

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

ANA LUIZA SALGADO DE ABREU

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS OBTIDOS POR  
MANUFATURA ADITIVA

BELO HORIZONTE

2022

ANA LUIZA SALGADO DE ABREU

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS OBTIDOS POR  
MANUFATURA ADITIVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos

BELO HORIZONTE

2022

ANA LUIZA SALGADO DE ABREU

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS OBTIDOS POR  
MANUFATURA ADITIVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos – Orientador

---

Prof. Dr. André Luís Marcomini

---

Prof. Dra. Mayra Aparecida Nascimento

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser meu guia e fortaleza em todos os momentos da minha vida.

A minha mãe, Maria Geralda, pelo amor incondicional, apoio e suporte durante a minha formação acadêmica. Por ser inspiração de honestidade e resiliência.

A minha irmã, Francielle, pelos conselhos e amizade.

Aos meus familiares pelo incentivo fundamental durante a graduação.

Ao meu orientador, João Paulo, por todo apoio. Ao CEFET-MG, amigos de curso e professores que contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

A cervejaria Ambev, Filial Minas, em especial ao time da Engenharia, por proporcionar todo o suporte durante o meu período de estágio e incentivo ao meu desenvolvimento. Aos profissionais do JET, time de materiais, por proporcionarem um ambiente de trabalho agradável.

A Afinko Soluções em Polímeros pela parceria e disposição durante o período do trabalho.

## RESUMO

As técnicas de manufatura aditiva aplicadas a estratégia de manutenção industrial têm recebido cada vez mais destaque com o objetivo de suprir as necessidades das empresas relacionadas a custo e confiabilidade. A impressão 3D do tipo modelagem por deposição fundida (FDM) é uma das tecnologias mais populares da categoria e diversas alternativas para otimizar os parâmetros de processo têm sido estudadas a fim de melhorar as propriedades dos polímeros impressos. Neste trabalho, variáveis que influenciam a fabricação de peças por impressão 3D do tipo FDM foram analisadas. Foram produzidos corpos de prova dos polímeros ABS, PETG e PP para ensaio de tração e flexão utilizando filamentos comerciais com diâmetros de 1,75 mm e 2,85 mm. Foram preparadas amostras com densidade de preenchimento (infill) de 20%, 50%, 80% e 100% e padrão de construção triangular com os dois tipos de tamanhos de filamentos. Além disso, foram preparadas amostras de PETG com padrão de preenchimento giróide. Os materiais caracterizados de forma mecânica apresentaram maior interferência do infill para os grupos fabricados com filamento de 1,75 mm e padrão de preenchimento triangular, com cerca de 30% de aumento no módulo de elasticidade variando a mesma proporção na densidade da peça. Os corpos de prova fabricadas em PETG com padrão triangular obtiveram resultados melhores de resistência a tração em comparação com as amostras de padrão giróide com a mesma densidade de impressão. Em flexão, os valores de módulo de elasticidade das amostras giróide com 80% de preenchimento superaram um grupo fabricado com a mesma densidade e padrão triangular. De maneira geral, os resultados obtidos apresentaram valores inferiores de módulo de elasticidade para os materiais PETG e PP quando comparados a referência teórica e valores aproximados para o ABS em condições específicas de impressão, contudo, o trabalho com os parâmetros de processo se mostrou uma alternativa promissora para melhorar a eficiência de peças impressas, aumentando a resistência a tração e flexão, mas também para redução de custos e peso de produtos.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Modelagem por deposição de fundido, parâmetros de impressão 3D, ABS, PETG, PP.

## ABSTRACT

Additive manufacturing techniques applied to industrial maintenance strategy have been increasingly highlighted in order to meet the needs of companies related to cost and reliability. The fused deposition modeling (FDM) 3D printing is one of the most popular technologies in this category and several alternatives to optimize the process parameters have been studied in order to improve the properties of the printed polymers. In this work, variables that influence the manufacturing of parts by 3D printing of the fused deposition modeling type were analyzed. Specimens of the polymers ABS, PETG, and PP were produced for tensile and flexural testing using commercial filaments with diameters of 1.75 mm and 2.85 mm. Samples were prepared with infill density of 20%, 50%, 80%, and 100% and infill pattern of triangular with both types of filaments. In addition, PETG samples with a gyroid infill pattern were prepared. The mechanically characterized materials showed greater interference from the infill for the groups fabricated with 1.75 mm filament and triangular fill pattern, with about 30% increase in modulus of elasticity by varying the same proportion in the density of the part. The specimens fabricated in PETG with triangular pattern obtained better tensile strength results compared to the samples with a gyroid pattern at the same print density. In bending, the modulus of elasticity values of the gyroid samples with 80% fill outperformed a group fabricated with the same density and triangular pattern. Overall, the results obtained showed lower modulus of elasticity values for PETG and PP materials when compared to the theoretical reference and approximate values for ABS under specific printing conditions, however, working with the process parameters proved to be a promising alternative for improving the efficiency of printed parts, increasing tensile and flexural strength, but also for reducing costs and product weight.

Keywords: additive manufacturing, fused deposition modeling, 3D print parameters, ABS, PETG, PP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Princípios dos processos de manufatura aditiva .....	15
Figura 3.2 – Fabricação por filamentos fundidos.....	16
Figura 3.3 – Ciclo da manufatura aditiva .....	18
Figura 3.4 – Processo de impressão por extrusão de material .....	18
Figura 3.5 – Parâmetros de construção para impressão 3D FDM.....	20
Figura 3.6 – Monômeros que formam o ABS .....	23
Figura 3.7 – Fórmula química do PETG.....	24
Figura 3.8 – Fórmula química do PP.....	25
Figura 4.1 – Fluxograma do procedimento experimental .....	27
Figura 4.2 – Parâmetros de impressão: ângulo e padrão de preenchimento.....	30
Figura 4.3 – Corpo de prova tipo I para ensaio de tração .....	32
Figura 4.4 – Corpo de prova ensaio de flexão.....	33
Figura 5.1 – Amostras para ensaio de tração impressas em ABS.....	36
Figura 5.2 – Curvas tensão x deformação das amostras de ABS fabricadas com filamento de 1,75 mm .....	37
Figura 5.3 – Curvas tensão x deformação das amostras de ABS fabricadas com filamento de 2,85 mm. ....	39
Figura 5.4 – Módulo de elasticidade obtido por ensaio de tração de amostras de ABS...	41
Figura 5.5 – Módulo de elasticidade obtido por ensaio de tração do PETG e PP .....	42
Figura 5.6 – Módulo de elasticidade das amostras de PETG .....	43
Figura 5.7 – Curvas tensão x deformação em flexão das amostras de ABS.....	44
Figura 5.8 – Curvas tensão x deformação em flexão das amostras de ABS fabricadas com filamento de 2,85 mm .....	46
Figura 5.9 – Módulo de elasticidade das amostras impressas de ABS .....	48
Figura 5.10– Módulo de elasticidade das amostras de PETG e PP .....	48
Figura 5.11 – Módulo de elasticidade das amostras de PETG .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais parâmetros da impressão 3D.....	19
Tabela 3.2 – Principais propriedades do ABS .....	24
Tabela 4.1 – Características dos filamentos comerciais.....	28
Tabela 4.2 – Propriedades dos filamentos comerciais.....	28
Tabela 4.3 – Perfil de impressão para os filamentos testados .....	30
Tabela 4.4 – Condições de impressão testadas.....	31
Tabela 4.5 – Dimensões do corpo de prova para tração .....	32
Tabela 4.6 – Condições do laboratório durante os ensaios de tração .....	32
Tabela 4.7 – Condições do laboratório durante os ensaios de flexão.....	33
Tabela 4.8 – Condições do ensaio de flexão.....	34
Tabela 5.1 – Análise dimensional dos polímeros impressos .....	35
Tabela 5.2 – Análise dimensional dos corpos de prova impressos para ensaio de tração	36
Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de tração para amostras de ABS de 1,75 mm.....	38
Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de tração para amostras de ABS de 2,85 mm.....	39
Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de tração para amostras de PETG e PP.....	40
Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de flexão para amostras de ABS de 1,75 mm.....	45
Tabela 5.7 – Resultados do ensaio de flexão para amostras de ABS de 2,85 mm.....	46
Tabela 5.8 – Resultados do ensaio de flexão para amostras de PETG e PP .....	47
Tabela 5.10 – Resumo do tempo e custo de impressão por material .....	50
Tabela 5.11 – Resultados do ensaio de flexão.....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno
AMF	Additive manufacturing file format
ASA	Copolímero de acrilonitrila-estireno-acrilonitrila
ASTM	American Society for Testing Materials
B	Largura total mínima
CAD	Computer aided design
CAE	Engenharia auxiliada por computador
CHDM	1,4-Ciclohexanodimetanol
CNC	Controle numérico por computador
D	Distância entre pinças
FDM	Modelagem por deposição de fundida
FFF	Fabricação de filamento fundido
G	Comprimento de calibração
GPa	Gigapascal
I	Espessura do corpo de prova para ensaio de flexão
IGES	Initial graphics exchange specification
L	Comprimento mínimo
$l_0$	Comprimento inicial da amostra
$L_0$	Comprimento total
$L_t$	Comprimento da seção estreita
MA	Manufatura aditiva
MPa	Mega Pascal
PA	Poliamidas
PC	Policarbonato
PDES	Product data exchange specification
PET	Poli (tereftalato de etileno)
PETG	Poli (etilenoglicol-co-ciclohexano-1,4-dimetanol tereftalato)
PLA	Poli (ácido láctico)
PP	Polipropileno
PPi	Polipropileno isostático

PTFE	Politetrafluoroetileno
PU	Poliuretano
PVA	Poli (álcool vinílico)
R	Raio do contorno
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização seletiva a laser
STL	Linguagem padrão de triângulo
T	Espessura
TPU	Poliuretano flexível
W	Largura da seção estreita
$W_0$	Largura total
XML	Extensible markup language
$\Delta l$	Variação do comprimento
$\varepsilon$	Deformação
$\sigma_f$	Deformação sob flexão

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
2.1 Objetivo Geral.....	13
2.2 Objetivos Específicos .....	13
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
3.1 Manufatura aditiva .....	14
3.2 Princípios gerais da modelagem por deposição fundida.....	16
3.3 Parâmetros de impressão.....	19
3.4 Arquitetura das peças impressas por FDM e materiais comumente utilizados .....	20
3.5 Filamento a base de ABS .....	23
3.6 Filamento a base de PETG.....	24
3.7 Filamento a base de PP .....	25
3.8 Aplicação industrial: manufatura aditiva como ferramenta de manutenção.....	26
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
4.1 Visão geral .....	27
4.2 Materiais .....	28
4.3 Métodos .....	29
4.3.1 Fabricação dos corpos de prova por impressão 3D.....	29
4.3.2 Controle dimensional das amostras.....	31
4.3.3 Ensaio de tração .....	31
4.3.4 Ensaio de flexão .....	33
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>35</b>
5.1 Processo de impressão 3D .....	35
5.2 Resultados do ensaio de tração .....	37
5.2.1 Densidade de preenchimento em amostras submetidas a tração.....	40
5.2.2 Padrão de preenchimento em amostras submetidas a tração.....	43
5.3 Resultados do ensaio de flexão .....	44
5.3.1 Densidade de preenchimento em amostras submetidas a flexão.....	47
5.3.2 Padrão de preenchimento em amostras submetidas a flexão .....	49
5.4 Custo dos produtos impressos.....	50
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>52</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, é um processo de fabricação que combina inovação e customização no desenvolvimento de produtos. Considerada por Niemelä et al. (2019), um dos principais avanços tecnológicos para a mudança de paradigma proposta pela indústria 4.0, a técnica compõe a nova visão para as cadeias produtivas, aliada a presença da automação industrial, sistemas ciberfísicos, internet das coisas e a internet de serviços. Afinal, o surgimento e a expansão do conjunto complexo de conceitos da quarta revolução industrial tem impacto significativo na eficiência do sistema produtivo (ROBLEX et al., 2016).

A respeito da tecnologia, criada em 1984 por Charles W. Hull, a primeira impressora 3D foi desenvolvida como uma solução capaz de produzir peças plásticas confiáveis e em menor tempo. Segundo VOLPATO (2017), a manufatura aditiva pode ser definida como uma técnica de adição sucessiva de camadas de material de acordo com informações de um modelo geométrico 3D. A integração dessa técnica com a aplicação de materiais adequados permite a fabricação de geometrias complexas e funcionais. Entre as principais tecnologias de MA, a mais difundida é a modelagem por deposição fundida (FDM - Fused Deposition Modeling), também conhecida como fabricação de filamentos fundidos (FFF - Fused Filament Fabrication) (FOX, 2019; SOLOMAN, 2020).

De acordo com um estudo global realizado em 2020 por iniciativa da empresa Ultimaker, houve um aumento da conscientização das empresas sobre manufatura aditiva em comparação ao ano anterior. Entretanto, conforme as informações da pesquisa, 29% das companhias com potencial para aplicação da impressão 3D desconhecem a capacidade de exploração dessa tecnologia. No país, as instituições brasileiras ainda estão nos estágios iniciais de adoção da impressão 3D. Dentro das organizações, espaços de trabalho cooperativo como makerspaces e FabLabs são destaque para construir e desenvolver ideias (SAVANTA, 2020, WOODSON et al., 2019).

A longo prazo, a manufatura aditiva tende a expandir ainda mais para sustentar o desenvolvimento tecnológico industrial. Conforme levantamento de 2019 da Editora Aranda, o mercado da impressão 3D está crescendo em diversos setores no Brasil. O estudo revela que 54% de fabricantes de produtos plásticos utilizam essa tecnologia para validar seus projetos ou fabricar pequenas tiragens de peças de montagem. Em acordo com o desenvolvimento desse setor, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) regulamentou em 2018 por

meio da NBR ISO/ASTM 52900:2018 os princípios gerais da manufatura aditiva (SOUZA, 2019).

As peças fabricadas por impressão 3D podem ser utilizadas em modelos educacionais, como recursos de montagem e de adaptação, além da possibilidade de utilização em peças funcionais. Neste contexto, a manufatura aditiva se torna uma ferramenta relevante para manutenção industrial, sendo capaz de compor uma estratégia comercial de redução de custos e aumento da confiabilidade de equipamentos e instalações (CAMARGO et al., 2021). Visando a utilização correta dos materiais e a expansão para além das aplicações usuais é necessário mapear os insumos para a técnica e utilizar uma metodologia de seleção de materiais que explore o potencial de uso de um mesmo material ou combinações de materiais existentes (ALGHAMDY et al., 2019).

Diversas alternativas têm sido testadas a fim de obter propriedades ideais de processamento que possibilitam um objeto com alta qualidade desenvolvido por manufatura aditiva. Contudo, ainda são necessários mais estudos relacionados as características dos materiais para impressão 3D, de modo a contemplar uma gama maior de matérias-primas, assim como, pesquisas a respeito do impacto das diferentes variáveis de processo na confiabilidade dos produtos impressos, visando abranger outras configurações ainda não analisadas. (POPESCU et al., 2018; SILVA, 2020).

O presente trabalho propõe configurações de impressão otimizadas dos filamentos comerciais de ABS, PETG e PP com diâmetros de 1,75 mm e 2,85 mm, visando aplicação de componentes impressos como peças de manutenção industrial. Para tanto realizou a correlação da influência das propriedades mecânicas dos materiais com os parâmetros de processo baseados na densidade e padrão de preenchimento, por meio da fabricação por modelagem por deposição fundida.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a influência dos parâmetros de densidade e padrão de preenchimento nas propriedades mecânicas dos polímeros comerciais utilizados na impressão FDM (ABS, PETG e PP), visando a obtenção de parâmetros de processo otimizados e confiabilidade nos produtos impressos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Impressão de peças tridimensionais sob diferentes condições de processamento;
- Caracterizar as propriedades mecânicas das peças impressas por ensaio de flexão e tração;
- Investigar a influência dos parâmetros de impressão sobre as condições de ensaio;
- Determinar configurações de impressão baseadas nos resultados mecânicos e variáveis de impressão 3D (tempo de impressão, custo e quantidade de material).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A norma ISO/ASTM 52900 (2021) define a manufatura aditiva como um processo de união de materiais para construção de objetos a partir de modelos 3D, camada por camada, em contraste com os processos subtrativos. De maneira geral, neste capítulo são abordados um breve histórico da técnica, o princípio de funcionamento da impressão 3D por extrusão, assim como os materiais comumente utilizados e suas caracterizações.

#### 3.1 Manufatura aditiva

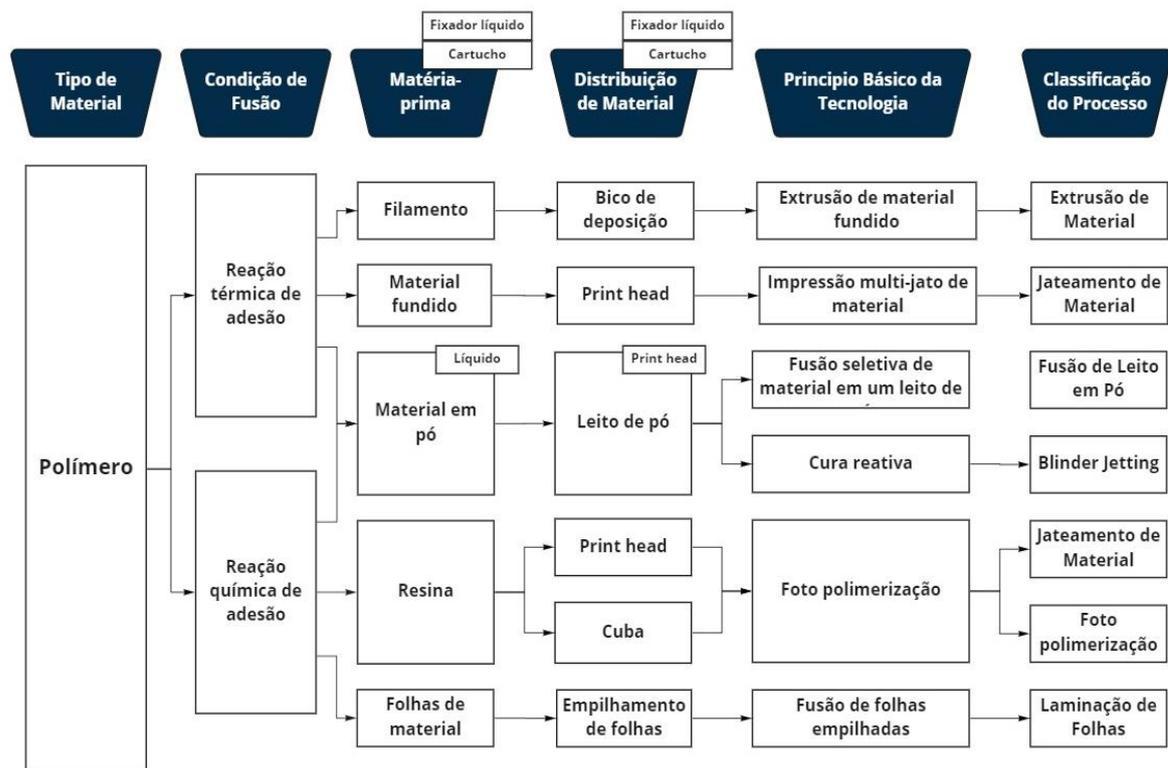
O processo de manufatura aditiva é baseado no fato de que todo objeto pode ser decomposto em diversas camadas e reconstruído com elas, independentemente de sua complexidade geométrica. Como regra, se um componente pode ser fabricado de forma econômica e eficaz utilizando a manufatura convencional, os processos de impressão 3D não são requeridos, em virtude, do custo dos equipamentos e dos insumos para fabricação aditiva. Usualmente, a MA é aplicada para geometrias complexas ou customizadas, baixo volume de produção e quando combinações especiais de propriedades e características são requeridas pelo projeto. (ISO/ASTM 52910:2018 e BRAGA, 2017).

A norma ISO/ABNT 52900:2021 (E) classifica sete categorias de manufatura aditiva:

- a) binder jetting é um processo aplicável quando se requer alta precisão na manufatura, no qual um agente de ligação líquido é depositado seletivamente para unir regiões de um material em pó;
- b) deposição por energia direcionada é um processo em que uma fonte de energia térmica focalizada (por exemplo: laser, feixe de elétrons e arco plasma) é utilizada para unir materiais por fusão à medida que são depositados;
- c) extrusão de material é o processo em que o material é depositado seletivamente por meio de um bocal ou orifício;
- d) na técnica de jato de material, gotículas de material de construção são depositadas seletivamente para formação de um objeto;
- e) a técnica power bed fusion, também conhecido como leito de pó, é o processo no qual a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó;
- f) laminação para manufatura aditiva é o processo no qual, folhas ou lâminas de material são unidas para formar um objeto;
- g) foto polimerização em cuba é o processo de manufatura aditiva no qual uma resina líquida é curada seletivamente através de um feixe direcionado de luz ultravioleta.

O fator determinante para cada processo está na técnica utilizada para união dos materiais. A adição de material pode ter como princípio a fusão, cura, sinterização, entre outros e isto define, por exemplo, a classe de materiais que são possíveis de utilização, afinal diferentes materiais possuem princípios diferentes de adesão e fusão. As principais características dos processos de manufatura aditiva para polímeros estão representadas na Figura 3.1. Destaque para a primeira classificação, por extrusão de material, baseada na extrusão de filamento fundido por um bico de deposição. A norma ISO/ASTM 52900:2015 também exemplifica essa relação para os materiais metálicos, cerâmicos e compósitos. Para fabricação aditiva de um objeto, além do princípio aplicado para união, as propriedades fundamentais dos produtos são influenciadas pelo tipo de material, como essa matéria prima é utilizada e como a máquina de fabricação foi planejada.

**Figura 3.1 – Princípios dos processos de manufatura aditiva**



Fonte: Adaptado de ISO/ASTM 52900:2015.

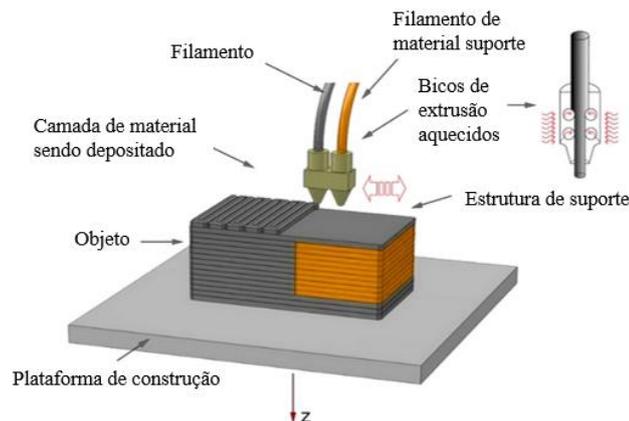
A foto polimerização foi o princípio técnico da primeira patente de manufatura aditiva, depositada pelo americano Charles Hull em 1983. O processo de estereolitografia, também conhecida pela sigla SLA, constitui na formação de um objeto através de um feixe de luz ultravioleta ou um feixe de elétrons que incide sobre uma resina. Desse modo, as camadas do

material de construção reagem formando uma peça com excelente acabamento superficial e boa precisão dimensional. Apesar da tecnologia pioneira para época, atualmente, a técnica mais popular de manufatura aditiva é a modelagem por deposição fundida, principalmente, em virtude da facilidade de utilização e do custo quando comparada aos outros processos da categoria (DI ANGELO et al., 2017, BARNATT, 2016 e LI et al., 2019).

### 3.2 Princípios gerais da modelagem por deposição fundida

O método de modelagem por deposição fundida é um processo de extrusão caracterizado pela deposição seletiva de material, camada por camada, para formação de um objeto. A liberação da licença compulsória da patente de impressão FDM da Stratasys em 2009, influenciou o mercado de impressoras de baixo custo e a popularização da técnica. A fabricação com filamento fundido é uma das tecnologias mais populares da categoria e os equipamentos possuem diferentes configurações mantendo o princípio de funcionamento. A impressão de material pode ocorrer com o efeito de dupla extrusão, ilustrada na Figura 3.2, desse modo, o equipamento tem potencial para combinar dois materiais na construção de uma peça, alternando os bicos ou com a versatilidade de imprimir por apenas um componente. Em dupla extrusão, cada bocal deve funcionar do mesmo modo em que uma impressora com apenas um bico extrusor (CALIGNANO et al., 2020; SILVA, 2020 e WHYMAN et al, 2018).

**Figura 3.2 – Fabricação por filamentos fundidos**



Fonte: Adaptado de CALIGNANO et. al, 2020.

Em um sistema básico FFF, uma bobina de filamento termoplástico é conduzida para o bocal de extrusão, em seguida, o polímero passa por uma pequena câmara onde aquece a uma determinada temperatura, tornando-se um fluido altamente viscoso. Então, o material fundido

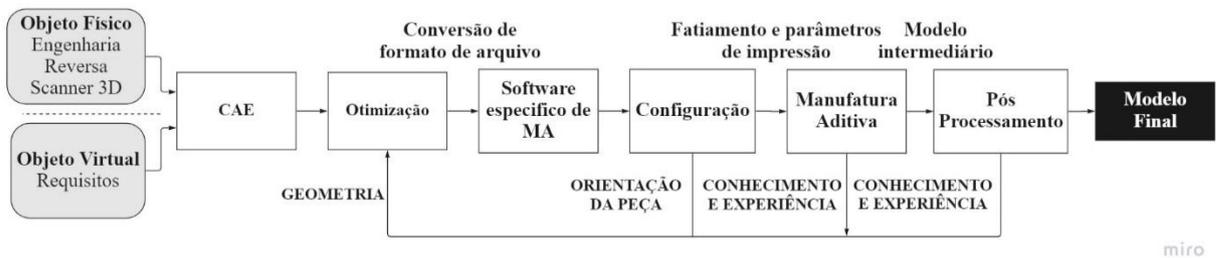
escoará para fora do metal por causa da aplicação de um fluxo de pressão no sistema, e solidifica-se imediatamente após a saída do bocal. O fluxo de material é depositado camada por camada na mesa aquecida conforme modelo definido no software da impressora 3D. A velocidade constante de deslocamento do bico na área de impressão e a pressão estável garantem um processo de extrusão uniforme e conseqüentemente um produto mais preciso (ALI et al., 2016 e MAZZANTI et al., 2019).

Neste processo, a montagem da extrusora é um elemento fundamental, afinal, representa a capacidade da máquina de fornecer a quantidade correta de material ao longo de distâncias variáveis para formar uma peça. Ali et al. (2016) descreve a extrusora das impressoras 3D como um sistema formado por uma extremidade fria, denominada cold end e, uma extremidade quente, hot end. A primeira parte é composta por um motor de passo responsável por movimentar uma engrenagem contra o material e conduzir o filamento para a hot end, onde o polímero com diâmetro de 1,75 mm ou 2,85 mm será aquecido (ALI et al., 2016 e MAZZANTI et al., 2019).

As impressoras podem utilizar extrusoras do tipo direta ou Bowden. A principal diferença entre os dois sistemas é a composição das partes móveis. No primeiro modelo, a extrusora e a hot end formam um único elemento móvel, enquanto, em uma extrusora do tipo Bowden, somente a extremidade quente é móvel, sendo necessário, um cabo flexível para conduzir o filamento do motor fixado no equipamento para a hot end. Em ambos os tipos de extrusão, a hot end pode ser descrita como uma câmara aquecida e controlada por um termopar, com dois orifícios, um para alimentação de filamento e outro para extrusão do polímero fundido. A temperatura no interior do componente deve ser suficiente para fundir o material sem deterioração do polímero. Além da montagem da impressora 3D, a digitalização mecânica do sistema é um componente fundamental de qualquer processo de manufatura por deposição fundida (ALI et al., 2016).

A princípio, a fabricação por impressão 3D requer uma máquina de prototipagem rápida, acesso a softwares de engenharia e de fatiamento, para conversão dos modelos e um scanner, que pode ser substituído por ferramentas de medição manual. A Figura 3.3 apresenta o ciclo da manufatura. A primeira etapa é o modelo 3D desenvolvido em um software de engenharia auxiliada por computador (CAE). Este modelo digital pode ser construído a partir de um objeto físico, utilizando um equipamento scanner 3D ou modelagem manual, tendo como base os conceitos de engenharia reversa. Em seguida, o modelo virtual deve ser convertido para os formatos usados nos processos de fabricação aditiva (GARDAN, 2016).

**Figura 3.3 – Ciclo da manufatura aditiva**

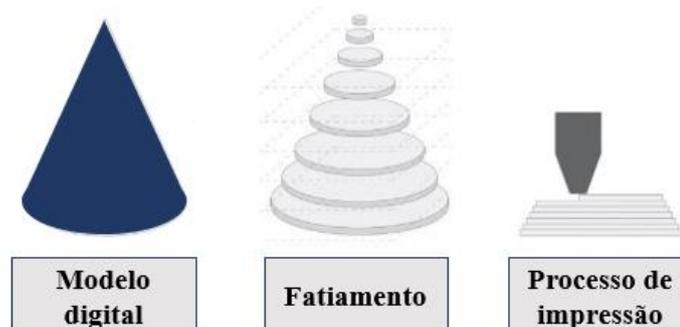


Fonte: Adaptado de GARDAN, 2016.

Outra possibilidade é iniciar o processo com um modelo virtual criado em um software de desenho assistido por computador (CAD). O modelo de geometria continua deve ser transformado em um formato que permita a leitura dos dados nos sistemas de manufatura aditiva, conforme exemplificado na Figura 3.4, como o formato STL (Linguagem Padrão do Triângulo). Nesta configuração, uma casca externa é convertida em uma infinidade de triângulos. Essa forma geométrica é requerida por assemelhar a um vetor pois possui intensidade, direção e sentido e, portanto, possibilita propriedades fundamentais para manufatura. O arquivo no formato STL fornece apenas o contorno do objetivo, portanto, permite a utilização em diversas impressoras 3D, inclusive em softwares abertos como Cura e Simplify3D, para configuração dos parâmetros de impressão como orientação da peça, suporte e temperatura (RODRIGUES et al., 2017, SILVA, 2020 e PESSOA e GUIMARÃES, 2020).

Além do formato STL, a norma ISO/ASTM 52900:2015 (E) regula os arquivos em formato AMF (Additive Manufacturing File Format), XML (Extensible Markup Language), IGES (Initial Graphics Exchange Specification), PDES (Product Data Exchange Specification or Product Data Exchange using STEP) e STEP.

**Figura 3.4 – Processo de impressão por extrusão de material**



Fonte: Adaptado de PESSOA e GUIMARÃES, 2020.

Com a finalidade de encontrar a melhor configuração de processo, o arquivo é transferido para máquina de impressão 3D, sendo possível ajustar alguns parâmetros da peça e informações de processamento, de acordo com o conhecimento e experiência do usuário. Normalmente, a fabricação automatizada do objeto ocorre com pouca supervisão humana, entretanto, em algumas interações o usuário ainda se faz necessário, como na remoção da peça no final do processo. A última etapa, denominada pós-processamento, está diretamente relacionado a aplicação da peça e quais tratamentos adicionais são indispensáveis (RODRIGUES et al., 2016).

### 3.3 Parâmetros de impressão

O processo de manufatura aditiva é influenciado por diversos parâmetros que determinam o resultado da impressão. Diante disso, segundo a norma ISO/ASTM 52910:2018, as principais variáveis de processo são composição do material, diâmetro do bocal/filamento, taxa de alimentação, velocidade de deposição, atmosfera e temperaturas de extrusão e da mesa de impressão. Em síntese, os principais parâmetros podem ser agrupados em três categorias, conforme descrito na Tabela 3.1 (MAZZANTI et al., 2019).

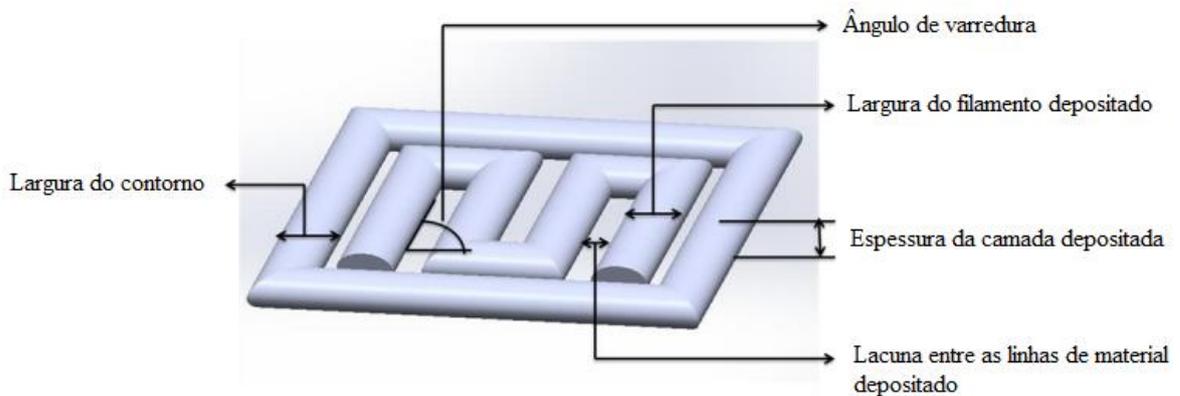
**Tabela 3.1 – Principais parâmetros da impressão 3D**

	<b>Parâmetros</b>	<b>Descrição</b>
<b>Geometria da extrusora</b>	Diâmetro do bico	Tamanho do orifício de saída da extrusora
	Diâmetro do filamento	Tamanho do filamento requerido para extrusão
<b>Processamento</b>	Temp. de fusão	Temperatura do material fundido na saída do bico
	Temp. da placa de aquecimento	Temperatura da superfície da placa
	Velocidade de impressão	Velocidade de deposição de material
<b>Estrutura</b>	Espessura da camada	Espessura da camada depositada
	Geometria de preenchimento	Estrutura interna do componente impresso
	Densidade de preenchimento	Porcentagem de material a preencher o volume aparente do componente
	Número de camadas	Número de camadas depositadas
	Ângulo de varredura	Ângulo entre o material depositado e o eixo x de impressão
	Lacuna de varredura	Distância entre duas linhas de depositado na mesma camada
	Largura de varredura	Largura do material depositado
Padrões	Caminho seguido para deposição de material na mesa de impressão	

Fonte: Adaptado de MAZZANTI et al., 2019.

O diâmetro do bico de extrusão e do filamento pertencem a categoria da extrusora, pois são itens definidos pela geometria deste componente. Velocidade de impressão e temperatura de fusão e da placa de aquecimento são fatores definidos pelo processamento, e conseqüentemente ao material trabalhado. Por fim, normalmente, os fatores referentes a estrutura de construção do objeto, conforme Figura 3.5 são definidos nos softwares das impressoras com uma maior interface com o usuário.

**Figura 3.5 – Parâmetros de construção para impressão 3D FDM**



Fonte: Adaptado de HOSSAIN et al., 2013.

Para obtenção de um produto com qualidade por meio da manufatura aditiva é fundamental entender o efeito dos parâmetros de processo citados. Em virtude das propriedades mecânicas baixas em relação a outras tecnologias tradicionais de processamento de materiais, grande parte das pesquisas na área buscam encontrar configurações ideais para técnica. Entretanto, não existem estudos a respeito de parâmetros ideais para todos os tipos de materiais e objetos, além disso, são poucas as informações sobre a otimização do processo de impressão 3D e o comportamento dos materiais avançados na manufatura aditiva. Desse modo, para garantir uma qualidade comercial adequada dos produtos impressos deve se associar os materiais e suas propriedades com os parâmetros de impressão adequados (CAMARGO et al., 2019; SILVA, 2020).

### **3.4 Arquitetura das peças impressas por FDM e materiais comumente utilizados**

A tecnologia de manufatura aditiva foi originalmente desenvolvida para materiais poliméricos, ceras e lâmina de papel. Em seguida, houve a criação de equipamentos capazes de processar compósitos, cerâmicas e metais. Em comparação com técnicas subtrativas tradicionais, como o torno CNC programado por controle numérico computadorizado, que

produz peças, normalmente, homogêneas e com qualidade previsível, os processos de impressão 3D podem produzir objetos com regiões vazias ou anisotropia de acordo com a orientação da peça na mesa, parâmetros de impressão e como o desenho foi configurado no equipamento (GIBSONN et al., 2015).

A norma ISO/ASTM 52910-2018 identifica alguns pontos de projeto importantes para a fabricação de uma peça por impressão 3D. A respeito do produto, o projetista deve considerar a eficácia do projeto visando otimizar o desempenho e eficiência do objeto. Por exemplo, as peças podem ser configuradas para ter um peso mínimo ou máxima rigidez. As considerações de projeto também devem ser baseadas no ambiente em que o produto será aplicado. Neste contexto, é necessário investigar as condições ambientais como faixa de temperatura de exposição, temperatura de trabalho, exposição a produtos químicos, radiação ou exposição biológica e propriedades relacionadas aos materiais como coeficiente de expansão térmica do material, absorção de líquidos e degradação ou envelhecimento do material. O custo e o tempo de fabricação também são fatores que devem ser considerações para o projeto.

A tecnologia de manufatura por deposição fundida funciona a partir de sistemas de extrusão de filamentos, geralmente, utilizando polímeros termoplásticos ou materiais compósitos. No último caso, os compósitos podem ser formados a partir de uma matriz termoplástica e reforço de nanopartículas cerâmicas ou fibras. Em virtude dos materiais aplicáveis na impressão FFF, configura-se uma extensa gama de possibilidades para aplicações nos setores aeroespacial, médico, automotivo, de bens de consumo e construção civil (SILVA, 2020 e WHYMAN et al., 2018).

Dentre os termoplásticos usados para impressão FDM, se destacam: poli (ácido láctico) (PLA), copolímero acrilonitrila butadieno estireno (ABS), copolímero Acrilonitrilaestirenoacrilonitrila (ASA), poli (etilenoglicolciclohexano1,4dimetanol tereftalato) (PETG), policarbonato (PC), poliuretano (PU) e poliuretano flexível (TPU), poliamidas (PA), polipropileno isostático (PPi), poli (álcool vinílico) (PVA), entre outros materiais comerciais. Apesar da variedade da matéria-prima apresentada, a gama de filamentos disponíveis no mercado ainda é considerada onerosa e restrita para fabricação de produtos funcionais (CARNEIRO et al., 2015 e SILVA, 2020).

Entre os tipos de filamentos apresentados, o PLA é um dos materiais mais populares para os equipamentos baseados em extrusão, em virtude, do baixo custo e facilidade de impressão, visto que, pode ser impresso em baixa temperatura (aproximadamente 210 °C) e

não requer mesa aquecida. Os objetivos impressos neste material, apresentam boa precisão dimensional para os padrões de manufatura FFF, entretanto, é superado pelos outros tipos de filamentos em relação as propriedades mecânicas, o que restringe sua aplicação a protótipos e esforço estático. Em comparação, o composto de ABS é mais um material muito comum no campo da impressão 3D, em virtude do baixo custo e propriedades adequadas para aplicações que exigem resistência ao impacto. Contudo, o copolímero possui contração mais alta que outros materiais, o que exige certos cuidados na hora da impressão, como mesa aquecida e garantir uma boa adesão do conjunto impresso a mesa (JOHNSON e FRENCH, 2018).

Em relação aos materiais avançados aplicados para impressão 3D do tipo FFF, os principais polímeros são: polipropileno (PP) e poliamida (PA). Recentemente, a gama de materiais possíveis de impressão foi ampliada com a possibilidade de processamento pela técnica de blendas poliméricas, materiais cerâmicos, metálicos e compósitos, com destaque para a adição de fibras de carbono e fibras de vidro em matrizes poliméricas para melhorar a performance dos componentes impressos (JOHNSON e FRENCH, 2018 e SILVA, 2020).

Embora, as peças impressas ainda sejam utilizadas em modelos educacionais ou simplesmente como um recurso visual, a fabricação de peças funcionais por manufatura aditiva está ganhando importância em diversos setores. Em virtude disso, cresce a atenção ao projeto das peças, que deve ser capaz explorar da melhor forma as vantagens da tecnologia e reduzir o impacto sobre as limitações do processo. Ademais, é necessário entender o comportamento dos componentes manufaturados, quando submetidos a cargas mecânicas, para prever o desempenho em uma determinada aplicação. As primeiras discussões sobre o tema iniciaram na academia na década de 90, com estudos como de FODRAN et al (1996), que buscaram isolar o efeito dos parâmetros de processo em relação as propriedades mecânicas de objetos fabricados com Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). Desde então, inúmeras pesquisas investigam a influência do processo de manufatura aditiva nas propriedades mecânicas de peças manufaturadas (POPESCU et al., 2018).

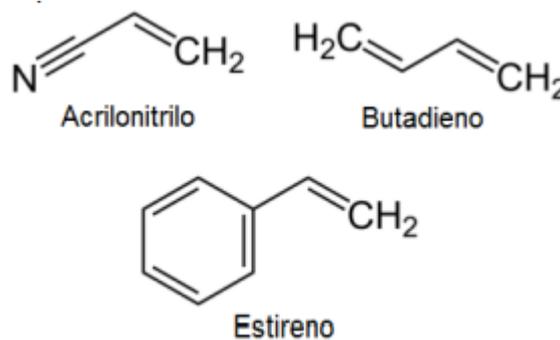
O trabalho desenvolvido por JOHNSON et al (2017) apresentou o efeito da porcentagem de preenchimento sobre a confiabilidade mecânica de amostras impressas nos principais materiais utilizados no processo FDM: PLA, ABS, PETG, PA e ASA, sobretudo em relação ao módulo, alongamento e modo de falha. Outro estudo realizado por CAMARGO et al (2019), indicou uma melhora nas propriedades de resistência a tração, flexão e impacto com o aumento da largura de material depositado em peças produzida com PLA-grafeno. Ademais sobre os impactos na confiabilidade mecânica, KELEŞ et al (2017) relacionaram a tensão

aplicada com a probabilidade de falha em objetos impressos em ABS por meio da distribuição Weibull. Diante do exposto, é evidente a necessidade de mais estudos que relacionem a confiabilidade de produtos impressos com os parâmetros de processamento e que contemplem as propriedades mecânicas, térmicas e reológicas dos materiais (SILVA, 2020).

### 3.5 Filamento a base de ABS

O ABS é um copolímero de estireno obtido por meio da união de três monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno. Cada qual tem seu papel nas propriedades do material, a acrilonitrila proporciona resistência térmica, química e rigidez, o componente elastomérico butadieno proporciona flexibilidade e resistência ao impacto e o estireno é responsável pela fluidez e dureza quando disperso em uma matriz do copolímero de acrilonitrila estireno. Os monômeros que constituem o material são apresentados na Figura 3.6 (MAGALHAES, 2019). O processo mecânico de formação do componente ocorre por meio da polimerização do butadieno que forma o polibutadieno, em paralelo ocorre a copolimerização do estireno com a acrilonitrila. Em sequência, as duas misturas são fundidas no processo de extrusão e se obtém o Acrilonitrila Butadieno Estireno (WIEBECK, 2005).

**Figura 3.6 – Monômeros que formam o ABS**



Fonte: GALINA, 2017.

O ABS é comumente utilizado na indústria automobilística e de eletrodomésticos em aplicações com grandes esforços mecânicos. Tubos do material, por exemplo, são empregados no transporte de fluídos a altas pressões para temperaturas de até 100 °C. O ABS pode ser encontrado na forma de resina, processado por moldagem de injeção, por extrusão, expandido e reforçado com fibras. As principais propriedades do copolímero são apresentadas na Tabela 3.2 (WIEBECK, 2005).

**Tabela 3.2 – Principais propriedades do ABS**

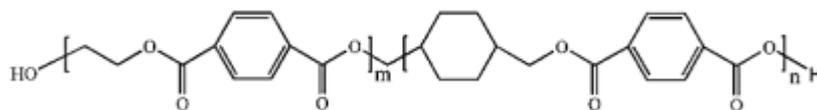
<b>Propriedades</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Tensão de tração na ruptura (MPa)	38 Mpa	58 Mpa
Módulo de elasticidade (MPa)	1900 Mpa	2700 Mpa
Alongamento na ruptura (%)	2%	3,1%
Resistência ao impacto Charpy (kJ/m <sup>2</sup> )	12 kJ/m <sup>2</sup>	36 kJ/m <sup>2</sup>
Densidade acm <sup>-3</sup>	1,02 acm <sup>-3</sup>	1,06 acm <sup>-3</sup>
Fluidez (cm <sup>3</sup> /10min)	2 cm <sup>3</sup> /10min	35 cm <sup>3</sup> /10min
Vicat (B) (°C)	94 °C	112 °C

Fonte: Adaptado de WIEBECK, 2005.

No contexto da manufatura aditiva FDM, o filamento a base de ABS possui excelentes propriedades mecânicas, conforme tabela anterior, um material com baixo peso específico, boa rigidez e resistência. Além disso, possui excelente adesão entre as camadas impressas e estética agradável. Segundo a fabricante Ultimaker (2017), o material é ideal para fabricação de protótipos visuais e funcionais e fabricação de pequenas tiragens. O copolímero é um termoplástico 100% reciclável, fator contribuinte para a questão industrial (MAGALHÃES, 2019).

### 3.6 Filamento a base de PETG

A fórmula química do PETG, poli (etilenoglicol-co-ciclohexano-1,4-dimetanol tereftalato) ou poli (etilenoglicol tereftalato), é apresentada na Figura 3.7. O termoplástico é obtido com a adição do 1,4-ciclohexanodimetanol (CHDM) ao poli (tereftalato de etileno) ou simplesmente, PET. O polímero formado é um termoplástico amorfo utilizado na impressão 3D para produção de objetos com baixa distorção e de fácil processamento, em virtude da boa fluidez (SILVA, 2020).

**Figura 3.7 – Fórmula química do PETG**

Fonte: SILVA, 2020.

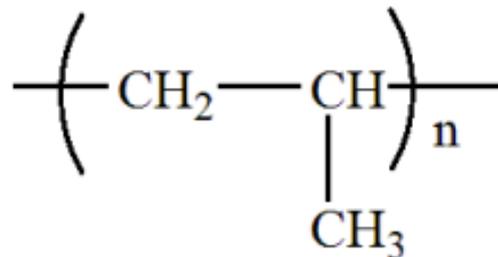
O PETG é um material higroscópico, portanto, os filamentos desse material devem ser armazenados em local livre de umidade para garantir uma boa qualidade de impressão. Por

conter o elemento glicol, o PETG não sofre da fragilidade do PET ao ser aquecido, o que contribui para a sua utilização como matéria prima para o processo FDM. Além disso, fatores como resistência ao desgaste e a corrosão por agentes oxidantes, colaboram para que o PETG se torne objetivo de estudo no contexto da manufatura aditiva (NETO, 2019).

### 3.7 Filamento a base de PP

O polipropileno (PP) é um material classificado como poliolefina, ou seja, um termoplástico formado pela polimerização de unidades de monômeros de olefinas, no caso o PP é obtido por meio da polimerização do propileno. A estrutura química do material é representada na Figura 3.8. O PP comercial é produzido com catalisadores estéreo-específicos e possui predominantemente estrutura isotática, sendo assim, os radicais metila (-CH<sub>3</sub>) ocupam a mesma posição relativa ao longo da cadeia (CANEVAROLO JR, 2002, RODRIGUES, 2018).

**Figura 3.8 – Fórmula química do PP**



Fonte: RODRIGUES, 2018.

Aplicado em diferentes áreas, como embalagens, têxtil, móveis e eletrodomésticos, além de automotivo e aeronáutico, o polipropileno também é um material disponível para a impressão 3D. Entre as vantagens da utilização do material estão alta rigidez e alta temperatura de serviço para um termoplástico commodity. Sua estabilidade dimensional é negativamente afetada em virtude do alto coeficiente de retração. No contexto da manufatura aditiva, o polímero é alvo recente das fabricantes de filamento, em razão, da resistência química e alta resistência à fadiga combinada a baixa densidade (CARNEIRO et al, 2015; SODEIFIAN et al., 2019).

### **3.8 Aplicação industrial: manufatura aditiva como ferramenta de manutenção**

A primeira revolução industrial foi marcada pela mecanização, força hidráulica e máquina a vapor. A segunda revolução pelo uso da energia elétrica com produção em massa e linha de montagem. E a terceira revolução industrial teve como principais pontos pelo computador e automação. No momento, a nova mudança de paradigma envolve a denominada quarta revolução industrial e os sistemas ciberfísicos. O cenário em breve são indústrias 4.0 caracterizadas por três pontos principais: digitalização da produção e automação, além de sistemas para aquisição de dados das linhas de produção e troca automática de dados através da conexão da manufatura em uma cadeia industrial (LASI et al., 2014 e ROBLEK et al., 2016).

Nesse sentido, as companhias têm passado por um processo de modernização para continuarem competitivas no novo modelo industrial, sobretudo apoiados na área de manutenção industrial. Segundo Monchy (1987), o conceito de manutenção está relacionado a garantia da disponibilidade de instalações e equipamentos com confiabilidade, segurança e custos adequados. No cenário atual, esse conceito relaciona-se com a melhoria de produtividade com a redução de custos e dos impactos ambientais, aumento da vida útil dos componentes, além do foco em segurança e confiabilidade (FOFANO et al, 2020; PESSOA e GUIMARÃES, 2020).

Com o objetivo de suprir as necessidades das empresas relacionadas a custos e confiabilidade, as técnicas de impressão 3D ganharam recente destaque para a estratégia de manutenção em diversos meios. A respeito da aplicação da técnica no ambiente industrial, a principal vantagem está na possibilidade de fabricar peças customizadas para atender as necessidades do meio, com redução de custo e tempo de espera, conforme evidenciado no estudo realizado por CAMARGO et al (2021), o qual realizaram uma análise financeira sobre a substituição de um conjunto de peças de uma fábrica de potes de sorvetes para componentes manufaturados e foi constatado uma economia superior a 90% durante oito meses. Entretanto, os pesquisadores não verificaram o comportamento da peça do ponto de vista da confiabilidade mecânica, sendo evidente, a necessidade de estudos também sobre essa ótica dos materiais (GROOVER, 2017 apud CAMARGO et al., 2021).

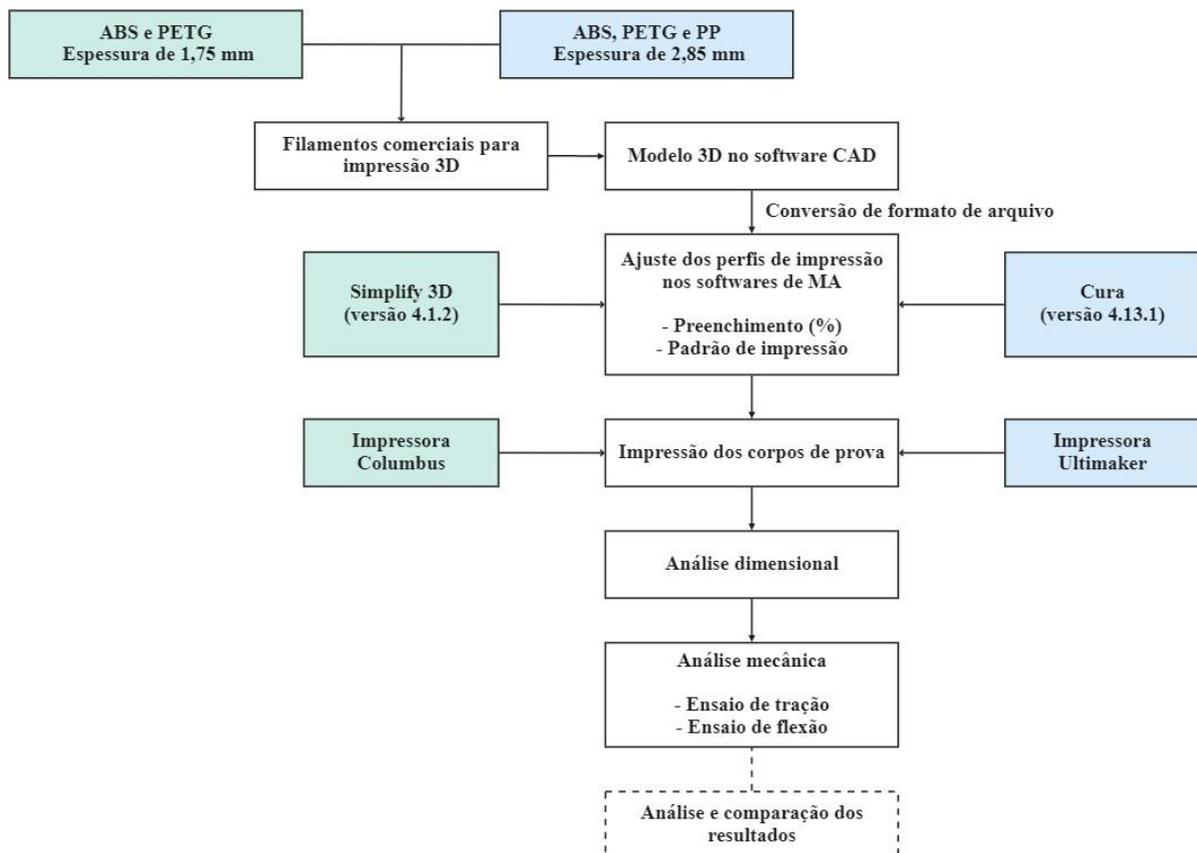
Desta forma, no presente estudo, propõe-se estudar parâmetros de processo para os principais polímeros comerciais aplicados na impressão 3D, por meio da relação da matéria prima com as características de processamento, visando confiabilidade nos produtos impressos. Os materiais e os métodos utilizados encontram-se descritos no próximo tópico.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Visão geral

Uma visão das etapas realizadas durante a execução deste trabalho é resumida no fluxograma da Figura 4.1 e posteriormente detalhada nas próximas seções. Em suma, os filamentos comerciais dos polímeros ABS, PETG e PP com diâmetros de 1,75 mm e 2,85 mm foram utilizados para a fabricação de corpos de prova impressos em dois equipamentos distintos. O processamento dos materiais foi feito com variação da densidade e do padrão de preenchimento por meio dos softwares Cura e Simplify 3D. As amostras foram caracterizadas mecanicamente via ensaio de tração e flexão. A influência das configurações de processo no comportamento mecânico foi avaliada concomitantemente com a relação de custo-benefício dos materiais.

**Figura 4.1 – Fluxograma do procedimento experimental**



Fonte: Próprio autor.

## 4.2 Materiais

Para realização deste trabalho, foram utilizados:

- Filamento composto de Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) da marca Cliever e 3D LAB, com diâmetros de 1,75 mm e 2,85 mm respectivamente.
- Filamento de PETG das empresas 3D LAB e 3DX, com diâmetros de 1,75 mm e 2,85 mm respectivamente.
- Filamento de polipropileno da fabricante Braskem, com nome comercial FL100PP.
- Adesivos para impressão Magigoo.

Os fabricantes e valores de mercado obtidos por cotações realizados no segundo quartil de 2022 são apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Características dos filamentos comerciais**

Material	Diâmetro do filamento (mm)	Fabricante	Cor	Valor (R\$/kg)
ABS	1,75 mm	Cliever	Natural	R\$ 103,26
ABS	2,85 mm	3D LAB	Preto	R\$ 99,80
PETG	1,75 mm	3D LAB	Preto	R\$ 119,80
PETG	2,85 mm	3DX	Preto	R\$ 133,00*
PP	2,85 mm	Braskem	Natural	R\$ 350,00*

\* Valores para 750 g de filamentos. Único tipo de bobina encontrado para cotação.

Fonte: Próprio autor.

Os dados fornecidos pelos fabricantes para os materiais utilizados são apresentados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Propriedades dos filamentos comerciais**

Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Limite de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
ABS	1,0 g/cm <sup>3</sup>	43,3 MPa	2,3 GPa
PETG	1,27 g/cm <sup>3</sup>	65 MPa	3,0 GPa
FL100PP	0,91 g/cm <sup>3</sup>	1470 MPa	1,14 GPa

Fonte: Adaptado de JOHNSON et al, 2018.

## 4.3 Métodos

### 4.3.1 Fabricação dos corpos de prova por impressão 3D

Para fabricação dos corpos de prova foi utilizado duas máquinas de impressão 3D: Columbus da marca Forge e Ultimaker 5S. Em ambas as impressoras, os movimentos lineares XY do cabeçote de extrusão são baseados em um mecanismo de correia nos eixos e os movimentos lineares no eixo Z é realizado pela mesa de impressão com base em um sistema de acionamento. No início de cada impressão, a máquina realiza uma calibração para garantir o nivelamento do cabeçote de extrusão com a mesa.

A máquina de nome comercial Columbus, desenvolvida pela empresa Forge, permite a utilização de bico de impressão com diâmetro de 1,75 mm, enquanto, o equipamento Ultimaker 5S funciona para filamentos de 2,85 mm de diâmetro. O princípio de funcionamento das máquinas é similar. Um trator posicionado fora da câmara de impressão conduz o filamento a temperatura ambiente para a hot end por meio de um tubo de politetrafluoroetileno (PTFE). No cabeçote de impressão, o material aquece até se tornar um fluido altamente viscoso que escoar para fora do bocal.

Para uma adequada fixação das peças impressas, antes do início do processo de manufatura foi utilizado fixadores na mesa do tipo cola adesiva para os materiais ABS e PETG e fixador líquido para o material PP. Além disso, garantiu-se um aquecimento adequado da mesa de impressão e a calibração do equipamento.

O modelo digital dos corpos de prova teste foram criados por meio de um software CAD, de acordo com o tipo I da ASTM D638 para ensaio de tração e a ASTM D790 para ensaio de flexão. Os arquivos salvos nos formatos. STL e .3DMF, foram fatiados em dois softwares diferentes: Simplify 3D (versão 4.1.2) e Cura (versão 4.13.1) para configurações das impressões nas máquinas Columbus e Ultimaker, respectivamente. Em cada programa, utilizou-se o perfil genérico de impressão do material para complementar parâmetros de processo já padronizados, como temperatura do bico e temperatura da mesa, apresentados na Tabela 4.3. Os perfis de impressão utilizados no software Simplify 3D foram fornecidos pelo fabricante da impressora 3D Columbus. Os corpos de prova foram impressos com altura de camada fixada em 0,25 mm com três camadas nas extremidades inferior e superior.

Tabela 4.3 – Perfil de impressão para os filamentos testados

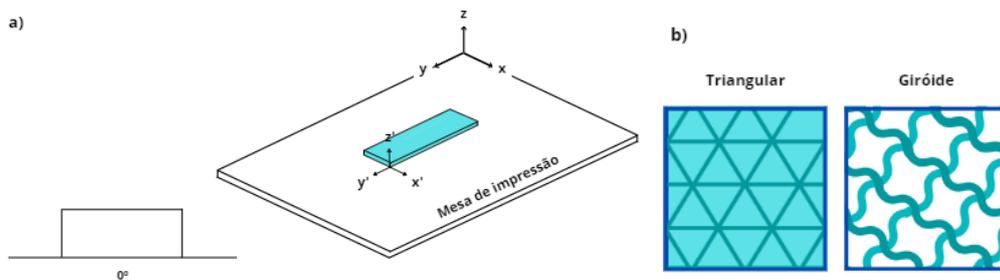
Software de MA	Material	Perfil do material	Temperatura do bico (°C)	Temperatura da mesa (°C)	Velocidade de impressão (mm/s)
Simplify 3D	ABS	Generic ABS	240° C	80° C	41,67 mm/s
Columbus	PETG	Generic PETG	240° C	80° C	41,67 mm/s
Cura	ABS	Generic ABS	245° C	85° C	30 mm/s
	PETG	Generic PETG	240° C	85° C	30 mm/s
Ultimaker	PP	Generic PP	207° C	100° C* 85° C	27 mm/s

\* Temperatura da mesa ajustada em 100° C durante a primeira camada de PP para fixação do adesivo com a peça. Após primeira camada, temperatura da mesa otimizada para 85° C.

Fonte: Próprio autor.

Para fabricação dos corpos de prova com variação da porcentagem de preenchimento e do padrão de impressão em duas máquinas diferentes, com exceção do polipropileno, as velocidades de impressão foram fixadas nas impressoras 3D Columbus e Ultimaker 5S em 41,67 mm/s e 30 mm/s, respectivamente. O filamento de PP foi impresso com velocidade 27 mm/s conforme indicação do fornecedor. As peças foram construídas sobre a mesa de impressão com ângulo nulo, conforme Figura 4.2.a. Os padrões de impressão triângulos, triangular e giróide configurados aos perfis dos materiais são apresentados na Figura 4.2.b. De acordo com as informações dos softwares, o padrão de preenchimento de triângulos fornece maior resistência no caso de carga aplicada perpendicularmente à face do objeto, além de ser indicado para manufatura de peças retangulares finas. Já o padrão giróide é indicado para peças que serão tensionadas de diferentes maneiras.

Figura 4.2 – Parâmetros de impressão: ângulo e padrão de preenchimento



(a) Ângulo de impressão da peça sobre a mesa.

(b) Padrões de preenchimento.

Fonte: Próprio autor.

Desta forma, foram produzidos corpos de prova teste, impressos em diferentes configurações de impressão que são apresentadas na Tabela 4.4. A seleção dos materiais avaliados em cada grupo ocorreu em virtude da disponibilidade da matéria-prima. Os corpos de prova foram confeccionados em impressoras 3D do modelo desktop.

**Tabela 4.4 – Condições de impressão testadas**

<b>Condição</b>	<b>Diâmetro do filamento (mm)</b>	<b>Preenchimento (%)</b>	<b>Padrão de preenchimento</b>	<b>Materiais avaliados</b>
1	1,75 mm	20%	Triangular	ABS
2	1,75 mm	50%	Triangular	ABS e PETG
3	1,75 mm	80%	Triangular	ABS e PETG
4	1,75 mm	100%	Triangular	ABS
5	2,85 mm	20%	Triângulos	ABS
6	2,85 mm	50%	Triângulos	ABS, PETG e PP
7	2,85 mm	80%	Triângulos	ABS, PETG e PP
8	2,85 mm	100%	Triângulos	ABS
9	2,85 mm	50 %	Giróide	PETG
10	2,85 mm	80%	Giróide	PETG

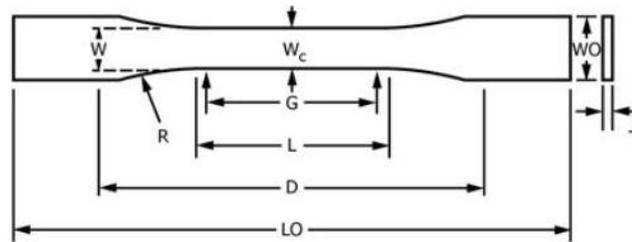
Fonte: Próprio autor.

#### 4.3.2 Controle dimensional das amostras

Os corpos de prova impressos tiveram suas dimensões medidas com paquímetro universal, resolução de 0,05mm, para avaliar as variações dimensionais das peças fabricadas em acordo com as normas utilizadas para caracterização mecânica dos polímeros.

#### 4.3.3 Ensaio de tração

Para a realização dos ensaios de resistência à tração, os corpos de prova impressos em impressoras 3D, foram testados no equipamento universal de ensaios marca INSTRON modelo 23-30 de acordo com a norma ASTM D638:2014. Neste trabalho, foi selecionado o tipo I para modelo de corpo de prova conforme Figura 4.3 e Tabela 4.5, produzido na quantidade mínima de 5 corpos de prova para cada formulação.

**Figura 4.3 – Corpo de prova tipo I para ensaio de tração**

Fonte: ASTM D638, 2014.

**Tabela 4.5 – Dimensões do corpo de prova para tração**

Dimensões		Tipo I (mm)
W	Largura da seção estreita	$13 \pm 0,5$ mm
Lt	Comprimento da seção estreita	$57 \pm 0,5$ mm
WO	Largura total	$19 \pm 6,4$ mm
Lo	Comprimento total	165 mm
G	Comprimento de calibração	$50 \pm 0,25$ mm
D	Distância entre pinças	$115 \pm 5$ mm
R	Raio do contorno	$76 \pm 1$ mm
T	Espessura	$3,2 \pm 0,4$ mm

Fonte: Adaptado de ASTM D638, 2014.

A análise mecânica foi realizada pela empresa AFINKO Soluções em Polímeros. Foi utilizado para os ensaios uma célula de carga de 5000N com a movimentação do cabeçote de 5 mm/min, até a ruptura dos materiais analisados. A distância entre as garras foi de 115 mm. As condições do laboratório foram controladas de acordo com as informações da Tabela 4.6.

**Tabela 4.6 – Condições do laboratório durante os ensaios de tração**

Amostra	Temperatura (° C)	Umidade (%)
ABS	$(24,3 \pm 0,4)^{\circ}$ C	$(49 \pm 2)$ %
PETG	$(24,4 \pm 0,1)^{\circ}$ C	48%
PP	24,3°C	48%

Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos no ensaio foram utilizados para cálculo do módulo de elasticidade, tensão no escoamento, deformação no escoamento, deformação na ruptura e deformação na ruptura e construção das curvas tensão x deformação. A tensão em cada ponto do gráfico é calculada através da razão entre a carga e área de seção transversal do corpo de

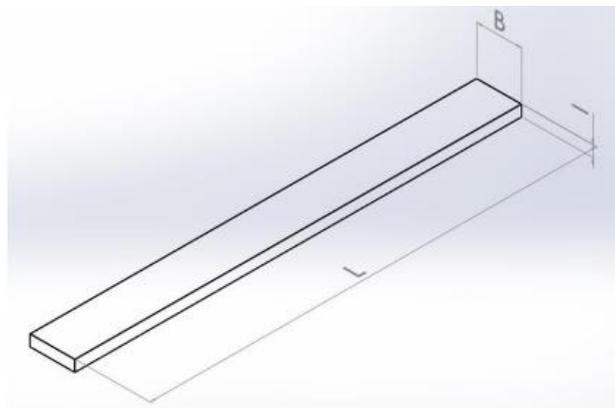
prova. O módulo de elasticidade ou módulo de Young foi obtido pela inclinação da curva a baixas deformações (até 20% de deformação). A deformação foi calculada pela razão entre a variação do comprimento da região útil da amostra e o comprimento inicial da região útil, conforme equação 1, no qual  $\Delta l$  é a subtração entre o comprimento da região no instante (l) e o comprimento inicial da amostra ( $l_0$ ) (CANEVAROLO JR, 2002).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

#### 4.3.4 Ensaio de flexão

Para a realização dos ensaios de resistência à flexão, utilizou-se um sistema para aplicação de carga em três pontos da amostra. As dimensões das peças impressas para o ensaio de flexão em três pontos, conforme norma ASTM D790:2017 estão representadas na Figura 4.4. Os testes foram realizados pela empresa AFINKO Soluções em Polímeros por meio da máquina INSTRON EMIC, modelo 23-30, com célula de carga de 5000N.

**Figura 4.4 – Corpo de prova ensaio de flexão**



Fonte: ASTM D70, 2017.

**Tabela 4.7 – Condições do laboratório durante os ensaios de flexão**

Dimensões		Tipo I (mm)
L	Comprimento mínimo	13 mm
B	Largura total mínima	12,7 mm
I	Espessura	3,2 mm

Fonte: Adaptado de ASTM D70, 2017.

A fim de minimizar interferências do ambiente, durante a realização do ensaio as condições do laboratório foram controladas. As informações das condições de teste apresentada na Tabela 4.8 também contempla a velocidade do ensaio e a distância preestabelecida entre os dois apoios, denominada span.

**Tabela 4.8 – Condições do ensaio de flexão**

Amostra	Condições de ensaio		Condições do ambiente		
	Span (mm)		Velocidade do ensaio (mm/min)	Temperatura (°C)	Umidade (%)
	Mínimo (mm)	Máximo (mm)			
ABS	52 mm	54 mm	(1,4 ± 0,03) mm/min	(22,0 ± 1,1)°C	(49 ± 1) %
PETG	44 mm	52 mm	(1,35 ± 0,1) mm/min	(23,2 ± 0,2)°C	(44 ± 2) %
PP	54 mm	54 mm	1,46 mm/min	(22,5 ± 0,3)°C	43%

Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos no ensaio foram utilizados construção das curvas de tensão x deformação e para cálculo do módulo de elasticidade, módulo secante 1%, tensão à flexão na ruptura e deformação à flexão na ruptura. O módulo de elasticidade é definido como razão entre a tensão de flexão e a deformação correspondente. A tensão de flexão (MPa) foi calculada de acordo com a equação 2, onde P é a carga aplicada (N), L é a distância entre os apoios (mm), b é a largura do corpo de prova (mm) e d, a espessura do corpo de prova (mm). A deformação sob flexão foi calculada pela equação 3, na qual D é a deflexão máxima no centro do corpo de prova. O módulo secante 1% foi calculado por meio da razão de tensão e deformação sob flexão na inclinação de 1% da secante da curva.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3)$$

Para análise estatística, foi produzido a quantidade mínima de 5 corpos de prova para cada condição de processamento avaliada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Processo de impressão 3D

A Tabela 5.1 apresenta os resultados da análise dimensional das amostras por material e ensaio. Além disso, verificou-se a qualidade das peças impressas por meio de inspeção visual através da observação do acabamento dos objetos, adesão das camadas e empenamento. A combinação do adesivo fixador com a ferramenta brim configurada nos softwares de manufatura utilizados, minimizou os efeitos do empenamento sobre o ABS. O PP se mostrou um material de difícil impressão quando comparado ao ABS e PETG, sendo necessário maior atenção quanto ao descolamento da mesa durante o processo, mesmo com a utilização do brim. Verificou-se durante a inspeção visual, a qualidade inferior dos corpos de prova impressos em PP em comparação as outras amostras.

**Tabela 5.1 – Análise dimensional dos polímeros impressos**

Ensaio	Material	Largura (mm)	Espessura (mm)
Ensaio de tração	ABS	(13,06 ± 0,11) mm	(6,95 ± 0,07) mm
	PETG	(13,18 ± 0,35) mm	(6,86 ± 0,19) mm
	PP	(12,53 ± 0,27) mm	(6,80 ± 0,25) mm
Ensaio de flexão	ABS	(13,05 ± 0,08) mm	(3,29 ± 0,06) mm
	PETG	(12,92 ± 0,44) mm	(3,16 ± 0,18) mm
	PP	(12,20 ± 0,19) mm	(3,34 ± 0,03) mm

Fonte: Próprio autor.

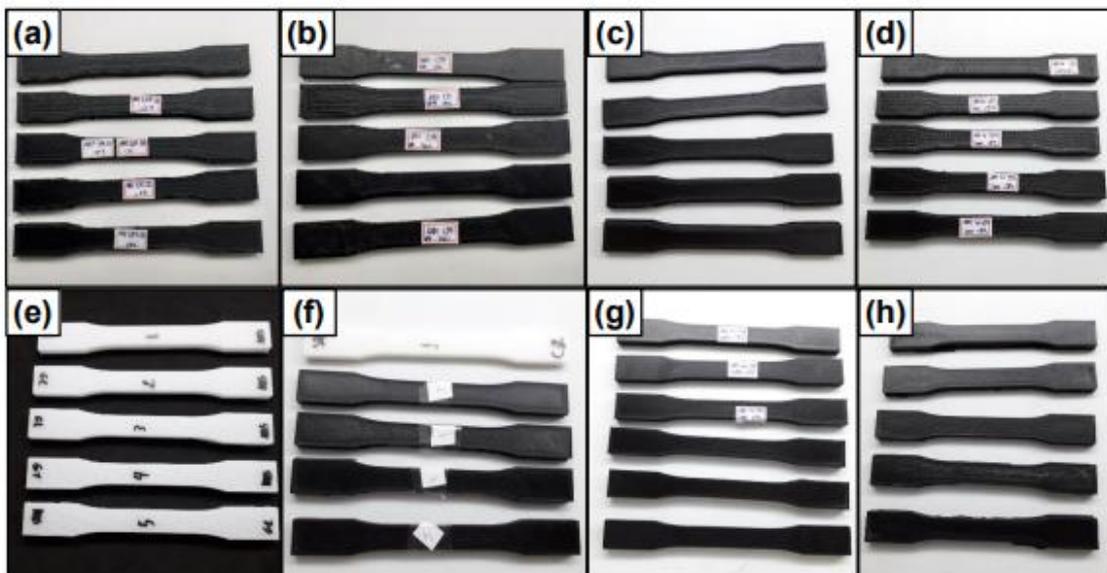
A Tabela 5.2 apresenta os resultados da análise dimensional das amostras por material e máquina. O ABS sofreu maior variação dimensional na impressora Columbus, produção com filamento de 1,75 mm, em comparação com as peças impressas na máquina Ultimaker com filamento de 2,85 mm. Para os filamentos de PETG as maiores variações dimensionais na espessura aconteceram nas peças fabricadas na primeira impressora e na largura dos corpos de prova processados no segundo equipamento. Para maior uniformidade na espessura dos objetos impressos, a velocidade de deposição de material deve ser constante durante o processo, portanto, alteração na velocidade de deslocamento da hot end durante a impressão na máquina Columbus pode ter provocado essa maior dispersão dos valores. Em relação a largura final dos corpos de prova, os principais aspectos relacionados são a largura do material depositado e as lacunas no plano XY entre as camadas depositadas.

**Tabela 5.2 – Análise dimensional dos corpos de prova impressos para ensaio de tração**

Impressora 3D	Material	Largura (mm)	Espessura (mm)
Columbus	ABS	(13,17 ± 0,11) mm	(6,80 ± 0,20) mm
	PETG	(13,53 ± 0,01) mm	(6,70 ± 0,23) mm
Ultimaker	ABS	(13,00 ± 0,04) mm	(7,00 ± 0,02) mm
	PETG	(12,95 ± 0,22) mm	(6,97 ± 0,07) mm
	PP	(12,53 ± 0,27) mm	(6,80 ± 0,25) mm

Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.1 apresenta o aspecto visual de amostras para ensaio de tração produzidas com os filamentos de ABS após a remoção da camada de brim. As figuras 5.1.a a 5.1.d são dos corpos de prova fabricados com filamento de 1,75 mm e padrão de geometria triangular enquanto as figuras 5.1.e a 5.1.h são das amostras produzidas com filamento de ABS de 2,85 mm de diâmetro.

**Figura 5.1 – Amostras para ensaio de tração impressas em ABS**

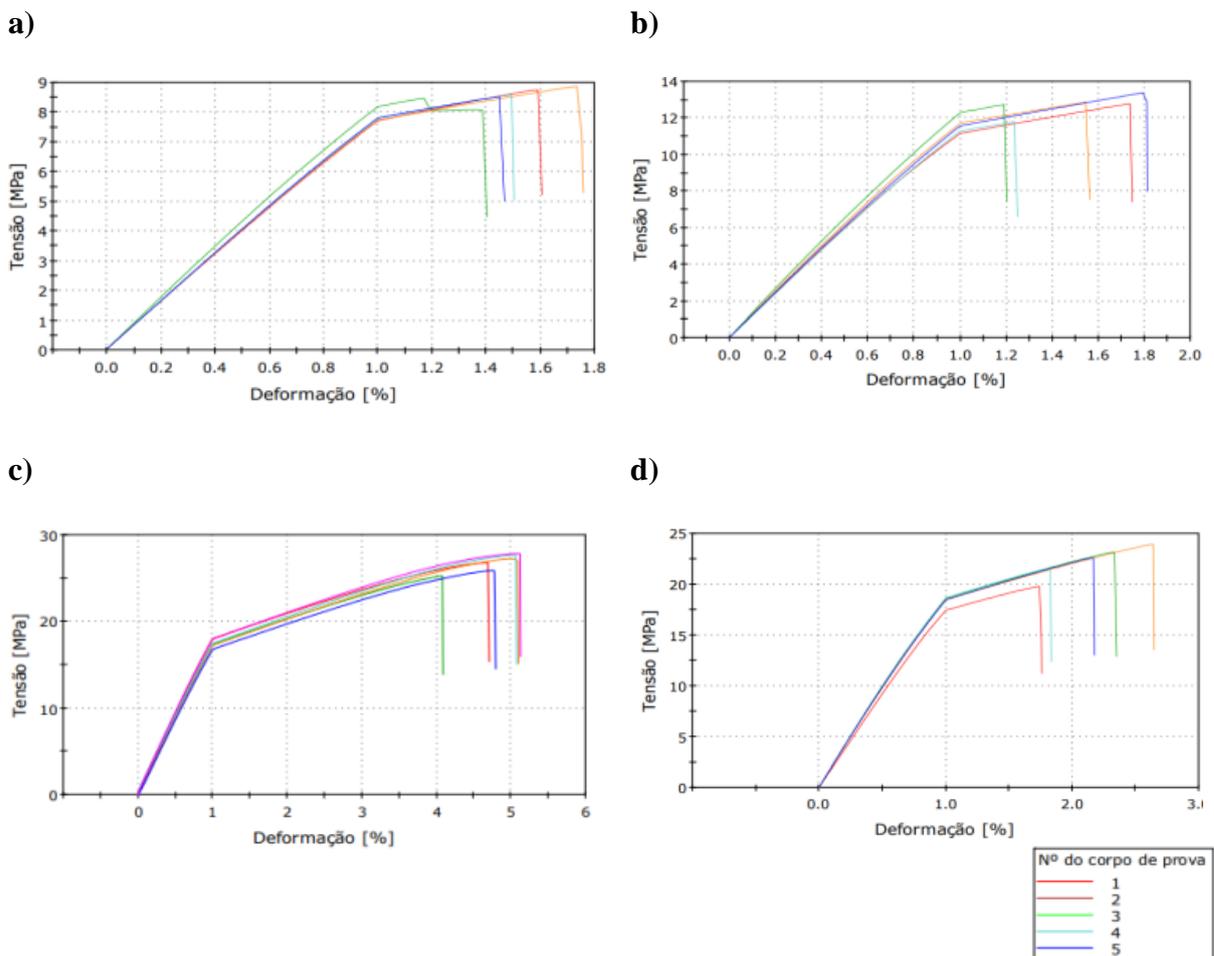
- (a) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 20% de preenchimento (G1ABS).
- (b) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 50% de preenchimento (G2ABS).
- (c) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 80% de preenchimento (G3ABS)
- (d) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 100% de preenchimento (G4ABS)
- (e) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 20% de preenchimento (G5ABS).
- (f) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 50% de preenchimento (G6ABS).
- (g) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 80% de preenchimento (G7ABS)
- (h) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 100% de preenchimento (G8ABS)

Fonte: AFINKO, 2022.

## 5.2 Resultados do ensaio de tração

A análise mecânica por meio do ensaio de tração explicita o comportamento das peças impressas nas diferentes condições propostas. As curvas de tensão em função da deformação das amostras de ABS fabricadas com filamento de 1,75 mm de diâmetro e padrão de preenchimento triangular está apresentada na Figura 5.2.

**Figura 5.2 – Curvas tensão x deformação das amostras de ABS fabricadas com filamento de 1,75 mm**



- (a) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 20% de preenchimento (G1ABS).  
 (b) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 50% de preenchimento (G2ABS).  
 (c) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 80% de preenchimento (G3ABS).  
 (d) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 100% de preenchimento (G4ABS)

Fonte: Adaptado de AFINKO, 2022.

Conforme observado nas curvas geradas, o grupo G3ABS de amostra impressas com 100% de preenchimento apresentou maior valor para módulo de elasticidade (1,98 GPa) entre

as amostras produzidas com filamento de 1,75 mm. Entretanto, no contexto da manufatura aditiva, a existências de vazios oferece ganho em custo de matéria prima e redução do peso, desde que, as propriedades requeridas se mantenham. Neste sentido, os resultados de módulo de elasticidade, tensão e deformação na ruptura para as porcentagens de 20%, 50%, 80% e 100% são apresentados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de tração para amostras de ABS de 1,75 mm**

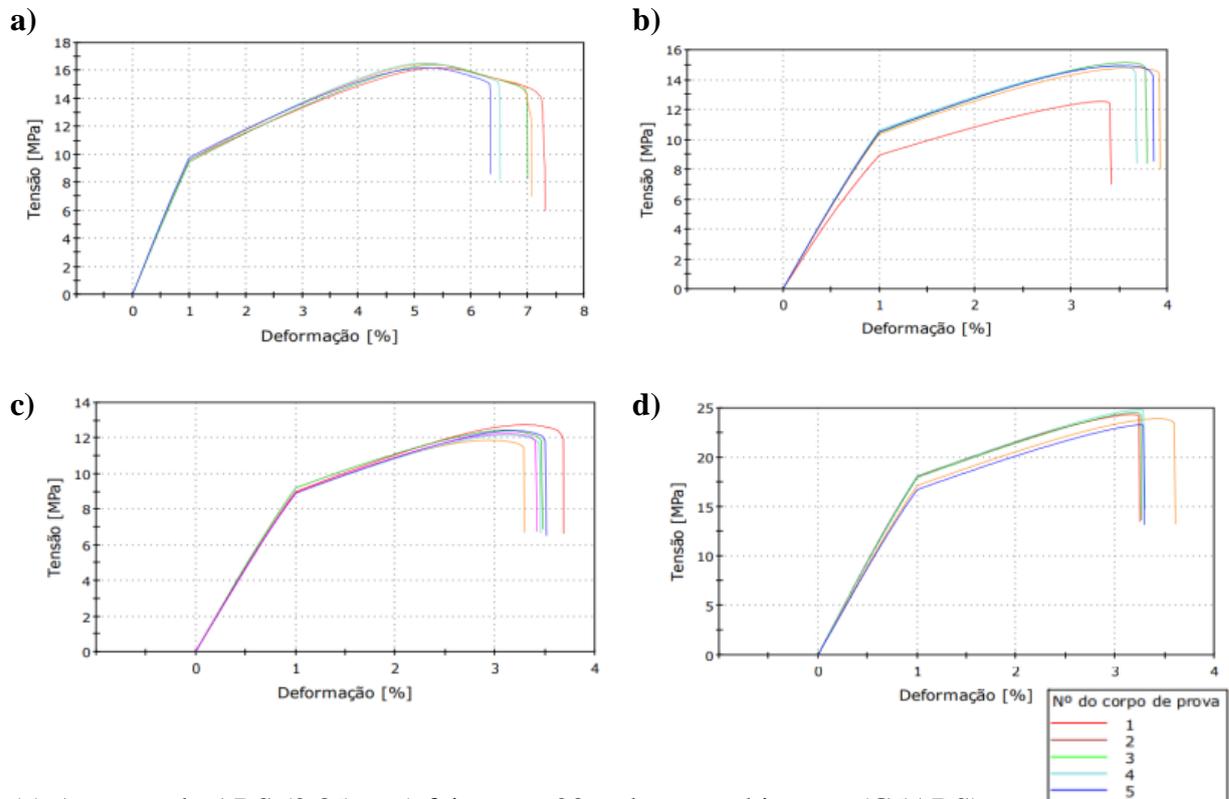
<b>Amostra</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Tensão na Ruptura (MPa)</b>	<b>Deformação na Ruptura (%)</b>
G1ABS	(0,82 ± 0,02) GPa	(8,55 ± 0,03) MPa	(1,53 ± 0,14) %
G2ABS	(1,24 ± 0,05) GPa	(12,71 ± 0,57) MPa	(1,50 ± 0,28) %
G3ABS	(1,81 ± 0,07) GPa	(26,76 ± 1,03) MPa	(4,78 ± 0,39) %
G4ABS	(1,98 ± 0,08) GPa	(22,19 ± 1,61) MPa	(2,14 ± 0,37) %

Fonte: Próprio autor.

Em comparação, o grupo G3ABS, apresentou uma performance aproximada do G4ABS, em módulo de elasticidade (1,81 GPa) e um maior valor de tensão para ruptura (26,76 MPa) do que os grupos G1ABS e G2ABS. Para a condição de impressão do polímero ABS em forma de filamento de 1,75 mm, o aumento de 30% na densidade de preenchimento resultou em um aumento de cerca de 30% no módulo de elasticidade e tensão na ruptura. Além disso, em todas as respostas verifica-se aumento das propriedades com aumento do infill, conforme esperado, pois com maior quantidade de material, espera-se que, em geral, as propriedades mecânicas melhorem.

As curvas de tensão em função da deformação das amostras de ABS fabricadas com filamento de 2,85 mm de diâmetro e padrão de preenchimento triangular estão representadas na Figura 5.3. Conforme esperado o grupo G8ABS, impresso com amostras 100% preenchidas apresentou maiores valores de módulo de elasticidade e tensão na ruptura. Entretanto, para a condição de impressão do filamento ABS de diâmetro 2,85 mm, o aumento na densidade de preenchimento não representou necessariamente melhores propriedades mecânicas, como relatado na Tabela 5.4, em virtude do comportamento do grupo G7ABS, fabricado com amostras de densidade de preenchimento igual a 80% que foi inferior ao esperado. As condições de impressão da amostra e variações ambientes durante a fabricação das amostras possivelmente contribuíram para este resultado, que também será abordado na próxima seção.

**Figura 5.3 – Curvas tensão x deformação das amostras de ABS fabricadas com filamento de 2,85 mm.**



- (a) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 20% de preenchimento (G5ABS).  
 (b) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 50% de preenchimento (G6ABS).  
 (c) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 80% de preenchimento (G7ABS).  
 (d) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 100% de preenchimento (G8ABS)

Fonte: Adaptado de AFINKO, 2022.

Um resumo das propriedades mecânicas obtidas via ensaio de tração para as amostras de ABS fabricadas com filamento de 2,85 mm de diâmetro e padrão de preenchimento triangular estão apresentados na Tabela 5.4 e foram utilizados para construção da Figura 5.4.

**Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de tração para amostras de ABS de 2,85 mm.**

ABS	Módulo Elástico (GPa)	Tensão no Escoamento (MPa)	Deformação no Escoamento (%)	Tensão na Ruptura (MPa)	Deformação na Ruptura (%)
G5	(1,00±0,02) GPa	(16,36±0,16) MPa	(5,26±0,09) %	(14,93±0,24) MPa	(6,72±0,33) %
G6	(1,09±0,05) GPa	(14,46±1,07) MPa	(3,49±0,12) %	(14,31±1,02) MPa	(3,64±0,20) %
G7	(0,95±0,91) GPa	(12,32±0,29) MPa	(3,12±0,12) %	(12,01±0,37) MPa	(3,40±0,09) %
G8	(1,85±0,07) GPa	(24,13±0,68) MPa	(3,27±0,11) %	(24,08±0,54) MPa	(3,30±0,10) %

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 5.5 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de tração realizados em amostras de PETG e PP com padrão de preenchimento triangular. Os corpos de prova de PP foram avaliados utilizando somente filamento com diâmetro de 2,85 mm em virtude das limitações de matéria prima para estudo. Em todos os resultados dos polímeros PETG e PP, para amostras impressas no mesmo equipamento, verifica-se aumento das propriedades mecânicas com aumento da porcentagem de preenchimento em razão da quantidade maior de material na peça que contribui para que, neste caso, maiores tensões fossem necessárias para romper e deformar permanentemente o material.

**Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de tração para amostras de PETG e PP**

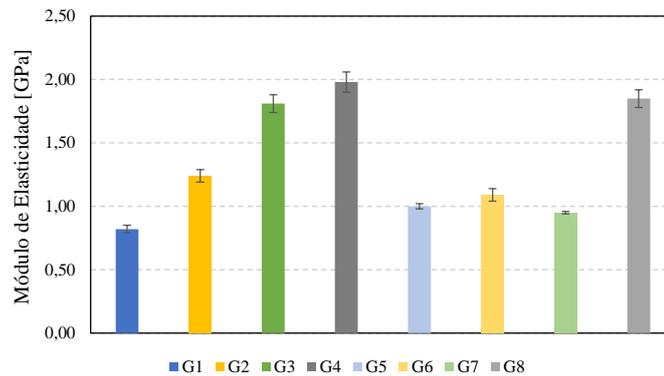
<b>Amostra</b>	<b>Módulo Elástico (GPa)</b>	<b>Tensão no Escoamento (MPa)</b>	<b>Deformação no Escoamento (%)</b>	<b>Tensão na Ruptura (MPa)</b>	<b>Deformação na Ruptura (%)</b>
G2PETG	(0,80 ± 0,02) GPa	(14,98 ± 0,24) MPa	(6,35 ± 0,53) %	(5,92±1,96) MPa	(134,03±37,0) %
G3PETG	(1,74 ± 0,07) GPa	(36,19 ± 5,71) MPa	(7,71 ± 2,36) %	(34,55±4,85) MPa	(8,59 ± 8,59) %
G6PP	(0,25 ± 0,02) GPa	(3,35 ± 0,45) MPa	(9,35 ± 3,69) %	(1,4±0,69) MPa	(91,08± 0,2) %
G7PP	(0,34 ± 0,08) GPa	(4,51 ± 0,30) MPa	(13,76± 0,99) %	(4,05±0,41) MPa	(28,35±8,25) %

Fonte: Próprio autor.

### 5.2.1 Densidade de preenchimento em amostras submetidas a tração

Os resultados do módulo de elasticidade das amostras de ABS impressas com diferentes densidades de preenchimento com padrão de impressão triangular são apresentados na Figura 5.4. O módulo de elasticidade, diretamente proporcional a rigidez do polímero, aumentou com o acréscimo na densidade de preenchimento para as amostras fabricadas com filamento de 1,75 mm. Quanto maior o módulo de elasticidade maior a rigidez do polímero, portanto para as amostras produzidas com filamento de 1,75 mm quanto maior a densidade de preenchimento maior a ridez do polímero ABS impresso. O mesmo comportamento esperado nos materiais fabricados com filamento de 2,85 mm não foi observado.

**Figura 5.4 – Módulo de elasticidade obtido por ensaio de tração de amostras de ABS**



Fonte: Próprio autor.

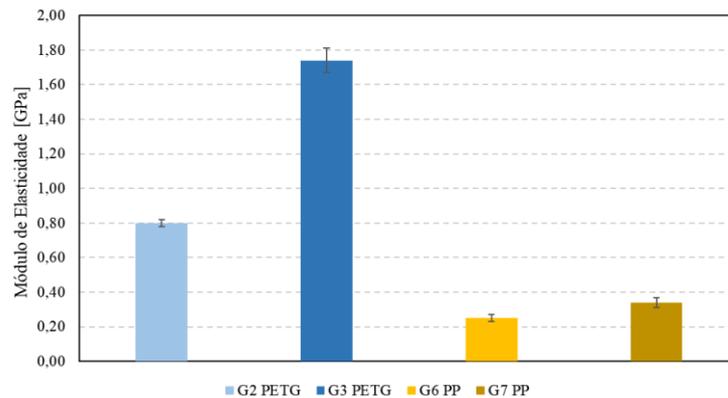
Para os filamentos de ABS com diâmetro de 2,85 mm, o módulo de elasticidade de 0,95 GPa do grupo G7ABS com 80% de preenchimento e padrão triangular foi inferior as amostras com porcentagens de preenchimento de 20% e 50%, grupos G5ABS e G6ABS, respectivamente. Este resultado pode ser devido a variações e defeitos de impressão. Entretanto, neste trabalho os corpos de prova analisados foram produzidos ao mesmo tempo na impressora 3D, com as mesmas condições. Para uma melhor avaliação do resultado, a fabricação individual das amostras iria abranger diferentes condições, entretanto, em virtude de limitações na disponibilidade do equipamento utilizado, a impressão unitária das peças não foi realizada.

Em relação a espessura dos filamentos de ABS utilizado, para os materiais com diâmetro de 1,75 mm, a alteração da densidade de preenchimento representou uma variação de 1,16 GPa entre o grupo G2ABS (módulo de elasticidade de 0,82 GPa) e o grupo G4ABS (módulo de elasticidade de 1,98 GPa). Para as amostras fabricadas com filamento de 2,85 mm, o módulo de elasticidade variou 0,85 GPa entre o grupo G2ABS (1,00 GPa) e o grupo G8ABS (1,85 GPa), indicando menor interferência desse parâmetro sobre os resultados da impressão utilizando o equipamento Ultimaker.

Para os grupos com a menor porcentagem de preenchimento impressa, 20%, o módulo de elasticidade do grupo G6ABS de 1,00 GPa foi superior ao grupo G1ABS de 0,82 GPa, portanto, apenas nesta condição a impressora com filamento de 2,85 mm apresentou resultados vantajosos em comparação ao equipamento que utiliza matéria prima de 1,75 mm.

A mesma avaliação foi realizada para as amostras de PETG e PP, os resultados do módulo de elasticidade é apresentado na Figura 5.5.

**Figura 5.5 – Módulo de elasticidade obtido por ensaio de tração do PETG e PP**



Fonte: Próprio autor.

Para as amostras de PETG, o aumento de 30% na densidade de preenchimento representou um acréscimo no módulo de elasticidade de 0,94 GPa dos grupos G2PETG com 20% de preenchimento para o grupo G3PETG, 50% de preenchimento e módulo de 1,74 GPa. A mesma magnitude do efeito do parâmetro não foi observada nas amostras de polipropileno, assim como para as amostras de ABS desenvolvidas com filamento de 2,85 mm, o parâmetro obteve pouca influência sobre a propriedade analisada com a variação do módulo de elasticidade para o PP foi de apenas 0,09 GPa.

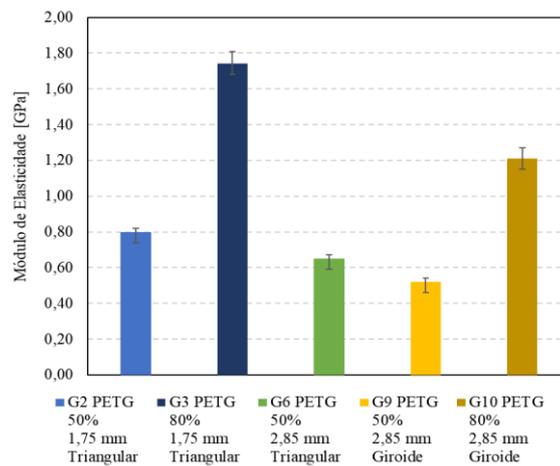
A densidade de preenchimento foi avaliada neste estudo com o objetivo de verificar se para um dado material ou condição o incremento nesse parâmetro afetaria ou não significativamente as propriedades do polímero sobre tração. Sendo assim, verifica-se que apenas o material polipropileno não apresentou respostas significativas ao parâmetro infill.

Além disso, o emprego de duas impressoras com o mesmo princípio de funcionamento para fabricação das amostras foi utilizado para verificar se o efeito do equipamento utilizado nos resultados. Verifica-se que para amostras de ABS fabricadas na impressora Columbus e filamento de diâmetro 1,75 mm as respostas em tração foram mais afetadas pela densidade de preenchimento do que para as amostras impressas no equipamento Ultimaker e filamento de 2,85 mm. Desse modo, as configurações da máquina utilizada para impressão 3D também influenciam nos resultados obtidos, pois, em geral, apesar dos dois equipamentos funcionarem pelo princípio de extrusão do material, as condições associadas a estrutura da impressora 3D variaram durante a impressão, sobretudo calibração da mesa e do bico, velocidade e temperatura do bocal.

### 5.2.2 Padrão de preenchimento em amostras submetidas a tração

Os resultados do módulo de elasticidade das amostras de PETG impressas com padrões de impressão triangular e giróide são apresentados na Figura 5.6. A diferença entre o padrão de impressão triangular do software Simplify 3D e Cura já foi abordada na seção anterior quando comentado sobre as diferenças entre os módulos obtidos utilizando filamento de 1,75 mm e 2,85 mm. Nos dois programas foi configurado o padrão de impressão triangular, afim de diminuir as variáveis específicas de funcionamento para cada máquina. Entretanto, para igualar os métodos de processo, nas duas impressoras foram utilizadas velocidades de semelhantes, resultando em velocidades de impressão um pouco mais elevadas do que o indicado pela fabricante do equipamento Ultimaker.

**Figura 5.6 – Módulo de elasticidade das amostras de PETG**



Fonte: Próprio autor.

As amostras de PETG avaliadas com padrão de impressão triangular obtiveram resultado superior às amostras com padrão giróide nas configurações com 50% e 80% de preenchimento, conforme esperado, pois, de acordo com as informações do software Cura, o desempenho do preenchimento em triângulos fornece maior resistência a peças retangulares e com aplicação de força perpendicularmente. Os valores do módulo de elasticidade para o padrão de preenchimento giróide dobraram com o aumento de 30% da densidade de preenchimento para os grupos G9PETG, módulo de elasticidade igual a 0,52 GPa, e G10PETG com módulo de elasticidade de 1,21 GPa.

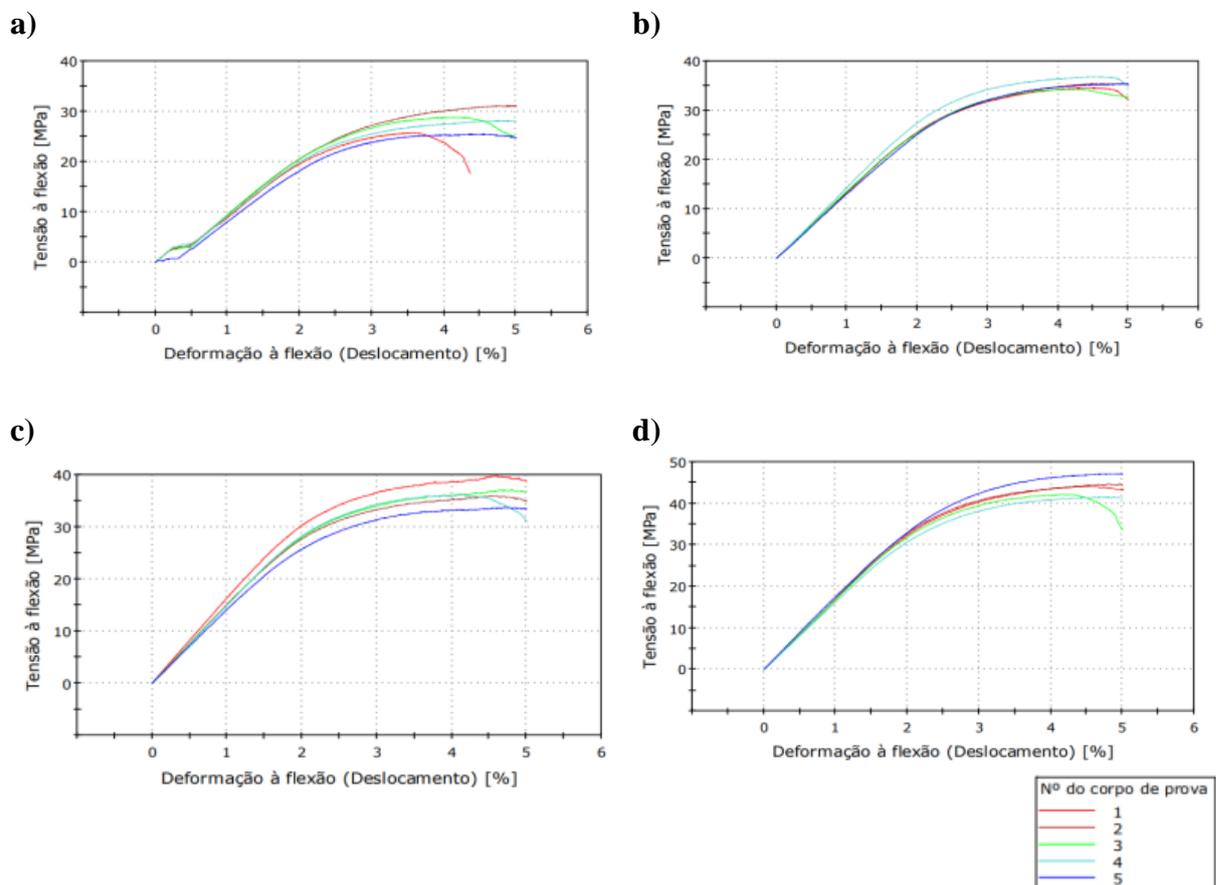
O padrão de preenchimento foi avaliado neste estudo com o objetivo de verificar se a modificação do parâmetro afetaria significativamente as propriedades do polímero sobre tração. Para o PETG, verifica-se diferentes respostas do material sobre as mesmas condições

com padrão triangular e giróide, pois diferentes estratégias na geometria de preenchimento representam, em geral, diferenças nas distribuições e dimensões de vazios no interior das amostras com infill inferior a 100%. Essas diferenças nos vazios no interior das peças foram observadas somente na simulação do software Cura durante a etapa de fabricação dos corpos de prova e foi representada na Figura 4.2.b.

### 5.3 Resultados do ensaio de flexão

As curvas de tensão em função da deformação em flexão dos grupos G1ABS a G4ABS são apresentadas na Figura 5.7.

**Figura 5.7 – Curvas tensão x deformação em flexão das amostras de ABS**



- (a) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 20% de preenchimento (G1ABS).  
 (b) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 50% de preenchimento (G2ABS).  
 (c) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 80% de preenchimento (G3ABS).  
 (d) Amostra de ABS (1,75 mm) feita com 100% de preenchimento (G4ABS)

Fonte: Adaptado de AFINKO, 2022.

**Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de flexão para amostras de ABS de 1,75 mm**

<b>Amostra</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Módulo Secante 1% (GPa)</b>	<b>Tensão à flexão na ruptura (MPa)</b>	<b>Deformação à flexão na Ruptura (%)</b>
G1ABS	(1,17 ± 0,07) GPa	(0,90 ± 0,06) GPa	(27,13 ± 3,01) MPa	(4,53 ± 0,63) %
G2ABS	(1,32 ± 0,06) GPa	(1,35 ± 0,05) GPa	(34,05 ± 1,52) MPa	(4,93 ± 0,10) %
G3ABS	(1,51 ± 0,09) GPa	(1,51 ± 0,08) GPa	(36,08 ± 1,95) MPa	(4,81 ± 0,37) %
G4ABS	(1,69 ± 0,05) GPa	(1,69 ± 0,05) GPa	(41,93 ± 5,07) MPa	-

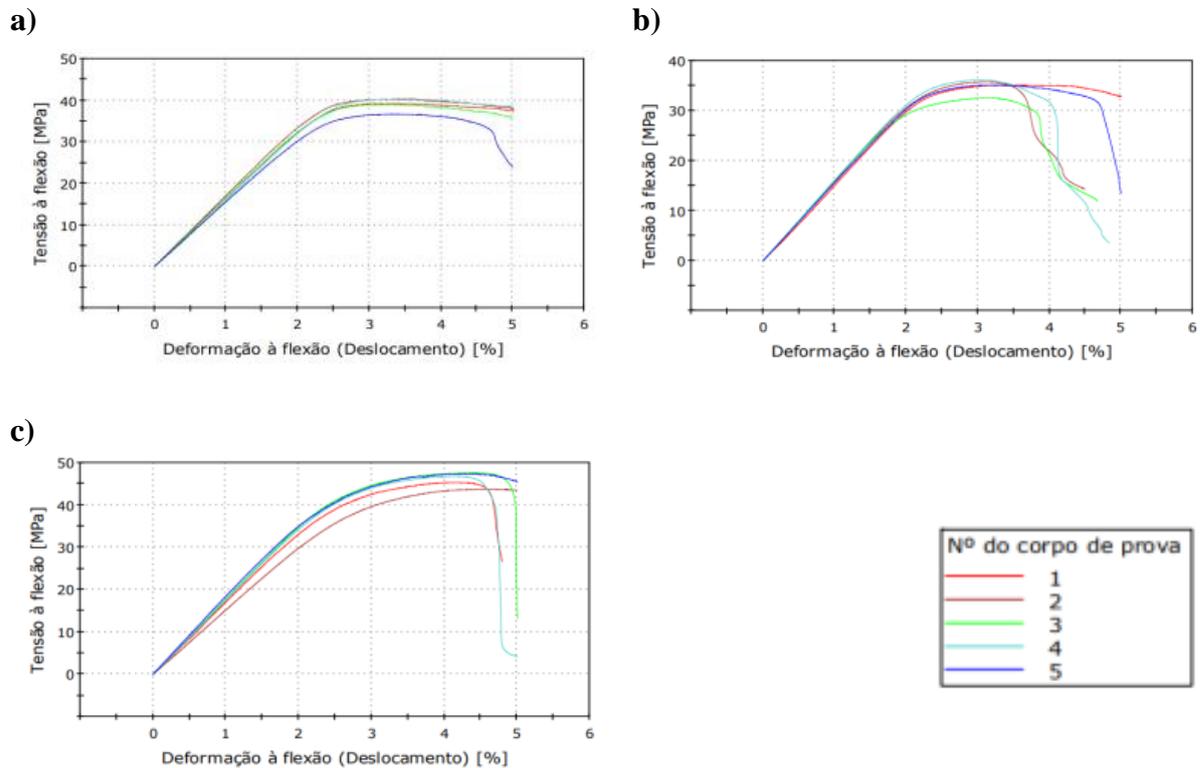
Fonte: Próprio autor.

Durante a realização do ensaio, os corpos de prova 1, 3 e 5 do grupo G3ABS não sofreram ruptura ao atingir a marca de 5% de deformação, conforme observado na Figura 5.7.c. Além disso, na Figura 5.7.d observa-se que o corpo de prova 3 sofreu ruptura antes da marca de 5% de deformação, com 4,22% de deformação.

Para todas as respostas em flexão de amostras impressas em ABS na impressora Columbus verifica-se aumento no módulo de elasticidade e módulo secante 1% com o incremento na densidade de preenchimento, pois o aumento no infill, significa redução de vazios no interior da peça e conseqüentemente maior quantidade de material, portanto, espera-se que, em geral, as propriedades mecânicas melhorem.

Assim como realizado para o comportamento em tração, foram utilizadas duas impressoras para fabricação das amostras em flexão. Os resultados dos grupos de ABS fabricadas com filamento de 2,85 mm no equipamento Ultimaker estão apresentadas na Figura 5.8 e os resultados das propriedades calculadas são apresentados resumidamente na Tabela 5.7.

**Figura 5.8 – Curvas tensão x deformação em flexão das amostras de ABS fabricadas com filamento de 2,85 mm**



- (a) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 20% de preenchimento (G5ABS).  
 (b) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 50% de preenchimento (G6ABS).  
 (c) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 80% de preenchimento (G7ABS).  
 (d) Amostra de ABS (2,85 mm) feita com 100% de preenchimento (G8ABS)

Fonte: Adaptado de AFINKO, 2022.

**Tabela 5.7 – Resultados do ensaio de flexão para amostras de ABS de 2,85 mm**

Amostra	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo Secante 1% (GPa)	Tensão à flexão na ruptura (MPa)	Deformação à flexão na Ruptura (%)
G5ABS	$(1,61 \pm 0,06)$ GPa	$(1,63 \pm 0,06)$ GPa	$(34,76 \pm 6,14)$ MPa	-
G6ABS	$(1,54 \pm 0,06)$ GPa	$(1,57 \pm 0,04)$ GPa	$(34,78 \pm 1,48)$ MPa	$(3,40 \pm 0,38)$ %
G7ABS	$(1,70 \pm 0,13)$ GPa	$(1,72 \pm 0,12)$ GPa	$(45,81 \pm 1,82)$ MPa	$(4,53 \pm 0,29)$ %

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.8.a observa-se que os corpos de prova 2 e 5 do grupo G4ABS sofreram ruptura antes da marca de 5% de deformação, com 4,95% e 3,79% de deformação, respectivamente. Desse modo, para esse grupo não foi calculado a deformação à flexão na

ruptura. Em comparação, os grupos fabricados com filamento de 2,85 mm de diâmetro apresentaram resultados superiores quanto ao módulo de elasticidade e módulo secante 1%. Além disso, com exceção da densidade de preenchimento de 80%, os grupos impressos no equipamento Ultimaker também tiveram maiores tensões à flexão na ruptura.

A Tabela 5.8 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de flexão realizados em amostras de PETG e PP com padrão de preenchimento triangular. Em resumo, verifica-se que o polímero PETG obteve respostas mais significativas com o incremento da densidade de preenchimento do que polímero polipropileno. Ainda assim, para os dois materiais, o aumento do infill representou uma maior quantidade de material e conseqüentemente a redução de vazios no interior do objetivo, resultando, conforme esperado, em melhores propriedades mecânicas em flexão. Além disso, a alteração no diâmetro do filamento e no equipamento de impressão, contribuiu para respostas significativamente diferentes do PETG sobre as mesmas condições de impressão.

**Tabela 5.8 – Resultados do ensaio de flexão para amostras de PETG e PP**

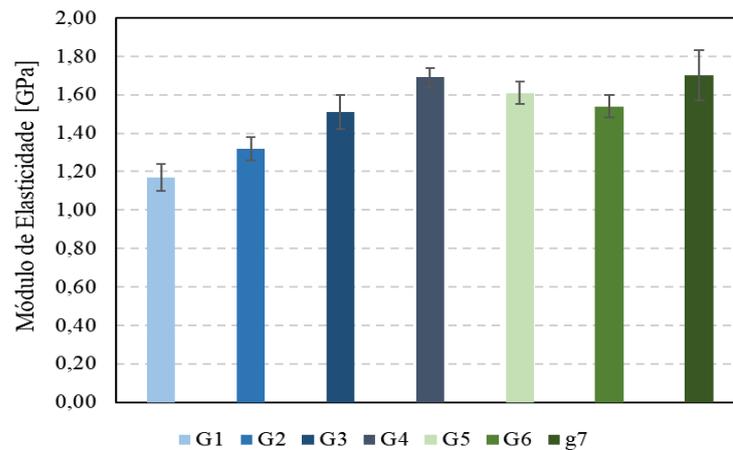
<b>Amostra</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Módulo Secante 1% (GPa)</b>	<b>Tensão à flexão na ruptura (MPa)</b>	<b>Deformação à flexão na Ruptura (%)</b>
G2PETG	(1,05 ± 0,02) GPa	(1,09 ± 0,04) GPa	(33,19 ± 2,04) MPa	(4,26±4,06) %
G3PETG	(1,34 ± 0,06) GPa	(1,38 ± 0,07) GPa	(52,25 ± 2,48) MPa	-
G6PETG	(1,28 ± 0,06) GPa	(1,28 ± 0,05) GPa	(41,14 ± 1,33) MPa	(4,55±0,28) %
G8PETG	(1,78 ± 0,05) GPa	(1,80 ± 0,4) GPa	(45,90 ± 1,26) MPa	(4,23±0,50) %
G6PP	(0,45 ± 0,04) GPa	(0,4 ± 0,04) GPa	(9,31 ± 0,76) MPa	-
G7PP	(0,48 ± 0,02) GPa	(0,43 ± 0,01) GPa	(10,39 ± 0,53) MPa	-

Fonte: Próprio autor.

### 5.3.1 Densidade de preenchimento em amostras submetidas a flexão

Os resultados do módulo de elasticidade obtido através do ensaio de flexão das amostras de ABS impressas com diferentes densidades de preenchimento e padrão de impressão triangular são apresentados na Figura 5.9.

**Figura 5.9 – Módulo de elasticidade das amostras impressas de ABS**

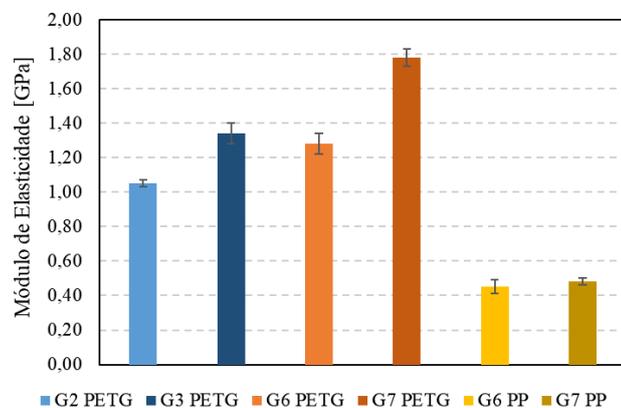


Fonte: Próprio autor.

Verificou-se que para as amostras produzidas com filamento de 1,75 mm quanto maior a densidade de preenchimento maior o módulo de elasticidade, com uma variação de 0,52 GPa entre o grupo G1 20% preenchido e o grupo G4, 100% preenchido. Desse modo, em média acréscimo de 30% de preenchimento respresentou um ganho de 10% no módulo de elasticidade. O mesmo comportamento esperado nos materiais fabricados com filamento de 2,85 mm não foi observado em virtude do grupo G6, que apresentou menor módulo que o grupo G5, apesar da densidade de preenchimento superior.

As amostras de PETG e PP também foram avaliadas quanto ao resultado do ensaio de flexão, conforme Figura 5.10 que apresenta os valores de módulo de elasticidade para diferentes formulações. Verificou-se que para todos os casos analisados, o aumento da densidade de preenchimento resultou em maior módulo de elasticidade.

**Figura 5.10– Módulo de elasticidade das amostras de PETG e PP**



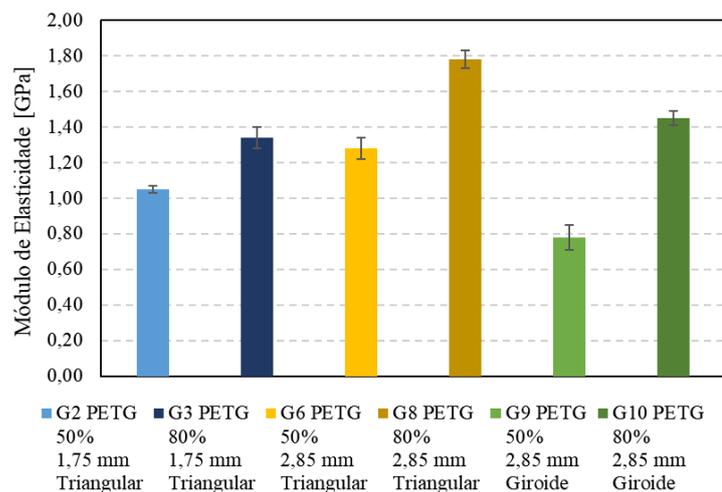
Fonte: Próprio autor.

Para as amostras de PETG, a influência do parâmetro densidade de preenchimento foi mais significativa para os corpos de prova impressos com filamento de 2,85 mm, pois o acréscimo de 30% do infill representou um aumento de 0,50 GPa do módulo de elasticidade entre os grupos G3PETG e G4PETG. A mesma magnitude do efeito do parâmetro não foi observada nas amostras de polipropileno, a densidade de preenchimento obteve pouca influência sobre a propriedade analisada com variação de apenas 0,03 GPa na propriedade.

### 5.3.2 Padrão de preenchimento em amostras submetidas a flexão

Os resultados do módulo de elasticidade das amostras de PETG impressas com padrões de impressão triangular e giróide são apresentados na Figura 5.11.

**Figura 5.11 – Módulo de elasticidade das amostras de PETG**



Fonte: Próprio autor.

A amostras de PETG avaliadas com padrão de impressão triangular obtiveram resultado superior quando comparado o módulo de elasticidade para os produtos com padrão giróide e 50% de preenchimento, conforme observado também nos resultados do ensaio de tração. Em relação aos grupos com 80% de preenchimento, o padrão giróide superou o módulo do grupo G3PETG de amostras fabricadas em padrão triangular com filamento de 1,75 mm, indicando sua utilização quando for requerido resistência a flexão do objeto. Ademais, o grupo G8PETG apresentou maior módulo de elasticidade entre todos os cenários avaliados com resultado de 1,78 GPa e 80% de preenchimento.

Os valores do módulo de elasticidade para o padrão de preenchimento giróide quase dobraram com o aumento de 30% da densidade de preenchimento entre os grupos G9PETG e

G10PETG, portanto, esse padrão de preenchimento foi mais influenciado pela densidade de preenchimento do que o padrão triangular quando analisado o comportamento em flexão.

Assim como para o comportamento em tração discutido na seção 5.2.2, verifica-se diferentes respostas do PETG sobre flexão para as mesmas condições de impressão com padrão triangular e giróide. Para este parâmetro de impressão, os resultados foram influenciados pela distribuição de vazios no interior da peça configurada de forma única para cada tipo de padrão, sendo assim, para uma mesma densidade de preenchimento, o padrão triangular produziu peças com dimensões de vazios interiores diferentes do padrão giróide.

#### 5.4 Custo dos produtos impressos

A Tabela 5.10 apresenta um resumo do tempo e custo de impressão para cada material com base no tempo de processamento de um corpo de prova retangular e nos valores dos filamentos apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 5.10 – Resumo do tempo e custo de impressão por material**

<b>Material</b>	<b>Material</b>	<b>Hora/g</b>	<b>Preço/g</b>
ABS	1,75 mm	00:03	R\$ 0,10
	2,85 mm	00:08	R\$ 0,10
PETG	1,75 mm	00:07	R\$ 0,18
	2,85 mm	00:04	R\$ 0,12
PP	2,85 mm	00:02	R\$ 0,47

Fonte: Próprio autor.

Considerando o tempo de fabricação unitário, uma peça da Figura 4.4 leva em média 26 minutos para ser impressa em ABS e PETG consumindo 6 e 7 gramas de filamento, respectivamente. Os valores mais relevantes de módulo de elasticidade para cada material e o custo de processamento estão representados na Tabela 5.11. As informações foram baseadas nos resultados do ensaio de flexão. Para construção da tabela, não foram considerados os valores para amostras 100% preenchidas a fim de propor uma redução no custo de peças por meio da manufatura aditiva. Os valores para o módulo de elasticidade teórico foram retirados da Tabela 4.2.

**Tabela 5.11 – Resultados do ensaio de flexão**

<b>Amostras</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade teórico (GPa)</b>	<b>Quant. material (g)</b>	<b>Tempo de impressão</b>	<b>Custo do material</b>
G3ABS	(1,51 ± 0,09) GPa	2,3 GPa	7,0 g	00:27	R\$ 0,70
G7ABS	(1,70 ± 0,06) GPa	2,3 GPa	6,0 g	00:51	R\$ 0,60
G3PETG	(1,34 ± 0,05) GPa	3,0 GPa	6,1 g	00: 26	R\$ 1,10
G6PETG	(1,78 ± 0,05) GPa	3,0 GPa	6,0 g	00:51	R\$ 0,72
G7PP	(0,48 ± 0,02) GPa	1,14 GPa	6,0 g	01:16	R\$ 2,82

Fonte: Próprio autor.

Apesar da diferença entre os valores de módulo de elasticidade encontrados neste trabalho e os valores teóricos da propriedade nos materiais, em virtude do baixo custo matéria prima, o processo de manufatura aditiva tem potencial para ser aplicado como ferramenta de manutenção. Conforme os resultados dos ensaios, as propriedades das peças impressas são facilmente modificadas por parâmetros de impressão com destaque para as condições de impressão utilizando densidade de preenchimento entre 50% e 100% para o padrão triangular de construção, com resultados significativos para amostras fabricadas com 80% de infill.

## 6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento de peças impressas é uma alternativa promissora para suprir as necessidades das empresas relacionadas a custos e confiabilidade, portanto, neste trabalho, amostras de ABS, PETG e PP foram fabricadas via impressão 3D a fim de avaliar as propriedades mecânicas dos polímeros. A forma de processamento por manufatura aditiva FDM possibilitou a alteração de diferentes parâmetros de processo e a avaliação da influência dessas variáveis nos materiais estudados.

A análise dimensional das amostras indicou uma maior variação das amostras de ABS fabricadas na impressora 3D Columbus, com filamento de 1,75 mm de diâmetro, em comparação com os resultados da máquina Ultimaker, que opera com filamento de diâmetro de 2,85 mm. Para os grupos impressos em PETG, foi observado maior variação dimensional na espessura das amostras da Columbus e na largura dos corpos de prova processados no equipamento Ultimaker. As diferenças nas medidas dos corpos de prova não impediram a análise mecânica, entretanto, são considerações importantes quando pensamos nas aplicações de peças de reposição que requerem uma precisão dimensional adequada.

Verificou-se por meio de inspeção visual que as amostras de PP, não apresentaram a mesma qualidade de acabamento observadas nas amostras de ABS e PETG. Em virtude da dificuldade de adesão do material a mesa de impressão, provavelmente a adesão das camadas nos corpos de prova também ficou ineficiente.

A densidade de preenchimento foi analisada com o objetivo de verificar se para um dado material ou condição o incremento nesse parâmetro afetaria ou não significativamente as propriedades do polímero sobre tração. Sendo assim, verifica-se que apenas o material polipropileno não apresentou respostas significativas ao parâmetro infill.

A caracterização mecânica por ensaio de tração revelou que para as amostras produzidas com filamento de 1,75 mm quanto maior a densidade de preenchimento maior a rigidez do polímero ABS impresso. Para esta mesma condição de processamento, entre os grupos G2ABS e G3ABS, com 50% e 80% de preenchimento, respectivamente, a maior densidade de material provocou um aumento de cerca de 30% no módulo de elasticidade. Para as amostras impressas com filamento de 2,85 mm de diâmetro foi identificado uma menor interferência desse parâmetro sobre os resultados mecânicos, com acréscimo de cerca de 40% nos valores de módulo com alteração do preenchimento entre os grupos G5ABS e G8ABS.

Os resultados dos ensaios também indicaram que apenas na condição de impressão com 20% de infill, as amostras impressas no equipamento Ultimaker apresentaram resultados

superiores de resistência a tração superiores as amostras fabricadas na impressora 3D Columbus, utilizando filamento de 1,75 mm.

Para as amostras de PETG, analisadas sobre tração, o aumento de 30% na densidade de preenchimento representou um acréscimo no módulo de elasticidade de 0,94 GPa entre os grupos G2PETG e o grupo G3PETG. A mesma magnitude do efeito do parâmetro não foi observada nas amostras de polipropileno.

Com relação a influência da densidade de preenchimento nas amostras submetidas ao ensaio de flexão com padrão triangular, para o filamento de ABS de 1,75 mm, quanto maior a densidade de preenchimento maior o módulo de elasticidade. O mesmo comportamento esperado nos materiais fabricados com filamento de 2,85 mm não foi observado em virtude do grupo G6ABS, que apresentou menor módulo que o grupo G5ABS, apesar da densidade de preenchimento superior. As amostras de PETG e PP também foram avaliadas quanto ao resultado do ensaio de flexão e verificou-se que para todos os casos analisados, o aumento da densidade de preenchimento resultou em maior módulo de elasticidade.

O padrão de preenchimento foi avaliado neste estudo com o objetivo de verificar se à modificação do parâmetro afetaria significativamente as propriedades do polímero. As amostras de PETG avaliadas com padrão triangular obtiveram resultado superior de resistência à tração com relação as amostras com padrão giróide nas configurações com 50% e 80% de preenchimento. Verificou-se diferentes respostas do material sobre as mesmas condições com padrão triangular e giróide, pois diferentes estratégias na geometria de preenchimento representam, em geral, diferenças nas distribuições e dimensões de vazios no interior das amostras com infill inferior a 100%.

No geral, os valores de módulo de elasticidade encontrados neste trabalho foram inferiores aos teóricos da propriedade nos materiais ABS, PETG e PP. Entretanto, conforme indicado na última seção, a técnica de manufatura aditiva oferece baixo custo da matéria prima e diversas possibilidades de impressão. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a densidade de preenchimento afeta consideravelmente o comportamento mecânico de peças impressas, assim como, o padrão de construção e a estrutura da máquina utilizada. Verificou-se resultados significativos para a impressão nas condições de densidade de preenchimento entre 50% e 100% para o padrão triangular, sobretudo em peças com 80% de infill.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudo da influência dos parâmetros de impressão relacionados ao equipamento de impressão e as condições de processamento relacionadas a quantidade e disposição de peças na mesa;
- Avaliar os efeitos da delaminação de camadas e desprendimento do polipropileno depositado na mesa de impressão em função de ajuste no processamento;
- Investigação da vida útil, em condições reais de funcionamento, de uma peça fabricada por manufatura aditiva.

## REFERÊNCIAS

AFINKO, Soluções em Polímeros. Relatório de ensaio: AFK1379/22, AFK1380/22, AFK1381/22. 2022.

ALGHAMDY, Mohammed; AHMAD, Rafiq; ALSAYYED, Basel. Material Selection Methodology for Additive Manufacturing Applications. *CIRP Design Conference* 2019.

ALI, Md.Hazrat; MIR-NASIRI, Nazim; KO, Wai Lun. Multi-nozzle extrusion system for 3D printer and its control mechanism. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v.86, p.999–1010, 2016.

ASTM - American Society for Testing Materials. ISO/ASTM 52900:2021 (E): Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary. 2021.

ASTM - American Society for Testing Materials. ISO/ASTM 52900:2015: Additive manufacturing - General principles – Terminology. 2015.

ASTM - American Society for Testing Materials. ISO/ASTM 52910:2018 (E). Additive manufacturing - Design - Requirements, guidelines and recommendations. 2018.

BARNATT, Christopher. 3D Printing. 3. ed: ExplainingTheFuture.com, 2016.

BRAGA, Luísa Miranda. Manufatura Aditiva: uma análise de aplicações atuais. Orientador: Marcos Venicius S. Pereira. 2017. 55 f. Projeto (Graduação em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017.

BRASKEM S.A. Materiais Braskem para Impressão 3D. Disponível em: <<https://www.braskem.com.br>>. Acesso em: 01 maio 2022.

CALIGNANO, Flaviana; LORUSSO, Massimo; ROPPOLO, Ignanio; MINETOLA, Paolo. Investigation of the mechanical properties of a carbon fibre-reinforced nylon filament for 3d printing. *Machines*. v.8, n.3, p.52, 2020.

CAMARGO, Giulia; BARBOSA, Pedro; ALMEIDA-SANTOS, Fernando. Impressão 3D na manutenção industrial e a redução de custos. *ABCustos*. v.16, n.1, 2021.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnologias e engenheiros. 2 ed. São Paulo: Artiliber editora, 2002.

CARNEIRO, O. S.; SILVA, A. F.; GOMES, R. Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*. v.83, p.768-776, 2015.

DEY, Arup; YODO, Nita. A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. v.3, p.64, 2019.

DI ANGELO, L; DI STEFANO, P; MARZOLA, A. Surface quality prediction in FDM additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v.93, p.3655– 3662, 2017.

FODRAN, Eric; KOCH, Martin; MENON, Unny. Mechanical and dimensional characteristics of fused deposition modeling build styles. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 1996.

FOFANO, Maria Gabriela Seleme; MARQUES, Marcos Augusto Mendes; SILVA, Wiliam de Assis; DROZDA, Fabiano Oscar. Aplicação da metodologia RCM em uma impressora 3D com tecnologia FDM. *Gestão, Inovação e Empreendedorismo*. 2020.

FOX, Bronwyn; SUBIC, Aleksander. An Industry 4.0 Approach to the 3D Printing of Composite Materials. *Engineering*, p. 621 – 623, 2019.

GALINA, Dielyson Martins. Influência da espessura da camada de impressão 3D nas propriedades mecânicas de peças fabricadas com o copolímero ABS. 2017. 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, 2017.

GARDAN, Julien. Additive manufacturing technologies: State of the art and trends. *International Journal of Production Research*. v.54, n.10, p.3118-3132, 2016.

GIBSONN, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. *Springer*. 2 ed. 2015.

GROOVER, Mikell P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Process, and Systems. *New Jersey: John Wiley & Sons*. 4 ed., 2017.

HOSSAIN, Mohammad Shojib; RAMOS, Jorge; ESPALIN, David; PEREZ, Mireya; WICKER, Ryan. Improving Tensile Mechanical Properties of FDM-Manufactured Specimens via Modifying Build Parameters. *International Solid Freeform Fabrication Symposium: An Additive Manufacturing Conference*. Austin, p.380-392, 2013.

JOHNSON, Gabriel A.; FRENCH, Jesse J. Evaluation of infill effect on mechanical properties of consumer 3D printing materials. *Advances in Technology Innovation*. v.3, n.4, p.179-184, 2018.

KELEŞ, Ö., BLEVINS, C.W.; BOWMAN, K.J. Effect of build orientation on the mechanical reliability of 3D printed ABS. *Rapid Prototyping Journal*, v.23, n.2, p.320-328, 2017.

LASI, H.; FETKE, P.; KEMPER, H-G; FELD, T; HOFFMANN, M. *Industrie 4.0. WIRTSCHAFTSINFORMATIK*. 2014.

LI, Hao; ZHANG, Shuai; ZHIRAN, Yi; LI, Jie; SUN, Aihua; GUO, Jianjun; XU, Gaojie. Bonding quality and fracture analysis of polyamide 12 parts fabricated by Fused Deposition Modeling. *Rapid Prototyping Journal*. v.23, 2017. LI, Neng; HUANG, Shuai; ZHANG, Guodong; QIN, Renyao; LIU, Wei; SHI, Gongqi; BLACKBURN, Jon. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. *Journal of Materials, Science & Technology*. v.35, p.242-269, 2019.

LIMA, Ramsés Otto Cunha; MARTINS, Samuel de Oliveira; SOUSA, Kalyude Diógenes de; MEDEIROS, Mayla Alencar. Estudo das propriedades mecânicas de polímeros aplicados em manufatura aditiva em comparação a polímero de aplicação industrial. *Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica*. v.3, n.1, p.35-46, 2021.

BRND WGN. MAGIGOO. Disponível em: <<https://magigoo.com>>. Acesso em: 01 maio 2022.

MAGALHÃES, André Leandro da Rosa. Análise de tenacidade à fratura em ABS por impressão 3D. Orientador: Sergio Henrique da Silva Carneiro. Monografia (Graduação em Engenharia Aeroespacial) - Universidade de Brasília, 2019.

MAZZANTI, Valentina; MALAGUTTI, Lorenzo; MOLLICA, Francesco. FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties. *Polymers*. V.11, p.1094, 2019.

MONCHY, François. A Função Manutenção. *São Paulo: Editora Durban, 1987.*

NETO, Altino Araújo Soares. Extrusora de termoplástico PET para produção de filamentos para impressão 3D: projeto de sistema mecânico. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2019.

NIEMELÄ, Marjo; SHI, Anqi; SHIROWZHAN, Sara; SEPASGOZAR, Samad; LIU, Chang. 3D Printing Architectural Freeform Elements: Challenges and Opportunities in Manufacturing for Industry 4.0. *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. p.1298-1304, 2019.

PESSOA, Sofia; GUIMARÃES, Ana Sofia. The 3D printing challenge in buildings. *E3S Web of Conferences*. v.172, 2020.

POPESCU, Diana; ZAPCIU, Aurelian; AMZA, Catalin; BACIU, Florin; MARINESCU, Rodica. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*. v.69, p.157-166, 2018.

PRICCI, Alessio; TULLIO, Marco D. de; PERCOCO, Gianluca. Analytical and numerical models of thermoplastics: A review aimed to pellet extrusion-based additive manufacturing. *Polymers*. v.13, p.3160, 2021.

REDWOOD, Bem; SCHOFFER, Filemon; GARRET, Brian. The 3D printing handbook: Technologies, design and applications. *Amsterdam: 3D Hubs*, 1 ed., 2017.

ROBLEK, Vasja; MESKO, Maja; KRAPEZ, ALOKZ. A Complex View of Industry 4.0. Universidade de Primorska, Eslovênia.2016. RODRIGUES, Vinícius Picanço; ZANCUL, Eduardo de Senzi; MANÇANARES, Cauê Gonçalves; GIORDANO, Caio Mezzeti, SALERNO, Mario Sergio. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. *Revista GEPROS*. v.12, n.3, 2017.

RODRIGUES, Taynara Tatiane. Polímeros nas indústrias de embalagens. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

SAHARUDIN, Mohd; HAJNYS, Jiri; KOZIOR, Tomasz; GOGOLEWSKI, Damian ZMARZLY, Paweł. Quality of Surface Texture and Mechanical Properties of PLA and PA-

Based Material Reinforced with Carbon Fibers Manufactured by FDM and CFF 3D Printing Technologies. *Polymers*. v. 13,2021.

SAVANTA. 3D Printing Sentiment Index. Ultimaker, 2020. Disponível em: Acesso em: 18 abril 2022.

SILVA, Philipe Augusto Pocidonio. Parametrização reológica do comportamento de blendas autorreparáveis durante o processo de impressão 3D. Orientador: Rodrigo Lambert Oréfica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

SHUTTERSTOCK. Disponível em: <https://www.shutterstock.com>. Acesso em: 05 fev. 2022.

SODEIFIAN, Gholamhossein; GHASEMINEJAD, Saghar; YOUSEFI, Ali Akbar. Preparation of polypropylene/short glass fiber composite as Fused Deposition Modeling (FDM) filamento. *Results in Physics*. v.12, p.205-222, 2019.

SOLOMAN, Sabrie. Additive Manufacturing Technology - 3D Printing & Design. The 4th Industrial Revolution. Nova Iorque, 2019.

SOUZA, Hellen. 3D printing: a growing market in Brazil. 3DR Holdings, 2019. Disponível em: <https://3dprint.com/236228/3d-printing-a-growing-market-in-brazil/>. Acesso em: 18 abril 2022.

ULTIMAKER Support. Materials. Disponível em: < <https://support.ultimaker.com> >. Acesso em: 01 maio 2022.

VOLPATO, Neri (organizador). Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2017.

WIEBECK, Hélio. Plásticos de engenharia. São Paulo: Artliber editora, 2005.

WHYMAN, Sean; ARIF, Khalid Mahmood; POTGIETER, Johan. Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v.96, p.3417–3428, 2018.

WOODSON, Thomas; ALCANTARA, Julia Torres e NASCIMENTO, Milena Silva do. Is 3D printing an inclusive innovation? An examination of 3D printing in Brazil. *Technovation*, p. 80 – 81, 2019.