacto

A partir dos resultados, é possível notar uma acentuada redução na energia de ruptura de r-ABS quando comparado ao ABS, apresentando uma redução de aproximadamente 83%. Esta perda de resistência ao impacto aponta alguma falha significativa na produção das amostras impressas por FDM. Um dos motivos que contribui para a menor resistência ao impacto para amostras r-ABS produzidas por FDM é o fato de haver falha na produção dos corpos de prova pela presença de vazios, o que é comum na impressão 3D e, afeta severamente os resultados. Para verificar esta condição, foi executado um estudo detalhado das micrografias dos filamentos e das amostras, sendo apresentados nos tópicos 5.6 e 5.7.

Uma diminuição nas propriedades mecânicas pode ser atribuída a diferentes fenômenos. Em primeiro lugar, a degradação térmica do r-ABS ocorre pelos múltiplos processos de aquecimento deste até a impressão dos corpos de prova. A presença de uma fase elastomérica (uma borracha de poli butadieno dispersa em uma matriz SAN), que é especialmente sensível à degradação termo-oxidativa, é um dos fatores que mais influenciam no desempenho final, uma vez que a sua degradação promove a diminuição da aderência com a matriz SAN atuando como concentradores de estresse.

4.6. Microscopia Ótica dos Filamentos

As amostras dos filamentos e dos corpos de prova foram analisadas no Microscópio óptico, a fim de visualizar a morfologia das superfícies interna e externa dos filamentos e dos corpos de prova. Para isso, inicialmente foram analisados os filamentos r-ABS e ABS puro, a fim de compará-los e validarmos se o filamento reciclado produzido apresenta semelhanças quando comparado ao comercial. A figura 28 mostra as análises obtidas através do microscópio óptico no filamento ABS virgem (comercial).

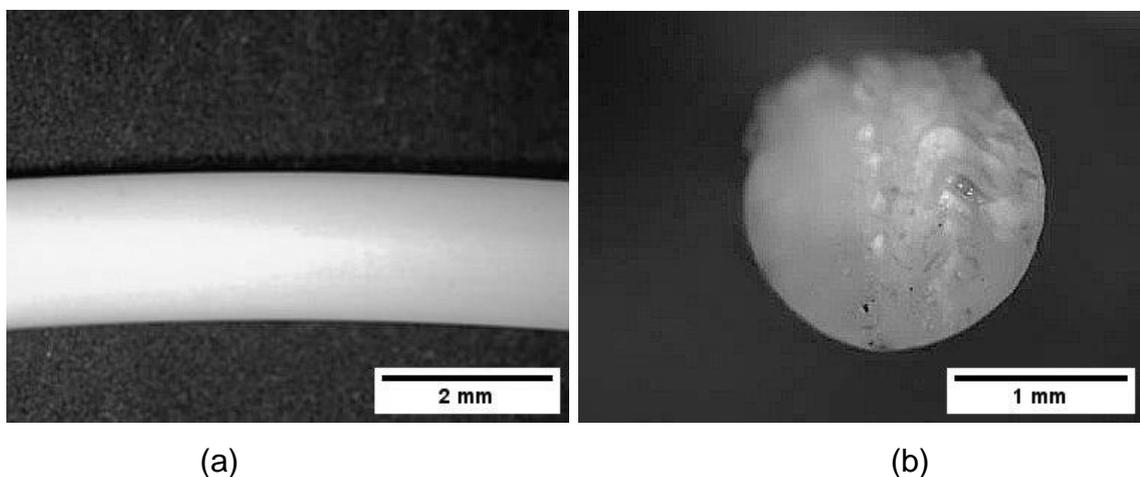


Figura 29 - Análise microscópica da superfície externa do Filamento ABS Puro – (a) com aproximação de (2x) e (b) com (4x).

Analisando as imagens, fica visível a homogeneidade do filamento ABS puro, sem a presença de vazios internamente e com bom aspecto visual na superfície externa, comprovando a uniformidade do material. Em seguida, foram analisadas as imagens da superfície externa do filamento r-ABS, a fim de se verificar a sua similaridade com o puro, indicado para a impressão 3D. Percebe-se que a superfície do material apresenta acabamento irregular e elevada rugosidade, além de possuir inúmeros vazios internamente. A figura 29 apresenta as análises obtidas através do microscópio óptico no filamento r-ABS (reciclado):

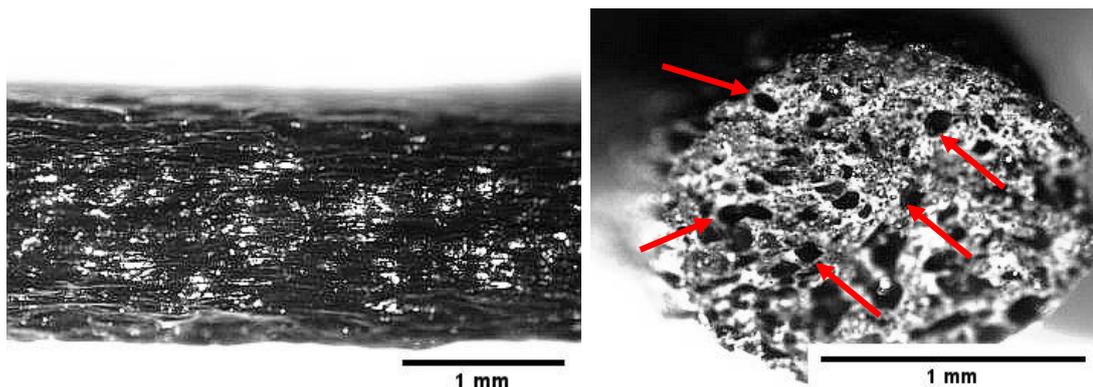


Figura 30 - Análise microscópica Filamento r-ABS (4x) (superfície externa)

No filamento r-ABS, é possível notar visivelmente a grande rugosidade na superfície, oriundo da enorme densidade de vazios na parte interna do filamento. Também pode ser devido a presença de fratura do fundido originada na extrusão do filamento.

Segundo Jazrawi et al. (2012), o processamento de polímeros, durante o processo de extrusão, quando o cisalhamento entre o fluido e as paredes do equipamento excede certo valor, o polímero fundido exibe uma instabilidade no fluxo. Em termos práticos a solução para diminuir a instabilidade é reduzir a velocidade da rosca e aumentar as temperaturas das zonas intermediárias.

Em termos de processabilidade o aumento excessivo da temperatura nas zonas finais de processamento, embora reduzisse a instabilidade no extrudado, poderia dificultar a criação de um filamento com diâmetro estável e adequado para uso na impressora 3D.

4.7. Variação no diâmetro dos filamentos

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. Com isso, a peça apresentará regiões de baixa densidade, presença de vazios e, principalmente, redução drástica das propriedades mecânicas do material.

A partir das medições, fica evidente a desuniformidade do filamento reciclado se comparado ao puro. Na figura 32 é possível visualizar a diferença. O filamento de ABS apresentou um bom acabamento superficial e homogeneidade em toda a sua

totalidade, exibindo brilho e coloração uniforme, enquanto que no filamento de r-ABS é possível notar irregularidades na região externa, rugosidade profunda, indicando a presença de vazios internamente, o que foi confirmada pela microscopia.



Figura 31 - Comparação filamento reciclado (preto) e filamento comercial (amarelo)

Os filamentos foram novamente mensurados em relação ao diâmetro, buscando observar os valores médios e a amplitude de variação. Foi percebida uma desuniformidade no filamento de r-ABS, com valor de diâmetro médio de 1,63 mm e amplitude de medidas entre 1,53 mm até 1,69 mm, ou seja, uma oscilação de 14mm. Ao analisar as medidas do diâmetro do ABS, este apresenta uma melhor estabilidade dimensional, variando de 1,76mm à 1,83mm, isto significa uma variação de 7mm, e um valor médio de 1,79 mm.

4.8. Microscopia Óptica do Corpo de Prova

As microestruturas dos materiais ABS e r-ABS foram analisadas nas superfícies de fratura dos corpos de prova de impacto. Como são amostras de corpos de prova impressos por FDM, é possível visualizar as camadas impressas para formar o corpo de prova. A compactação que se observa é gerada pela adesão entre camadas, com a presença de alguns vazios. A figura 30 apresenta a superfície de fratura e o preenchimento do ABS comercial:

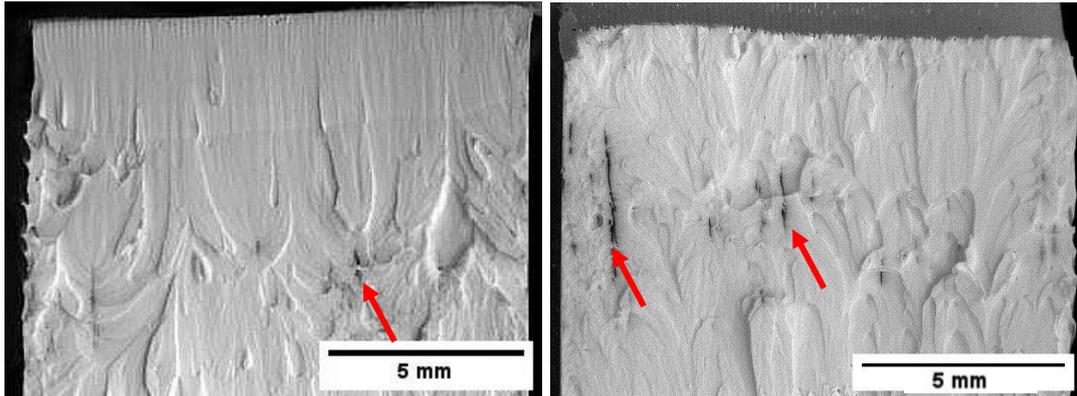


Figura 32 - Corpo de prova de ensaio de Impacto do ABS comercial. Setas indicam presença de vazios.

A imagem referente ao corpo-de-prova com preenchimento 100% permite visualizar as linhas de impressão, sendo possível notar somente alguns pequenos vazios, indicados por uma seta vermelha. A rugosidade é baixa, mas as cicatrizes de arrancamento indicam a boa adesão entre as camadas impressas.

A superfície de fratura do corpo de prova após o ensaio mecânico produzido pelo filamento de ABS comercial (figura 30) apresenta morfologia nítida de camadas sobre camadas. Essa estrutura já era esperada e algumas publicações apresentam imagens semelhantes também em superfície de corpos de prova de ABS ensaiados mecanicamente (PEREZ, ROBERSON e WICKER, 2014), (WU, GENG, *et al.*, 2015), e são diferentes da superfície de fratura de amostras de ABS injetadas (WU, GENG, *et al.*, 2015), as quais não apresentam vazios, levando a uma maior resistência mecânica das amostras.

Um dos objetivos da impressão 3D é obter produtos com resistência mecânica próxima a de peças injetadas ou usinadas. Para isso torna-se necessário aumentar a resistência inter-camadas das peças impressas. Na figura 31, é possível visualizar a superfície de fratura horizontalmente do corpo de prova do r-ABS, onde o ensaio mecânico de resistência ao impacto foi realizado perpendicularmente ao sentido da deposição das camadas.

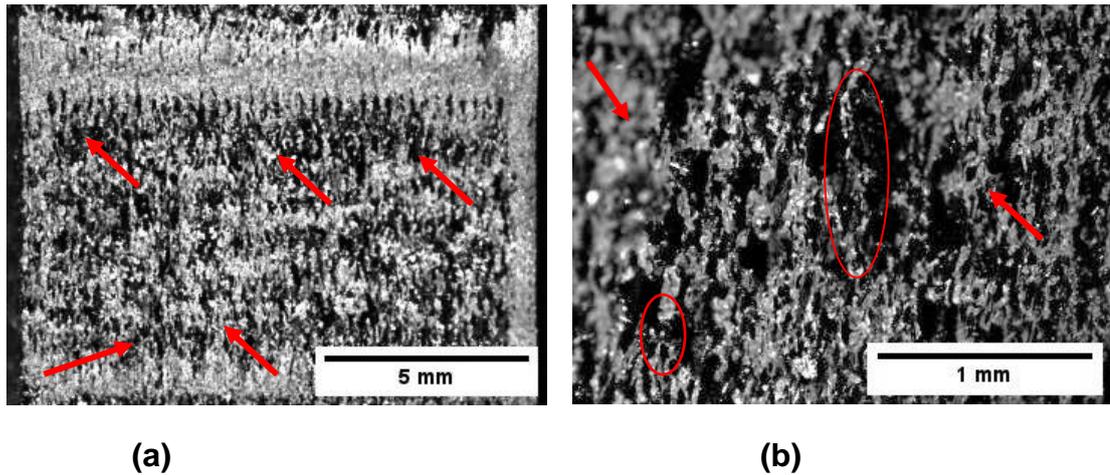


Figura 33 - Superfície de fratura do corpo-de-prova de r-ABS. A imagem bCP's: (a) demonstra a fratura enquanto que (b) mostra um aumento considerável de vazios

O material reciclado apresentou grande diferença quando comparado ao polímero virgem, pois se observa um grande número de falhas de impressão e vazios. Essa configuração explica a redução drástica da resistência ao impacto para o r-ABS.

Apesar dos corpos de prova para FDM e moldagem por injeção secarem ao mesmo tempo e temperatura semelhantes, a taxa de alimentação lenta do filamento durante o FDM o expõe à umidade por um longo período de tempo, o que pode acarretar uma maior absorção de umidade na superfície do filamento.

A direção de impressão também favorece o sentido dos vazios. No estudo de Guessasma et al. (2015), os autores usaram microtomografia para analisar os defeitos internos e constataram que a orientação das peças impressas em 45° em relação a mesa de impressão reduz a quantidade de defeitos internos. Da mesma forma, De Ciurana et al. (2013) indica que a porosidade e resistência mecânica de peças impressas em FDM, sob várias condições de processamento, possui redução dos vazios internos para direção de deposição 45° graus. Isso reforça que a quantidade de vazios entre as camadas é responsável pela condição de baixa resistência ao impacto no r-ABS.

4.9. Medição e Pesagem dos Corpos de Prova

Para um melhor entendimento referente a redução das propriedades mecânicas, principalmente a de impacto, buscou-se realizar a medição dimensional e pesagem das amostras de ABS e r-ABS para fins de comparação.

Pelos resultados das medições das amostras para o teste de resistência a tração, é possível observar uma melhor uniformidade dimensional no material reciclado quando comparado ao virgem, indicando as boas propriedades do material reciclado para produção do filamento e impressão das amostras.

No entanto, ao se verificar os pesos das massas das amostras, percebe-se que o material reciclado apresentou significativa redução de massa quando comparado ao virgem, indicando possivelmente uma falha, que foi verificada a partir dos vazios constatados internamente por parte da análise microscópica, as quais estão no anexo 2 e 3 do presente trabalho.

5. CONCLUSÕES

Através deste estudo, foi possível avaliar o potencial de produção de um filamento para impressão FDM a partir do r-ABS, cujos polímeros foram coletados de REEE. As etapas realizadas de preparação mostram a facilidade em executar a coleta, limpeza e fragmentação em larga escala, produzindo flocos de alta qualidade para a produção de filamentos.

Os resultados das análises de infravermelho levaram a conclusão de que os materiais presentes na produção de carcaças de monitores CRT e televisores são essencialmente o ABS (Acrilonitrila-butadieno-estireno), PC (policarbonato) e PS (poliestireno) independente da marca e do ano de fabricação. Entretanto foram identificadas diferenças entre os códigos presentes nos produtos e sua composição.

A fabricação do filamento de r-ABS em extrusora monorosca foi viável, sem grandes contratempos, porém uma excessiva porosidade foi percebida no filamento reciclado. No entanto, as impressões foram possíveis, não apresentando falhas constantes durante a deposição do material, e sem apresentar entupimento no bico de impressão, utilizando como parâmetros os semelhantes ao adotado convencionalmente para a impressão de ABS comercial. Apesar disso, a qualidade dimensional e estética é inferior se comparada a dos filamentos comerciais.

Além disso, a adesão à mesa de impressão foi mais persistente durante a deposição do material, sendo removido com facilidade após o resfriamento.

Através dos resultados obtidos pode-se observar uma redução nas propriedades mecânicas do reciclado, mas isso não limita o uso do r-ABS como fonte para aplicações tolerantes a baixa resistência mecânica, se tornando uma maneira viável para substituição de polímeros virgens em aplicações da manufatura aditiva.

No entanto, o filamento atendeu as dimensões para que possa ser utilizado na impressão 3D do tipo FDM, além dos corpos de prova possuírem boa tolerância dimensional. Como resultado da estratégia de moldagem de camada por camada, a adesão entre as camadas é o ponto chave que afeta diretamente as propriedades mecânicas dos produtos FDM.

5.1. Contribuição do trabalho

Este estudo produziu resultados importantes para usuários da tecnologia FDM e interessados em utilizar materiais reciclados. No planejamento e produção de peças a serem impressas com r-ABS, as propriedades mecânicas que devem ser consideradas são a resistência ao impacto e a tensão de ruptura. De forma a compensar as propriedades inferiores, os polímeros podem ser potencializados com aditivos ou material virgem, além da escolha da geometria da peça, e parâmetros de impressão, a fim de melhorar seu desempenho.

Diante disso, tenho a convicção de que o trabalho apresentado foi de grande valia, pois toda a metodologia aplicada é de fácil adaptação e utilização, sendo possível executar em diversos ramos e segmentos com materiais poliméricos reciclados.

5.2. Possibilidades de trabalhos futuros

Para ampliar o escopo dos resultados, novas pesquisas com materiais reciclados podem melhorar o entendimento e a utilização destes na fabricação de filamentos para impressão 3D. A otimização dos parâmetros de impressão pode aprimorar significativamente as propriedades mecânicas, sendo possível obter resultados melhorados.

A velocidade e temperatura de extrusão, são parâmetros que devem ser mais bem estudados, assim como o uso de resfriamento ausente da água para a conformação do filamento. Além disso, é importante verificar a utilização de outros polímeros oriundos de REEE, que possuem como características uma menor absorção de água, a fim de se obter melhores resultados de propriedades mecânicas.

A influência da espessura da parede também é outro ponto importante a destacar, para avaliar qual o valor mínimo de espessura que se poderia utilizar na impressão, sem comprometer a integridade física do objeto. Se conseguir utilizar a uma parede mais fina, consegue-se reduzir o tempo de impressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPLAST. Processo de Transformação para Materiais Plásticos. São Paulo, 2014. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/file/download/2017/Perfil_2016_Abiplast_web.pdf. Acesso em 20 de Setembro de 2021.
- ABREU, J. T. F. Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo delta. 2017. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de engenharia, Universidade de Porto. Porto, Portugal, 2017.
- ALMEIDA, Rosemire dos S. Influência da velocidade de rotação no processo de extrusão do polipropileno virgem e reciclado. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- ARNOLD, J. C.; Watson, T.; Alston, S.; Carnie, M.; Glover, C. *Polym. Test.* 2010, 29, 459.
- ASTM. Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics. EUA, 2004.
- ASTM. Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. EUA, 2004.
- AUMNATE, C. et al. Fabrication of ABS/Graphene Oxide Composite Filament for Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2018, 2018.
- BARWINKEL, S.; SEIDEL A.; HOBEIKA S.; HUFEN, R.; MORL, M.; Altstadt, V. *Materials* vol. 9, 659 (2016).
- Billah, K. M. M., Lorenzana, F. A. R., Martinez, N. L., Wicker, R. B., & Espalin, D. (2020). Thermomechanical characterization of short carbon fiber and short glass fiber-reinforced ABS used in large format additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 35, 101299. doi:10.1016/j.addma.2020.101299.
- BiPRO GmbH, Copenhagen Resource Institute (BiPR/CRI). Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU, Final report. Brussels: European Commission. Available at: <https://ec.europa.eu/environment/waste/> (2015).
- B. Derby and N. Reis, "Inkjet printing of highly loaded particulate suspensions," *MRS Bulletin*, vol. 28, no. 11, pp. 815–818, 2003.

- BLOK, L. G.; LONGANA, M. L.; YU, H.; WOODS, B. K. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*, v. 22, p. 176-186, 2018.
- BRASKEM. Glossário de termos aplicados a polímeros. *Boletim técnico, Camaçari*, n. 8 PVC, 9 p., 2002.
- BRESEGHELLO, L. A performative approach to 3d printed architecture. 2015. Tese de bacharelado - Ciências da Arquitetura - Politecnico di Milano, 2015.
- BRETAS, R.E.S.; D'ÁVILA, M.A. " Reologia de polímeros fundidos". São Carlos:EdUFSCar, 2000. 196p.
- BRETAS, R.E.S.; D'ÁVILA, M.A. " Reologia de polímeros fundidos". São Carlos:EdUFSCar, 2010, 2º Ed.
- BRYDEN, D. CAD and rapid prototyping for product design. China: Laurence King Publishing Ltd, 2014.
- CANEVAROLO, S. V. Técnicas de caracterização de polímeros. Ed. ARTLIBER, 2003.
- CARNEIRO, O. S., SILVA, A. F., GOMES, R., "Fused deposition modeling with polypropylene", *Materials & Design*, v. 83, p. 768-776, (2015).
- CARVALHO, C. Reciclagem Primária de ABS: Propriedades Mecânicas, Térmicas e Reológicas. 180 f. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina. UDESC. 2009.
- CARVALHO, T. C. M. B.; XAVIER, L. H. Gestão de resíduos eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- Catão, M. D. Ó. (2019). O crescente aumento dos resíduos oriundos de equipamentos eletroeletrônicos: a cidade em busca da gestão socioambiental adequada para o destino final do e-lixo. *Revista de Direito Da Cidade*, 11(3), 175–197. <https://doi.org/10.12957/rdc.2019.37901>.
- COUTINHO, R. R. R. P. Avaliação dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas de peças de PLA/PBAT fabricadas por impressão 3D. 2017. 63 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Acesso em: 15 ago. 2022.
- COSTA, C.M. Caracterização Reológica de Fluidos Complexos. Rio de Janeiro. PUCRJ, 2017. 18p.
- CUNICO, M. Impressoras 3D: o novo meio produtivo. 1.ed. Curitiba: Concep3D Pesquisas Cientificas Ltda, 2015.

DA CRUZ FERREIRA, G.; KRÜGER, T. R.; DOS SANTOS, C. B. Utilização da impressão 3d na manufatura para a otimização de processos: um estudo de caso em indústrias automobilísticas. 2016. Memorial de Trabalho de Conclusão de Curso – FAE Centro Universitário, Curitiba, PR, 2016.

DALCIN, G.B., Ensaios dos Materiais. Curso Engenharia Industrial Mecânica, URI - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, Rio Grande do Sul, Brasil, 2007, p. 1-41.

DE CIURANA, J.; SERENÓA, L.; VALLÈS, È. Selecting Process Parameters in RepRap Additive Manufacturing System for PLA Scaffolds Manufacture. Procedia CIRP, v. 5, n. 0, p. 152-157, 2013. ISSN 2212-8271.

DE REZENDE MARTINS, J. F. Estudo do efeito do tipo de preenchimento no comportamento mecânico de peças fabricadas por fused deposition modelling usando o compósito pla-fibra de carbono. 2021. Tese de mestrado - Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2021.

DIAS, Marcelo Vizeu. Avaliação da gestão de resíduos eletroeletrônicos. 189 f. Tese (Doutorado em Gestão Ambiental) – Universidade Positivo, Curitiba, 2017.

EPA-ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. Electrical and Eletronic Equipment. Disponível em: http://www.epa.ie/enforcement/weee/electricalandelectronicequipment/#.VRGL7_ , acesso em 8 Jul. (2021).

FERNANDES, João Francisco Miranda. Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Técnico Lisboa, Lisboa, 2016.

FERNANDEZ-VICENTE, M. et al. Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. 3D printing and additive manufacturing, v. 3, n. 3, p. 183–192, 2016.

FERREIRA, C. M. N.; LEITE, C. C.; COSTA, C. M. R.; ARAUJO, R.G. M. de.; SOUZA, W. C. de.; Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos: Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI, Brasília, 2012.

GARCIA, L. H. T. Desenvolvimento e fabricação de uma mini-impressora 3D para cerâmicas. 2010. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18146/tde.../LuisHilarioToblerGarcia.pdf>.

Acesso em: 21 Setembro, 2022.

GARRETT, Filipe. Como funcionam os diferentes tipos de impressoras 3D. TechTudo, 27 fev. 2016. Disponível em: < <https://glo.bo/2LOdkFS> >. Acesso em: 18 maio 2022.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. Additive manufacturing technologies. 2 ed. New York: Springer, 2015.

GNANASEKARAN, K.; HEIJMANS, T.; VAN BENNEKOM, S.; WOLDHUIS, H. 3D printing of CNT-and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling. Applied materials today, v. 9, p. 21-28, 2017.

GUESSASMA, S.; BELHABIB, S.; NOURI, H. Significance of pore percolation to drive anisotropic effects of 3D printed polymers revealed with X-ray μ tomography and finite element computation. Polymer, v.81, n.3, 2015 ISSN 0032-3861.

HARRIS, M.; et al. Acrylonitrile Butadiene Styrene and Polypropylene Blend with Enhanced Thermal and Mechanical Properties for Fused Filament Fabrication. Materials, 12, 4167; doi:10.3390/ma12244167 (2019).

HIRAYAMA, D. Reciclagem do copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno e do poliestireno de alto impacto oriundos de rejeitos de equipamentos elétricos e eletrônicos na forma de blendas poliméricas. 2015. 213 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de Lorena - Universidade Federal de São Paulo, Lorena, 2015. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-08102015-172459/pt-br.php>. Acesso em: 7 Abril. 2022.

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

Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, New York, NY, USA, 2009.

GOLWALA, H.; ZHANG, X.; MDISKANDER, S.; SMITH, A. L. Solid waste: Na overlooked source of microplastics to the environment. Science of The Total Environment, v. 769, 2021. Disponível em: . doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144581.

JIMÉNEZ, Mariano, et al. Additive manufacturing technologies: no overview about 3D printing methods and future prospects. Research Article, 30, 2019.

KUREK, A. P.; SELLIN, N.; GELSLEICHTER, M. Redução e substituição do ácido crômico na etapa de condicionamento de ABS para metalização. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Joinville, v. 19, n. 3, p. 248-254, 2009.

- JAZRAWI, B. et al. Processing aids for biodegradable polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 128, n. 6, p. 3592-3600, 2012. ISSN 1097- 4628.
- JAYANTH, N.; SENTHIL, P. Application of 3D printed ABS based conductive carbon black composite sensor in void fraction measurement. *Composites Part B* 159 (2019) 224–230.
- J. P. Kruth, “Material increase manufacturing by rapid prototyping techniques,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 577–639, 1991.
- JIMÉNEZ, M., ROMERO, L., DOMÍNGUEZ, M., E., DOMÍNGUEZ, M. Additive Manufacturing Technologies: Na Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. Research Article. Hindawi Complexity. Volume 2019, Article ID 9656938, 30 pages <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>.
- LANDI, T. R. L.; SILVA, L. G. A. Estudo do efeito da radiação ionizante com feixe de elétrons sobre terpolímero Acrilonitrila Butadieno Estireno-ABS. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, São Paulo, v. 4, n. 4, 2003.
- LAVEZ, N.; SOUZA, V. M.; LEITE, P. R. O papel da logística reversa no reaproveitamento do ‘lixo eletrônico’ – um estudo no setor de computadores. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 5, n. 1, p. 15-32, 2011.
- LIOU, F. W. *Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development*. Boca Raton: Crc Press Taylor & Francis Group, 2008.
- LIU, Z.; LEI, Q.; XING, S. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 5, p. 3741–3751, 2019.
- LIU, M.; Guo, Y.; Wang, J.; Yergin, M. Corrosion avoidance in lightweight materials for automotive applications. *Mater. Degrad.* 2018, 2, 24. [CrossRef].
- LIWARSKA-BIZUKOJC, E. Effect of (bio)plastics on soil environment: A review. *Science of The Total Environment*, v. 795, 2021. Disponível em: . doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148889. Acesso em: 10 de março de 2023.
- LONTRA, Beatriz G. F. *Reciclagem mecânica de polietileno de alta densidade obtido a partir de sacolas plásticas*. 2011. 44 f. Projeto (Graduação em Engenharia de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- LOVO, J. F. P.; FORTULAN, C. A. Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo fdm. 1 o Simpósio do Programa de

- PósGraduação em Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, p. 1–6, 2016.
- Mahmood S, Qureshi A J, Goh K L and Talamona D. Tensile strength of partially filled FFF printed parts: experimental results Rapid Prototyp. J. 23 122–8 (2017).
- MANRICH, S. Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e molde, 1. ed. - São Paulo: Artiliber Editora, 2005.
- MANDARINO, M. L. F.; SINAY, M. C. F. de. O Resíduo de equipamento elétrico e eletrônico: suas principais características e nocividades. Revista Interdisciplinar Científica Aplicada, Blumenau, v. 13, n. 2, p. 30-57, 2019.
- MOREIRA, R. M. D. Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM. 2016. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de engenharia, Universidade de Porto. Porto, Portugal, 2016.
- O'CONNELL, J. 3D Printing Infill: The Basics Simply Explained. All3DP. 2022. Disponível em: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>. Acesso em: 6 Abr. 2022.
- PINTO, R. J. F. Injeção e Caracterização do Comportamento Mecânico de Polímeros Termoplásticos: Influência da Pressão de Injeção. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, 2012. Disponível em: . Acesso em: 04 Julho. 2022.
- PEDROSA, Tiago F.S. Conceção e desenvolvimento de equipamento de extrusão de filamento para impressora 3D. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, 2015.
- PEREZ, A. R. T.; ROBERSON, D. A.; WICKER, R. B. Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. J Fail. Anal. and Preven. (2014) 14:343–353 DOI 10.1007/s11668-014-9803-9.
- PORTO, W. S., Brasnieski, A. C. F., Souza, J. A. de, & Freitas, M. A. L. de. (2020). Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: um diagnóstico da destinação na percepção do consumidor final de Vilhena/RO. Amazônia, Organizações e Sustentabilidade, 8(2), 07. <https://doi.org/10.17648/aos.v8i2.1008>
- PRACELLA, M. Blends and Alloys. In: Modification of Polymer Properties. Elsevier Inc., pp. 155–184. 10.1016/B978-0-323-44353-1.00007-5 (2017).
- RAGHAVAN, J.; MESHII, M. Creep rupture of polymer composites, Composites Science and Technology, v. 57, p. 375-388, 1997.

- REDWOOD, B.; SCHAFFER, F.; GARRET, B. The 3D Printing Handbook. Primeira Edição. ed. Amsterdam, The Netherlands: Coers & Roest, 2018. 289 p. ISBN 978-90-827485-0-5.
- RELVAS, C. A. M. O mundo da impressão 3D e o fabrico digital. Porto: Engebook, 2018.
- RESINEX. Resinex. Resinex, 2019. Disponível em: < <https://resinex.com.br> >. Acesso em: 17 out. 2021.
- ROBERSON, D. A., Perez, A. R. T., Shemelya, C. M., Rivera, A., MacDonald, E., & Wicker, R. B. (2015). Comparison of stress concentrator fabrication for 3D printed polymeric izod impact test specimens. Additive Manufacturing, 7, 1-11.
- SANTANA, Leonardo. Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA. 2015. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2015.
- SIMIONESCU, T., M., et al. An experimental study on mechanical and thermal behavior of acrylonitrile butadiene styrene enhanced with fire retardants. Environmental Engineering and Management Journal. May 2020, Vol. 19, No. 5, 773-783. Disponível em: <http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/>; <http://www.eemj.eu>.
- SILVA, F. L. F. Comissionamento e estudo dos materiais PLA e ABS processado através da manufatura aditiva. 2019. Relatório de projeto de iniciação científica – Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2019.
- SIQUEIRA, Valdilene S; MARQUES, Denise Helena França. Gestão e descarte de resíduos eletrônicos em belo horizonte: algumas considerações. Caminhos de Geografia, v. 13, n. 43, pp. 174–187, 2012.
- SOUSA, J. G. Q. Efeito dos parâmetros de impressão 3d na resistência à tração de peças impressas com filamento abs. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Ceará, Russas, CE, 2022.
- STRATASYS INC. Steven Scott Crump. Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects. Minneapolis, EUA, 1989.
- SUN, Q. et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of fdm. 2008. Rapid Prototyping Journal, v. 14, n. 2, p. 72–80, 2008.
- The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. THE GLOBAL E- WASTE STATISTICS PARTNERSHIP. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/gem-2020/>. Acesso em: 06 de ago. de 2022.

- TIGANIS, Burn.; DAVIS, Paul.; HILL, Jonhson, Thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blends, *Polymer Degradation Stablsh*, 76, 425-434,2002.
- UJFALUSI, Z., et al. Detailed Thermal Characterization of Acrylonitrile Butadiene Styrene and Polylactic Acid Based Carbon Composites Used in Additive Manufacturing. *Polymers* 2020, 12, 2960; doi:10.3390/polym12122960.
- VEIT H.M., BERNARDES A.M., FERREIRA J.Z., TENÓRIO J.A.S., MALFATTI C.F. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. *Journal of Hazardous Materials B137* (2006) 1704-1709.
- VOLPATO, Neri; CARVALHO, Jonas de. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. In: VOLPATO, Neri. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Blucher, 2017. Cap. 1. p. 15-30.
- XAVIER, Lúcia Helena; LINS, Fernando A. Freitas. Mineração Urbana de Resíduos Eletroeletrônicos: Uma nova fronteira a explorar no Brasil. *Brasil Mineral*, v. 1, n. 379, p. 22–26, 2018.
- ZHAO, H.-M.; HE, Y.; FU, J.´Z.; QIU, J. Inclined layer printing for fused deposition modeling without assisted supporting structure. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, [S. l.], v. 51, p.1-13, June 2018.
- WU, W.; GENG, P., et al. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials* 2015, 8, 5834-5846; doi:10.3390/ma8095271.
- WENG, Z., Wang, J., Senthil, T., and Wu, L.,. *Mater Design* 102:276–283 (2016).
- WOJTYLA, Szymon; KLAMA, Piotr; BARAN, Tomasz. Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. *Journal of occupational and environmental hygiene*, v. 14, n. 6, p. D80-D85, 2017.

ANEXO 2 – Medições realizadas nos corpos de prova de Resistência a tração

Medições dos corpos de prova				
	ABS	ABS	r-ABS	r-ABS
	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
	12,35	3,50	12,00	3,35
	12,70	3,25	12,00	2,95
	12,70	3,20	12,00	3,00
	12,75	3,20	12,00	2,95
	12,80	3,30	12,00	3,00
	12,75	3,15	12,00	2,80
Média	12,68	3,27	12,00	3,01
Desvio Padrão	0,16	0,13	0,00	0,18

ANEXO 3 – Pesagem dos corpos de prova do ensaio de tração e ensaio de impacto

Massa (g) dos Corpos de prova (CP)				
	ABS		r-ABS	
	CP tração	CP Impacto	CP tração	CP Impacto
	8,54	10,52	7,19	8,89
	8,51	10,47	6,85	8,49
	8,50	10,44	6,41	8,46
	8,51	10,41	6,80	8,15
	8,48	10,42	6,90	8,62
	8,50	10,38	6,81	8,36
	-	10,34	-	7,86
Média	8,51	10,42	6,83	8,40
Desvio-padrão	0,02	0,06	0,25	0,33

