



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ERISSON JELIEL MENDES PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO TIPO DE PREENCHIMENTO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE
PEÇAS FABRICADAS EM PETG POR IMPRESSÃO 3D**

RUSSAS

2022

ERISSON JELIEL MENDES PEREIRA

AVALIAÇÃO DO TIPO DE PREENCHIMENTO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE
PEÇAS FABRICADAS EM PETG POR IMPRESSÃO 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P49a Pereira, Erisson Jeliel Mendes.
 Avaliação do tipo de preenchimento na resistência mecânica de peças fabricadas em PETG por impressão 3D / Erisson Jeliel Mendes Pereira. – 2023.
 75 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Ciência da Computação, Russas, 2023.
 Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.
1. impressão 3D. 2. manufatura aditiva. 3. tipo de preenchimento. 4. PETG. 5. ensaios mecânicos. I. Título.

CDD 005

ERISSON JELIEL MENDES PEREIRA

AVALIAÇÃO DO TIPO DE PREENCHIMENTO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE
PEÇAS FABRICADAS EM PETG POR IMPRESSÃO 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 29/11/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Joci e Edizon, que sempre se esforçaram para me tornar uma pessoa melhor e acreditaram no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter abençoado eu e minha família em todos os momentos, nos proporcionando uma vida maravilhosa com muita saúde, felicidades e conquistas.

Aos meus pais, Joeci e Edizon, os quais sempre foram exemplos excelentes, que dedicaram todos os seus esforços para me proporcionar o melhor possível, além de amor e carinho em toda minha trajetória.

Ao meu irmão, Jardel, por todo o companheirismo, ensinamentos e conselhos, sempre mostrando a importância da educação.

A minha noiva, Beatriz, que esteve ao meu lado e sempre me ajudou nos momentos de dificuldade, com muita paciência, companheirismo e amor.

A minha tia, Juraci, que mesmo distante, sempre buscou ajudar como podia, demonstrando cuidado e buscando o meu melhor.

A minha avó, Mônica, por ser exemplo de carisma, empenho e persistência para conseguir seus objetivos.

Ao meu tio, Marcos, por todo o auxílio e incentivos durante esse período de formação educacional.

A toda a minha família que serviu de base para eu conseguir atingir meus objetivos, ajudando sempre que possível.

Agradeço aos meus amigos por toda preocupação e busca por tornar meus dias melhores.

Agradeço a todos os meus professores, em especial ao Dr. Pedro Helton, pela orientação, atenção, disponibilidade, paciência e suporte durante o desenvolvimento desse trabalho e no restante da formação acadêmica.

RESUMO

Com o desenvolvimento acelerado da tecnologia, os modelos de fabricação de peças seguiram o fluxo de inovações, como é o caso da manufatura aditiva (MA), com o foco na redução dos desperdícios, do tempo de fabricação e na criação de elementos complexos. O método de fusão por deposição de material (FDM) tornou-se referência na MA, com ênfase no desenvolvimento de peças e protótipos em impressões tridimensionais. Nessa perspectiva, é indispensável o estudo a respeito dos parâmetros de impressão para otimizar o processo de fabricação e obter peças satisfatórias. Dessa forma, o objetivo do trabalho em questão é analisar a influência do tipo de preenchimento na resistência mecânica de peças fabricadas por impressão 3D com o material poli tereftalato de etileno glicol (PETG). Foi realizado um estudo a respeito das propriedades do material, a definição da geometria para fabricação dos corpos de prova, a modelagem, a impressão das peças, as medições necessárias, o ensaio de tração e as análises dos resultados. A análise dimensional, o limite de resistência a tração, o alongamento, a massa e o tempo foram as condições avaliadas para variação nos tipos de preenchimento. Para o estudo dos resultados foi usado o método estatístico de análise de variância (ANOVA). Através da fabricação e ensaio de tração foi verificado que o tipo de preenchimento não exerce influência sobre as dimensões da peça. O limite de resistência à tração foi influenciado pelo padrão interno, uma vez que os espaços vazios se comportam como concentradores de tensão, facilitando o rompimento. Em relação ao alongamento na ruptura, os espaços vazios também tiveram efeito negativo e o comportamento das cadeias moleculares do padrão grade provocaram uma elevada estabilidade ao alongamento com o PETG. Por meio do teste de variância, constatou-se que o tipo de preenchimento tem efeito significativo sobre a massa, em que o tipo ziguezague apresentou maior massa e o subdivisão cúbica a menor, tal fator está associado diretamente a quantidade de material depositado pelo bico extrusor. Outro fator que é influenciado pelo tipo de preenchimento é o tempo, sendo os padrões que apresentam linhas onduladas com maior tempo de fabricação e os que tem linhas retas com tempos menores.

Palavras-chave: impressão 3D; manufatura aditiva; tipo de preenchimento; PETG; ensaios mecânicos.

ABSTRACT

With the accelerated development of technology, parts manufacturing models followed the flow of innovations, as is the case with additive production (AM), with a focus on reducing waste, the pace of manufacturing and the creation of complex elements. The material deposition fusion (FDM) method has become a reference in AM, with an emphasis on the development of parts and prototypes in three-dimensional flowers. From this perspective, it is essential to study printing parameters to improve the manufacturing process and obtain guaranteed parts. Therefore, the objective of the work in question is to analyze the influence of the type of filling on the mechanical resistance of parts manufactured by 3D printing with the material polyethylene glycol terephthalate (PETG). A study was carried out regarding the properties of the material, the definition of the geometry for manufacturing the test specimens, the modeling, the printing of the parts, the precision, the tensile test and the analysis of the results. Dimensional analysis, tensile strength limit, elongation, mass and time were the conditions evaluated for variation in filling types. To study the results, the statistical method of analysis of variance (ANOVA) was used. Through manufacturing and tensile testing, it was verified that the type of filling does not influence the dimensions of the part. The tensile strength limit was influenced by the internal standard, since the empty spaces behave as stress concentrators, facilitating rupture. In relation to elongation at break, voids also had a negative effect and the behavior of standard grade molecular chains caused an increase in tension during elongation with PETG. Through the variance test, it was found that the type of filling has a significant effect on the mass, in which the zigzag type presented the highest mass and the cubic subdivision the lowest. This factor is directly associated with the amount of material deposited by the extruder nozzle. Another factor that is influenced by the type of filling is time, with patterns that have wavy lines taking longer to manufacture and those with straight lines taking less time.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing; type of filling; PETG; mechanical tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Método de Blantner em perfis topográficos.....	17
Figura 2 – Funcionamento da técnica FDM.....	18
Figura 3 – Impressora com código aberto.....	19
Figura 4 – Métodos mais comuns de impressão em três dimensões.....	19
Figura 5 – Procedimento genérico para impressão 3D.....	20
Figura 6 – Peças produzidas por manufatura aditiva.....	21
Figura 7 – Peças em plástico reciclado.....	22
Figura 8 – Presença de estruturas de apoio.....	23
Figura 9 – Braço robótico desenvolvido com o auxílio de uma impressora 3D.....	25
Figura 10 – <i>Cyborg Beast</i>	26
Figura 11 – Carro SLEV produzido por manufatura aditiva.....	27
Figura 12 – Item decorativo em PLA.....	29
Figura 13 – Protetor facial desenvolvido pela Prusa.....	30
Figura 14 – Exemplo de bico de extrusão com variações no diâmetro.....	31
Figura 15 – Influência da altura de camada na qualidade superficial de peças.....	34
Figura 16 – Representação das camadas de uma peça impressa por manufatura aditiva....	36
Figura 17 – Empenamento da peça no contato com a mesa.....	36
Figura 18 – Corpos de prova com 10%, 30%, 50%, 70%, 90% e 100% de preenchimento	
Figura 19 – Corpos de prova com diferentes orientações de preenchimento.....	40
Figura 20 – Impressora GTMAX3D CORE H5.....	41
Figura 21 – Filamento PETG usado nos corpos de prova.....	43
Figura 22 – Adesivo líquido.....	43
Figura 23 – Espátula para auxiliar na remoção dos corpos de prova.....	44
Figura 24 – Escova de aço para limpeza do bico da impressora 3D.....	44

Figura 25 – Tipos de preenchimento usados: a) linhas (CP1); b) grade (CP2); c) triângulos (CP3); d) tri-hexágono (CP4); e) cúbico (CP5); f) subdivisão cúbica (CP6); g) octeto (CP7); h) quarto cúbico (CP8); i) concêntrico (CP9); j) ziguezague (CP10); k) cruzado (CP11); l) cruzado 3D (CP12); m) giróide (CP13).....	47
Figura 26 – Balança eletrônica de precisão	48
Figura 27 – Paquímetro digital	48
Figura 28 – Representação do CP modelado no <i>SolidEdge</i> ® com suas respectivas medidas.....	49
Figura 29 – Tipo de aderência <i>skirt</i> usado para fabricação dos CPs.....	50
Figura 30 – Corpos de prova em processo de impressão.....	50
Figura 31 – Necessidade de acabamento nos CPs nas regiões circuladas.....	51
Figura 32 – Processo de fixação, estrição e rompimento do corpo de prova.....	52
Figura 33 – Corpos de prova impressos para o ensaio de tração.....	53
Figura 34 – Curvas tensão-deformação para todas as combinações e as 1, 2, 5 e 9, separadamente.....	55
Figura 35 – Representação do comportamento das cadeias moleculares de polímeros dúcteis submetidos à tração.....	56
Figura 36 – Amostra dos corpos de prova após o ensaio de tração.....	57
Figura 37 – Região de fratura para o preenchimento concêntrico e cruzado, respectivamente.....	59
Figura 38 – Efeito do tipo de preenchimento sobre o LRT.....	60
Figura 39 – Efeito do tipo de preenchimento sobre o alongamento.....	61
Figura 40 – Efeito do tipo de preenchimento sobre a massa.....	63
Figura 41 – Efeito do tipo de preenchimento sobre o tempo.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do ABS.....	28
Tabela 2 – Principais propriedades do ABS, PLA e PETG.....	32
Tabela 3 – Temperatura da mesa de impressão para o ABS, PLA e PETG.....	37
Tabela 4 – Temperatura de impressão dos principais polímeros de impressão 3D.....	37
Tabela 5 – Descrição e representação dos tipos de preenchimento do <i>Ultimaker Cura</i> ..	38
Tabela 6 – Parâmetros fixos para impressão dos corpos de prova.....	46
Tabela 7 – Dimensões dos corpos de prova com intervalo de confiança de 95%.....	54
Tabela 8 – LRT para CPs fabricados por manufatura aditiva com PETG.....	58
Tabela 9 – Alongamento na ruptura para CPs fabricados com PETG.....	60
Tabela 10 – Massa dos CPs fabricados com PETG.....	62
Tabela 11 – Tempo de impressão dos CPs fabricados com PETG.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bi-Dimensional
3D	Tri-Dimensional
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society For Testing And Materials
CAD	Computer-Aided Design
CPs	Corpos de prova
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição de Materiais
g	Gramas
G-CODE	Código G
MPa	Mega Pascal
LRT	Limite de resistência à tração
LSEV	<i>Low-Speed Electric Vehicle</i>
MA	Manufatura aditiva
min	Minuto
mm	Milímetro
PETG	Poli Tereftalato de Etileno Glicol
PLA	Ácido Poli Láctico
PR	Prototipagem Rápida
s	Segundo
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
STL	Surface Tessellation Language
XEV	<i>X Electrical Vehicle</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Manufatura Aditiva	16
2.1.1	<i>Histórico da manufatura aditiva</i>	16
2.1.2	<i>Fused Deposition Modeling – FDM</i>	18
2.1.3	<i>Procedimento de impressão 3D</i>	19
2.1.4	<i>Vantagens e Desvantagens da impressão 3D</i>	21
2.1.5	<i>Aplicações</i>	24
2.2	Materiais mais comuns na impressão 3D	27
2.2.1	<i>ABS</i>	27
2.2.2	<i>PLA</i>	28
2.2.3	<i>PETG</i>	29
2.2.4	<i>Comparativo das propriedades dos materiais de impressão 3D</i>	31
2.3	Parâmetros de Impressão 3D	32
2.3.1	<i>Diâmetro do bico de extrusão</i>	33
2.3.2	<i>Altura de camada</i>	34
2.3.3	<i>Velocidade de impressão</i>	35
2.3.4	<i>Temperatura da mesa</i>	36
2.3.5	<i>Temperatura de impressão</i>	37
2.3.6	<i>Tipo de preenchimento</i>	38
2.3.7	<i>Nível de preenchimento</i>	40
2.3.8	<i>Orientação de preenchimento</i>	41
3	METODOLOGIA	42
3.1	Recursos para fabricação dos corpos de prova	42
3.1.1	<i>Impressora 3D</i>	42
3.1.2	<i>Filamento para impressão</i>	43
3.1.3	<i>Recursos auxiliares para a impressão dos corpos de prova</i>	43
3.2	Parâmetros de impressão 3D	45

3.2.1	<i>Parâmetros fixos</i>	45
3.2.2	<i>Parâmetros variáveis</i>	45
3.3	Matriz experimental	46
3.4	Procedimento para impressão 3D	47
3.5	Procedimento para ensaio de tração	50
3.6	Instrumentos de medição	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Análise dimensional dos corpos de prova	53
4.2	Resistência à tração	55
4.2.1	<i>Análise visual da fratura dos CPs</i>	57
4.2.2	<i>Limite de resistência à tração</i>	58
4.2.3	<i>Alongamento na ruptura</i>	60
4.4	Massa dos corpos de prova	60
4.5	Tempo de impressão	63
5	CONCLUSÃO	66
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Frente ao crescente desenvolvimento de novas tecnologias e a competitividade no cenário econômico mundial, a busca por métodos e equipamentos para fabricação de peças de forma mais rápida, econômica e sustentável é recorrente tanto no segmento industrial quanto nas demais áreas (SCHWAB, 2019). Sob essa perspectiva, os métodos de Manufatura Aditiva (MA), em especial a Modelagem por Fusão e Deposição de Materiais – *Fused Deposition Modeling* (FDM), estão ascendendo por proporcionar melhorias na qualidade dos produtos, redução de custos e redução de tempo para produção de peças (DA CRUZ FERREIRA, 2016).

No processo de FDM um filamento é aquecido e extrudado em um bico extrusor para a deposição em camadas, seguindo a geometria previamente definida no *software* de modelagem. O filamento se solidifica dando origem a peça projetada. Na maioria dos casos, não é necessária a remoção de material, acarretando na redução de: desperdícios por sobras, etapas complementares de fabricação, moldes e uso ferramentas (STRONG, 2014).

Outro fator essencial para expansão do FDM é a possibilidade de criar uma grande diversidade de geometrias de forma rápida. Nessa perspectiva, o processo de fabricar peças em impressoras 3D está em crescente evolução no mercado com o uso na medicina, na industrial automobilística, na educação, na robótica e em itens decorativos, por exemplo (FERNANDES, 2016).

Ao avaliar os principais polímeros que são usados no FDM, tem-se o poli tereftalato de etileno glicol (PETG), o qual é recente no mercado, porém reúne características do acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e do poliácido láctico (PLA) como alta resistência a tração, elevada ductilidade, facilidade na impressão, boa resistência térmica e química, grande resistência ao desgaste, à corrosão, à agentes oxidantes e à umidade (FREY, 2021; ALZHRANI, 2017).

Os parâmetros de impressão são essenciais para definir as propriedades mecânicas e geométricas de peças produzidas por MA. O diâmetro do bico de extrusão, a altura de camada, a velocidade de impressão, a temperatura da mesa, a temperatura de impressão, o tipo, nível e orientação de preenchimento, material usado e o tipo de impressora são algumas das variáveis para seleção das condições ideais para a aplicação desejada. No entanto, o PETG ainda apresenta poucos estudos a respeito da significância desses parâmetros em suas propriedades mecânicas e estruturais.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência do tipo de preenchimento nas dimensões, na resistência a tração, no alongamento na ruptura, na massa e no tempo de impressão de corpos de prova impressos com o PETG.

1.1 Objetivos

Os objetivos foram divididos em objetivos gerais e específicos para auxiliar na organização e compreensão do trabalho em questão. Em que o primeiro aborda a ideia geral do estudo e o segundo as premissas para alcançar o objetivo principal.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos do tipo de preenchimento na resistência à tração de peças fabricadas por impressão 3D com o filamento PETG.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos essenciais para alcançar o objetivo geral do trabalho em questão são compreendidos por:

- Avaliar os parâmetros gerais de impressão 3D do PETG;
- Avaliar a influência dos tipos de preenchimento nas medidas de uma peça;
- Avaliar a influência dos tipos de preenchimento no LRT;
- Avaliar a influência dos tipos de preenchimento no alongamento;
- Avaliar a influência dos tipos de preenchimento na massa;
- Avaliar a influência dos tipos de preenchimento no tempo de impressão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nos tópicos a seguir será abordado um pouco sobre manufatura aditiva, os materiais mais comuns na impressão 3D e os principais parâmetros de impressão 3D.

2.1 Manufatura aditiva

Os processos de fabricação podem ser realizados de diversas formas como fundição, remoção e/ou adição de material. O custo-benefício, o tipo de material, a aplicação da peça, as condições do ambiente e do trabalho são alguns parâmetros que vão auxiliar na escolha do método mais adequado para fabricação.

Um método que está evoluindo constantemente é a impressão em três dimensões/tridimensional (3D), que consiste em fabricar objetos pela deposição de material, por meio de um bico, bocal ou cabeça de impressão. Outro termo associado à impressão 3D é manufatura aditiva (MA), o qual representa o processo de fabricação adicionando camada por camada de material a partir de uma geometria tridimensional (ISO/ASTM52900, 2018).

Mesmo que MA tenha um sentido mais amplo que impressão 3D, ambos os termos são empregados em diversas literaturas como sinônimos e são comumente usadas, ainda, como: prototipagem rápida, fabricação de forma livre, manufatura instantânea, manufatura digital direta, manufatura acrescentando material, manufatura de bancada, manufatura rápida, manufatura por camada (VOLPATO, 2017).

2.1.1 *Histórico da manufatura aditiva*

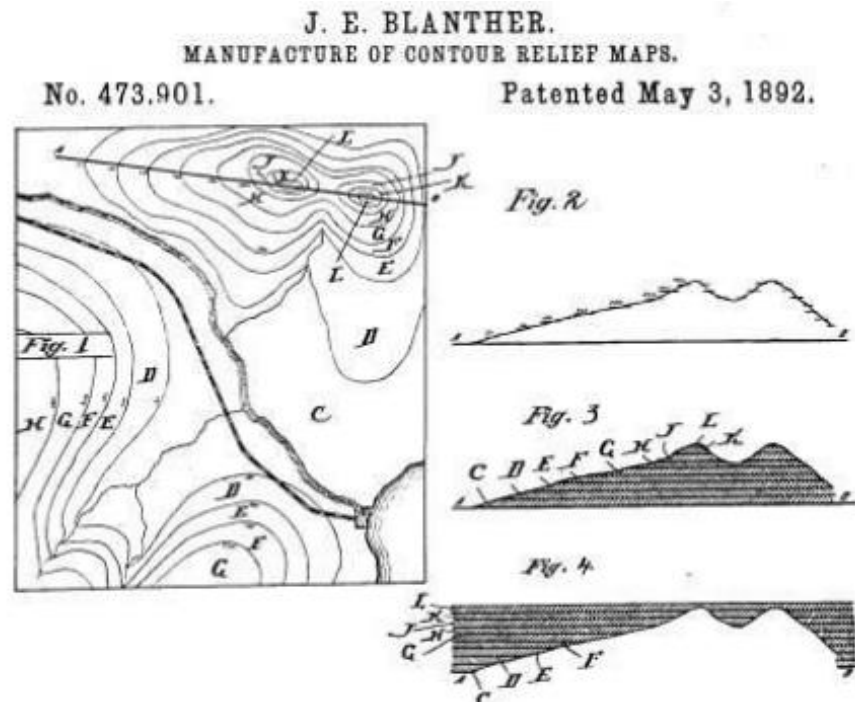
O princípio de construção baseado na sobreposição de material tem registro desde as pirâmides egípcias, nas quais blocos eram empilhados gradativamente na altura e formato desejado. Além do conhecimento dos egípcios, a fotoescultura e a topografia foram essenciais para os avanços atuais da impressão 3D (VOLPATO, 2017).

Em 1860 o francês François Willème foi responsável por desenvolver a fotoescultura. Essa técnica consiste em fotografar um objeto completamente com 24 câmeras espaçadas por 15°, com o auxílio de um pantógrafo. Após esse registro em 360°, cada foto era usada para usinar um bloco de material desejado e esculpir o objeto (BRAGA, 2017).

Posteriormente, em 1892, a técnica do francês foi aperfeiçoada na topografia com a elaboração de perfis topográficos de relevos, por J. E. Blather. Nesse processo, diversas placas de cera foram suavizadas para se aproximar das silhuetas do relevo original,

ficando conhecido como: Método de Blather. A Figura 1 representa esse método:

Figura 1 - Método de Blather em perfis topográficos.



Fonte: BRAGA (2017).

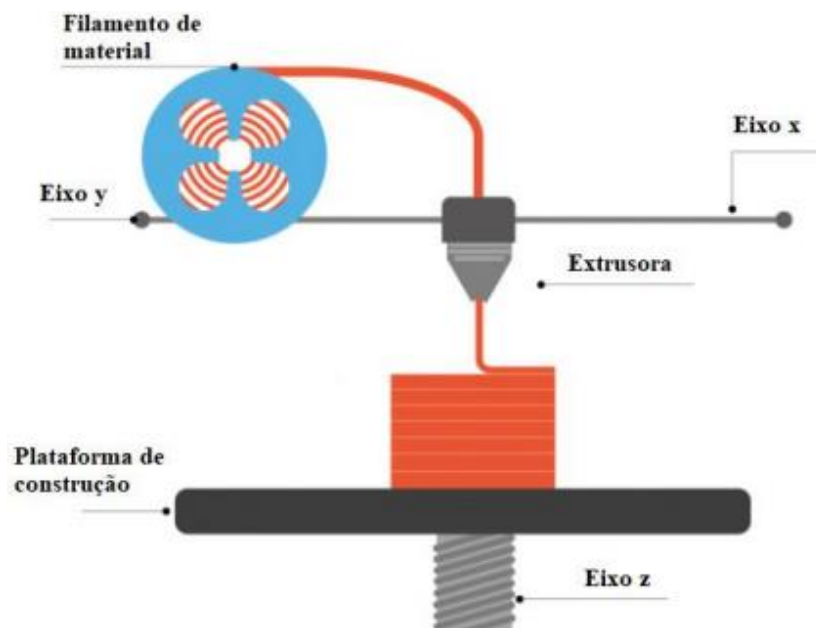
Oficialmente, o conceito de manufatura aditiva surgiu no Japão, no Instituto de Pesquisa Industrial de Nagoya, em 1981, por Hideo Kodama. Esse designer liderou o estudo a respeito do processo de fabricação de cada camada de uma estrutura, usando um laser para endurecer uma resina fotopolimérica. O método de prototipagem rápida desenvolvido é usado até os dias atuais por impressoras 3D modernas, processo conhecido como *Stereolithography* (SLA) (SCHOTTE, 2019).

Na contemporaneidade, outros métodos além do SLA estão ganhando notoriedade como é o caso do *Selective Laser Sintering* (SLS) e do *Selective Laser Melting* (SLM). De modo geral, o SLS utiliza um laser para sinterizar um pó, normalmente materiais plásticos ou cerâmicos, em que as camadas seguintes são sinterizadas sob as camadas inferiores já endurecidas. Já o SLM, tem um procedimento semelhante ao SLS, porém com pó metálico (UTEXAS, 2012).

2.1.2 Fused Deposition Modeling – FDM

Em 1989 Scott e Lisa Crump desenvolveram a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM). Essa técnica consiste na extrusão de um material termoplástico por meio de um bocal com temperatura maior que o ponto de fusão do filamento. A deposição acontece nos eixos y e x, com acréscimo de camadas sobrepostas no eixo z, como na Figura 2. Após o resfriamento do filamento acontece a solidificação, dando origem à peça desejada (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

Figura 2 - Funcionamento da técnica FDM.



Fonte: DruckWege 3D Printing (2020).

Entretanto, foi apenas em 2009 que a patente da empresa *Stratasys* se venceu, possibilitando a ascensão desse tipo de tecnologia para diversas partes do mundo, com valores expressivamente mais baratos (BRAGA, 2017).

A partir desse marco algumas empresas entraram no mercado com o desenvolvimento de impressoras e *softwares* para auxílio da impressão. Nessa perspectiva, a empresa Makertbot Industries criou a primeira impressora 3D com código aberto para comercialização alcunhada de “*CupCake CNC*”, ilustrada pela Figura 3. A empresa disponibilizou os arquivos das peças da impressora para melhorar a acessibilidade e difundir a tecnologia, a qual adotava a técnica FDM e tinha dimensões externas de 350 mm x 240 mm x 450 mm (LWT SISTEMAS, 2021).

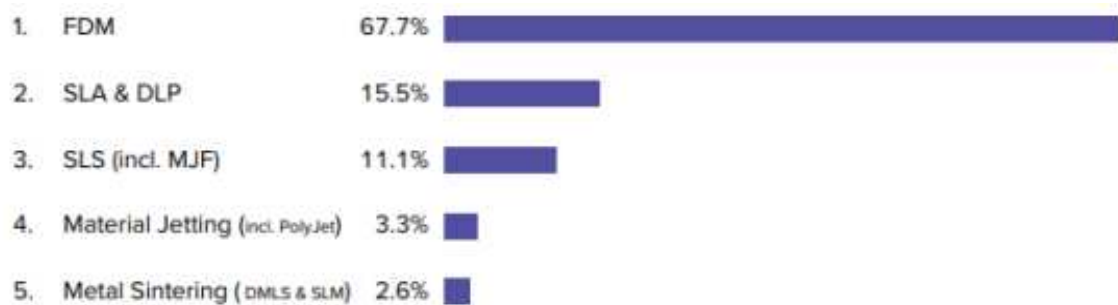
Figura 3 - Impressora com código aberto.



Fonte: LWT Sistemas (2021).

Com ações desse cunho as técnicas de impressão 3D se desenvolvem até a contemporaneidade, sendo a FDM a prática mais recorrente, como é possível observar na Figura 4.

Figura 4 - Métodos mais comuns de impressão em três dimensões

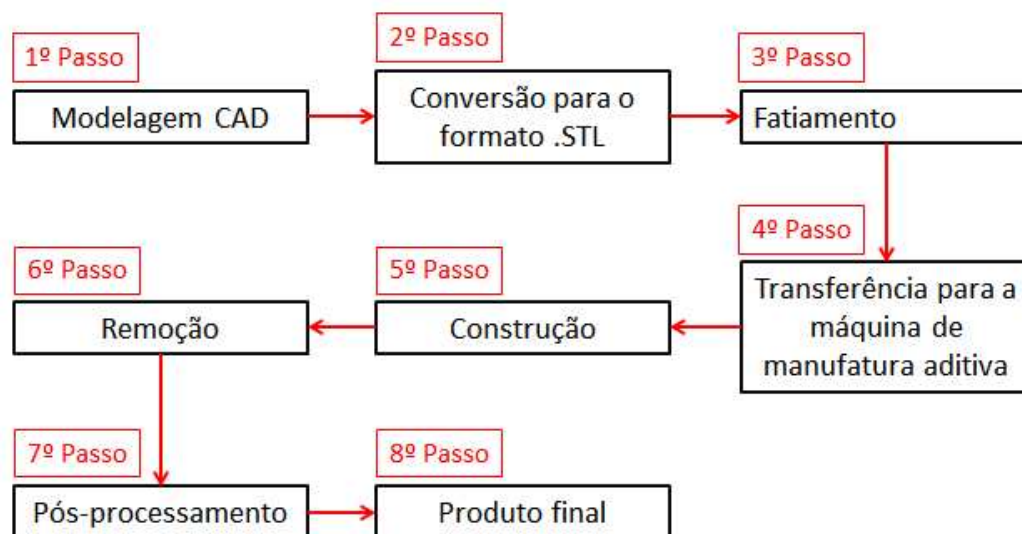


Fonte: 3D HUBS (2018).

2.1.3 Procedimento de impressão 3D

Apesar de existirem diversos métodos de manufatura aditiva, alguns passos são genéricos conforme é possível observar na Figura 5.

Figura 5 – Procedimento genérico para impressão 3D



Fonte: Adaptada de Ribeiro (2019)

No primeiro passo, modelagem CAD (*Computer Aided Design*), a peça a ser impressa é modelada em 3D com o auxílio de um *software*. Nesse modelo virtual é essencial analisar a viabilidade estrutural da futura peça, tendo como base a sobreposição das camadas no processo (RIBEIRO, 2019).

O segundo passo é responsável por realizar a conversão do arquivo modelado em CAD para o formato STL (*Surface Tessellation Language*), o qual é o mais comum entre as impressoras 3D. Convém salientar que o arquivo em STL representa a superfície da peça, sem levar em consideração demais aspectos como: cor, material e unidades (JAFARI, 2000).

No fatiamento um software cria o código G (G-CODE), que deve ser compatível com a impressora. Esse terceiro passo é crucial para a boa qualidade do produto final, uma vez que alguns parâmetros fundamentais são estabelecidos como altura de cama, nível e tipo de preenchimento, temperatura de impressão e da mesa, velocidade e material, por exemplo. Após as condições definidas e analisadas criteriosamente, acontece a transferência do código G para a máquina de MA, no quarto passo (RIBEIRO, 2019)

A etapa de construção se dá quando a impressora começa o processo de impressão, com a deposição de material a partir da leitura das linhas do código G. Nesse passo cabe ao responsável acompanhar o processo visualmente para evitar o agravamento de uma possível falha. No sexto passo a peça é retirada da máquina após as condições de segurança serem estabelecidas, uma vez que tanto a peça como o operador podem sofrer danos (RIBEIRO, 2019).

Na penúltima etapa (pós-processamento) o processo de acabamento pode acontecer, dependendo das condições de impressão e da finalidade da peça. Tal processo pode

incluir lixamento, pintura, remoção de suportes estruturais e montagem, por exemplo. Em consequência a essas etapas, o produto final é alcançado, com as devidas personalizações e condições impostas nos passos anteriores (RIBEIRO, 2019).

2.1.4 Vantagens e desvantagens da impressão 3D

Em relação ao processo de manufatura aditiva, tem-se que essa técnica apresenta diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais como:

- a) Peças complexas e personalizadas: Se configura como uma das principais vantagens, uma vez que é possível desenvolver um protótipo ou a própria peça sem limitações geométricas, abrindo possibilidade para criatividade e avanços tecnológicos, conforme Figura 6 (CAMPBELL et al., 2011).

Figura 6 - Peças produzidas por manufatura aditiva.



Fonte: geek360 (2021)

- b) Sem necessidade de moldes: Outra grande vantagem é a não dependência de moldes, haja vista que o material é extrudado a cada camada por um bico, modelando a geometria final desejada (CAMPBELL et al., 2011).
- c) Baixo nível de desperdício: Essa vantagem está associada ao fato da deposição de camadas sucessivas ser controlada e projetada. Desse modo, a impressora de MA usa apenas a matéria-prima necessária (CAMPBELL et al., 2011).
- d) Redução na quantidade de processos até o produto final: Como o processo de desenvolvimento de uma peça por manufatura aditiva é direto ao produto, não são necessários, geralmente, outros métodos de fabricação como a usinagem, forjamento ou fundição (CAMPBELL et al., 2011).

- e) Variação da geometria sem prejuízo financeiro: Por ser um procedimento que se desenvolve a partir de *softwares*, é possível analisar a presença de possíveis erros antes da impressão. Tais erros são encontrados, normalmente, no desenho em CAD ou no fatiamento, possibilitando a readequação da estrutura geométrica (CAMPBELL et al., 2011).
- f) Globalização de geometrias: Com o compartilhamento dos arquivos via Internet o processo de democratização da MA se deu de forma mais acentuada. Nessa perspectiva, uma empresa consegue disponibilizar arquivos de peças para outra empresa ou consumidor em qualquer região no mundo, agilizando e expandindo a produção (CAMPBELL et al., 2011).
- g) Uso de reciclados: Novos modelos estão sendo implementados para usar material reciclado como matéria-prima e reciclar os excessos da produção de uma peça. Algumas empresas já estão explorando essa área, que é o caso da ReDeTec, que reaproveita peças velhas em plástico e produz filamento para usar em outras peças como na Figura 7 (BAKER, 2018).

Figura 7 - Peças em plástico reciclado



Fonte: Impressoras 3D (2021)

Em relação aos pontos negativos da fabricação de peças por impressoras 3D, os principais aspectos são:

- a) Limitação do tamanho da peça: Essa problemática acontece em função do tamanho limitado da câmara de construção. Assim, peças muito extensas

necessitam ser fabricadas em partes separadas, dificultando o processo (BRAGA, 2017).

b) Velocidade de produção baixa: Essa característica dificulta o processo de fabricação em larga escala, com os equipamentos atuais de impressão. Uma possível justificativa está na baixa velocidade de deposição das camadas, porém é possível otimizar esse tempo alterando alguns parâmetros (BRAGA, 2017).

c) Necessidade de mão de obra qualificada: Como a estrutura da peça é projetada em *softwares*, fatiada com outro recurso digital e levada para máquina para adequação dos parâmetros de impressão, é essencial o controle e entendimento dessas etapas para alcançar o produto final da forma desejada. Dessa forma, é necessário um conhecimento técnico suficiente para desenvolver a atividade (BRAGA, 2017).

d) Pouca exploração da área de MA: O âmbito da manufatura aditiva se desenvolveu muito desde a sua criação. No entanto, ainda é uma área pouco explorada academicamente, dificultando a expansão mais acelerada da tecnologia (BRAGA, 2017).

e) Necessidade de suportes em algumas peças: Em situações em que parte das estruturas das peças ficam com ângulos maiores que 45° são necessários suportes adicionais para produzir a geometria desejada, como é possível observar pela Figura 8 com as cores em azul claro. Tal processo demanda uma quantidade maior de material, tempo e recursos, uma vez que devem ser projetadas com características específicas para não aderir definitivamente à peça ou ficar frágil sem suportar os esforços (MANUFATURA ADITIVA, 2022).

Figura 8 - Presença de estruturas de apoio.



Fonte: Manufatura digital (2022)

2.1.5 Aplicações

A diversidade de peças e máquinas que podem ser reparadas ou construídas pelo processo de manufatura aditiva é enorme, são vários os setores que essa técnica está presente como: aeroespacial, militar, produtos eletrônicos, arquitetura, educação, automotivo e medicina, por exemplo. Segundo WOHLERS REPORT (2014) as principais áreas industriais que a MA é encontrada atualmente são: produtos eletrônicos, automotiva, medicina e aeroespacial.

Em relação aos produtos eletrônicos é possível observar uma aplicação direta pela empresa Flex, multinacional que fabrica computadores e celulares, que tem o objetivo de otimizar suas linhas de produção no Brasil, com o auxílio do FIT Instituto de Tecnologia- sem fins lucrativos credenciado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Nessa perspectiva, foi desenvolvido um braço robótico com impressão 3D, chamado de Yumi, capaz de pegar cartuchos dispostos em diversas caixas e colocar em bandejas. A produção do braço robótico com auxílio da MA se deu pela necessidade uma geometria complexa e peso limitado, contribuindo para precisão da calibração do sistema pneumático (BAGUETE, 2020). Na Figura 9 está presente o braço robótico Yumi.

Figura 9 - Braço robótico desenvolvido com o auxílio de uma impressora 3D.



Fonte: Baguete (2020).

Em relação à saúde, um ótimo exemplo é a prótese *Cyborg Beast*, desenvolvida por Jorge Zuniga e um grupo de pesquisa na *Creighton University*, em 2009. O objetivo do estudo foi proporcionar uma qualidade de vida melhor para crianças e adultos que não tinham membros superiores, por meio da impressão de próteses personalizadas com auxílio das técnicas de manufatura aditiva. Além de oferecer um produto com um valor muito inferior ao do mercado ainda disponibilizou os arquivos dos desenhos na Internet para uma democratização das próteses. A Figura 10 representa a prótese *Cyborg Beast* (ZUNIGA, et al., 2015).

Figura 10- *Cyborg Beast*.

Fonte: Zuniga (2015).

Após o projeto inicial, alguns autores e o próprio Zuniga desenvolveram melhorias no produto e alguns testes experimentais. Após esses estudos foi observado que a maioria dos voluntários das pesquisas acharam satisfatórias as próteses nos âmbitos práticos, estéticos e simbólicos, mas uma pequena parcela não considerou o projeto interessante em algum desses âmbitos (OLIVEIRA, et al., 2022).

No ramo dos automóveis um destaque é a produção de um carro elétrico impresso na impressora 3D, o *Low-Speed Electric Vehicle* (LSEV). O modelo foi desenvolvido em 2018 em uma parceria entre a Polymaker e a *X Electrical Vehicle* (XEV), chegando até 69 km/h com uma autonomia de bateria de 150 km. Segundo os fabricantes, o carro foi desenvolvido para dirigir em vários ambientes com variações drásticas de temperatura (TECHTUDO, 2018).

Além disso, outro aspecto interessante é que o LSEV contou com uma redução de 2 mil para 57 peças, facilitando sua montagem e reduzindo seus custos. Convém salientar ainda que o modelo foi todo produzido pela sobreposição de camadas exceto as janelas, os pneus, o motor, o chassi e os assentos (TECHTUDO, 2018). Na Figura 11 é possível observar o modelo:

Figura 11- Carro SLEV produzido por manufatura aditiva.



Fonte: Techtudo (2018).

2.2 Materiais mais comuns na impressão 3D

Para Bourell et al (2017) a diversidade de matéria-prima usada na manufatura aditiva nos dias atuais é muito expressiva com o uso em várias áreas. Dentre os materiais então: poliestireno, polipropileno, policarbonato, poliéster, epóxi, ligas de alumínio, ouro, níquel aço inoxidável, aços ferramenta, chocolate e papel, por exemplo. No entanto, os mais comuns no FDM são os polímeros: poli ácido láctico (PLA), acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e poli tereftalato de etileno glicol (PETG).

2.2.1 ABS

O acrilonitrila butadieno estireno (ABS) é um polímero derivado do petróleo obtido a partir da copolimerização de três monômeros: acrilonitrila (entre 15% e 30%, fornece resistência térmica e química), butadieno (entre 5% e 15%, oferece resistência ao impacto e alongamento) e estireno (entre 40% e 60%, oferece brilho, moldabilidade e rigidez). Ao variar os percentuais na composição é possível obter diferentes tipos de ABS com propriedades variadas, com boa flexibilidade, elevada resistência ao impacto, à tração e à abrasão. A temperatura de impressão desse material varia de 230 a 250°C (MAIS POLIMEROS, 2018).

No entanto, apresenta limitações na faixa de temperatura de uso, a qual varia de -20° a 80°, sendo recomendadas aplicações que sejam majoritariamente em interiores. Outro aspecto negativo está associado à liberação de fumaça durante o processo de impressão, sendo necessário algum tipo de ventilação para evitar danos à saúde (FERNANDES, 2016).

O ABS é um material que tem baixa dureza superficial, sendo fácil de lixar.

Visando melhorar o acabamento superficial, é usada acetona pura para suavizar o efeito das camadas, uma vez que esse composto reage com o ABS. É recomendado que a impressão com esse polímero seja realizada em local fechado e com a mesa aquecida, para evitar que o ar em baixa temperatura resfrie a peça de forma indesejada e cause empenamento das estruturas (3D LAB, 2021).

Em relação à precisão dimensional com esse tipo de material, tem-se que é um polímero com alta precisão de impressão e constância dimensional, uma vez que é um material amorfo, sem estrutura cristalina. Nessa perspectiva, durante o resfriamento a taxa de retração é muito baixa, proporcionando as características dimensionais mencionadas (AUMNATE et al., 2018).

Uma vantagem ambiental é que em sua produção é necessário 57% menos energia que os demais plásticos alternativos. Além disso, é um polímero que apresenta ótimas condições para reciclagem, facilitando esse processo após a inutilidade das peças (MAIS POLIMEROS, 2018). A Tabela 1 representa algumas propriedades mecânicas desse polímero.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do ABS.

Propriedades	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade – E	2200	MPa
Tensão de Ruptura	29	MPa
Resistência à tração	41	MPa
Tensão de Escoamento	38	MPa
Coef. Poisson	0,35	MPa

Fonte: 3D LAB (2021)

2.2.2 PLA

O poliácido láctico (PLA) é um polímero biodegradável oriundo da síntese química do ácido láctico de fontes renováveis como o milho, o trigo e a cana-de-açúcar, por exemplo (FERNANDES, 2016). Alguns pontos fortes associados à impressão desse material destacam-se a não necessidade de uma mesa aquecida e a possibilidade das peças serem impressas em máquinas abertas (3D LAB, 2019).

Além das vantagens já mencionadas, é possível destacar outras, como: boa aderência na mesa de impressão, baixíssima contração, elevada dureza superficial, elevada qualidade visual, peças brilhosas, ótima adesão entre as camadas (3D LAB, 2019).

Porém, alguns pontos negativos são destaque na escolha desse material para aplicar em uma peça. O PLA, com temperatura de fusão por volta de 185°C, configura-se

como um material com baixa resistência térmica, podendo amolecer quando exposto ao sol a partir de 60°C, influenciando no controle dimensional. Além disso, em função da dureza superficial elevada, não é recomendado em peças que precisam ser lixadas (3D LAB, 2019).

Ademais, por ser um material de origem natural, a aplicação em alimentos não é prejudicial, mas o uso dos pigmentos coloridos oriundos do petróleo e o processo de impressão não garantem a segurança alimentar, não sendo recomendado, geralmente, pelos fabricantes (3D LAB, 2019).

Uma característica peculiar no PLA é a sua elevada resistência à carga estática e baixa tenacidade. Nessa perspectiva, a peça não é indicada em aplicações que sofrerão impacto, pois ela não tem boa ductilidade. No entanto, é possível aplicar uma carga estática elevada sem comprometer a integridade estrutural (DE MORAES, 2017).

Uma aplicação recorrente do PLA é em decorações, como a da Figura 12, em que o brilho em conjunto com a boa qualidade de impressão promovem uma peça de ótima qualidade.

Figura 12 – Item decorativo em PLA.



Fonte: 3D LAB (2019)

2.2.3 PETG

O poli tereftalato de etileno glicol (PETG) é um composto obtido a partir da polimerização do PET, mesmo material usado nas garrafas plásticas, com o Ciclohexano Dimetilol. Durante a polimerização o glicol é adicionado ao PET para formar um filamento menos quebradiço e mais fácil de usar. O PETG une características desejáveis tanto do ABS, alta resistência e ductilidade, quanto do PLA, pela facilidade na impressão (FREY, 2021; ALZHRANI, 2017).

Dentre as propriedades do filamento em estudo, ele apresenta alta resistência ao desgaste, a corrosão e agentes oxidantes, elevada tenacidade e ductilidade, ausência de odores fortes durante o processo de impressão, boa resistência térmica (até 85°, aproximadamente), elevada resistência química e grande resistência a umidade (3D HUB, 2017; 3D LAB, 2021).

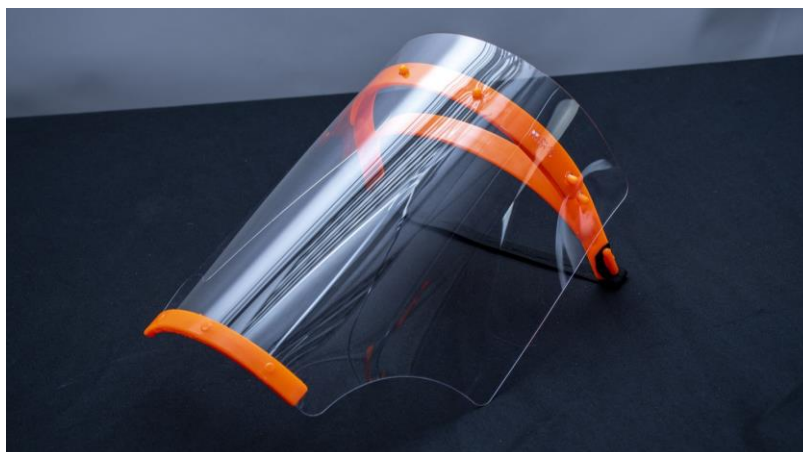
No entanto, assim como os demais materiais, o PETG também apresenta pontos negativos. Um aspecto significativo é que esse filamento é relativamente novo no mercado, tendo uma disponibilidade comercial menor e estudos reduzidos a seu respeito. O poli tereftalato de etileno glicol tem uma densidade maior que os demais, uma vez que o PLA tem 1,24 g/cm³, o ABS tem 1,04 g/cm³ e o PETG tem 1,27 g/cm³ (ALZHRANI, 2017; 3D LAB, 2020).

Além disso, o PETG tem uma temperatura de fusão mais alta, cerca de 240 °C, mas é recorrente a fabricação de peças em impressoras abertas, por não sofrer tanta interferência do ambiente externo. Outro fator que merece atenção é a característica de ser extremamente pegajoso e escoar com facilidade durante a impressão, sendo necessário ajustar a impressora 3D para reduzir os efeitos dessa condição. (ALZHRANI, 2017; ALL3D, 2018).

Em relação às aplicações, o PETG possui diversas aplicações em peças de alta qualidade e robustez. Uma aplicação destaque é a produção de máscaras para combater o corona vírus durante a pandemia. Nessa perspectiva, o material reúne características essenciais para a aplicação como: não reage ao álcool, boa adaptação com a pele, elevada resistência mecânica e ductilidade (3D LAB, 2020).

O filamento foi recomendado e produzido inicialmente pela empresa Prusa, a qual liberou os arquivos para impressão dos suportes para os protetores faciais, representados na Figura 13 (3D LAB, 2020).

Figura 13 - Protetor facial desenvolvido pela Prusa.



Fonte: Prusa3d (2020)

2.2.4 Comparativo das propriedades dos materiais de impressão 3D

Os três polímeros apresentam características específicas e, conseqüentemente, aplicações distintas, não sendo ideal classificar de modo generalista como melhor ou pior o material. Nessa perspectiva, foi desenvolvida a Tabela 2 para realizar um comparativo entre as propriedades como densidade, temperatura da mesa, transição vítrea (temperatura na qual um material no estado vítreo passa para o estado viscoso), temperatura de fusão e resistência à tração (BEQ, 2019).

Convém enaltecer, ainda, que alguns valores foram obtidos a partir de experimentos, sendo possível uma variação nesses valores indicados pela Tabela 2. Além disso, em algumas propriedades não foram mencionados valores numéricos pela dificuldade no aferimento desses valores, sendo obtidos apenas comparativos gerais na literatura. A quantidade de pontos está associada à expressividade do valor ou a sequência de comparação, sendo três pontos o maior valor, dois pontos o valor mediano e um ponto o menor valor, ou menos expressivo.

Tabela 2 – Principais propriedades do ABS, PLA e PETG.

Propriedades	ABS	PLA	PETG
Densidade	1,04 g/cm ³	1,24 g/cm ³	1,27 g/cm ³
Temperatura da mesa	90 – 120°C	55 – 70°C	80 – 100°C
Transição vítrea	98°C	55°C	70°C
Temperatura de fusão	220°C	185°C	240°C
Resistência à tração	41 MPa	60 MPa	50 Mpa
Resistência à flexão	79 MPa	83 MPa	70 Mpa
Resistência ao impacto	240 J/m	16 J/m	101 J/m
Tensão de ruptura	29 MPa	46 Mpa	32,6 Mpa
Tensão de Escoamento	38 MPa	66 MPa	51 Mpa
Módulo de Elasticidade	2200 MPA	4350 MPA	2120 Mpa
Odor ao imprimir			
Retração térmica			
Exposição ao sol			
Resistência à umidade			
Qualidade superficial			
Brilho			
Facilidade na reciclagem			

Fonte: Adaptado de 3D LAB (2017), R3DY (2021) e Besko, Bilyk e Sieben (2017).

2.3 Parâmetros de impressão 3D

O processo de fabricação das peças influencia diretamente na qualidade do produto final, seja no acabamento superficial, seja nas propriedades mecânicas, por exemplo.

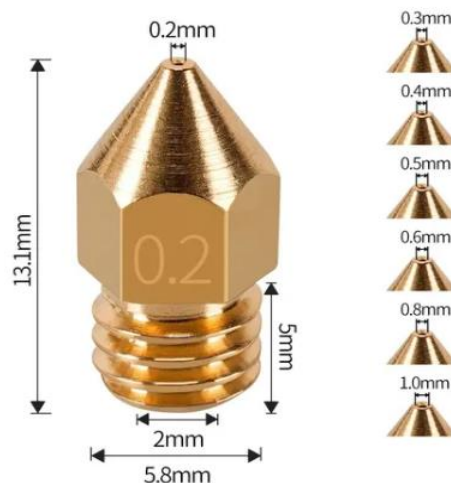
Com o processo FDM não é diferente, o ajuste das condições de impressão é essencial para atingir as qualidades desejadas (PANDA, RAJU BAHUBALENDRUNI E BISWAL, 2014).

Nessa perspectiva, há uma série de variações do produto final que podem ser encontradas ao combinar as condições de operação, possibilitando a aplicação da impressão 3D nos mais variados produtos. Nos tópicos seguintes será abordado um pouco dos parâmetros mais recorrentes no processo.

2.3.1 Diâmetro do bico de extrusão

O bico de extrusão é um dos itens essenciais no processo de impressão 3D e tem a função de depositar o material fundido na mesa com o diâmetro desejado, podendo ser fabricado, geralmente, de latão, de aço inoxidável, de aço endurecido ou de materiais especiais (ACELERA 3D, 2019). O diâmetro do bico de extrusão (conforme figura 14) influencia na qualidade da peça e na velocidade de impressão. Nessa perspectiva, quando é utilizado um bico de extrusão com um diâmetro grande o filamento é extrudado com maior facilidade e maior rapidez, porém a qualidade final da peça é menor. O processo inverso também acontece, uma vez que ao usar um bico menor a extrusão é dificultada e mais lenta, mas a qualidade final é maior (CASAGRANDE, 2013).

Figura 14: Exemplo de bico de extrusão com variações no diâmetro.



Fonte: Ecofiltros sustentáveis (2022)

O bico com 0,4 mm de diâmetro é o mais comum entre as impressoras 3D, uma vez que atende a maioria das aplicações com uma boa facilidade na extrusão, boa velocidade de impressão e qualidade final nos detalhes das peças (3DFILA, 2021). É recomendado que peças que com detalhes tenham o diâmetro do bico menor que a menor dimensão do detalhe,

para manter uma boa qualidade superficial e não afetar as propriedades mecânicas com um possível processo de usinagem pós-impressão, por exemplo. Além disso, é indicado que as paredes tenham pelo menos o dobro do diâmetro do bico (CASAGRANDE, 2013).

2.3.2 *Altura de camada*

A altura de camada no processo de impressão 3D é medida pela espessura de cada camada. Sob esse viés, é sabido que a manufatura aditiva se dá com a deposição de camadas e a altura de camada é um fator essencial para qualidade final da peça, para o tempo de impressão e para resistência mecânica (ARAÚJO, 2017).

As impressoras presentes no mercado conseguem, normalmente, imprimir uma altura de camada entre 0,05 e 0,4 milímetros. Na figura 15 é possível observar um pouco da influência desse parâmetro, sendo as peças da esquerda com menor altura de camada e as da direita com uma altura elevada. A primeira peça (extremidade esquerda) foi realizada com altura de camada de 0,05 milímetros em 171 minutos. Já a última peça (extremidade direita) foi fabricada com uma altura de camada de 0,4 milímetros em 24 minutos (3DLAB, 2017).

Figura 15: Influência da altura de camada na qualidade superficial de peças.



Fonte: 3D Lab (2017)

Pela figura 15 é possível observar que em peças com maior quantidade de camadas a qualidade superficial é melhor, por produzir uma peça mais homogênea. Com exceção da primeira foto que foi tratada quimicamente com vapor de acetona, as peças com maior altura de camada são mais brilhosas, em função da curvatura maior da superfície externa refletir mais luz. Além disso, ao diminuir a espessura das camadas, são necessárias mais camadas para atingir a altura final da peça, aumentando consideravelmente o tempo de execução da impressão (3DLAB, 2017).

Alguns estudos associam a pequena altura de câmara e, conseqüentemente,

maior quantidade de camadas com a maior resistência mecânica, em decorrência da maior aderência entre as camadas. Outrossim, está associado à questão da relação entre o diâmetro do bico e a altura de camada, uma vez que a altura de camada não deve ser superior a 80% do diâmetro do bico extrusor (3DLAB, 2017).

2.3.3 Velocidade de impressão

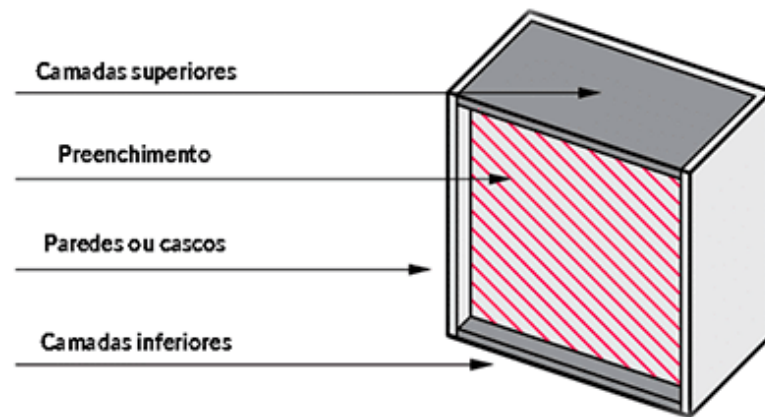
A velocidade de impressão é um fator essencial na parametrização dos fatores de impressão, a qual representa a velocidade com que os motores das impressoras vão se mover para manufaturar a peça desejada. Esse parâmetro combina as velocidades dos motores que se movimentam nos eixos X e Y e o motor responsável pela extrusão (KONDO, 2021).

A forma mais recorrente de modificar a velocidade de impressão é ajustando diretamente no *software* de fatiamento (geralmente até 60 mm/s). Ao aumentar a velocidade de impressão haverá uma redução no tempo para impressão. No entanto, se o objetivo é reduzir o tempo de impressão outras medidas também podem ser adotadas como: alterar a densidade de preenchimento e espessura da parede, criar design de peças vazias, usar um bico maior, usar uma altura de camada maior e produzir mais de uma peça ao mesmo tempo (3D LAB, 2018).

Convém salientar, que ao aumentar excessivamente a velocidade da manufatura, a qualidade das peças é prejudicada, uma vez que a camada anterior a que será adicionada não terá resfriado o suficiente. Porém, ao usar uma velocidade muito baixa o material passa muito tempo no bico extrusor, acarretando numa má deposição e uma deformação na peça. Assim, é necessário encontrar um valor ideal para esse parâmetro de modo a garantir a utilidade da peça (WISHBOX, 2020).

A velocidade de impressão pode ser alterada de acordo com cada etapa do processo de fabricação, ao depender do tipo de peça. Na primeira camada é necessária uma velocidade menor para garantir uma boa fixação na mesa extrusora. Em paredes que necessitam de melhor acabamento ou sustentação, geralmente as superiores e as laterais externas, também são usadas velocidades baixas de impressão. Já em regiões de preenchimento é usada uma velocidade maior, uma vez que existe pouca função de sustentação ou estética (FERNANDES, 2016). Na figura 16 estão representadas as camadas.

Figura 16- Representação das camadas de uma peça impressa por manufatura aditiva.



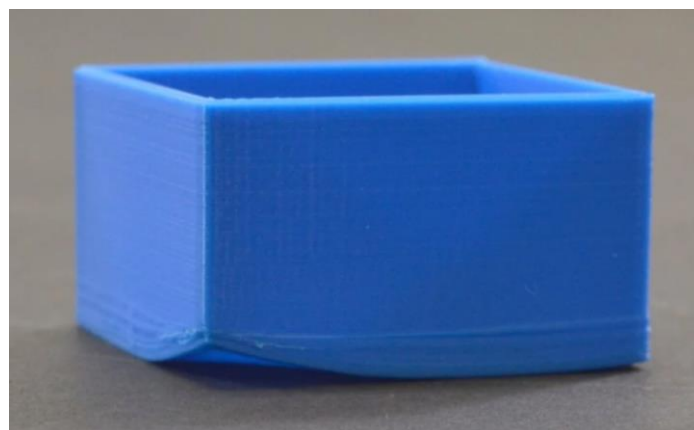
Fonte: 3D Lab (2019).

2.3.4 Temperatura da mesa

A mesa extrusora é o local onde os filamentos são depositados em elevadas temperaturas para a construção da peça. Apenas as primeiras camadas ficam em contato com a mesa, as quais são essenciais para a fixação da peça na localização desejada, estando sobre influência direta da temperatura da mesa e das camadas superiores (O'CONNELL, 2021).

Nessa perspectiva, alguns materiais exigem condições especiais de aquecimento da mesa, uma vez que uma mesa mais quente proporciona uma maior adesão enquanto uma mesa mais fria pode causar *warping* (empenamento) nas camadas externas com a diferença de temperatura e, conseqüentemente, elevação das tensões internas, conforme é possível observar na figura 17 (3D.ON, 2022).

Figura 17- Empenamento da peça no contato com a mesa.



Fonte: tech CD (2021)

Alguns dos polímeros mais usados têm suas temperaturas para mesa de impressão bem definidas como é o caso do ABS, do PLA e do PETG, conforme a tabela 3.

Tabela 3 – Temperatura da mesa de impressão para o ABS, PLA e PETG.

Material	Temperatura da mesa de impressão (°C)
ABS	110
PLA	60
PETG	85

Fonte: 3DLAB (2019).

2.3.5 Temperatura de impressão

A temperatura de impressão é um dos fatores essenciais para o bom desempenho do processo de manufatura aditiva. Esse parâmetro está associado com a temperatura do bico, o qual terá função de aquecer o filamento até o ponto de deposição. O ajuste desse fator está associado diretamente com o tipo de material, as especificações do fabricante e os aditivos que podem ser adicionados, por exemplo. Para verificar se essa temperatura está de acordo é realizado um teste com a impressão de uma torre de temperatura (O'CONNELL, 2021).

Ao elevar demais a temperatura do bico, o termoplástico tende a ser extrudado com uma quantidade excessiva de bolhas, provocando imperfeições no acabamento superficial e problemas estruturais. Além disso, ao elevar a temperatura acima do indicado o bico extrusor pode obstruir e as peças podem resfriar mais lentamente, comprometendo a qualidade geométrica (O'CONNELL, 2021).

Já a temperatura muito baixa do bico, o processo de deixar a matéria-prima com a viscosidade ideal para impressão fica comprometido, dificultando a fixação das camadas e, conseqüentemente, tornando a peça imprópria para o uso. Nessa perspectiva, é necessário realizar o estudo e ajuste desse parâmetro para uma impressão bem sucedida (CASAGRANDE, 2013). Na tabela 4 está presente a faixa de temperatura de impressão do ABS, do PLA e do PETG.

Tabela 4 - Temperatura de impressão dos principais polímeros de impressão 3D.

Material	Temperatura de impressão (°C)
ABS	220 – 240
PLA	195 – 220
PETG	240 – 260

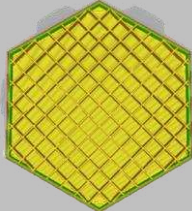
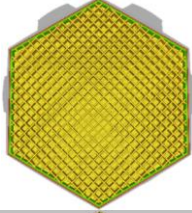
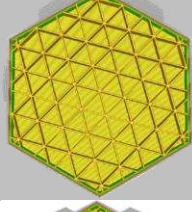
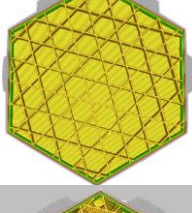
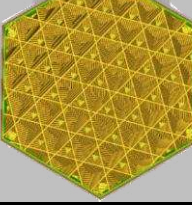
Fonte: 3D Lab (2019).

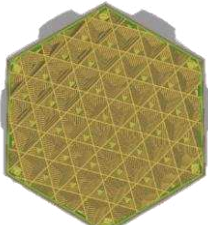
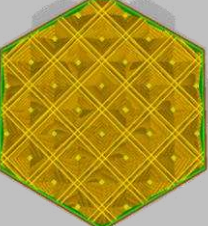
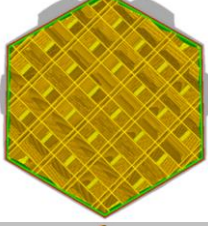
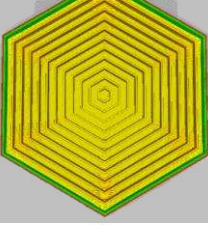
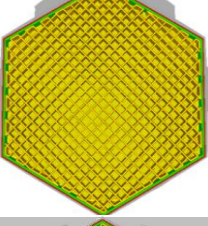
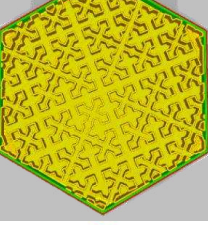
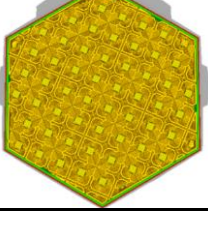
2.3.6 Tipo de preenchimento

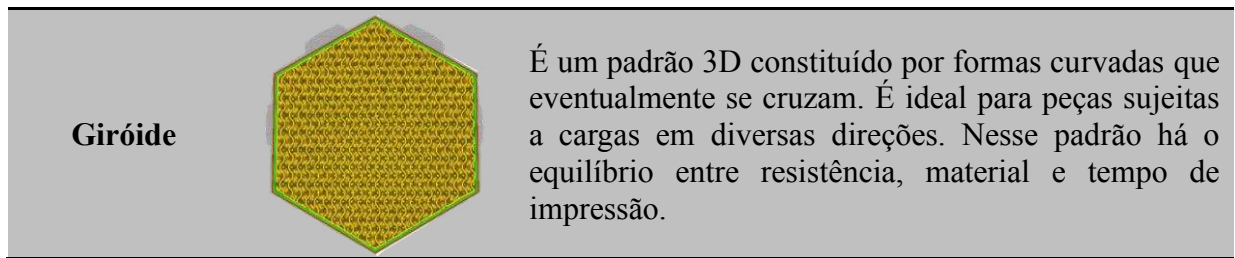
O tipo de preenchimento ou padrão de preenchimento é um dos parâmetros mais importantes na construção de peças por manufatura aditiva, uma vez que algumas estruturas exigem uma mínima resistência mecânica, uma determinada densidade, um limite de tempo e um valor econômico pré-determinado, por exemplo. Tais necessidades são afetadas diretamente pelo padrão de preenchimento, o qual representa a geometria interna que vai compor a peça (O'CONNELL, 2021).

A tabela 5 representa os principais tipos de preenchimentos disponibilizados pelo aplicativo de fatiamento *Ultimaker Cura*.

Tabela 5 – Descrição e representação dos tipos de preenchimento do *Ultimaker Cura*.

Tipo de preenchimento	Representação	Descrição
Grade		Contém linhas bidimensionais a cada camada com o dobro de espaço entre as linhas. Fornece média resistência mecânica, consumo médio de material e tempo médio para conclusão.
Linhas		Várias linhas são impressas ao longo dos eixos X e Y a cada duas camadas. Com boa resistência em duas dimensões, com o uso reduzido de material e peso leve, sendo comum em impressões rápidas.
Triângulos		As linhas são impressas em três sentidos no plano XY. Apresenta boa resistência em duas dimensões, quando a força é perpendicular à face do objeto. Indicada para componentes retangulares finos.
Tri-hexágono		Esse padrão 2D imprime hexágonos e triângulos intercalados. Tem boa resistência mecânica, porém com elevada quantidade de material e maior tempo de impressão.
Cúbico		Desenvolvido por cubos empilhados inclinados 45° em torno dos eixos X e Y. A resistência em três dimensões é elevada, porém o tempo de impressão é maior e a quantidade de material também.

Subdivisão cúbica		Semelhante ao padrão cúbico, impresso em um plano 3D com foco na redução de material e na melhoria do tempo de impressão.
Octeto		Esse padrão empilha formas geométricas em pirâmides. O preenchimento do padrão se dá em três dimensões com uso frequente em peças com elevadas resistências mecânicas.
Quarto cúbico		Padrão bem semelhante ao octeto, porém a metade das formas de pirâmides são deslocadas na outra metade.
Concêntrico		As linhas se comportam como “ondas” constituindo o perímetro da peça com um mesmo centro. Caracteriza-se pela elevada velocidade de impressão, baixo consumo de material e ideal para peças flexíveis.
Ziguezague		Nesse padrão têm-se uma linha constante ao decorrer do plano XY. Bastante indicado em impressões rápidas e em peças com baixa resistência mecânica.
Cruzado		Esse modelo se desenvolve em formatos geométricos semelhantes a cruzes com formas específicas no 2D. Nos espaços entre as cruzes os filamentos dobram e se torcem. Padrão comum em peças flexíveis.
Cruzado 3D		Com formas semelhantes ao cruzado, as linhas se movem em inclinações no plano 3D. Nessa perspectiva, as peças adquirem uma rigidez maior.

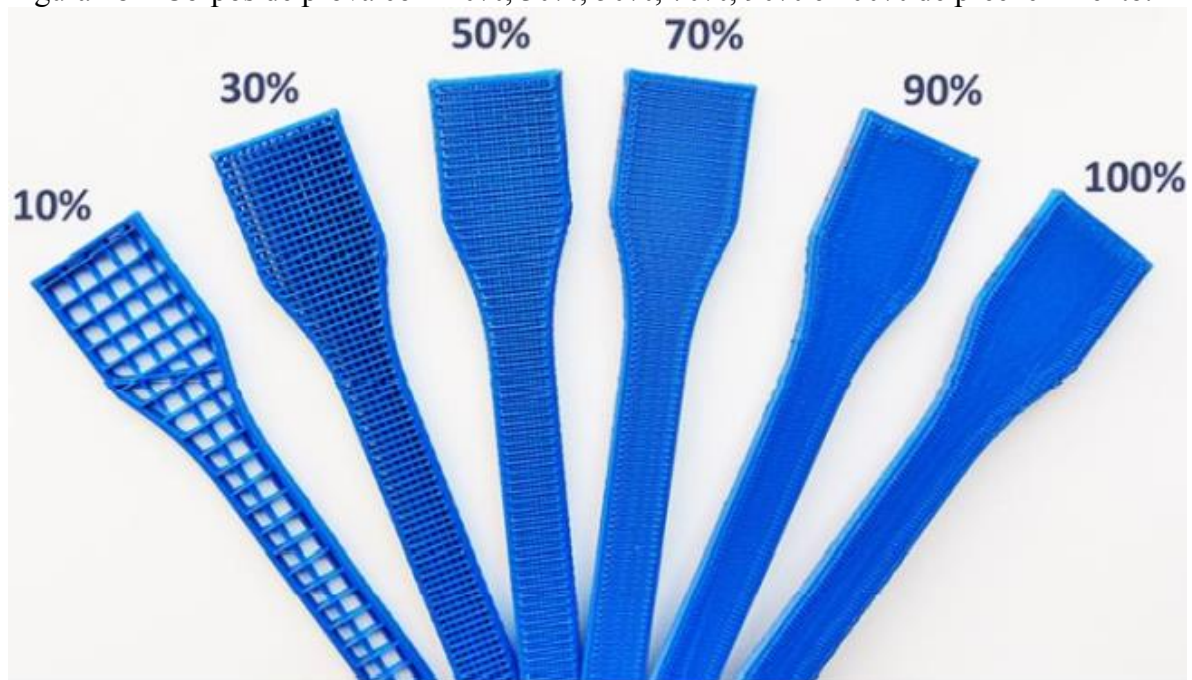


Fonte: Adaptado de All3DP (2022), O'Connell (2022), Suporte Ultimaker (2022), 3D geek show (2021).

2.3.7 Nível de preenchimento

Para Fernandes (2016) o nível de preenchimento representa a quantidade de material impresso no interior da peça. Nos *softwares* fatiadores esse parâmetro vai de 0% à 100%, em que 0% significa que a peça está vazia, sem preenchimento, e 100% que a peça está maciça. É essencial a escolha do nível de preenchimento que melhor se adequa às necessidades da peça, uma vez que a melhor escolha reduzirá o tempo de impressão, o consumo de material e, conseqüentemente, o custo final, sem comprometer a integridade estrutural. Na figura 18 é possível observar a diferença entre os níveis de preenchimento.

Figura 18 – Corpos de prova com 10%, 30%, 50%, 70%, 90% e 100% de preenchimento.



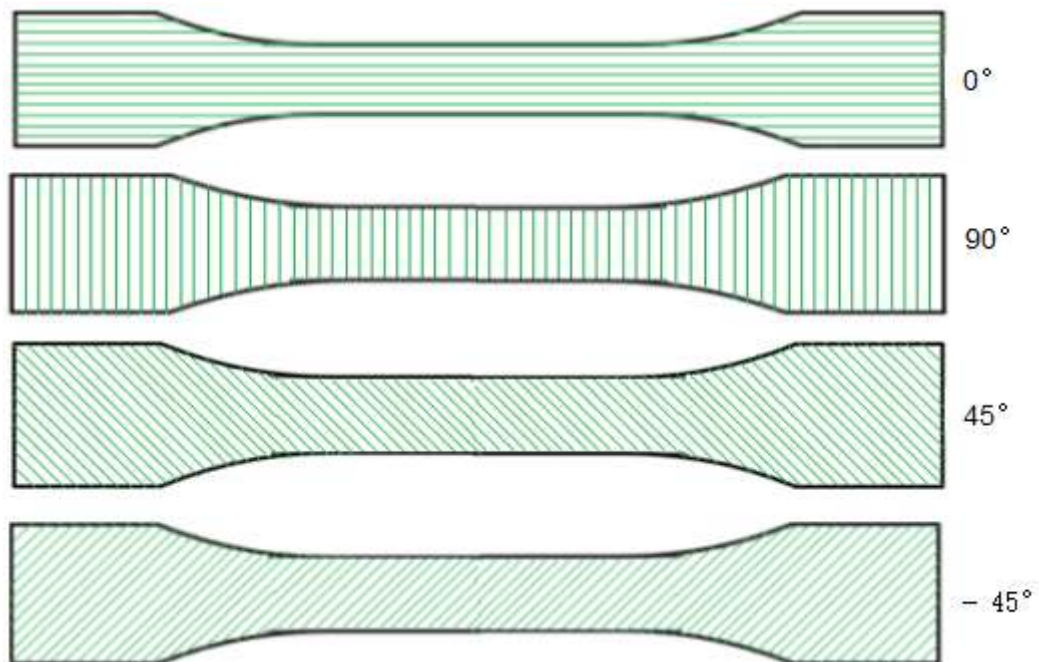
Fonte: 3D Matter (2021)

2.3.8 Orientação de preenchimento

A orientação de preenchimento é responsável pelo sentido dos filamentos no momento da impressão, configurando-se como muito importante por influenciar nas propriedades mecânicas da peça final (SOUSA, 2022). É possível a sobreposição de camadas com orientações diferentes, com o objetivo de melhorar propriedades e reduzir outros parâmetros como tempo de impressão e quantidade de matéria-prima.

Ao realizar a combinação da sobreposição de camadas com diferentes orientações, Fernandes (2006) chegou a resultados que indicam que as orientações de $0^\circ/90^\circ$ tiveram melhor resistência à tração que orientações $45^\circ/45^\circ$, por exemplo. A figura 19 representa corpos de prova com orientação de preenchimento de 0° , 90° , 45° e -45° .

Figura 19 – Corpos de prova com diferentes orientações de preenchimento.



Fonte: autor (2022)

3 METODOLOGIA

No tópico em questão será abordado o procedimento, recursos e parâmetros essenciais para a impressão, ensaio e análise dos corpos de prova.

3.1 Recursos para fabricação dos corpos de prova

Em relação aos principais recursos para impressão dos corpos de prova têm-se a impressora 3D e o filamento de impressão como primordiais para o processo.

3.1.1 Impressora 3D

A máquina de impressão utilizada no processo foi do modelo GTMAX CORE H5 com resolução de camadas de 0,05 mm a 0,4 mm, cinemática core XV, acionamentos e trilhos no eixo z, capacidade de aquecimento da mesa até 135 °C e limpador automático de bico. Na Figura 20 está representada a impressora usada.

Figura 20 - Impressora GTMAX3D CORE H5.



Fonte: autor (2023).

3.1.2 Filamento para impressão

Para a matéria prima dos corpos de prova foi usado o filamento PETG na cor verde, com diâmetro do fio de 1,75 mm, temperatura recomendada do bico extrusor entre 240 e 250 °C, temperatura recomendada para mesa entre 80 e 90°C e uma densidade de 1,27g/cm³. Na Figura 21 está representada a bobina de filamento usada.

Figura 21 - Filamento PETG usado nos corpos de prova.



Fonte: autor (2023)

3.1.3 Recursos auxiliares para a impressão dos corpos de prova

Além da máquina de impressão e o filamento, foram usados recursos para auxiliar no procedimento de fabricação dos corpos de prova. Adesivo líquido para impressão 3D, espátula e escova de aço foram alguns dos utensílios utilizados. O primeiro é aplicado sobre a mesa com o objetivo de facilitar na remoção do corpo de prova após o resfriamento (Figura 22).

Figura 22 - Adesivo líquido.



Fonte: autor (2023).

O segundo também tem a função de auxiliar na remoção da peça, porém com a aplicação de leves choques mecânicos (Figura 23).

Figura 23 - Espátula para auxiliar na remoção dos corpos de prova.



Fonte: autor (2023)

Já a escova de aço realiza a limpeza do bico entre as impressões, visando evitar o acúmulo de material e possíveis danos a peça que serão impressas (Figura 24).

Figura 24 - Escova de aço para limpeza do bico da impressora 3D.



Fonte: autor (2023)

3.2 Parâmetros de impressão 3D

Em relação aos parâmetros de impressão, foi realizado a divisão em dois grupos, sendo o primeiro correspondente aos parâmetros fixos, que serão constantes em todas as impressões, e o segundo aos parâmetros variáveis, os quais sofreram alterações no decorrer da fabricação das amostras.

3.2.1 Parâmetros fixos

Em virtude da disponibilidade, o diâmetro do bico de extrusão foi usado o valor de 0,4 mm, o qual proporciona menores alturas da camada e, conseqüentemente, maior precisão geométrica nas peças. Em relação à altura de camada, foi adotado o valor de 0,2 mm para a primeira camada. As paredes externas (inferiores e superiores) com 0,8 mm de espessura, ou seja, duas camadas com extrusão de 0,4 mm. O valor pequeno de camadas externas está associado a tentativa de reduzir os impactos dessas camadas no ensaio de tração, prevalecendo o tipo de preenchimento. A altura de camada no preenchimento foi de 0,2 mm.

Por recomendação do fabricante e do site da 3D Lab foi adotado a temperatura de impressão de 240° C e a temperatura da mesa de 80° C para o PETG. A velocidade de impressão da camada inicial foi de 20 mm/s. Já a velocidade das camadas de preenchimento e das paredes foi de 40 mm/s. Foi adotado uma velocidade de retração de 70 mm/s, visando reduzir o tempo de impressão.

O nível de preenchimento adotado foi de 50%, um valor intermediário para analisar diretamente a influência dos tipos de preenchimento além de otimizar a quantidade de matéria prima e o tempo de fabricação. A orientação usada foi de -45°/45, visando uma nova análise da influência da geometria interna das peças, uma vez que são escassos os trabalhos analisando o parâmetro em questão com a orientação -45°/45°. A Tabela 6 retrata de forma sucinta os parâmetros fixos adotados.

Tabela 6 – Parâmetros fixos para impressão dos corpos de prova.

Parâmetro	Unidade
Diâmetro do bico de extrusão:	0,4 mm
Altura da 1ª camada	0,2 mm
Altura de camada no preenchimento	0,2 mm
Temperatura de impressão	240° C
Temperatura da mesa	80° C
Velocidade de impressão da 1ª camada	20 mm/s
Velocidade de impressão nas demais camadas	40 mm/s
Velocidade de retração	70 mm/s
Nível de preenchimento	50%
Orientação de preenchimento	-45°/45

Fonte: Autor (2023).

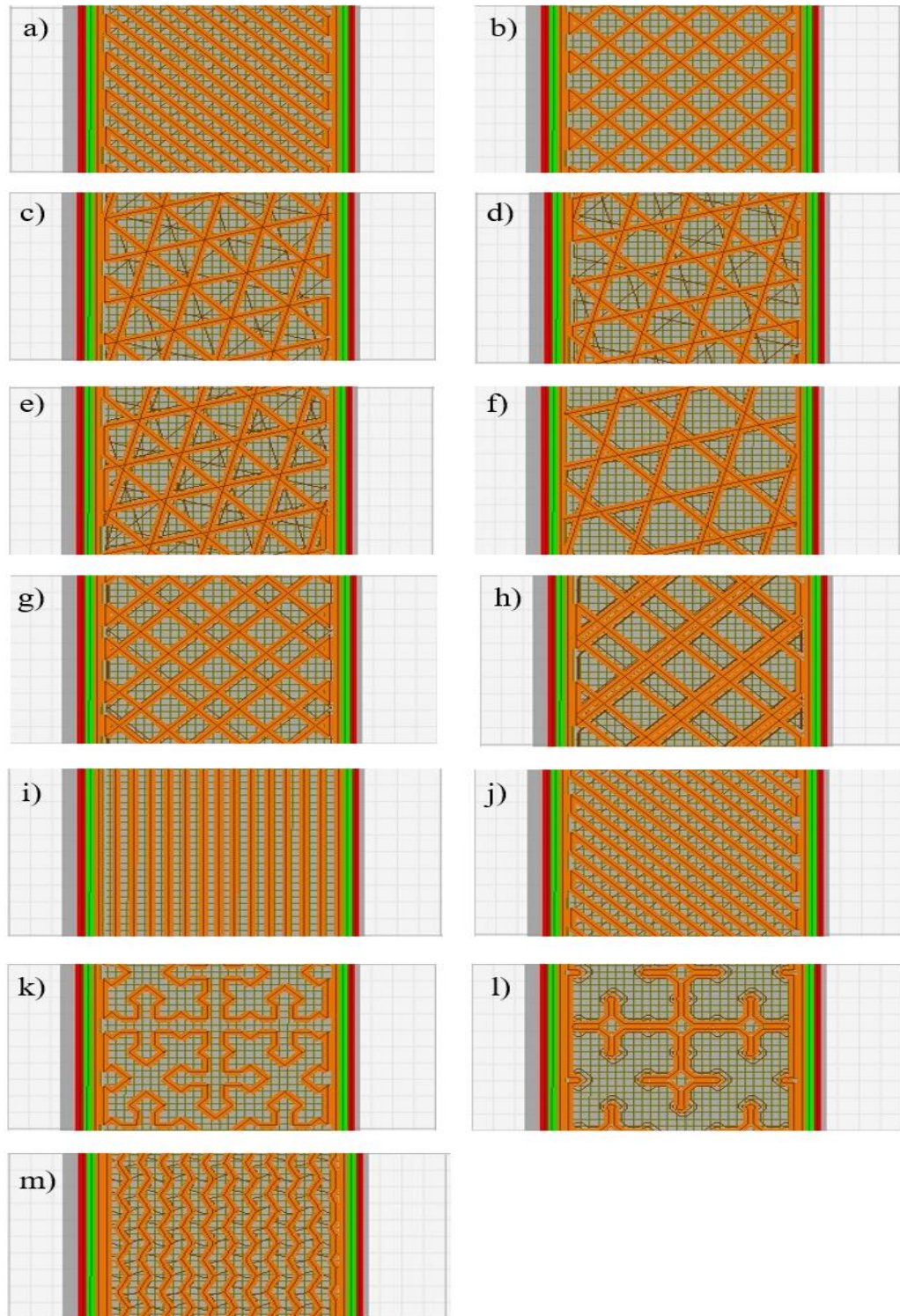
3.2.2 Parâmetros variáveis

O único parâmetro que terá sua configuração alterada é o tipo de preenchimento, o qual foi extraído do aplicativo de fatiamento *Ultimaker Cura*. Nessa perspectiva, as geometrias de preenchimento usadas serão: linhas, grade, triângulos, tri-hexágono, cúbico, subdivisão cúbica, octeto, quarto cúbico, concêntrico, zigzag, cruzado, cruzado 3D e giróide.

3.3 Matriz experimental

Como são 13 tipos diferentes de tipo de preenchimento, serão 13 combinações de corpos de prova (CPs) as quais podem ser representadas na Figura 25. Para cada combinação foram fabricados 3 CPs com objetivo de ter mais segurança nas análises do ensaio e nas medidas de massa e de dimensões. Desse modo, foram impressos 39 CPs no total.

Figura 25 - Tipos de preenchimento usados: a) linhas (CP1); b) grade (CP2); c) triângulos (CP3); d) tri-hexágono (CP4); e) cúbico (CP5); f) subdivisão cúbica (CP6); g) octeto (CP7); h) quarto cúbico (CP8); i) concêntrico (CP9); j) ziguezague (CP10); k) cruzado (CP11); l) cruzado 3D (CP12); m) giróide (CP13).



Fonte: autor (2023).

3.4 Instrumentos de medição

Com o objetivo de realizar a medição da massa e a das variações dimensionais dos corpos de prova, é necessário o uso de equipamentos de precisão. Nessa perspectiva, foi utilizado a balança eletrônica de precisão da HL-Series com tolerância de 0,0001 g, representada pela Figura 26.

Figura 26 – Balança eletrônica de precisão



Fonte: autor (2023).

Além da balança, foi usado o paquímetro digital Zaas com tolerância de 0,01 mm, conforme Figura 27. Os equipamentos foram utilizados em função da disponibilidade no laboratório da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus de Russas.

Figura 27 – Paquímetro digital

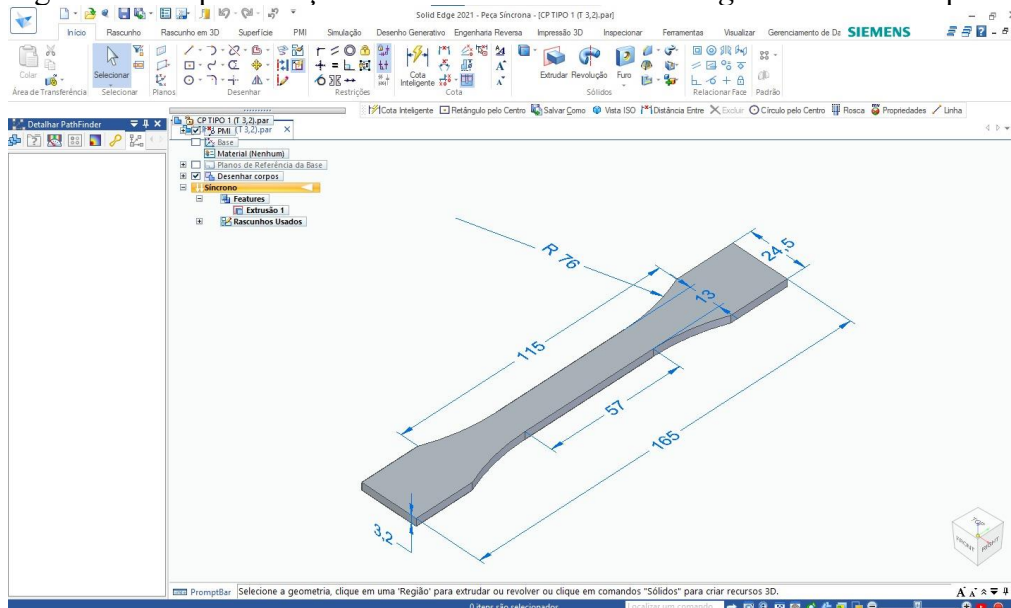


Fonte: autor (2023).

3.5 Procedimento para impressão 3D

Para realizar a fabricação dos CPs foi adotada a norma ASTM D638-22 (ASTM, 2022), a qual aborda o método de ensaio de tração para materiais plásticos. Para plásticos rígidos e semirrígidos é recomendado pela norma usar a combinação de dimensões do Tipo 1, com espessura de $3,2 \pm 0,4$ mm para fabricação por adição de material. Após definir o tipo de corpo de prova, foi adotado o *Software de CAD SolidEdge®* para realizar o desenho do modelo, conforme é possível observar na Figura 28.

Figura 28 – Representação do CP modelado no *SolidEdge®* com suas respectivas medidas.



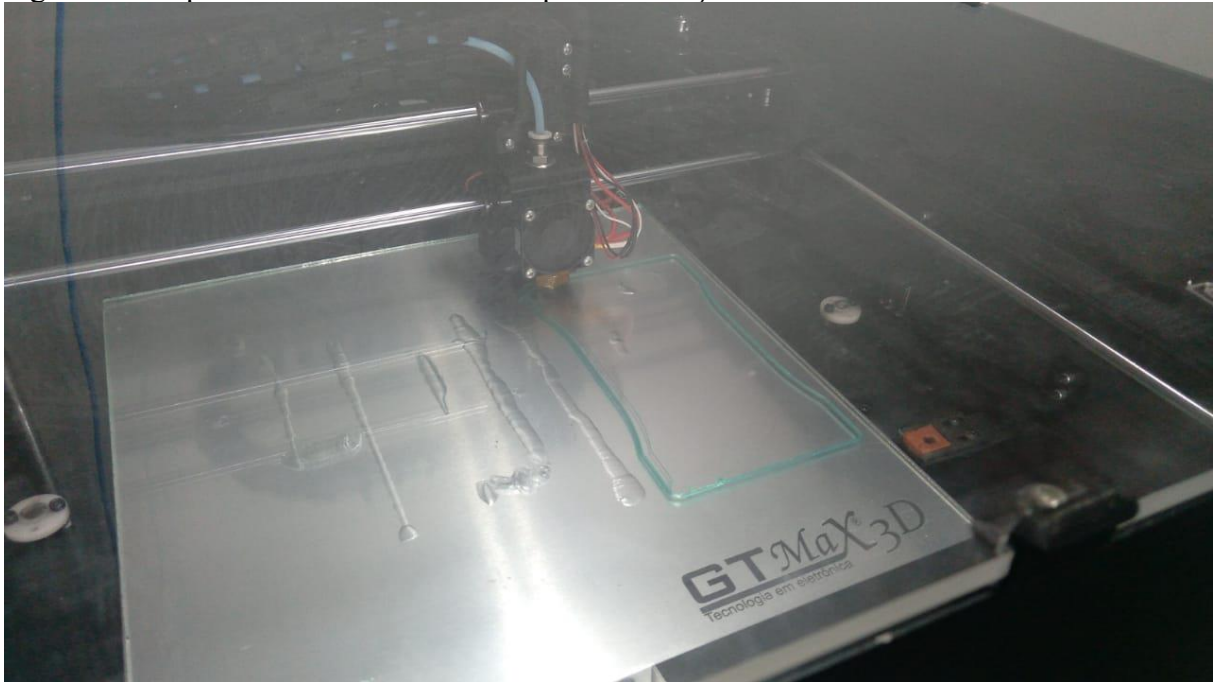
Fonte: autor (2023).

Após a modelagem o arquivo é exportado no formato STL, presente no próprio *Software de CAD*. No *Software Ultimaker Cura® 5.3.0* é inserido o arquivo STL para realizar a definição dos parâmetros de impressão e posicionamento na mesa, etapa essa muito importante para a fabricação dos corpos de prova. Uma vez que os parâmetros foram aplicados, acontece o fatiamento e exportação do arquivo na linguagem de programação G-CODE, comumente usada em impressoras 3D. O arquivo G-CODE define quais os pontos o bico deve percorrer e os demais parâmetros de impressão.

Ao dar a ordem para iniciar a fabricação, é necessário aplicar o adesivo específico para impressões 3D sobre a mesa. Logo em seguida o equipamento aquece a mesa de impressão e o bico de extrusão até 80 °C e 240 °C , respectivamente. Antes de iniciar a deposição de material dos corpos de prova, a mesa se movimenta no eixo Z até a posição ideal para o início do processo e, em seguida, a máquina deposita um contorno definido como *skirt*,

o qual tem o objetivo de testar a aderência do material na mesa e limpar o bico de extrusão, conforme Figura 29.

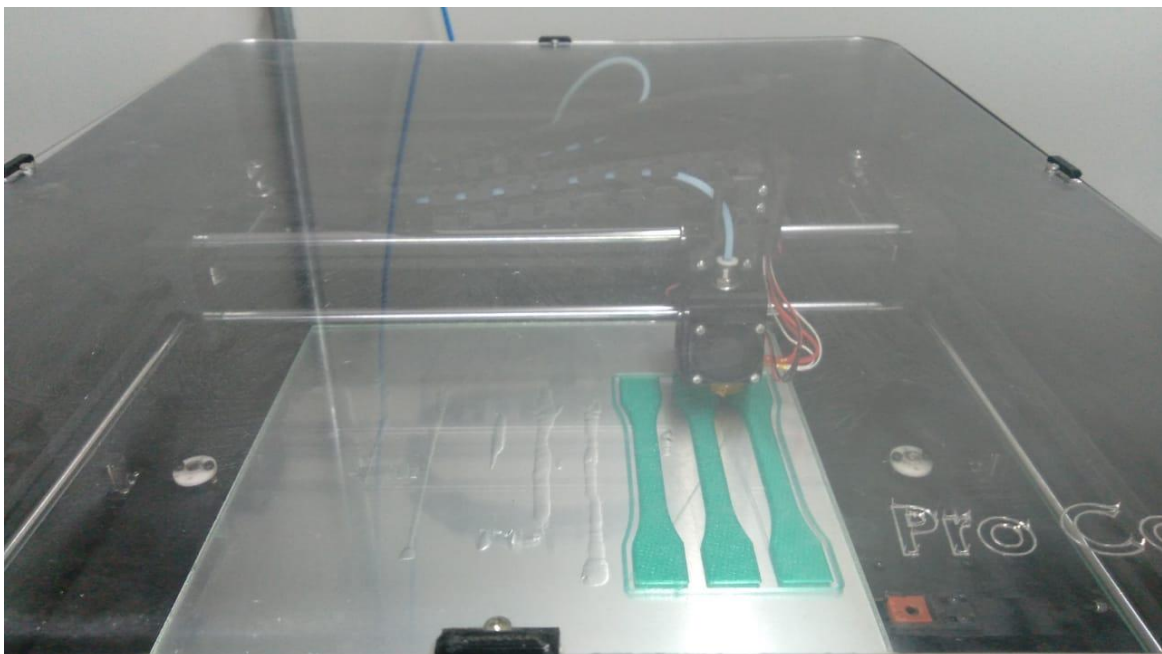
Figura 29 – Tipo de aderência *skirt* usado para fabricação dos CPs.



Fonte: autor (2023).

Ao finalizar a *skirt*, na qual foi depositado oito camadas, iniciou-se a fabricação dos modelos para o ensaio de tração, como é possível observar na Figura 30.

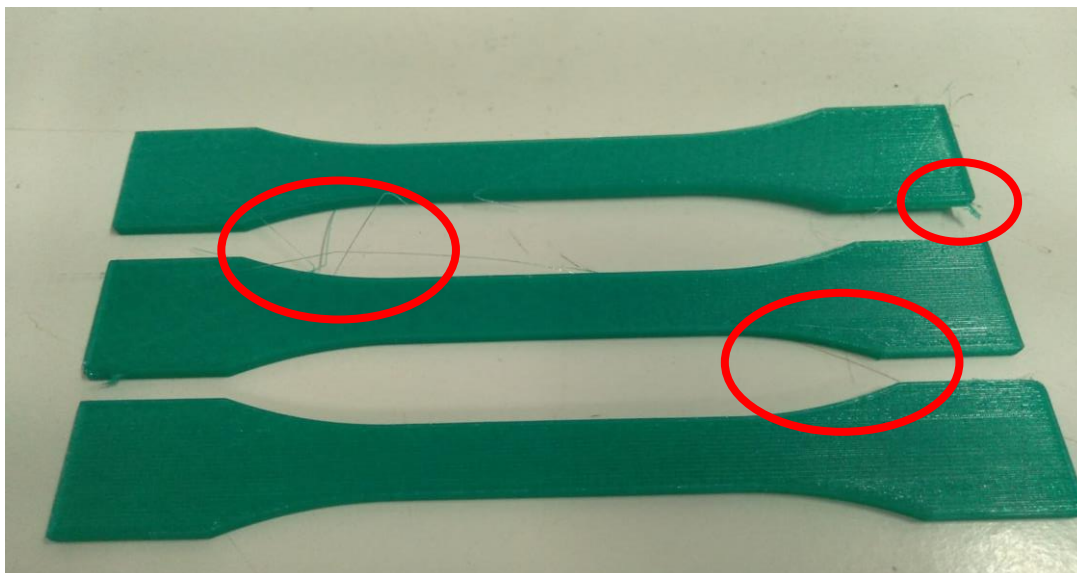
Figura 30 – Corpos de prova em processo de impressão.



Fonte: Autor (2023).

Após a deposição do material fundido, a mesa e o bico resfriam com o auxílio da porta da impressora aberta. Com as peças fabricadas, é necessário um processo de acabamento para ajustar alguns filetes que ficaram soltos no processo, conforme é possível analisar na Figura 31.

Figura 31 – Necessidade de acabamento nos CPs nas regiões circuladas.



Fonte: Autor (2023).

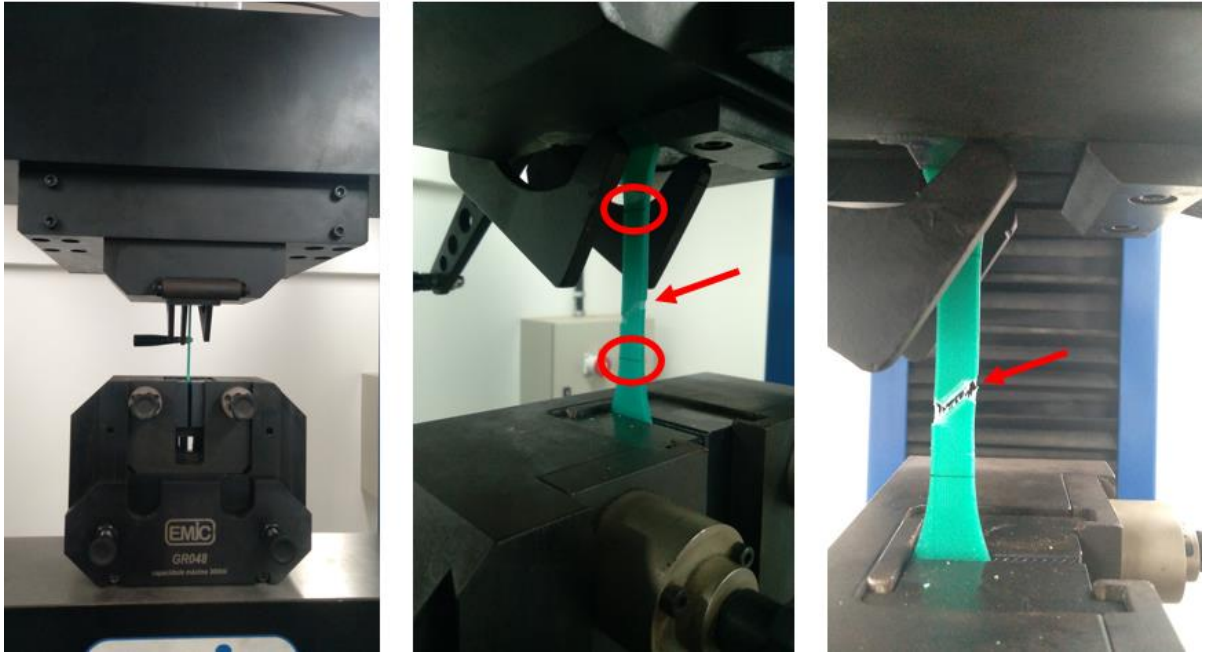
Com os elementos de ensaio acabados, compete a demarcação com uma nomenclatura específica para realizar a distinção e a marcação ao longo do corpo de prova para delimitar pontos estratégicos para o ensaio de tração.

3.6 Procedimento para ensaio de tração

Com os CPs fabricados foram definidos parâmetros para o ensaio de tração conforme a norma ASTM D638-22. Nessa perspectiva, a velocidade adotada para o deslocamento das garras de fixação foi 2 mm/min e a distância das garras ao centro do corpo de prova foi 67,5 mm. Para facilitar e garantir uma isonomia na distância entre as garras durante os ensaios de tração, foram traçadas linhas perpendiculares nos corpos de prova. A parte útil dos CPs também foi definida e marcada conforme sugerido na norma, a qual é possível observar na região circulada na Figura 31.

Uma vez que a peça de ensaio foi bem fixada nas garras da máquina, respeitando as zonas demarcadas, algumas medidas dos corpos de prova são inseridas no *software* de ensaio para começar a aplicação da força axial. Com a aplicação da carga acontece a estrição do CP e, conseqüentemente, rompimento, como é indicado pelas setas na Figura 32.

Figura 32- Processo de fixação, estrição e rompimento do corpo de prova.



Fonte: Autor (2023).

Após o rompimento do CP, os dados são exportados no formato TXT para analisar no *software* de estatística com o uso da técnica de análise de variância (ANOVA).

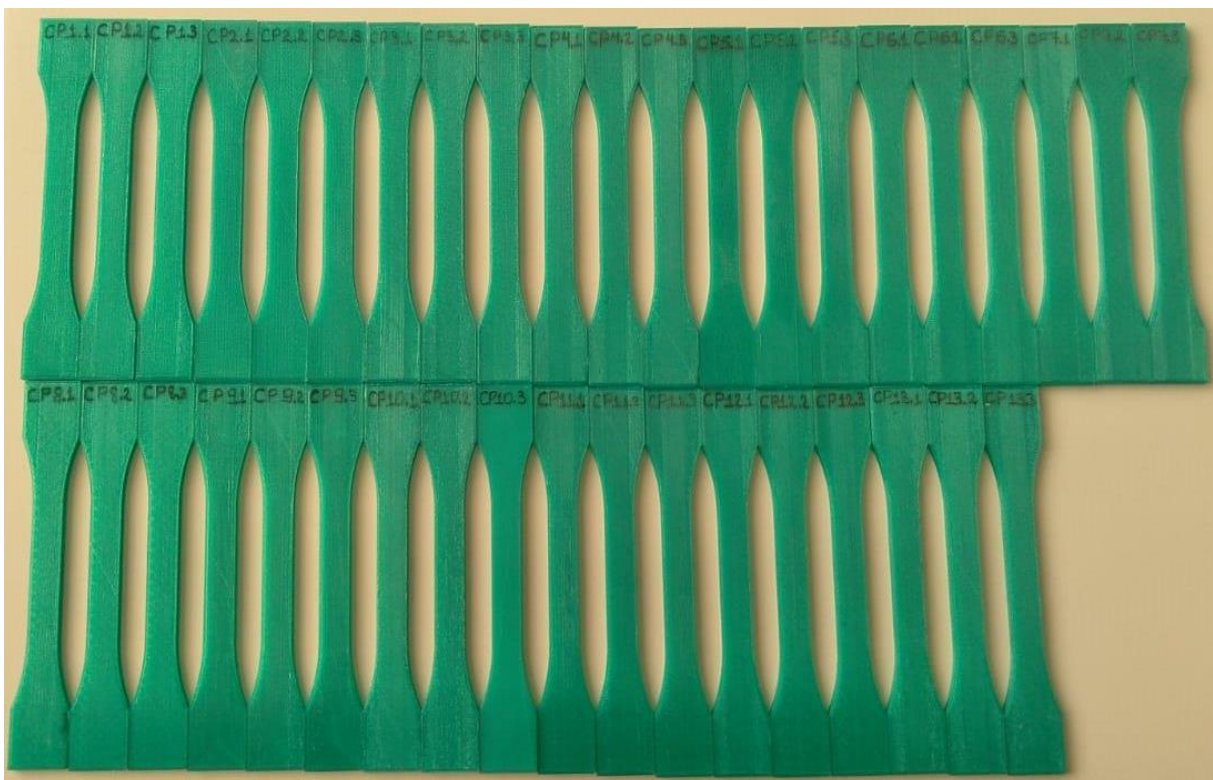
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O capítulo a seguir representa os resultados obtidos com o ensaio de tração e as medições realizadas. Para análise de variância foram plotados gráficos com intervalos de confiança de 95%. Além disso, foram registradas fotos e plotados gráficos de tensão-deformação para facilitar as análises.

4.1 Análise dimensional dos corpos de prova

Na Figura 33 estão representados os 39 corpos de prova impressos por manufatura aditiva em PETG.

Figura 33 – Corpos de prova impressos para o ensaio de tração.



Fonte: autor (2023).

Após finalizado o processo de impressão, acabamento e marcação, os CPs foram medidos com o auxílio de um paquímetro, conforme a Tabela 7, com o fito de avaliar se as dimensões estavam de acordo com a norma ASTM D638-22.

Tabela 7 – Dimensões dos corpos de prova com intervalo de confiança de 95%.

Tipo de preenchimento	Largura (mm)	Espessura (mm)
Linhas	13,01 ± 0,01	3,29 ± 0,07
Grade	13,17 ± 0,01	3,10 ± 0,06
Triângulos	13,06 ± 0,01	3,25 ± 0,05
Tri-hexágono	13,04 ± 0,02	3,28 ± 0,03
Cúbico	13,07 ± 0,01	3,22 ± 0,06
Subdivisão cúbica	13,03 ± 0,01	3,26 ± 0,04
Octeto	13,11 ± 0,01	3,28 ± 0,04
Quarto cúbico	13,05 ± 0,02	3,40 ± 0,02
Concêntrico	12,97 ± 0,01	3,30 ± 0,07
Ziguezague	13,01 ± 0,01	3,42 ± 0,01
Cruzado	13,03 ± 0,02	3,37 ± 0,01
Cruzado 3D	12,98 ± 0,01	3,35 ± 0,2
Giróide	13,03 ± 0,01	3,38 ± 0,02

Fonte: Autor (2023).

Uma vez que os valores sugeridos pela ASTM D638-22 para as dimensões da largura e espessura são $13 \pm 0,5$ e $3,2 \pm 0,4$, respectivamente, observa-se que os dados das medidas se encontram dentro dos limites de tolerância. Ao realizar o teste de variância ANOVA, verificou-se que $P > 0,5$ e $F < 1$, indicando que o tipo de preenchimento não apresentou significância nos valores de largura e altura.

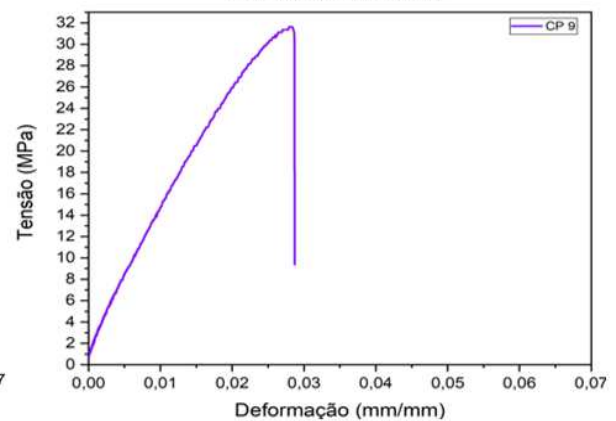
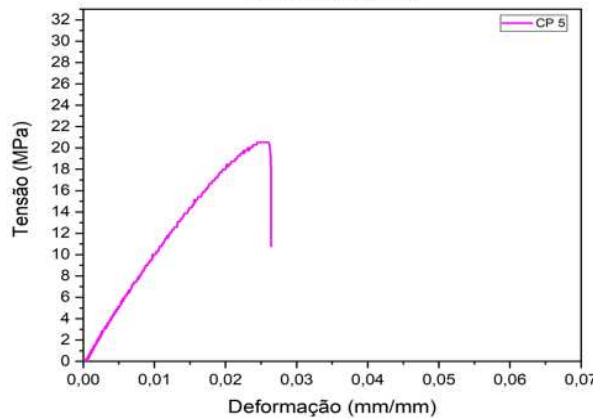
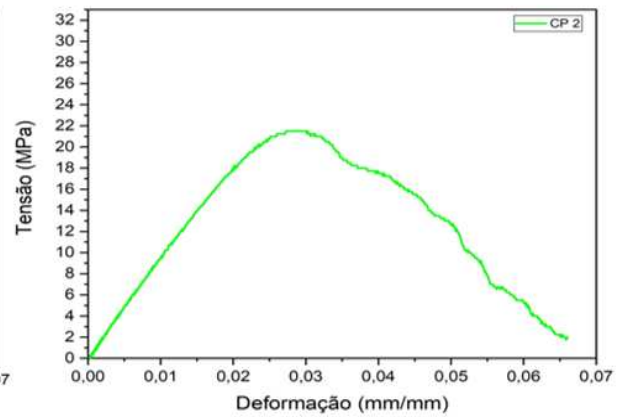
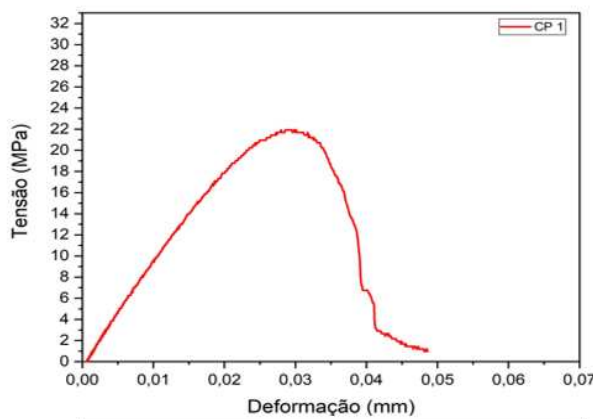
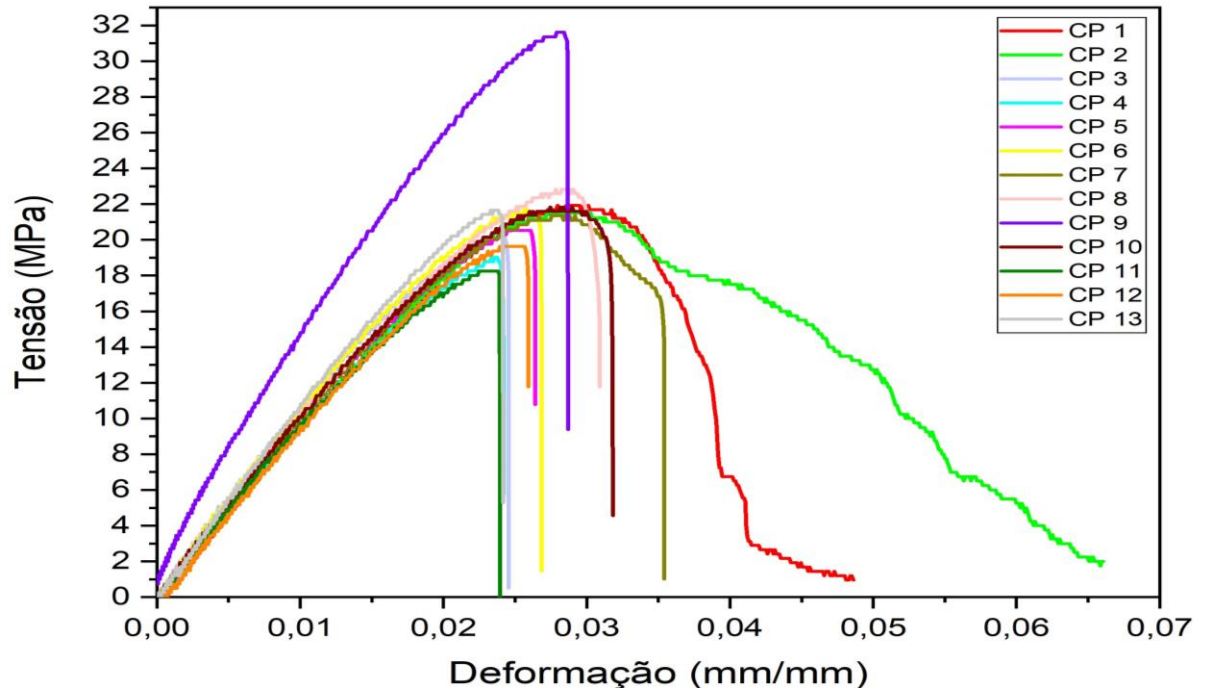
Além disso, observa-se uma variação nas medidas entre os tipos de corpos de prova, a qual aconteceu em função dos problemas de aderência das primeiras camadas do PETG à mesa de impressão combinado com a incerteza de medição dos instrumentos e a incerteza de impressão da máquina.

No estudo realizado por Messimer et. Al (2019), em que foram realizadas 6930 medições em CPs fabricados por FDM, o autor identificou que amostras com dimensões menores apresentam intervalos de confiança maiores e vice-versa, corroborando com a situação da Tabela 7 ao se comparar os intervalos de largura e espessura de cada CP.

4.2 Resistência à tração

Na Figura 34 está representado o comportamento das curvas tensão-deformação plotadas a partir do ensaio de tração dos corpos de prova impressos em PETG.

Figura 34 – Curvas tensão-deformação para todas as combinações e as 1, 2, 5 e 9, separadamente.



Fonte: autor (2023).

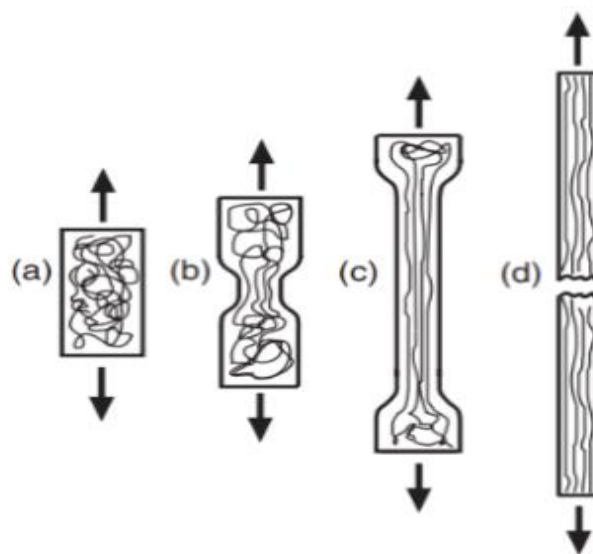
Na Figura 34 foram separados alguns gráficos para melhor visualização. Com isso, observa-se que o padrão das curvas varia de acordo com o tipo de preenchimento. Um aspecto em comum é a região elástica bem definida em todos os estudos.

Em contrapartida, a região plástica apresenta comportamentos distintos, ocupando uma área maior nas duas primeiras combinações. Tal variação nesse padrão das curvas denota que um tipo de preenchimento tem maior ductilidade que outro, como é o caso do CP 2 (tipo grade) em relação ao CP 5 (tipo cúbico), em que o primeiro apresenta maior capacidade de deformar plasticamente antes da fratura, logo é mais dúctil e o CP 5 mais frágil. Essas características foram enaltecidas pelos autores Meyers e Chawla (2009) em seus estudos a respeito de polímeros dúcteis.

Nas curvas tensão-deformação em que, após o limite de escoamento, as curvas tendem a decrescer sutilmente, acontece o fenômeno de alinhamento das cadeias moleculares no mesmo sentido da força. O decaimento suave da tensão ocorre porque as cadeias se alinham no sentido de aplicação de força de tração, para enfim acontecer o rompimento dos fios ao atingirem suas tensões máximas e, conseqüentemente, a fratura dos corpos de prova (Fernandes, 2016). Nos CPs em que o alinhamento não aconteceu ou foi discreto, como na combinação 9, ocorre o fato das cadeias moleculares já se encontrarem paralelas à força ou o tipo de preenchimento apresentar grande estabilidade estrutural.

Na Figura 35 é possível identificar esse processo de alinhamento das cadeias moleculares de acordo com a aplicação da força até a fratura dos CPs.

Figura 35 – Representação do comportamento das cadeias moleculares de polímeros dúcteis submetidos à tração.

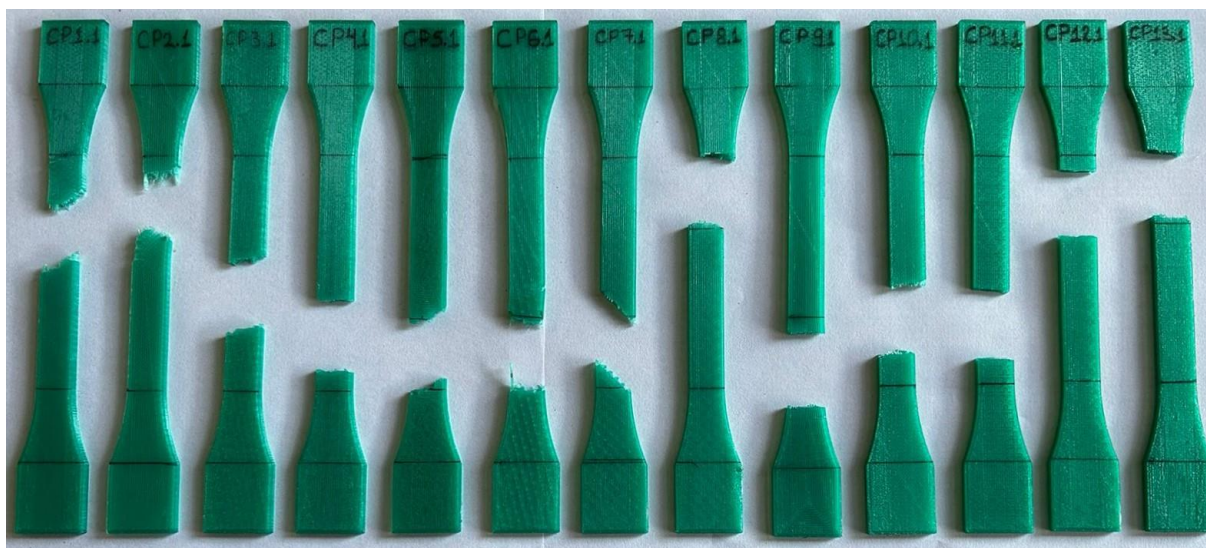


Fonte: Adaptado de Dowling (2013).

4.2.1 Análise visual da fratura dos CPs

Além dos padrões das curvas tensão-deformação, a análise visual dos corpos de prova é essencial para entender alguns fenômenos. Na Figura 36 é possível realizar uma inspeção visual para identificar possíveis padrões de ruptura.

Figura 36 – Amostra dos corpos de prova após o ensaio de tração.



Fonte: autor (2023)

É notório que a maioria dos CPs romperam próximos ao raio do filete. Para Masood (2010) esse comportamento é normal pelo fato da região ser um concentrador de tensão e tais configurações de fratura são comuns em peças fabricadas por FDM.

Outro ponto importante é a questão da geometria da região da fratura. Nessa perspectiva, é visível que em alguns corpos de prova (como os CPs 12 e 13) o sentido da fratura é perpendicular a força de tração aplicada, enquanto que em outros (como os CPs 1 e 7) há um ângulo não perpendicular. Esse fenômeno é decorrente do tipo de preenchimento, uma vez que nas peças as quais o preenchimento da região entre filetes as cadeias moleculares ficaram 0° , o rompimento foi perpendicular a força de tração.

No entanto, nas amostras que as regiões com mais espaços vazios não ficaram perpendiculares a força de tração, o rompimento também não ficou perpendicular como é possível analisar o CP7. Nessa situação, o tipo de preenchimento tem associação com a orientação das cadeias moleculares, em que algumas camadas tendem a se deslocar e outras a romper logo, conforme analisa Thompson et. al. (2019).

Por meio da análise visual, também é notório que a região da fratura apresentou aparências distintas. Quando comparado o CP2 com o CP9, observa-se que o primeiro tem fios mais prolongados e o segundo tem um perfil praticamente liso. Tal condição diz respeito

a capacidade de se deformar plasticamente antes da fratura, em que o maior alongamento dos fios no primeiro caso se configura como uma peça mais dúctil, enquanto o segundo caso é mais frágil, comportamentos que foram enaltecidos também na Figura 34.

4.2.2 Limite de resistência à tração

Durante o ensaio de tração, a máquina exporta dados referentes à força aplicada e o alongamento em função do tempo, possibilitando a extração de informações essenciais para entender o comportamento dos CPs. Após tratar as informações em planilhas, foram encontrados os seguintes valores de limite de resistência à tração (LRT) para as peças em PETG, conforme Tabela 8.

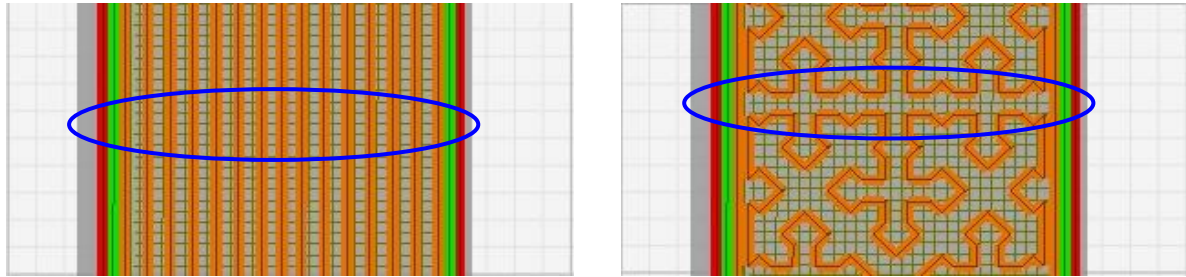
Tabela 8 – LRT para CPs fabricados por manufatura aditiva com PETG.

Tipo de preenchimento	LRT (MPa)
Linhas	21,76 ± 0,97
Grade	20,55 ± 0,76
Triângulos	20,68 ± 1,17
Tri-hexágono	19,77 ± 1,55
Cúbico	19,71 ± 1,65
Subdivisão cúbica	20,34 ± 1,12
Octeto	21,99 ± 1,12
Quarto cúbico	22,49 ± 0,75
Concêntrico	31,42 ± 0,45
Ziguezague	22,07 ± 0,55
Cruzado	18,27 ± 0,44
Cruzado 3D	19,40 ± 0,46
Giróide	22,16 ± 1,43

Fonte: Autor (2023).

Ao analisar os valores é evidente que o tipo cruzado apresentou o menor LRT e o tipo concêntrico o maior valor de resistência. Na Figura 37 é possível analisar o perfil dos preenchimentos na região entre os raios dos filetes dos CPs.

Figura 37 – Região de fratura para o preenchimento concêntrico e cruzado, respectivamente.

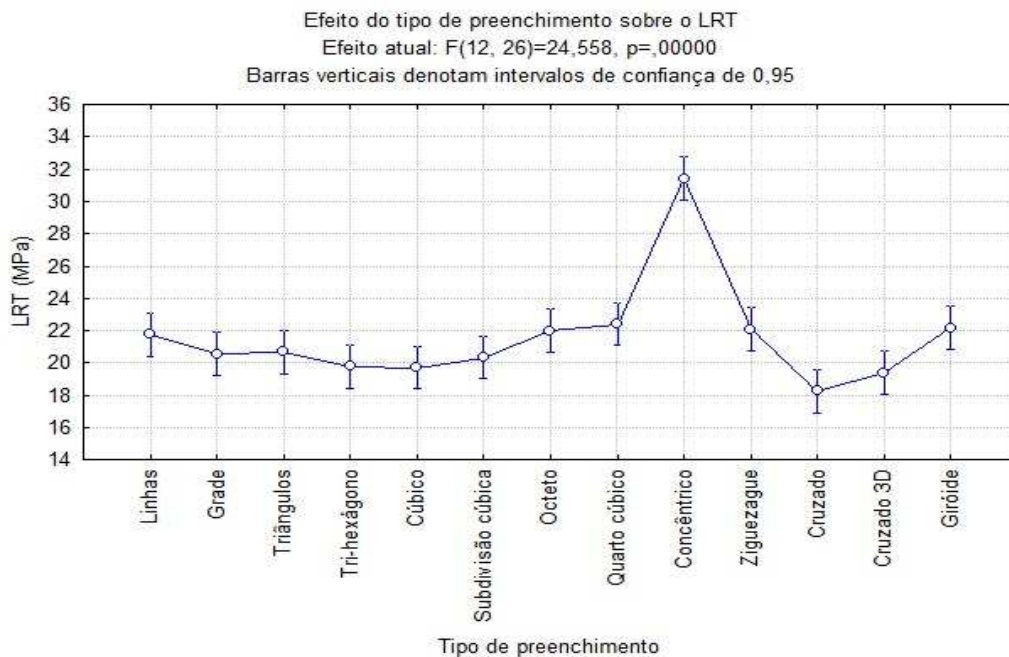


Fonte: Autor (2023).

As regiões circuladas em azul da Figura 37 demonstram o possível motivo da diferença entre os LRT dos preenchimentos, haja visto que a quantidade de material na seção sujeita à carga de tração é superior no padrão concêntrico. O padrão cruzado apresenta uma zona com concentrador de tensão (elevado volume vazio), o qual se configura como uma fenda (circulado em azul), tornando a seção transversal mais propícia à falha, conforme defendeu Fernandez Vicente et. al. (2016) em que a presença de grandes vazios na peça, proporciona uma redução na sua resistência à tração.

Estatisticamente, após computar os dados no *software* usando o método ANOVA, constatou-se que há significância do limite de resistência a tração no tipo de preenchimento de corpos de prova fabricados em PETG, uma vez que $P \ll 0,5$ e $F > 1$. Na Figura 38 os valores de LRT foram expressos graficamente.

Figura 38 – Efeito do tipo de preenchimento sobre o LRT.



Fonte: Autor (2023).

Com o auxílio do gráfico, fica evidente os valores do maior e do menor limite de resistência à tração. Além disso, os demais CPs apresentam valores de LRT próximos, tendo

pontos em comum ao considerar os intervalos de confiança. Essa proximidade nos limites de resistência à tração é explicada pela similaridade entre a quantidade de espaços vazios.

Ao comparar geometrias internas semelhantes como o tipo linhas e grade (em que o primeiro apresenta linhas unidirecionais a cada duas camadas e o segundo linhas bidirecionais a cada camada) nota-se que a relação entre os limites de tração (padrão linha maior que o padrão grade) segue a bibliografia escrita por Lima e Santos (2018), a qual associa essa relação ao fato de a maior quantidade de material depositada proporcionar um maior LRT.

4.2.3 Alongamento na ruptura

O alongamento está associado à capacidade de um material deformar até a falha, se o alongamento é grande, o material deforma muito até a falha. Nessa perspectiva, os valores médios de alongamentos foram coletados e expressos na Tabela 9.

Tabela 9 – Alongamento na ruptura para CPs fabricados com PETG.

Tipo de preenchimento	Alongamento na ruptura (mm)
Linhas	8,16 ± 0,33
Grade	9,63 ± 0,35
Triângulos	4,05 ± 0,22
Tri-hexágono	4,07 ± 0,13
Cúbico	4,24 ± 0,36
Subdivisão cúbica	4,14 ± 0,34
Octeto	6,05 ± 0,79
Quarto cúbico	5,01 ± 0,11
Concêntrico	4,88 ± 0,14
Ziguezague	5,49 ± 0,49
Cruzado	4,03 ± 0,10
Cruzado 3D	4,15 ± 0,10
Giróide	4,07 ± 0,11

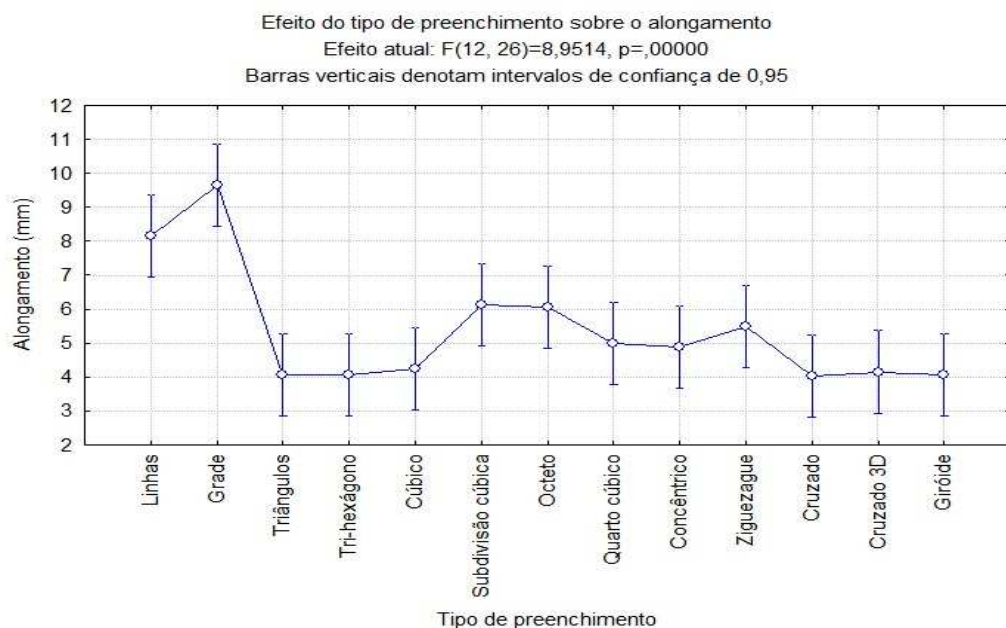
Fonte: Autor (2023).

Ao analisar os valores da Tabela 9, tem-se que o tipo grade apresenta o maior alongamento e o tipo Cruzado o menor. Na Figura 36 o tipo cúbico tem um elevado prolongamento dos fios na região da fratura, evidenciando a elevada ductilidade do corpo de

prova. Tal comportamento é explicado pelo maior rearranjo das cadeias moleculares para o devido padrão associado as características do material. Já no padrão cruzado os espaçamentos entre as formas (conforme Figura 37) tornam a peça mais propensa à ruptura, reduzindo a resistência ao alongamento em função do concentrador de tensão, conforme menciona Lima e Santos (2018).

Para verificar a significância dos resultados, foi realizado o teste de variância ANOVA. Para uma confiança de 95%, os valores de $P < 0,05$ e $F > 1$, afirmando que o tipo de preenchimento tem significância sobre o alongamento. Essa comprovação estatística foi demonstrada graficamente na Figura 39.

Figura 39 – Efeito do tipo de preenchimento sobre o alongamento.



Fonte: Autor (2023).

Por meio da leitura da Figura 39, é possível identificar além das inferências já mencionadas, a presença de outro comportamento, que é o caso da semelhança de valores de alongamentos entre o tipo triângulos, tri-hexágono e cúbico. Os corpos de prova apresentam grande semelhança nos agrupamentos dos perfis internos triangulares, ocasionando distribuições semelhantes de forças ao longo da seção transversal.

Ao comparar o grupo anteriormente citado com o grupo de maior alongamento como os do tipo linhas e grade, observa-se que a combinação de perfis triangulares proporcionou características associadas a maior fragilidade, os quais apresentam baixos valores de alongamento, com menores deformações que o segundo grupo.

Além das semelhanças mencionadas, observa-se que as combinações dos tipos cruzado, cruzado 3D e giróide também apresentaram comportamentos semelhantes ao se

comparar o alongamento. Tais perfis são formados por linhas curvas, as quais combinadas com a sobreposição das camadas, têm geometrias com aspectos semelhantes, justificando a proximidade entre os valores de alongamento para os materiais impressos em PETG.

4.4 Massa dos corpos de prova

Na Tabela 10 estão os valores médios de massa dos corpos de prova com seus intervalos de confiança de 0,95.

Tabela 10 – Massa dos CPs fabricados com PETG.

Tipo de preenchimento	Massa (g)
Linhas	8,45 ± 0,52
Grade	7,64 ± 0,41
Triângulos	8,09 ± 0,41
Tri-hexágono	8,05 ± 0,42
Cúbico	7,89 ± 0,48
Subdivisão cúbica	7,14 ± 0,40
Octeto	8,09 ± 0,41
Quarto cúbico	8,61 ± 0,16
Concêntrico	8,00 ± 0,42
Ziguezague	8,74 ± 0,01
Cruzado	8,00 ± 0,02
Cruzado 3D	7,65 ± 0,03
Giróide	8,50 ± 0,23

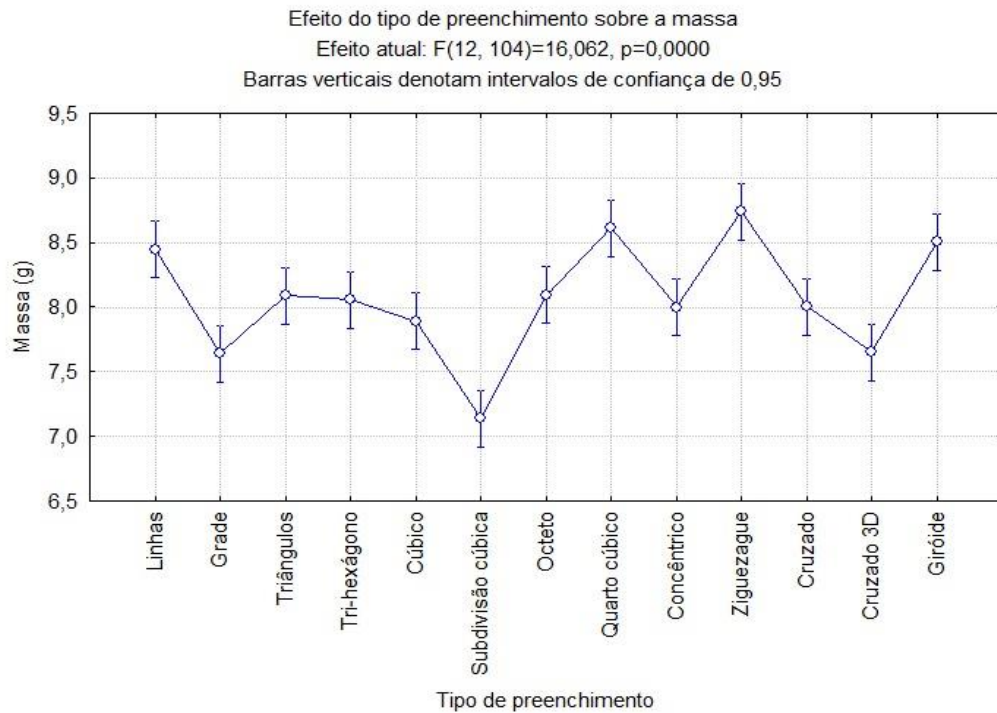
Fonte: Autor (2023).

Por meio da Tabela 10 é possível inferir que o tipo ziguezague apresentou a maior massa entre as combinações, fator associado diretamente a maior quantidade de material injetado durante a trajetória ao longo dos eixos X e Y do bico extrusor. Já a menor massa foi o tipo subdivisão cúbica, o qual foi desenvolvido visando uma redução no consumo de material, com uma quantidade maior de espaços vazios, conforme defendeu O'Connell (2022).

Ao realizar o teste estatístico de análise de variância, foi encontrado que o tipo de preenchimento tem influência sobre a massa das peças fabricadas em PETG, uma vez que os valores de $P \ll 0,05$ e $F > 1$. A Figura 40 representa graficamente os dados de massa das

combinações dos corpos de prova.

Figura 40 – Efeito do tipo de preenchimento sobre a massa.



Fonte: Autor (2023).

Por intermédio do teste ANOVA é possível comprovar a significância do tipo de preenchimento sobre a massa. Graficamente essa distinção é evidenciada, pois os há algumas regiões de pico no gráfico em relação as demais.

4.5 Tempo de impressão

Um aspecto importante para a fabricação de peças por manufatura aditiva é o tempo que uma peça demora para ser impressa. Tal parâmetro foi obtido durante a fabricação dos corpos de prova, sendo expresso pela Tabela 11.

Tabela 11 – Tempo de impressão dos CPs fabricados com PETG.

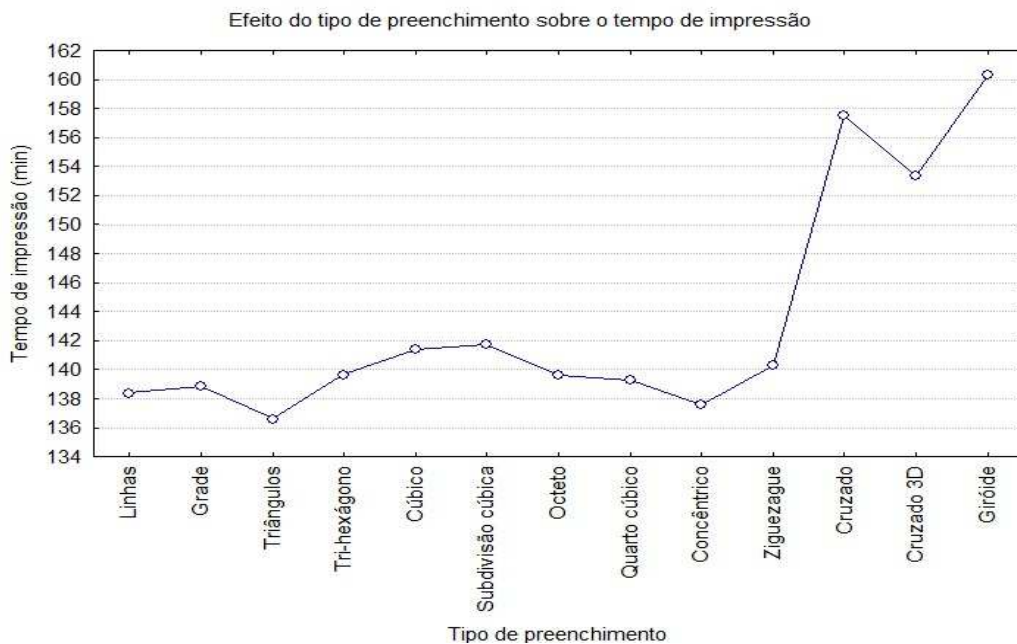
Tipo de preenchimento	Tempo de impressão (min)
Linhas	138,38
Grade	138,83
Triângulos	136,6
Tri-hexágono	139,65
Cúbico	141,37
Subdivisão cúbica	141,7
Octeto	139,62
Quarto cúbico	139,25
Concêntrico	137,55
Ziguezague	140,33
Cruzado	157,52
Cruzado 3D	153,32
Giróide	160,3

Fonte: Autor (2023).

Por meio da tabela 11 é possível afirmar que a combinação que apresentou o maior tempo de impressão foi o tipo Giróide com o tempo de impressão de 160,3 min para os três corpos de prova, com o preenchimento do tipo giróide. Já o tipo Triângulos, com um tempo de 136,6 min, apresentou o menor tempo.

Ao representar graficamente os valores são melhores interpretados, conforme é possível analisar na Figura 41.

Figura 41 – Efeito do tipo de preenchimento sobre o tempo.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 41, expõe o comportamento do tipo de preenchimento sobre o tempo de impressão. As combinações do tipo linhas, grade, triângulos, tri-hexágonos, cúbico, subdivisão cúbica, octeto, quarto cúbico, concêntrico e ziguezague apresentaram pequenas variações, tal situação se dá em função das trajetórias das camadas de impressão serem retas.

Já as combinações do tipo cruzado, cruzado 3D e giróide se destacaram das demais, por serem valores significativamente maiores, os quais os padrões são compostos por linhas onduladas, acarretando em maiores tempos para o bico extrusor finalizar uma camada e, conseqüentemente, maior tempo para imprimir a peça. Em consonância, De Rezende Martins (2021) afirma que peças com ondas nos sentidos dos eixos X e Y apresentam um maior tempo para impressão, uma vez que o cabeçote demora mais tempo mudando de direções, como é o caso do padrão de preenchimento giróide.

Além disso, constatou-se que os CPs com linhas curvas apresentavam maior tempo de fabricação ainda no processo de fatiamento do *software* Ultimaker Cura® 5.3.0, processo comprovado após a impressão das peças com PETG.

5 CONCLUSÃO

O trabalho em questão tem como objetivo avaliar a influência do tipo de preenchimento nas propriedades mecânicas (resistência à tração e alongamento na ruptura), na análise dimensional, na massa dos corpos de prova e no tempo de impressão em peças fabricadas pelo processo FDM com o filamento poli tereftalato de etileno glicol (PETG).

Nessa perspectiva, através dos principais pontos ressaltados no trabalho, pôde-se concluir que:

Observou-se que a variação dimensional das medidas dos corpos de prova ficou dentro dos intervalos de confiança estabelecidos pela norma ASTM D638-22, em que as medidas de espessura mesmo apresentando valores menores teve uma tolerância relativamente maior, no entanto é um fenômeno normal para medidas com valores relativamente pequenos. De modo geral, o tipo de preenchimento não exerceu influência nas medidas dos corpos de prova.

Analisando os diagramas de tensão-deformação das combinações verificou-se que os CPs impressos em PETG tiveram suas propriedades mecânicas influenciadas pelo tipo de preenchimento, uma vez que alguns se comportaram de modo mais dúctil (grade) e outros mais frágil (cruzado). Tal fenômeno é influenciado pelo alinhamento das cadeias moleculares, em que o desalinhamento prolongado favorecerá os CPs dúcteis, com uma geometria de fratura de fios prolongados. Em contrapartida, nas fraturas repentinas, os preenchimentos se configuram como frágeis, com fios praticamente uniformes e alinhados na região de fratura.

Ao avaliar o limite de resistência à tração, o padrão do tipo cruzado apresentou o menor LRT e o padrão concêntrico o maior. Esses resultados foram melhor avaliados ao ver o padrão que os compunha. Nessa perspectiva, o cruzado apresentou um espaço vazio perpendicular a aplicação da força, comportando-se como um concentrador de tensão e no tipo concêntrico constatou-se uma elevada densidade de fios axiais a aplicação da força, tornando a peça mais resistente ao esforço de tração. Analisando estatisticamente, foi verificado a significância do tipo de preenchimento no limite de resistência à tração, fator diretamente associado a quantidade de espaços vazios na peça e na densidade de material depositado.

Em relação ao alongamento, a análise em torno desse parâmetro foi essencial para verificar as características dos CPs associadas à ductilidade e fragilidade, se comportando como um fator de significância considerada em função do teste ANOVA. Além dos tipos grades e cruzado terem o maior e menor, respectivamente, valor de alongamento na ruptura, observou-se que alguns padrões internos com geometrias semelhantes tiveram valores de

alongamento próximos, como é o caso do grupo que apresentou perfis internos triangulares e o grupo com linhas onduladas.

Ao avaliar a massa, o teste de estatística comprovou que o tipo de preenchimento exerce significância sobre a massa de peças fabricadas em PETG. O tipo ziguezague teve maior massa e o tipo subdivisão cúbica a menor. Esse parâmetro está associado diretamente a quantidade de material depositada pelo bico extrusor, uma vez que quanto maior a liberação de filamento, maior o valor final de massa.

O tempo de impressão também se configurou como significativo ao realizar o teste ANOVA. O tipo giróide levou o maior tempo para ser impresso enquanto o tipo triângulos levou o menor tempo. A explicação para a diferença de tempo se dá na complexidade dos padrões, uma vez que tipos de preenchimento com linhas curvas demoram mais tempo para o bico extrusor finalizar a camada. Já com linhas retas o percurso é mais curto, influenciando diretamente no tempo final de produção da peça.

De modo geral, conclui-se que o tipo de preenchimento com método FDM de materiais impressos em PETG apresentou efeitos relevantes nas propriedades mecânicas, no limite de resistência a tração, no alongamento na ruptura, na massa e no tempo de impressão. No entanto, não teve efeito significativo nas medidas das peças.

Assim, os objetivos do referente trabalho foram atingidos, contribuindo para estudos futuros a respeito do tema com os resultados encontrados e a revisão bibliográfica realizada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a influência de outros parâmetros de impressão combinados com o tipo de preenchimento para corpos de prova de PETG.
- Analisar a influência do tipo de preenchimento com outros ensaios mecânicos com o uso do PETG.
- Analisar a viabilidade financeira do PETG em função de outros materiais em determinados estudos de casos.

REFERÊNCIAS

3D printed face shields for medics and professionals. **PRUSA 3D**, 2020. Disponível em: <https://www.prusa3d.com/page/covid-19_379/>. Acesso em 09 out. 2022.

7 formas de aumentar a velocidade da impressão 3D sem perder qualidade! **3D LAB**, 2018. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/aumentar-a-velocidade-da-impressao-3d/>>. Acesso em 19 out. 2022.

A Brief History of Additive Manufacturing. TriMech Blog. **Schotte, Greg**, 2019. Disponível em: <https://blog.trimech.com/a-brief-history-of-additive-manufacturing>. Acesso em 22 set. 2022.

ADDITIVE manufacturing trend report 2021: 3D printing market growth in the year of the COVID-19. **3DHUBS**. 2021. Disponível em: <<https://www.hubs.com/3dprinting/fdm/>>. Acesso em 26 set. 2022.

ALZHRANI, M. **Modification of Recycled Poly(ethylene terephthalate) for FDM 3D[1]Printing Applications**. 2017. Dissertação de Mestrado, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada., 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 638- 22**. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. United States, 2022.

Aprenda como escolher o tipo e percentual de preenchimento na impressão 3D! **3D LAB**, 2019. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/preenchimento-na-impressao-3d/>>. Acesso em 19 out. 2022.

Aprenda como evitar warping na sua impressão 3D. **tech CD**, 2021. Disponível em: <<https://techcd.com.br/noticias/evitar-warping/>>. Acesso em 19 out. 2022.

ARAÚJO, G. G et al. **Impressão 3D e os Parâmetros que influenciam no Produto Final. In: SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção**, 2017, Bauru - SP. Anais do XXIV Simpósio de Engenharia de Produção, 2017.

AUMNATE, C. et al. **Fabrication of ABS/Graphene Oxide Composite Filament for Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2018, 2018.

BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D**. Gestão, Tecnologia e Inovação: Revista eletrônica dos Cursos de Engenharia Curitiba, v. 1, n. 3, p. 9–18, 2017.

Bico Nozzle Impressoras 3d Ender Prusa Tevo Creality Bluer. **Ecofiltros sustentáveis**, 2022. Disponível em: https://leonardogod.mercadoshops.com.br/MLB-1954362430-bico-nozzle-impressoras-3d-ender-prusa-tevo-creality-bluer-_JM>. Acesso em 17 out. 2022.

BOURELL, D.; KRUTH, J. P.; LEU, M.; LEVY, G. et al. Materials for additive manufacturing. **CIRP Annals**, v. 66, n. 2, p. 659-681, 2017.

BRAGA, L. M. **Manufatura aditiva: uma análise de aplicações atuais**. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso – PUC/RJ, 2017.

CAMPBELL, T. et. al. **Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing**. Vol.8, 2011.

CASAGRANDE, M. V. S. **Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida fdm**. 2013. Projeto de Graduação - Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

Como saber se o filamento é ABS ou PLA? Aprenda a diferenciá-los! **3D LAB**, 2020. Disponível em: <[Configurações de enchimento. **Suporte ultimaker**, 2022. Disponível em: <<https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012607079-Infill-settings>>. Acesso em 25 out. 2022.](https://3dlab.com.br/como-saber-se-o-filamento-e-abs-ou-pla/#:~:text=Acontece%20que%20a%20densidade%20do,de%201%2C24g%2Fcm%C2%B3.>>. Acesso em 09 out. 2022.</p></div><div data-bbox=)

Conheça a história completa da Makerbot – Parceria LWT Sistemas. **LWT SISTEMAS**, 2021. Disponível em: <<https://www.lwtsistemas.com.br/2021/05/07/conheca-a-historia-completa-da-makerbot-parceira-lwt-sistemas/>>. Acesso em 26 set. 2022.

Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D. **3D LAB**, 2017. Disponível em: <<https://www.3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>>. Acesso em 10 out. 2022.

Cura & Infill: os melhores padrões de preenchimento. **ALL3DP**, 2022. Disponível em: <<https://all3dp.com/pt/2/cura-infill-padroes-preenchimento/>>. Acesso em 25 out. 2022.

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

DE MORAES, E. A. **Estudo da influência do teor de acetato de vinila na morfologia e biodegradabilidade de blendas poli(ácido láctico)/polietileno-co-acetato de vinila**. 2017. Tese de mestrado - Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2017.

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

Dicas para a impressão 3D com ABS. **3D.on**, 2022. Disponível em: <<http://www.3don.net.br/DicasImpressao.aspx>>. Acesso em 19 out. 2022.

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials Engineering Methods for**

Deformation, Fracture, and Fatigue. 4. ed. Edinburgh Gate, Harlow, Reino Unido: Pearson Education Limited, 2013.

Estruturas de suporte à manufatura aditiva: por que são importantes e como projetar para elas. **Manufatura digital**, 2022. Disponível em: <<https://www.manufaturadigital.com/estruturas-de-suporte-manufatura-aditiva/>>. Acesso em 29 set. 2022.

FDM 3D Printing materials compared. 2017. **3DHUB**, 2020. Disponível em: <<https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>>. Acesso em 09 out. 2022.

FERNANDES, J. F. M. **Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. Lisboa, Portugal, 2016.

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

FERNANDO, R. M. **Análise experimental de amostras produzidas por manufatura aditiva em PLA através de ensaio de tração.** Trabalho de Conclusão de Curso – UFU, 2019.

Filamento PETG e a impressão de máscaras para combater o corona vírus. **3D LAB**, 2020. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/filamento-petg-impressao-de-mascaras/>>. Acesso em 09 out. 2022.

Flex: inovação com manufatura aditiva. **BAGUETE**, 2020. Disponível em: <<https://www.baguete.com.br/noticias/01/06/2022/flex-inovacao-com-manufatura-aditiva/>>. Acesso em 30 set. 2022.

FREY, S. The Best PETG Filaments of 2021. **All3DP**. 2021. Disponível em: <<https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/>>. Acesso em 7 nov. 2021.

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

GUIA: A tecnologia de impressão 3D. **Brasilia Fab Lab**, 2017. Disponível em: <<https://medium.com/bsbfablab/guia-a-tecnologia-de-impress%C3%A3o-3d-2d8b6b8cb5e5>>. Acesso em 05 out. 2022.

How to Eliminate Plastic Waste and Plastic Pollution with Science and Engineering. Interesting Engineering. **BAKER, M**, 2018. Disponível em: <[https://interestingengineering.com/how-to-eliminate-plastic-waste-and-plastic-pollution-with-science-and\[1\]engineering](https://interestingengineering.com/how-to-eliminate-plastic-waste-and-plastic-pollution-with-science-and[1]engineering)>. Acesso em 29 set. 2022.

ISO/ASTM 52900. **Additive manufacturing - General principles - Terminology**, 2018. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en..> Acesso em 02 jun. 2022./

JAFARI, M. et al. A novel system for fused deposition of advanced multiple ceramics. **Rapid Prototyping Journal**, MCB UP Ltd, v. 6, n. 3, p. 161–175, 2000.

KONDO, H. The Best 3D Print Speed Settings for PLA & More. **All3DP**. 2021. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/3d-printing-speed-optimal-settings/>>. Acesso em 19 out. 2022.

LIMA, E. D.; SANTOS, J. R.; **Estudo sobre novos componentes fabricados pela indústria automobilística com o auxílio da manufatura**. 2018. Monografia - Faculdade de Tecnologia de Santo André, Santo André, SP, 2018.

LSEV: carro é feito com impressora 3D e deve chegar ao mercado em 2019. **TECHTUDO**, 2018. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/2018/03/lsev-carro-e-feito-com-impressora-3d-e-deve-chegar-ao-mercado-em-2019.ghtml>>. Acesso em 04 set. 2022.

MASOOD, S.H.; MAU, K.; SONG, W.; **Tensile properties of processed fdm polycarbonate material**. Mater. Sci. Forum 2010.

MATTERHACKERS. How to Succeed when 3D Printing with PETG Filament. **MatterHackers**. 2021. Disponível em: <<https://www.matterhackers.com/news/how-to-succeed-when-printing-with-petg-filament>>. Acesso em 26 out. 2022.

Melhores impressoras 3D. **GEEK360**, 2021. Disponível em: <<https://geek360.com.br/melhores-impressoras-3d/>>. Acesso em 28 set. 2022.

MESSIMER, Sherri L. et al. Full-density fused deposition modeling dimensional error as a function of raster angle and build orientation: Large dataset for eleven materials. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 3, n. 1, p. 6, 2019.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical behavior of materials**. Cambridge University Press, USA. 2nd Ed., 2009.

O'CONNELL, J. 3D Printing Infill: The Basics Simply Explained. **All3DP**. 2022. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>> . Acesso em: 6 abr. 2022.

O'CONNELL, J. The Most Important 3D Printer Slicer Settings. **All3DP**. 2021. Disponível em: <<https://m.all3dp.com/2/3d-slicer-settings-3d-printer/>>. Acesso em 19 out. 2022.

OLIVEIRA, R. *et al.* **O design nas próteses cyborg beast nas perspectivas de Sargent (1994) e Lobach (2001)**. v.11, n 21, p. 73-96, 2022.

PANDA, B. N.; RAJU BAHUBALENDRUNI, M. V.; BISWAL, B. B. **Comparative Evaluation of Optimization Algorithms at Training of Genetic Programming for Tensile Strength Prediction of FDM Processed Part**. Procedia Materials Science, v. 5, p. 2250-2257, 2014.

PETG Filament Guide – Explained, Compared Reviewed. **ALL3D**, 2018. Disponível em: <https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/>>. Acesso em 09 out. 2022.

PETG! Será que ele realmente é melhor do que PLA e ABS? **3D LAB**, 2021. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/petg-conheca-esse-material/>>. Acesso em 09 out. 2022.

PLA: tudo o que você precisa saber sobre o filamento PLA. **3D LAB**, 2019. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/>>. Acesso em 05 out. 2022.

Plástico ABS e suas principais características e aplicações. **Mais polímeros**, 2018. Disponível em: <<https://maispolimeros.com.br/2018/09/24/plastico-abs-e-suas-principais-caracteristicas-e-aplicacoes/>>. Acesso em 05 set. 2022.

Preenchimento relâmpago na sua impressora 3d - Novo Cura 4.12. **3D GEEK SHOW – Impressão 3D**, 2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=8ohHyL5Fqh0>>. Acesso em 25 out. 2022.

Qual a influência da temperatura na impressão 3D? **3DLAB**, 2019. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/temperatura-na-impressao-3d/>>. Acesso em 19 out. 2022.

QUAL Bico Escolher para Minha Impressora 3D?. **Acelera 3D**, 2019. Disponível em: <<https://acelera3d.com/qual-bico/>>. Acesso em 17 out. 2022.

Qual é a influência da altura da camada em suas peças 3D? **3D LAB**, 2017. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/altura-da-camada-na-impressao-3d/>>. Acesso em 18 out. 2022.

Reciclagem de plásticos na impressão 3D. **IMPRESSORAS3D.COM**, 2019. Disponível em: <<https://www.impresoras3d.com/pt/reciclagem-de-pl%C3%A1sticos-na-impress%C3%A3o-3d/>>. Acesso em 28 set. 2022.

REDWOOD, B.; SCHFFER, F.; GARRET, B. **The 3D printing handbook: technologies, design and applications**. 3D Hubs, 2017.

RIBEIRO, P. **Caracterização Mecânica de Estruturas Manufaturadas por Adição de Material Termoplástico com diferentes níveis e formas de preenchimento**. Trabalho de Conclusão de Curso - UnB, 2019.

SCHWAB, Klaus. The Global Competitiveness Report 2019. **World Economic Forum**, 2019.

Selective Laser Sintering, Birth of an Industry. **UTEXAS**, 2012. Disponível em: <<http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry##ch4>>. Acesso em 02 jun. 2022.

Sobre o conceito de transição vítrea em polímeros. **BEQ**, 2019. Disponível em: <<https://engenharia-quimica.blogspot.com/2011/07/sobre-o-conceito-de-transicao-vitrea-em.html>>. Acesso em 11 out. 2022.

SOUSA, J. G. Q. **Efeito dos parâmetros de impressão 3d na resistência à tração de peças impressas com filamento abs**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Ceará, Russas, CE, 2022.

Tabela de propriedades comparativa de filamentos 3D. **R3DY**, 2021. Disponível em: <<https://www.r3dy.com.br/tabela-de-propriedades-comparativa-de-filamentos-3d/>>. Acesso em 10 out. 2022.

Tamanho de bico para Impressora 3D: Qual usar? Prós e Contras? **3DFila**, 2021. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/tamanho-de-bico-para-impressora-3d-qual-usar-pros-e-contras/>>. Acesso em 17 out. 2022.

THOMPSON, R. et al. Properties of FDM Prints. **Universidade of Cambridge**. 2019. Disponível em: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/add_manuf/fdm.php>. Acesso em: 17 out. 2022.

Tipos de preenchimento no Cura! Veja como configurar o infill neste software. **3DLab**, 2021. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/preenchimento-no-cura/>>. Acesso em 25 out. 2022.

TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **2014. Rapid Prototyping Journal**, v. 20 n. 3, p. 192–204, 2014.

VELOCIDADE de impressão 3d: melhores configurações para sua aplicação. **Wishbox**, 2020. Disponível em: <<https://www.wishbox.net.br/blog/velocidade-de-impressao-3d/>>. Acesso em 19 out. 2022.

VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2017.

WOHLERS, T. T. **Wohlers report 2008**. Colorado: Wohlers Associates, 2008.

ZUNIGA, J. *et al.* **Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences**. BMC Research Notes, v.8, 2015.