



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE RUSSAS**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LUCAS FELIPE AGUIAR MAIA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PETG UTILIZANDO MÉTODO DE TAGUCHI**

**RUSSAS**

**2023**

LUCAS FELIPE AGUIAR MAIA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PETG UTILIZANDO MÉTODO DE TAGUCHI

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)

---

- M187a Maia, Lucas Felipe Aguiar.  
Análise da influência dos parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PETG utilizando o método de Taguchi / Lucas Felipe Aguiar Maia. – 2023.  
132 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.
1. Impressão 3D. 2. Polietileno Tereftalato Glicol (PETG). 3. Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).  
4. Método de Taguchi. 5. Propriedades Mecânicas. I. Título.

CDD 620.1

---

LUCAS FELPE AGUIAR MAIA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PETG UTILIZANDO MÉTODO DE TAGUCHI

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: 28/11/2023.

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 minha mãe, Elizabete, por ajudar a tornar isso tudo possível.

## RESUMO

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, é uma tecnologia revolucionária que tem transformado a forma como objetos tridimensionais são produzidos. Nesse contexto, o estudo dos parâmetros de impressão 3D e a otimização das propriedades mecânicas são de suma importância para aproveitar todo o potencial dessa tecnologia. Entre os materiais utilizados na impressão 3D, o Polietileno Tereftalato Glicol (PETG) tem se destacado devido às suas propriedades únicas, como resistência mecânica, durabilidade e biodegradabilidade. No entanto, é necessário compreender a influência dos parâmetros de impressão 3D no PETG para maximizar suas propriedades desejadas. Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho foi analisar como os parâmetros de nível de preenchimento, padrão de preenchimento, altura de camada e orientação de impressão afetam as propriedades de resistência à tração, alongamento na ruptura, tempo de impressão e massa do PETG impresso em 3D, assim como definir a combinação dos níveis dos fatores de controle que maximizam essas propriedades. Para alcançar esse objetivo, utilizou-se o Método de Taguchi, amplamente recomendado para estudos que envolvem múltiplos fatores e um grande número de combinações a serem avaliadas. Os resultados obtidos destacaram que o nível de preenchimento foi o fator mais influente no limite de resistência à tração, tempo de impressão e massa das amostras. Aumentos no nível de preenchimento resultaram em maior resistência, porém com um tempo de impressão mais longo e maior massa das peças. O padrão de preenchimento também teve um impacto significativo, sendo o padrão "linhas" o mais eficaz para aumentar o alongamento na ruptura e melhorar a resistência do material. Além disso, a altura de camada influenciou o tempo de impressão e a massa das amostras, com alturas maiores resultando em maior massa, mas tempo de impressão reduzido. Quanto à orientação de impressão, foi menos influente, exceto para o alongamento na ruptura, onde a orientação de  $-45^\circ$  e  $45^\circ$  foi a mais adequada. Para o limite de resistência à tração, a orientação perpendicular de  $90^\circ$  foi considerada a mais adequada. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a necessidade de considerar os parâmetros de impressão 3D no PETG para otimizar suas propriedades mecânicas desejadas. Compreender a influência desses parâmetros possibilitará a fabricação de peças impressas em 3D com melhor desempenho e qualidade. Essas descobertas contribuem significativamente para o avanço da impressão 3D e seu uso em diversas aplicações industriais e tecnológicas.

**Palavras-chave:** impressão 3D; polietileno tereftalato glicol (PETG); modelagem por fusão e deposição (FDM); método de Taguchi; propriedades mecânicas; parâmetros de impressão.

## ABSTRACT

3D printing, also known as additive manufacturing, is a revolutionary technology that has transformed the way three-dimensional objects are produced. In this context, the study of 3D printing parameters and the optimization of mechanical properties are of utmost importance to harness the full potential of this technology. Among the materials used in 3D printing, Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) has stood out due to its unique properties such as mechanical strength, durability, and biodegradability. However, it is necessary to understand the influence of 3D printing parameters on PETG to maximize its desired properties. In this context, the main objective of this work was to analyze how the parameters of fill density, fill pattern, layer height, and print orientation affect the properties of tensile strength, elongation at break, printing time, and mass of 3D-printed PETG, as well as to define the combination of control factor levels that maximize these properties. To achieve this objective, the Taguchi Method was used, widely recommended for studies involving multiple factors and a large number of combinations to be evaluated. The results obtained highlighted that the fill density was the most influential factor in the tensile strength limit, printing time, and mass of the samples. Increases in fill density resulted in higher strength, but with longer printing time and greater mass of the parts. The fill pattern also had a significant impact, with the "lines" pattern being the most effective in increasing elongation at break and improving material strength. Furthermore, layer height influenced the printing time and mass of the samples, with greater heights resulting in higher mass but reduced printing time. As for print orientation, it was less influential, except for elongation at break, where the  $-45^\circ$  and  $45^\circ$  orientations were the most suitable. For the tensile strength limit, the perpendicular  $90^\circ$  orientation was considered the most suitable. Thus, the results obtained reinforce the need to consider 3D printing parameters for PETG to optimize its desired mechanical properties. Understanding the influence of these parameters will enable the manufacturing of 3D-printed parts with better performance and quality. These findings contribute significantly to the advancement of 3D printing and its use in various industrial and technological applications.

**Keywords:** 3D printing; polyethylene terephthalate glycol (PETG); fused deposition modeling (FDM); Taguchi method; mechanical properties; printing parameters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resumo das etapas de impressão 3D .....	20
Figura 2 – Visão geral de mercado 2018-2026 .....	22
Figura 3 – Etapas de confecção de peças por FDM/FFF .....	25
Figura 4 – Síntese do processo de impressão .....	26
Figura 5 – Características de empenamento e adesão de camada .....	27
Figura 6 – Características do suporte e preenchimento .....	27
Figura 7 – Aplicações gerais para FDM/FFF .....	29
Figura 8 – Participação de setores no mercado de AM .....	29
Figura 9 – Aplicações de engenharia usando FDM/FFF .....	30
Figura 10 – Usos medicinais da prototipagem rápida no .....	31
Figura 11 – Movimento do bico e mesa nas impressoras cartesiana, delta .....	32
Figura 12 – Impressora 3D tipo cartesiana .....	33
Figura 13 – Impressora .....	34
Figura 14 – Impressora 3D tipo polar .....	35
Figura 15 – Forma de comercialização dos filamentos de impressão .....	37
Figura 16 – Resumo das informações-chave do carretel e filamento .....	38
Figura 17 – Síntese gráfica das propriedades mecânicas .....	42
Figura 18 – Representação de uma torre de temperatura .....	44
Figura 19 – Níveis de preenchimento de 10 a 90% na impressão 3D .....	46
Figura 20 – Tipos/padrões de preenchimento na impressão 3D .....	47
Figura 21 – Representação da orientação de impressão .....	47
Figura 22 – Ângulos de orientação 0°, 45° e 90° para FDM/FFF .....	48
Figura 23 – Combinação dos ângulos de orientação em (-45°,45°) e (0°,90°) .....	49
Figura 24 – Medida da altura de camada .....	51
Figura 25 – Diâmetros de bico (mm) disponíveis no mercado .....	52
Figura 26 – Síntese dos principais parâmetros de impressão .....	53
Figura 27 – Representação de um ensaio de tração .....	54
Figura 28 – Máquina de ensaio de tração .....	56
Figura 29 – Exemplo de extensômetro .....	56
Figura 30 – Resistência a tração e módulo de Young para materiais usados em FDM .....	57
Figura 31 – Gráfico da função perda de Taguchi .....	58
Figura 32 – Representação de um sistema .....	60



Figura 33 – Representação de quadros latinos .....	61
Figura 34 – Filamento PETG ( <i>PrintaLot</i> ) .....	63
Figura 35 – Impressora GTMax3D H5.....	64
Figura 36 – Máquina de Ensaio de Tração (EMIC).....	65
Figura 37 – Paquímetro digital ZAAS.....	66
Figura 38 – Balança eletrônica de precisão .....	66
Figura 39 – Fluxograma metodológico .....	67
Figura 40 – Fluxograma das etapas de interpretação dos resultados.....	67
Figura 41 – Corpo de prova para ensaio de tração .....	76
Figura 42 – Modelagem do CP no <i>Solid Edge</i> .....	77
Figura 43 – Modelagem no <i>Ultimaker Cura</i> .....	78
Figura 44 – Padrão de Preenchimento "Linhas" e suas orientações.....	78
Figura 45 – Confeção dos corpos de prova .....	79
Figura 46 – CPs impressos, demarcados e armazenados.....	80
Figura 47 – Procedimento do ensaio de tração.....	81
Figura 48 – CPs impressos .....	83
Figura 49 – Influência da temperatura e do material na mesa de aderência.....	85
Figura 50 – Curva tensão <i>versus</i> deformação para a amostra CP 15.1.....	86
Figura 51 – Aspecto da curva tensão-deformação para .....	87
Figura 52 – Influência da temperatura na curva tensão-deformação.....	88
Figura 53 – Influência da taxa de deformação na curva.....	88
Figura 54 – Estágios característicos presente .....	89
Figura 55 – Perfis de fratura para o PETG .....	90
Figura 56 – Desenho esquemático entre pontes fibrilares, microvazios e trincas.....	91
Figura 57 – Direção de falha diagonal e perpendicular para o PETG.....	92
Figura 58 – Regiões internas dos CPs após a ruptura .....	92
Figura 59 – Gráfico tensão <i>versus</i> deformação para diferentes níveis do PETG .....	100
Figura 60 – Gráfico tensão <i>versus</i> deformação para o padrão linhas.....	106
Figura 61 – Padrão de preenchimento do tipo giróide .....	121

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Número de patentes de FDM antes de 2008 e a partir de 2009 .....	23
Gráfico 2 – Altura de camada x tempo de impressão .....	50
Gráfico 3 – Curva tensão x deformação para polímeros .....	55
Gráfico 4 – Efeitos principais para médias do LRT .....	98
Gráfico 5 – Efeitos principais para razões s/n do LRT .....	99
Gráfico 6 – Efeitos principais para as médias do alongamento .....	105
Gráfico 7 – Efeitos principais para as razões s/n do alongamento .....	105
Gráfico 8 – Efeitos principais para as médias referentes ao tempo .....	111
Gráfico 9 – Efeitos principais para as médias referentes ao tempo .....	111
Gráfico 10 – Efeitos principais para as médias referentes a massa .....	117
Gráfico 11 – Efeitos principais para as razões s/n referentes a massa .....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desafios da manufatura aditiva .....	19
Tabela 2 – Evolução da impressão 3D nos anos 1980.....	23
Tabela 3 – Benefícios e vantagens da modelagem por fusão e deposição .....	24
Tabela 4 – Requisitos básicos para a impressão 3D FDM .....	28
Tabela 5 – Vantagens e desvantagens das impressoras cartesianas .....	33
Tabela 6 – Vantagens e desvantagens das impressoras tipo delta.....	35
Tabela 7 – Vantagens e desvantagens das impressoras tipo polar .....	36
Tabela 8 – Comparativo entre as propriedades do PLA, ABS e PETG.....	42
Tabela 9 – Média das temperaturas de impressão para o PETG, ABS e PLA.....	44
Tabela 10 – Média das temperaturas de mesa para o PETG, ABS e PLA.....	45
Tabela 11– Parâmetros de controle .....	69
Tabela 12 – Parâmetros fixos.....	70
Tabela 13 – Resumo dos elementos centrais para o experimento .....	70
Tabela 14 – Dimensões (mm).....	76
Tabela 15 – Dimensões dos CPs.....	83
Tabela 16 – Limites de resistência à tração médios para cada combinação (CP) .....	93
Tabela 17 – Resposta para as médias de cada nível de cada combinação do LRT .....	94
Tabela 18 – Resposta para as razões s/n do LRT .....	95
Tabela 19 – ANOVA para as razões s/n do LRT.....	96
Tabela 20 – Alongamento na ruptura médio para cada combinação (CP).....	101
Tabela 21 – Resposta para as médias de cada nível de combinação do alongamento.....	102
Tabela 22 – Resposta para as razões s/n do alongamento .....	103
Tabela 23 – ANOVA para razões s/n do alongamento.....	104
Tabela 24 – Tempo de médio de impressão para cada conjunto de combinação (CP).....	107
Tabela 25 – Resposta para as médias de cada nível de combinação referentes ao tempo.....	108
Tabela 26 – Resposta para as razões s/n referentes ao tempo.....	109
Tabela 27 – ANOVA para razões s/n referentes ao tempo.....	110
Tabela 28 – Médias das massas para cada conjunto de cada combinação (CP).....	113
Tabela 29 – Resposta para as médias de cada nível de combinação referentes a massa .....	114
Tabela 30 – Resposta para as razões s/n referentes a massa.....	115
Tabela 31 – ANOVA para as razões s/n referentes a massa.....	116
Tabela 32 – Resumo dos resultados sob cada propriedade.....	119

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AM	Additive Manufacturing
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais
CAD	Computer Aided Design
CAGR	Taxa de Crescimento Anual Composta
CAM	Computer Aided Manufacturing
CPs	Corpos de Prova
DOE	Planejamento de Experimentos
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição
FFF	Fabricação por Filamento Fundido
GPa	Giga Pascal
kN	Kilo Newton
LRT	Limite de Resistência à Tração
MO	Matriz Ortogonal
MPa	Mega Pascal
OL	Quadros Latinos
PC	Polycarbonato
PEEK	Poli Éter-Éter-Cetona
PET	Polietileno Tereftalato
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
PLA	Ácido Polilático
S/N	Sinal Ruído
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
STL	Standard Template Library
Tm	Temperatura de Fusão
UFC	Universidade Federal do Ceará
$\Delta L$	Variação do Comprimento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	17
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i> .....	17
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i> .....	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Manufatura Aditiva</b> .....	18
<i>2.1.1</i>	<i>Síntese do procedimento de manufatura aditiva</i> .....	19
<i>2.1.2</i>	<i>Panorama de mercado futuro</i> .....	21
<b>2.2</b>	<b>Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)</b> .....	22
<i>2.2.1</i>	<i>Vantagens e desvantagens da tecnologia FDM/FFF</i> .....	24
<i>2.2.2</i>	<i>Etapas da modelagem</i> .....	25
<i>2.2.3</i>	<i>Características em comum nas impressões 3D por FDM/FFF</i> .....	26
<i>2.2.4</i>	<i>Aplicações</i> .....	28
<i>2.2.5</i>	<i>Tipos de impressoras</i> .....	31
<i>2.2.5.1</i>	<i>Cartesiana</i> .....	32
<i>2.2.5.2</i>	<i>Delta</i> .....	34
<i>2.2.5.3</i>	<i>Polar</i> .....	35
<b>2.3</b>	<b>Materiais de impressão 3D</b> .....	36
<i>2.3.1</i>	<i>PETG</i> .....	39
<i>2.3.2</i>	<i>ABS</i> .....	40
<i>2.3.3</i>	<i>PLA</i> .....	41
<i>2.3.4</i>	<i>Comparativo das propriedades mecânicas entre o PETG, ABS e PLA</i> .....	42
<b>2.4</b>	<b>Parâmetros de Impressão</b> .....	43
<i>2.4.1</i>	<i>Temperatura de impressão/extrusão</i> .....	43
<i>2.4.2</i>	<i>Temperatura de mesa</i> .....	45
<i>2.4.3</i>	<i>Nível e tipo de preenchimento</i> .....	45
<i>2.4.4</i>	<i>Orientação de impressão</i> .....	47
<i>2.4.5</i>	<i>Altura de camada e diâmetro de bico</i> .....	50
<i>2.4.6</i>	<i>Velocidade de impressão e de retração</i> .....	52
<b>2.5</b>	<b>Ensaio de Resistência à Tração em Polímeros</b> .....	53
<i>2.5.1</i>	<i>Resistência à tração do PETG</i> .....	56
<b>2.6</b>	<b>Método de Taguchi</b> .....	58

2.6.1	<i>Fatores</i> .....	59
2.6.2	<i>Experimentos fatoriais fracionados</i> .....	60
2.6.3	<i>Matriz ortogonal</i> .....	60
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	62
3.1	<b>Material e Equipamentos</b> .....	62
3.1.1	<i>Filamento PETG</i> .....	62
3.1.2	<i>Impressora 3D FDM/FFF</i> .....	63
3.1.3	<i>Máquina de ensaio de tração</i> .....	64
3.1.4	<i>Equipamentos de medição</i> .....	65
3.2	<b>Métodos</b> .....	67
3.2.1	<i>Parâmetros de controle</i> .....	68
3.2.1.1	<i>Parâmetros fixos</i> .....	69
3.2.2	<i>Matriz de procedimento experimental</i> .....	70
3.2.2.1	<i>Relação signal-to-noise (S/N-sinal ruído)</i> .....	74
3.2.3	<i>Procedimentos para os corpos de prova e ensaio de tração</i> .....	75
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	82
4.1	<b>Análise dimensional dos corpos de prova</b> .....	82
4.2	<b>Curva tensão-deformação</b> .....	86
4.2.1	<i>Análise da fratura</i> .....	89
4.2.2	<i>Limite de resistência à tração (LRT)</i> .....	93
4.2.3	<i>Alongamento na ruptura</i> .....	101
4.3	<b>Tempo de impressão</b> .....	107
4.4	<b>Massas das Amostras</b> .....	113
4.5	<b>Discussão</b> .....	119
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	122
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	124
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	125
	<b>APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DE CORPO DE PROVA TIPO I</b>	
	<b>CONFORME A ASTM D638-22</b> .....	132

## 1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, revolucionou a forma como objetos tridimensionais são produzidos. Essa tecnologia permite a fabricação direta de peças complexas a partir de dados de projeto em formato CAD, abrindo possibilidades inovadoras em diversas áreas industriais. Entre os métodos de impressão 3D, destaca-se a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), também conhecida como Fabricação de Filamento Fundido (FFF). Esse método utiliza termoplásticos para criar camadas sucessivas que se solidificam para formar a peça final. A simplicidade, velocidade e custo moderado do FDM tornaram-no uma das técnicas mais promissoras e amplamente utilizadas na impressão 3D (Stratasys, 2022).

No campo dos materiais utilizados na impressão 3D, os polímeros desempenham um papel fundamental. Entre os polímeros utilizados, destaca-se o Polietileno Tereftalato Glicol (PETG). O PETG é uma variação do polímero PET (Polietileno Tereftalato), amplamente conhecido por sua utilização em garrafas de refrigerante e embalagens de alimentos. O PETG apresenta características únicas que o diferenciam do PET convencional, do ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e do PLA (Ácido Polilático), os quais também são comumente utilizados na impressão 3D. O PETG combina a resistência mecânica e a durabilidade do ABS com a facilidade de impressão e a biodegradabilidade do PLA. Além disso, o PETG é um material mais sustentável, pois pode ser reciclado e reutilizado, reduzindo o impacto ambiental (Besko; Bilyk; Sieben, 2017).

No campo da pesquisa, o PETG tem despertado um interesse crescente na comunidade acadêmica e na indústria devido às suas propriedades superiores em comparação com outros materiais de impressão 3D. Os estudos atuais buscam aprimorar ainda mais as propriedades mecânicas, a estabilidade dimensional e a resistência a produtos químicos do PETG. Além disso, há um foco crescente na otimização dos parâmetros de impressão 3D específicos para o PETG, a fim de obter peças impressas com desempenho superior em diversas aplicações (Cano-Vicent *et al.*, 2021).

Dentre os parâmetros de impressão 3D que podem afetar as propriedades mecânicas, destacam-se o nível de preenchimento, o padrão de preenchimento, a altura de camada, a orientação de impressão, a temperatura de impressão e a velocidade de impressão. O nível de preenchimento determina a quantidade de material depositado, o padrão de preenchimento afeta a disposição geométrica desse material, a altura de camada define a espessura de cada camada impressa, a temperatura de impressão influencia a fusão e a aderência

das camadas, a orientação de impressão influencia a direção do alinhamento das camadas e a velocidade de impressão afeta a taxa de deposição do material. A variação desses parâmetros exerce um impacto significativo nas propriedades finais da peça impressa (Wibawa; Mastrisiswadi; Ismianti, 2020).

Para sistematizar a avaliação da influência dos parâmetros nas propriedades mecânicas do PETG impresso em 3D, recorre-se ao Método de Taguchi. Esse método estatístico é recomendado em situações com múltiplos fatores e ampla variedade de combinações. Utilizando uma matriz ortogonal, o Método de Taguchi determina as combinações de parâmetros a serem estudadas, empregando a análise da relação sinal-ruído (SN) para avaliar a qualidade do processo. Reconhecido por sua eficácia, o Método de Taguchi tem aplicação bem-sucedida em vários setores industriais, incluindo engenharia automotiva, eletrônica e fabricação de produtos eletrônicos (Roy, 2010).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo geral analisar a influência dos parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas, tempo de impressão e massa de corpos de prova fabricados com PETG. Utilizando o Método de Taguchi, serão definidas combinações específicas de parâmetros para maximizar as propriedades desejadas.



## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a influência dos principais parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas, tempo de impressão e massa dos corpos de prova fabricados com material PETG.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) modelar e produzir corpos de prova em material PETG de acordo com a norma ASTM D638-22 com diferentes combinações entre nível de preenchimento, padrão de preenchimento, altura de camada e orientação de impressão;
- b) realizar o ensaio de resistência à tração nos corpos de prova impressos;
- c) realizar uma análise visual e dimensional dos corpos de prova;
- d) analisar a influência dos parâmetros no limite de resistência à tração;
- e) analisar a influência dos parâmetros no alongamento na ruptura;
- f) analisar a influência dos parâmetros no tempo de impressão;
- g) analisar a influência dos parâmetros na massa das amostras;
- h) definir a combinação de parâmetros de impressão 3D que maximizam as propriedades mecânicas do PETG.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Estabelece o referencial bibliográfico em cinco principais conceitos-chave como manufatura aditiva, modelagem por fusão e deposição, materiais de impressão, parâmetros de impressão 3D e ensaio de resistência à tração em polímeros. O conteúdo norteia e constitui os fundamentos básicos que amparam o desenvolvimento deste trabalho, buscando evidenciar de forma clara e objetiva os resultados e conclusões apresentados.

### 2.1 Manufatura Aditiva

O advento da globalização, o avanço tecnológico e industrial, assim como o aumento do nível de padrão de consumo, resultou no crescimento da exigência dos consumidores perante aos produtos que eram adquiridos. Conseqüentemente, ao confeccionarem produtos mais complexos e, sobretudo, para manterem a competitividade, os prazos para desenvolvimento tiveram que ser reduzidos por parte das empresas (Cunico, 2015).

Dessa forma, ao final dos anos 1980, o progresso tecnológico permitiu o surgimento de técnicas de fabricação baseado na adição de material (camada por camada), acarretando em uma nova alternativa aos métodos convencionais tais como: usinagem, moldagem, conformação e entre outros. Assim, segundo Volpato (2017), esse modelo de fabricação foi denominado de Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing* - AM), que também ficou conhecido como impressão 3D (tridimensional).

A *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana para Testes e Materiais - ASTM), órgão responsável por supervisionar o desenvolvimento de padrões AM, define a tecnologia como: “um processo de união de materiais para fazer objetos a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição a metodologias de fabricação subtrativas” (Standard, 2012).

Nomenclaturas como Fabricação de Formas Livres (*Free-form Fabrication*), Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*), Fabricação por Camadas (*Layer Manufacturing*) e Impressão 3D (*3D-Printing*) são comumente utilizadas pela academia e indústria. Contudo, devido à grande evolução de tais processos, há um consenso para a padronização em torno do nome Manufatura Aditiva (Cunico, 2015).

A ascensão da impressão 3D permitiu que a sociedade passasse a ser fabricante de seus próprios produtos assim como a grande indústria. Dessa maneira, tornou-se possível criar, materializar ideias, estudar e pesquisar novos materiais, através de um baixo custo e

acessibilidade. Para Ford e Despeisse (2016), esse crescimento é devido a ganhos em termos da liberdade de design, customização em massa, co-criação e inovação em modelos de negócios.

Em vista disso, a Tabela 1 mostra as principais vantagens e desafios cruciais que serão enfrentados pela AM ao longo dos próximos anos.

Tabela 1 – Vantagens e desafios da manufatura aditiva

Vantagens	Desafios
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pequenos lotes de produtos personalizados são economicamente atraentes em relação aos métodos tradicionais de produção em massa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Custo e velocidade de produção.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>A produção direta a partir de modelos CAD 3D significa que não são necessárias ferramentas e moldes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desenvolvimento e normalização de novos materiais.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Projetos na forma de arquivos digitais podem ser facilmente compartilhados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Validação das propriedades mecânicas e térmicas de materiais existentes e tecnologias AM.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>A natureza aditiva do processo proporciona economia de material, assim como a capacidade de reutilizar resíduos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Automação de sistemas AM e planejamento de processos para melhorar a eficiência de fabricação.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>A distribuição permite a interação direta entre consumidor/cliente local e produtor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Déficits em projetistas e engenheiros qualificados em manufatura aditiva.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fazer sob encomenda reduz o risco de estoque, sem produtos acabados não vendidos, ao mesmo tempo em que melhora o fluxo de receita à medida que as mercadorias são pagas antes de serem fabricadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os materiais da estrutura de suporte não podem ser reciclados, por isso precisam ser minimizados através de uma boa orientação de construção.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>As peças finais têm porosidade muito baixa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conjunto de concorrentes em constante mudança.</li> </ul>

Fonte: Ford e Despeisse (2016, com adaptações, tradução nossa).

### 2.1.1 Síntese do procedimento de manufatura aditiva

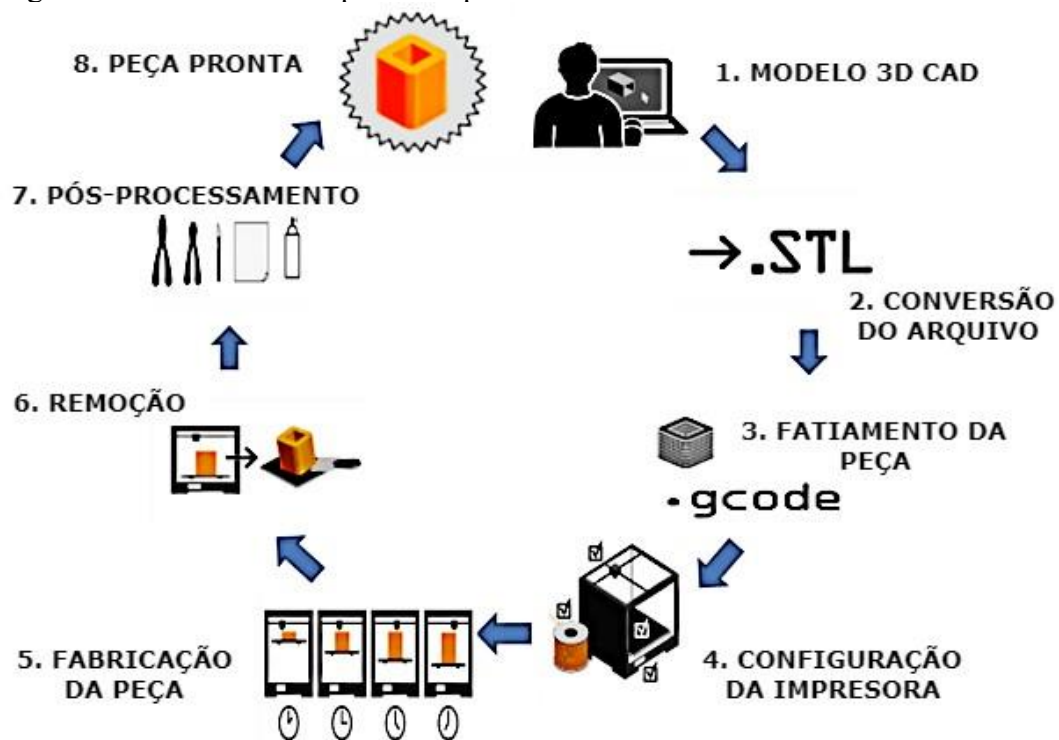
O processo de prototipagem rápida para produzir objetos em três dimensões parte de um modelo tridimensional projetado em um software CAD (*Computer Aided Design*), no qual será desenvolvido e preparado para impressão. Conseqüentemente, os equipamentos que

realizam esse procedimento são denominados de máquinas de manufatura aditiva ou, simplesmente, Impressoras 3D (Porsani; Silva; Hellmeister, 2017).

O arquivo gerado no software CAD é transferido para um sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*) para ser lido em várias camadas. Com efeito, camadas finas de um ou mais material – configuradas de acordo com o respectivo projeto-, são inseridas por meio de um bico de extrusão de material movido através de um dispositivo mecânico. Assim, camadas são sobrepostas uma por vez e, com isso, o objeto especificado no desenho será fabricado – podendo ser oco ou maciço (Max *et al.*, 2018).

Além disso, segundo Max *et al.* (2018), a criação do molde pode ser feita de duas formas: criando o objeto em um software (CAD) ou escaneamento o objeto que será impresso. A Figura 1 ilustra os procedimentos a serem adotados para realizar o processo de impressão.

Figura 1 – Resumo das etapas de impressão 3D



Fonte: Santos *et al.* (2018, com adaptações).

Segundo Anderson (2012), as três principais máquinas aditivas (impressoras 3D) presentes hoje no mercado são as que funcionam por meio da modelagem por fusão e deposição (*Fused Deposition Modeling – FDM*), a estereolitografia (*Stereo Lithography Apparatus – SLA*) e a sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering – SLS*). Isto posto, a primeira atua depositando camadas por um bico extrusor utilizando termoplástico, a segunda utiliza um laser

para endurecer uma resina líquida e, a terceira, que também utiliza um laser, mas que seus materiais para compor o objeto podem ser plásticos, metais, ou cerâmica em pó.

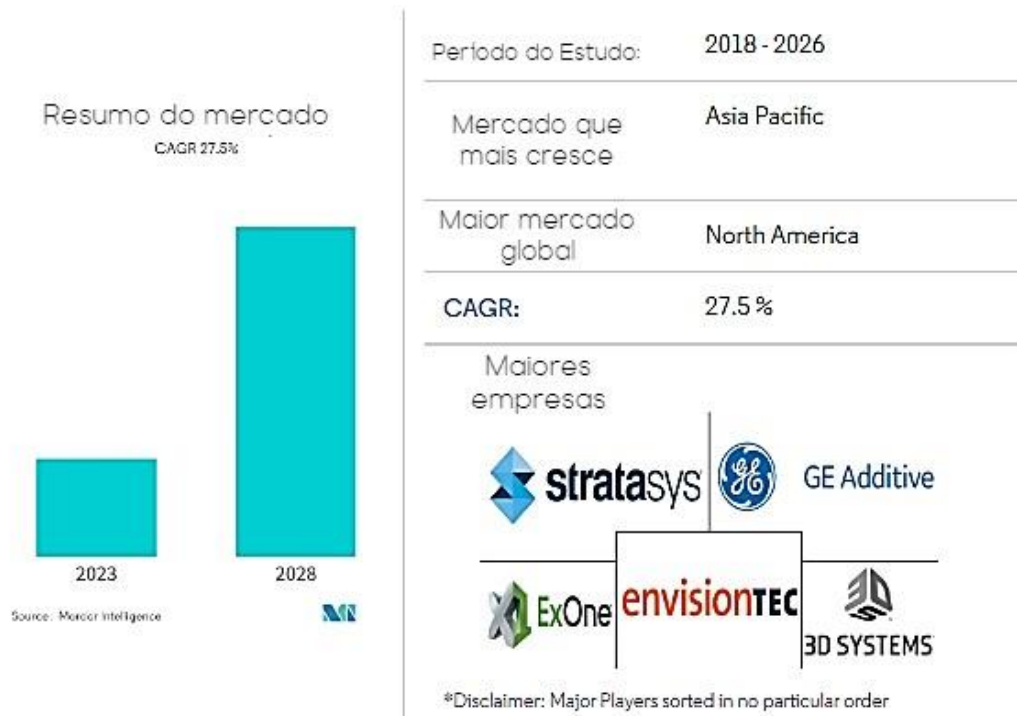
Assim, o tipo de técnica a ser utilizada depende de vários critérios e fatores a serem analisados pela indústria ou projetista, tais como: material, custo de produção, demanda, tempo de execução e entre outros.

### ***2.1.2 Panorama de mercado futuro***

“O mercado global de manufatura aditiva e materiais foi avaliado em US\$ 16,6 milhões em 2020 e deve atingir US\$ 70,92 milhões até 2026, além de crescer a um CAGR de 27,5% durante o período de previsão (2021 - 2026)”, conforme indica relatório da Mordor Intelligence (2021). Dessa forma, fatores como avanços recentes em maquinário (sobretudo na modelagem por fusão e deposição), materiais e softwares, além da diminuição dos preços das máquinas baseadas em AM e a crescente conscientização perante as indústrias; propiciaram cada vez mais a disponibilidade dessa tecnologia.

De acordo com a Mordor Intelligence (2021), que realizou o estudo de mercado de AM e materiais para o período de 2018 a 2026, o índice CAGR (taxa de crescimento anual composta) tem previsão de crescimento de 27,5% nos próximos 5 anos. Além disso, a região Ásia-Pacífico possui a maior tendência de crescimento para o período 2021-2026, e a região da América do Norte teve a maior participação no mercado em 2021. Em suma, a Figura 2 mostra os principais pontos de mercado em relação a manufatura aditiva e materiais no período de estudo de 2018 para 2026.

Figura 2 – Visão geral de mercado 2018-2026



Fonte: Mordor Intelligence (2021, com adaptações).

## 2.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

Em 1989, S.Scott Crump, cofundador da *Stratasys Inc.* registrou uma patente de “*apparatus and method for creating three-dimensional objects*” (aparelho e método para criar objetos tridimensionais), tal que tinha como finalidade de operação a deposição de material fundido, sobretudo, filamento plástico. Em sequência, esse registro originou o que viria a ser o nome para *Fused Deposition Modeling* (Modelagem por Fusão e Deposição – FDM) (Porsani; Silva; Hellmeister, 2017). A patente da tecnologia FDM foi concedida à *Stratasys Inc.* em 1992, com isso, um termo de uso livre foi criado, chamando-se de Fabricação por Filamento Fundido (FFF).

Dessa forma, a Tabela 2 mostra os principais fatos ocorridos na década de 80 em relação a impressão 3D.

Tabela 2 – Evolução da impressão 3D nos anos 1980

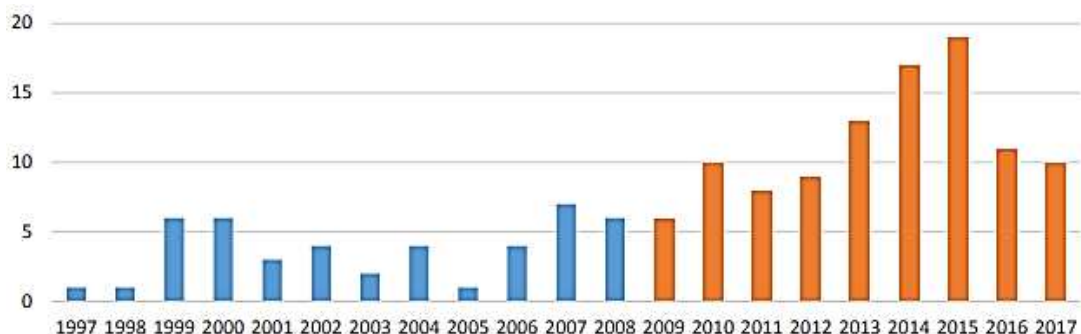
Ano	Fato
1980	Primeira patente de prototipagem rápida criada pelo Dr. Hideo Kodama
1984	Estereolitografia criada e abandonada pelo time Francês
1986	Estereolitografia criada e patenteada por Charles Hull
1988	Primeira impressora 3D SLA, a SLA-1
1988	Primeira impressora 3D SLS, criada Carl Deckard e comprada pela 3D System
1989	Primeira impressora 3D FDM, criada por S. Scott Crump pela Stratasys Inc
1990	A ascensão das impressoras 3D e softwares de CAD

Fonte: Done 3D (2020, com adaptações).

Inovações e queda no preço das impressoras desta categoria foram alavancadas a partir do ano de 2009, uma vez que a patente das impressoras FDM chegou ao fim. Com isso, essa tecnologia tornou-se cada vez mais acessível, favorecida, também, devido ao movimento de colaboração *Open Source* (código aberto) chamado *RepRap* (autorreplicar), que desenvolveu impressoras 3D de baixo custo Done 3D (2020).

Em síntese, de acordo com Pitágora e de Vasconcelos (2018), em relação a documentos relacionados a patentes: “em apenas 8 anos após a perda da validade da patente em 2009, houve um crescimento de 133% em comparação aos anos anteriores, com mais 89 documentos patenteados”. O Gráfico 1 resume os números de documentos por ano para o período de 1997 a 2017.

Gráfico 1 – Número de patentes de FDM antes de 2008 e a partir de 2009



Fonte: Pitágora e de Vasconcelos (2018).

### 2.2.1 Vantagens e desvantagens da tecnologia FDM/FFF

A tecnologia FDM trouxe inúmeras vantagens e benefícios perante o mercado e a sociedade, uma vez que criar geometrias complexas e peças com cavidades internas de maneira simples e limpa, tornou-se acessível. Todavia, ao se buscar desenvolver aplicações com exigências maiores (tolerâncias mais precisas, maior durabilidade e estabilidade), os termoplásticos disponíveis para a impressão oferecem as propriedades necessárias (Stratasys, 2022). A Tabela 3 reúne os principais pontos em relação a benefícios e vantagens.

Tabela 3 – Benefícios e vantagens da modelagem por fusão e deposição

Benefícios	Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A tecnologia é limpa, simples de usar e amigável para o escritório</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Precisão, repetibilidade e confiabilidade confiáveis</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Redução das despesas de produção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Múltiplas opções de alto desempenho para aplicações que exigem maiores resistências</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prazos de entrega mais curtos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grande capacidade de construção e produção de peças (demanda)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Os termoplásticos de nível de produção suportados são mecanicamente e ambientalmente estáveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Variedade de material</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geometrias complexas e cavidades que de outra forma seriam problemáticas tornam-se práticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Economia</li> </ul>

Fonte: Stratasys (2022, com adaptações).

De igual modo, Santos *et al.* (2018), salienta que as principais desvantagens relacionadas a esse tipo de modelagem são: a velocidade de impressão (relacionada a taxa de extrusão), a lentidão quando comparada a outros tipos de impressora, e o desperdício de material quando existe a necessidade de se criar um suporte para fabricar peças de maior complexidade.

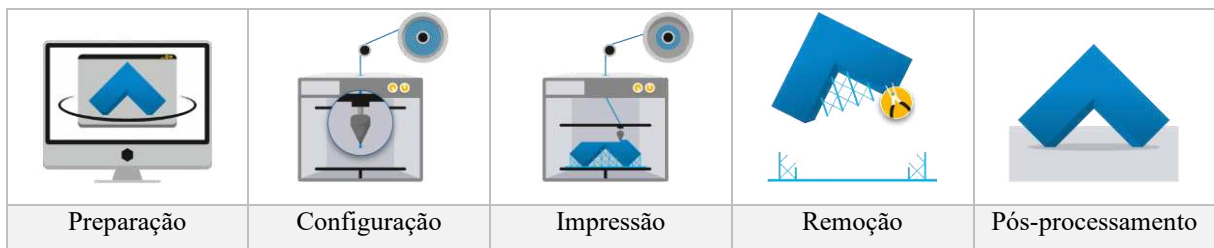


### 2.2.2 Etapas da modelagem

O processo de fabricação pode ser dividido em três principais etapas: pré-processamento, produção e pós-processamento. A primeira secciona o projeto CAD em camadas que podem variar de 0,005 polegadas (0,127 mm) a 0,013 polegadas (0,3302 mm) de altura. Em sequência, a segunda está relacionada a etapa de deposição de camadas e, o pós-processamento, é a etapa de remoção do material de suporte e acabamento final da peça (Hiemenz; Stratasys, [s.d.]).

Já de acordo com Engineering Product Designer (2021), podemos dividir a fabricação em cinco etapas: preparação da peça, configuração da máquina FDM, impressão das peças, remoção das peças e pós-processamento. A Figura 3 mostra as cinco fases do processo de modelagem.

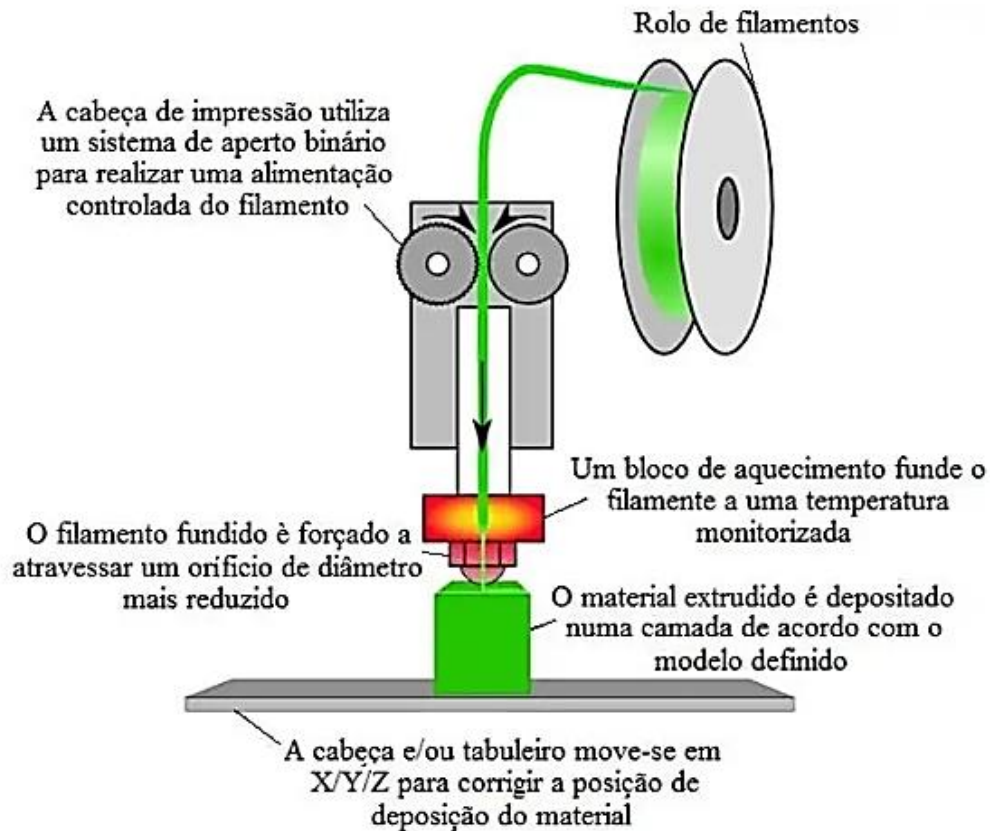
Figura 3 – Etapas de confecção de peças por FDM/FFF



Fonte: Engineering Product Designer (2021, com adaptações).

Em síntese, o processo de fabricação através de uma impressora FDM se inicia quando o material (filamento termoplástico) é desenrolado de uma bobina em direção ao bico extrusor. O bloco de aquecimento funde o termoplástico, tornando-o apto para ser extrudado pelo bico. Assim, um sistema mecânico movimenta o bico extrusor no plano horizontal (eixo x-y), permitindo a vazão do material sobre a mesa de impressão (geralmente aquecida). Com isso, o filamento é depositado camada sobre camada até a finalização da peça projetada, auxiliada pelo movimento no eixo-z (baixo para cima) da mesa de impressão (Besko; Bilyk; Sieben, 2017). A Figura 4 representa resumidamente os procedimentos de impressão.

Figura 4 – Síntese do processo de impressão



Fonte: Victor (2019).

Há vários métodos de pós-processamento de alto padrão para peças impressas por FDM, incluindo: lixamento e polimento, escova e pintura, soldagem a frio, suavização a vapor, revestimento epóxi e revestimento de metais (Hubs, 2022).

### 2.2.3 Características em comum nas impressões 3D por FDM/FFF

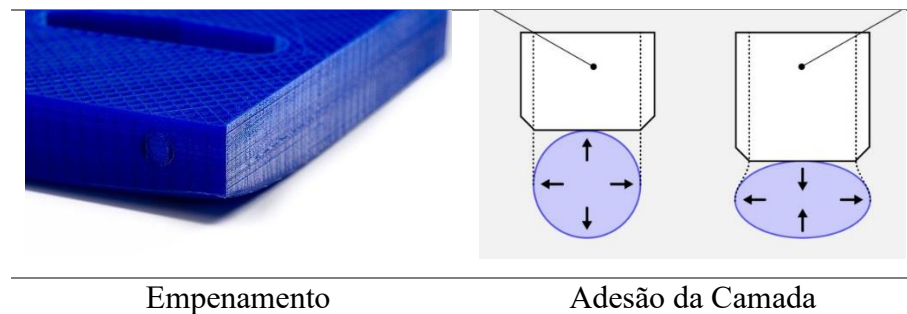
O projetista deve manter suas capacidades e limitações em mente para produzir os melhores resultados. Apesar de haver variações nos sistemas de extrusão de impressoras 3D que atuam na modelagem FDM e as peças possam ter qualidades diferentes, também existem algumas características comuns (benéficas ou malélicas) que ocorrem nesse tipo de tecnologia (Rani; Mubeen, 2022):

- a) empenamento:
  - diminui as dimensões da peça quando o material extrudado se solidifica;
  - cada material tem sua própria suscetibilidade à deformação.
- b) adesão da camada:

- superfície ondulada, independentemente da altura da camada usada;
  - pequenos orifícios ou roscas podem exigir pós-processamento.
- c) estrutura do suporte:
- projetar peças que minimizem a necessidade de estruturas de suporte.
- d) espessura do preenchimento e das paredes externas:
- afeta a resistência das peças.

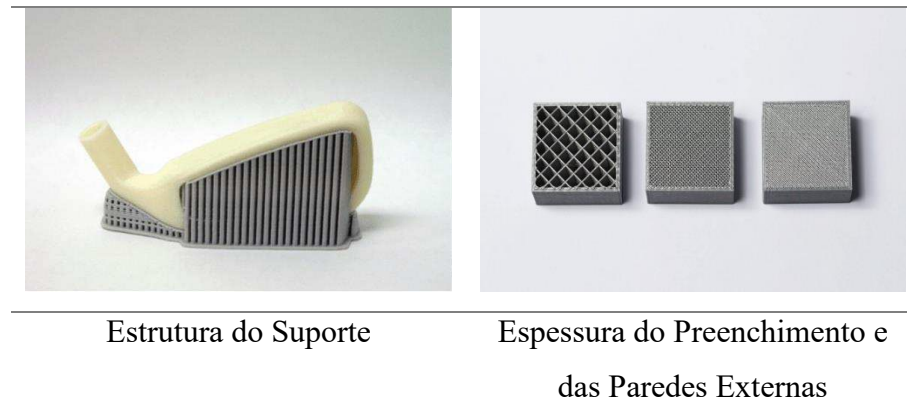
Desse modo, a Figura 5, assim como a Figura 6, exemplificam essas quatro principais características.

Figura 5 – Características de empenamento e adesão de camada



Fonte: Engineering Product Designer (2021).

Figura 6 – Características do suporte e preenchimento



Fonte: Engineering Product Designer (2021).

Conjuntamente, Hubs (2022), Tabela 4, mostra outras características essenciais como materiais, precisão dimensional e tamanho típico da construção.

Tabela 4 – Requisitos básicos para a impressão 3D FDM

Materiais	Termoplásticos (PLA, ABS, PETG, PC, PEI etc.)
Precisão Dimensional	$\pm 0.5\%$ (limite inferior $\pm 0.5$ mm) - desktop $\pm 0.15\%$ (limite inferior $\pm 0.2$ mm) - industrial
Tamanho Típico da Construção	200 x 200 x 200 mm - desktop 900 x 600 x 900 mm - industrial
Espessura da Camada Comum	50 a 400 microns
Apoio	Nem sempre necessário

Fonte: Hubs (2022, com adaptações).

#### 2.2.4 Aplicações

Em relação as aplicações que envolvem a modelagem por fusão e deposição, estas incluem setores aeroespacial, automobilístico, biomédico, eletrônico, construção, utilidades domésticas e artesanato. Como resultado da utilização de inúmeros polímeros e compósitos poliméricos, essa tecnologia intensifica a produção de produtos funcionais (Rajan *et al.*, 2022).

A Figura 7 demonstra seis aplicações gerais de impressão FDM usando filamentos poliméricos.

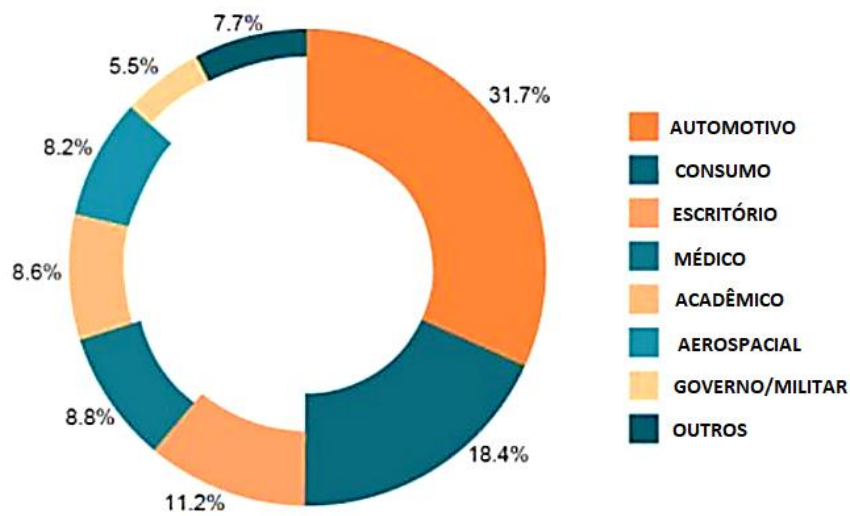
Figura 7 – Aplicações gerais para FDM/FFF



Fonte: Wang *et al.* (2022, com adaptações).

A Figura 8 mostra os principais setores de manufatura aditiva do mercado e seus respectivos percentuais de participação na indústria.

Figura 8 – Participação de setores no mercado de AM



Fonte: Van Hemelrijck *et al.* (2016 com adaptações).

Além disso, segundo Rajan *et al.* (2022): "Atualmente, a pesquisa em FDM se concentra no desenvolvimento de novos compósitos poliméricos e na otimização dos parâmetros para obter produtos de melhor qualidade para aplicações em diversas aplicações de fabricação".

A impressão 3D pela técnica FDM permite fabricar estruturas compósitas reforçadas com fibras para automóveis e aeronaves, estruturas eletricamente condutivas, além de próteses nasais e biossensores. Ademais, aplicações de construção, produtos biológicos, médicos e bioquímicos, indústrias de alimentos e joias, elementos de aquecimento leves e filtro de partículas de fuligem são outras eminentes aplicações possíveis para esse tipo de tecnologia (Wang *et al.*, 2022). A Figura 9 mostra os principais usos na engenharia utilizando esse método de impressão.

Figura 9 – Aplicações de engenharia usando FDM/FFF



Fonte: Wang *et al.* (2022, com adaptações).

A pandemia da COVID-19 trouxe inúmeros desafios para a indústria de manufatura aditiva, uma vez que houve uma mudança repentina e significativa no modelo de fabricação tradicional para processos de produção em massa a uma escala industrial. Dessa forma, pontos relacionados a manufatura, segurança, certificação, design e questões legais, são alguns exemplos dos novos desafios da AM (Wang *et al.*, 2022). A Figura 10 mostra os importantes produtos desenvolvidos utilizando FDM na luta contra a COVID-19.



Figura 10 – Usos medicinais da prototipagem rápida no combate à pandemia de COVID-19



Fonte: Wang *et al.* (2022 com adaptações).

### 2.2.5 Tipos de impressoras

O progresso da prototipagem rápida após o ano de 2009, sobretudo, após o fim das patentes da impressão 3D pela tecnologia FDM, impulsionou o mercado da manufatura aditiva. Com efeito, a acessibilidade ao processo de fabricação contribuiu para alavancar o

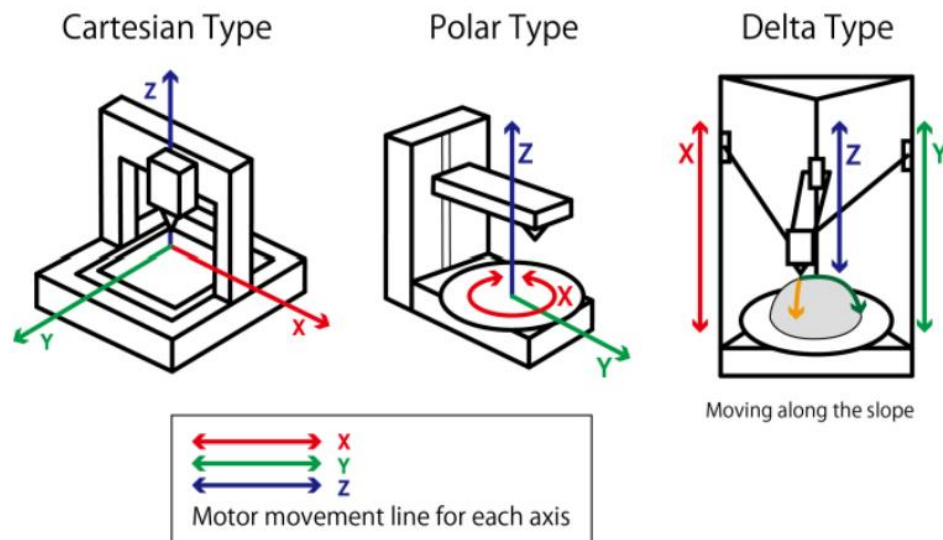
desenvolvimento de novas formas de imprimir, ou seja, inovações nas máquinas aditivas. Assim, este tópico apresentará os principais tipos de impressoras 3D que utilizam o método por fabricação de filamento fundido.

Existem vários aspectos a serem considerados quando se busca diferenciar as impressoras FDM. Entretanto, de acordo com O’Connell (2022), o “sistema de coordenadas operacionais” e a “natureza mecânica”, são os dois aspectos mais importantes.

Desse modo, baseando-se na orientação no espaço tridimensional, todas as impressoras FDM/FFF podem ser divididas em três subcategorias: a cartesiana, a delta e a polar (Kakabadze, 2020). Em vista disso, os demais modelos de máquinas aditivas se encaixam nessas respectivas subcategorias.

Em síntese, a Figura 11 condensa um comparativo entre as três subcategorias de impressoras FDM/FFF e seus respectivos movimentos durante a confecção de uma dada peça.

Figura 11 – Movimento do bico e mesa nas impressoras cartesiana, delta e polar



Fonte: Kakabadze (2020) .

### 2.2.5.1 Cartesiana

São os tipos mais comuns a serem encontradas no mercado. Essas impressoras funcionam com base no princípio do sistema de coordenadas cartesianas, ou seja, utiliza três eixos ortogonais (X-Y-Z). Na maioria das impressoras 3D FDM, a placa de base – pode possuir a forma retangular ou quadrada -, se move no eixo Z e o bico extrusor se move nas direções X



e Y. Com isso, a principal vantagem das cartesianas é o seu baixo preço de mercado (Ultimaker e MakerBot, principais marcas), além da possibilidade de serem vendidas como kits a serem montadas pelo usuário (Alex M, 2022).

Todavia, algumas impressoras detêm apenas a direção do eixo Y para a placa de base de impressão, e os movimentos do cabeçote de impressão ocorrem nas direções X e Z (Pasha Shaik; Schuster; Shaik, 2021). A Figura 12 mostra um modelo Ender 3 de uma impressora cartesiana.

Figura 12 – Impressora 3D tipo cartesiana



Fonte: Eletrogate (2022).

Nesse sentido, a Tabela 5 relaciona pontos positivos e negativos quanto a utilização da impressora FDM/FFF cartesiana.

Tabela 5 – Vantagens e desvantagens das impressoras cartesianas

<b>Prós</b>	<b>Contras</b>
Precisão e manuseio	Quadro grande e pesado
Simple de entender e implementar	Lentidão
Barato	Altura de impressão limitada
Fácil de atualizar e corrigir	

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.2.5.2 Delta

Trata-se da impressora 3D FDM mais importante vista no mercado. Essas máquinas operam em coordenadas cartesianas, tal que seu princípio de funcionamento decorre do movimento combinado entre a placa de impressão (redonda) e a extrusora conectada em três pontos triangulares – de onde vem o seu nome. Com efeito, cada um dos três pontos se move para cima e para baixo, para a esquerda e para a direita, determinando a posição e a direção do bico (Costa, 2019).

Em suma, segundo Alex M. (2022), os limites de fabricação para as impressoras Delta são definidos apenas pelo diâmetro da base e pela altura dos braços. Elas possuem uma bandeja de impressão fixa e foram projetadas para acelerar o processo de impressão. A Figura 13 mostra um modelo Trilab DeltiQ de uma impressora tipo delta.

Figura 13 – Impressora 3D tipo delta



Fonte: Trilab (2023).

Nesse sentido, a Tabela 6 relaciona pontos positivos e negativos quanto a utilização da impressora FDM/FFF tipo delta.

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens das impressoras tipo delta

<b>Prós</b>	<b>Contras</b>
Rapidez	Dificuldade em corrigir e atualizar
Alta qualidade de impressão	Menos compatível com extrusão de acionamento direto
Capaz de impressões mais altas	Área de construção relativamente pequena

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.2.5.3 Polar

De acordo com o próprio nome, esse modelo utiliza as coordenadas polares, ou seja, essas impressoras usam ângulo e distância para localizar pontos em duas dimensões no plano X-Y. Ademais, plota pontos em uma placa de base circular (giratória) em vez de uma retangular. A máquina imprime o objeto desejado camada por camada à medida que o bico extrusor se move para cima ao longo do eixo Z (Pasha Shaik; Schuster; Shaik, 2021). Desse modo, as impressoras do tipo polar são ideais para fabricar objetos que seguem uma tendência em espiral. A Figura 14 mostra um modelo de uma impressora tipo polar.

Figura 14 – Impressora 3D tipo polar



Fonte: Aniwaa (2023).

Nesse sentido, a Tabela 7 relaciona pontos positivos e negativos quanto a utilização da impressora FDM/FFF tipo polar.

Tabela 7 – Vantagens e desvantagens das impressoras tipo polar

Prós	Contras
Eficiência energética	Precisão inconsistente
Fabricar objetos maiores usando menos espaço	Lentidão
Menos motores e menos ruído	Complicado processo de preparação do modelo

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.3 Materiais de impressão 3D

A impressão 3D é capaz de produzir peças totalmente funcionais numa vasta gama de materiais: cerâmicos, metálicos, polímeros e as suas combinações (materiais híbridos), compostos ou materiais classificados funcionalmente – aqueles que cujas propriedades mudam gradualmente em relação às suas dimensões. Assim como muitos processos de fabricação, essa tecnologia requer materiais de alta qualidade que atendam especificações consistentes para construir peças e dispositivos de elevado grau e desempenho. Em vista disso, fornecedores, compradores e usuários finais, estabeleceram requisitos, procedimentos e acordos de controle de material (Shahrubudin; Lee; Ramlan, 2019).

Segundo Rajan *et al.* (2022): “Os materiais utilizados para FDM são geralmente à base de polímeros, tendo diferentes comportamentos físicos, mecânicos e térmicos. A seleção dos materiais poliméricos depende das diferentes aplicações e de acordo com os requisitos.”

Apesar de ter um número considerável de polímeros, as máquinas aditivas que estão disponíveis hoje no mercado têm somente uma capacidade de fusão de cerca de 300 °C. Com efeito, um material com alto ponto de fusão não pode ser usado nesse processo de impressão; limitando, dessa forma, o uso da tecnologia FDM. Logo, os materiais ideais para a impressão 3D FDM/FFF são os polímeros termoplásticos e materiais com baixo ponto de fusão (Rajan *et al.*, 2022).

*Polylactic acid* (PLA), *Acrylonitrile butadiene styrene* (ABS), *Polyethylene terephthalate glycol* (PETG), *Polyetheretherketone polymer* (PEEK), *Polycarbonate* (PC), Nylon, são alguns dos principais polímeros termoplásticos presentes atualmente no mercado de prototipagem rápida.

Os polímeros usados na tecnologia FDM/FFF são vendidos na forma de filamentos. Um mesmo material pode ter diferentes tipos de filamentos, exigindo, por sua vez, a

especificação de cada fabricante, uma vez que eles podem ter temperaturas de fusão/processamento distintas (Cano-Vicent *et al.*, 2021). A Figura 15 mostra uma representação de polímeros na forma de filamentos em rolos (carretéis).

Figura 15 – Forma de comercialização dos filamentos de impressão



Fonte: Wishbox Technologies (2016).

No mercado de impressão 3D os filamentos são disponibilizados enrolados em carretéis, possuindo especificações de venda conforme o tipo de diâmetro (geralmente 1,75 mm ou 3 mm), cores e o peso – em geral, varia de 750 g a 1 kg, mas há modelos com menos ou mais gramas (Wishbox Technologies, 2016). A Figura 16 sintetiza os principais pontos ao se analisar na compra de filamentos.

Figura 16 – Resumo das informações-chave do carretel e filamento

			
<b>Diâmetro externo</b> 200 mm	<b>Diâmetro do furo central</b> 52 mm	<b>Largura</b> 54 mm	<b>Tensão do parafuso</b> 3 mm
			
<b>Diâmetro do filamento</b> 1.75 mm( ± 2%)	<b>Peso do filamento</b> 750 g	<b>Comprimento do filamento</b> 200 m	<b>Gravidade específica</b> 1.04 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Leapfrog 3D Printers (2020, com adaptações).

Para Cano-Vicent *et al.* (2021), entender o comportamento térmico do filamento é o ponto-chave para imprimir uma boa peça em FDM. A temperatura de transição vítrea (*glass transition temperature* -  $T_g$ ) é quando o polímero faz a transição do estado cristalino para o “borrachoso”. Outrossim, a temperatura de fusão (*melting temperature* -  $T_m$ ) é quando o polímero faz a transição do estado sólido para o líquido. Desse modo, quando a temperatura do extrusor FDM atinge o  $T_m$ , material está pronto para ser impresso.

A qualidade da impressão está diretamente relacionada a qualidade do filamento. Assim, segundo a 3D Lab (2017), há quatro características que se devem verificar antes de imprimir:

- a) se o diâmetro do fio está dentro da faixa estipulada;
- b) se está na mesma tonalidade de cor em diferentes lotes;
- c) se o filamento está com um bom controle de umidade;
- d) se o filamento está bem enrolado no carretel.

### 2.3.1 PETG

O PETG é um material derivado do *polietileno tereftalato* (PET) modificado com o glicol (G). O PET é considerado o plástico mais utilizado no mundo, sobretudo, na criação de garrafas de água e refrigerante. Dessa forma, a sua disseminação no mercado é justificada devido a esse material ser leve, ter boa performance de design, ser transparente e brilhante, além de possuir boa resistência mecânica e química (Besko; Bilyk; Sieben, 2017).

Todavia, o Polietileno Tereftalato “bruto” não é muito utilizado na impressão 3D. Com isso, a adição do glicol a forma base desse polímero, permitiu a redução do ponto de fusão, conter a cristalização ao ser submetido à esforço, aumentar a resistência, aumentar a facilidade de extrusão e obter uma maior estabilidade térmica (Filament2print, 2019).

No que diz respeito a questão ambiental, é um termoplástico reciclável, o que reduz o desperdício e o potencial impacto negativo. Ademais, não é tóxico e não exala cheiro durante o processo de impressão (R3dy, 2021).

O PETG tornou-se um material durável e resistente à abrasão. Segundo Cano-Vicent *et al.* (2021), as principais propriedades para esse polímero são: tenacidade, resistência à tração, transparência, flexibilidade, alta processabilidade e excelente resistência química. Contudo, ainda de acordo com Cano-Vicent *et al.* (2021): “uma das suas desvantagens é a alta porosidade do produto impresso, mas isto também pode ser uma vantagem em aplicações específicas tais como modelos ósseos, hardware de laboratório feito à medida e ortopedia”.

Em relação as desvantagens, o PETG, apesar de ser um material forte, tem as peças com uma maior facilidade de risco quando comparada a outros materiais como o ABS, além de ser mais “pegajoso” durante a impressão (Besko; Bilyk; Sieben, 2017).

Segundo Wimpenny, Pandey e Jyothish Kumar (2016), a cor do filamento tem efeito mínimo na resistência à tração de peças impressas por FDM. Já Pitaru *et al.* (2020), salienta que ainda não há consenso na literatura perante a influência da cor do filamento nas propriedades mecânicas, sobretudo do PETG.

Quanto as especificações relacionadas aos parâmetros de impressão – temperatura de extrusão, temperatura de mesa, velocidade de impressão -, deve-se seguir as recomendações do fabricante. Para Cano-Vicent *et al.* (2021) a temperatura de extrusão é entre 220 a 250 °C e temperatura de mesa de 60 °C. Já para a empresa Simplify 3D (2023), a temperatura de extrusão é entre 230 a 250 °C e temperatura de mesa entre 75 a 90 °C. Em relação a velocidade, a Filament2print (2019) recomenda valores baixos, em torno de 30 mm/s, mas para a 3D Fila (2023) as velocidades recomendáveis estão entre 45 mm/s a 60 mm/s.

### 2.3.2 ABS

O polímero ABS foi um dos primeiros materiais a serem desenvolvidos para a impressão 3D. O Acrilonitrila Butadieno Estireno é feito a partir do petróleo, tendo em sua composição três diferentes monômeros que dão base a seu respectivo nome. Desse modo, esse material é um dos mais utilizados na manufatura aditiva, uma vez que confere peças flexíveis e resistentes (Santos *et al.*, 2018).

No processo FDM, o ABS confere ao produto final alta resistência mecânica, fácil processabilidade, resistência à corrosão e alta resistência à fusão. Além disso, é fácil de ser extrudado devido ao menor coeficiente de atrito. Esse polímero é usado principalmente para imprimir produtos domésticos, assim como peças automotivas e brinquedos. Todavia, o ABS, por não ser biocompatível, não é adequado para aplicações médicas; do mesmo modo que as camadas não se fundem completamente para criar um dispositivo à prova d'água (Rajan *et al.*, 2022).

Ao se utilizar esse material para impressão, deve-se operar em uma área ventilada ou usar uma impressora fechada, uma vez que esse polímero gera fumaça quando é derretido. Ademais, o ABS é altamente propenso a deformação durante o resfriamento, sendo essencial o uso da mesa de aquecimento (Besko; Bilyk; Sieben, 2017).

Quanto aos requisitos de impressão, Cano-Vicent *et al.* (2021) confere uma temperatura de extrusão entre 215 a 250 °C, além de 90 a 120 °C para a temperatura de mesa. Para Simplify 3D (2023) essa temperatura está entre 220 a 250 °C. Entretanto, Hamod e Andersson (2015) conferem um valor entre 230 a 250 °C, assim como a Leapfrog 3D Printers (2020) sugere a temperatura em torno dos 230 °C.

Em relação a temperatura da mesa, para Simplify 3D (2023) está entre 95 a 110 °C. Todavia, Hamod e Andersson (2015) conferem um valor entre 80 a 110 °C, assim como Leapfrog 3D Printers (2020) sugere a temperatura em torno dos 90 °C.

Recomenda-se manter as velocidades de impressão consistentes durante a operação o que, desse modo, resultará em uma melhor qualidade da peça Leapfrog 3D Printers (2020).



### 2.3.3 PLA

O PLA é um termoplástico que possui uma característica semicristalina ou amorfa. Esse material tem como aspecto o seu quesito sustentável, uma vez que tem sua composição formada a partir de milho, trigo, beterraba ou cana de açúcar; ou seja, é biodegradável (Santos *et al.*, 2018).

De acordo com Rajan *et al.* (2022), o PLA, por ser um termoplástico de baixa temperatura, tem custo de operação reduzido com propriedades mecânicas desejáveis. Com efeito, é usado principalmente para engenharia biomédica e de tecidos. Contudo, possui como principais limitações a baixa força de fusão e a baixa taxa de cristalização; restringindo, dessa forma, sua aplicação em diferentes setores.

Esse polímero tem como vantagens fundamentais o baixo custo, ter boa rigidez e resistência, boa precisão dimensional, além de uma vida útil considerável. No entanto, suas desvantagens estão relacionadas a baixa resistência ao calor (diminuindo o brilho e nitidez da cor), baixa resistência à tração, pode escorrer e necessitar de ventiladores de resfriamento, além do filamento acabar se tornando quebradiço (Simplify 3d, 2023).

Para a temperatura de impressão, a 3D Fila (2023) recomenda entre 185 a 205 °C. Para Simplify 3D (2023) essa temperatura está entre 190 a 220 °C. Entretanto, Hamod e Andersson (2015) conferem um valor entre 160 a 220 °C, assim como Leapfrog 3D Printers (2020) sugere a temperatura em torno dos 210 °C.

Em relação a temperatura da mesa, Cano-Vicent *et al.* (2021) confere uma temperatura entre 90 a 120 °C. Para Simplify 3D (2023) essa temperatura está entre 45 a 60 °C. Entretanto, Hamod e Andersson (2015) conferem um valor em torno de 70 °C, assim como Leapfrog 3D Printers (2020) sugere a temperatura em torno dos 40 °C.

### 2.3.4 Comparativo das propriedades mecânicas entre o PETG, ABS e PLA

A Tabela 8 condensa as principais características e propriedades mecânicas em “baixo”, “médio” e “alto” entre os três polímeros apresentados.

Tabela 8 – Comparativo entre as propriedades do PLA, ABS e PETG

Propriedades	PLA	ABS	PETG (PET,PTT)
<b>Ecológico</b>	alto	baixo	alto
<b>Brilho</b>	médio	baixo	alto
<b>Transparência</b>	médio	baixo	alto
<b>Rigidez/Dureza</b>	médio	alto	alto
<b>Resistência Impactos</b>	baixo	médio	alto
<b>Flexibilidade</b>	baixo	médio	médio
<b>Contração/WARP</b>	baixo	alto	médio
<b>Precisão/Detalhes</b>	alto	baixo	médio
<b>Qualidade de Superfície</b>	alto	baixo	alto
<b>Resistência/Atritos</b>	baixo	médio	alto
<b>Resistência Química</b>	médio	baixo	alto
<b>Resistência Temp.</b>	baixo	alto	médio
<b>Usinabilidade</b>	baixo	alto	baixo
<b>Densidade</b>	baixo	médio	baixo
<b>Temp. de Impressão</b>	médio	alto	alto
<b>Temp. Mesa Aquecida</b>	baixo	alto	médio
<b>Preço por m3/grama/hora</b>	baixo	médio	médio

Fonte: Besko, Bilyk e Sieben (2017, com adaptações).

A Figura 17 mostra visualmente os principais pontos relacionados as propriedades mecânicas do PETG, ABS e PLA.

Figura 17 – Síntese gráfica das propriedades mecânicas



Fonte: Stampomatica (2023, com adaptações).

## 2.4 Parâmetros de Impressão

A qualidade final da peça é determinada por inúmeros fatores durante todo o processo de impressão, tal como a finalidade de aplicação, qual material será utilizado, sob quais aspectos e condições o produto finalizado estará sujeito, assim como a verificação da qualidade do filamento.

Dado o exposto, os parâmetros de impressão 3D para FDM/FFF são fundamentos primordiais a serem bem estudados e definidos antes de cada processo, visto que afeta a qualidade do produto, desempenho, tempo de serviço, além de fatores econômicos.

Na atualidade, os recentes estudos relacionados a manufatura aditiva buscam investigar combinações de diferentes parâmetros de processo visando encontrar um conjunto ideal de parâmetros visando melhorar a precisão dimensional de peças impressas (Zharylkassyn; Perveen; Talamona, 2021).

Em suma, os tópicos subsequentes reúnem o conteúdo referente a parâmetros-chave de impressão, tais como: temperatura de extrusão, temperatura de mesa, nível e tipos de preenchimento, orientação de impressão, altura de camada e diâmetro de bico, velocidade de impressão e de retração.

### 2.4.1 Temperatura de impressão/extrusão

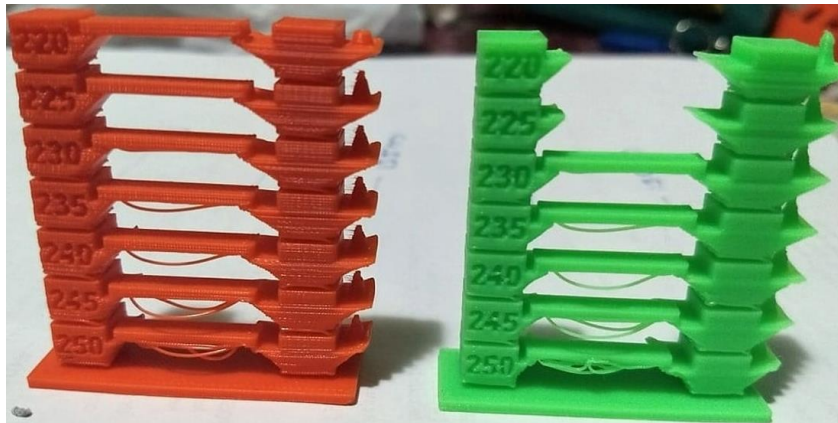
A temperatura de impressão/extrusão é a temperatura necessária para que o polímero atinja a fase vítrea e, dessa forma, consiga iniciar a extrusão do filamento através do bico extrusor.

É um parâmetro fundamental, uma vez que, se a temperatura for muito baixa, o material terá alta viscosidade, dificultando a sua extrusão. Por outro lado, se a temperatura for muito alta, o material ficará muito fluido e poderá ocorrer gotejamento. Assim, é de suma importância definir corretamente a temperatura de extrusão de acordo material que é usado na impressão, dando notoriedade as informações fornecidas pelo fabricante (Zharylkassyn; Perveen; Talamona, 2021).

À medida que o material é extrudado através do bico, ele esfria de sua temperatura inicial (transição vítrea) para a temperatura da câmara. Com efeito, essa mudança de temperatura acaba desenvolvendo tensões internas no material. Assim, em virtude da variação na velocidade de deposição, essas tensões podem levar a deformações inter e intracamadas, acarretando ou não na falha da peça fabricada (Solomon; Sevel; Gunasekaran, 2021).

Dado o exposto, em função de minimizar erros, deve-se priorizar o faixa de temperatura concedida pelo fabricante do filamento. Além disso, para definir o valor exato da impressão, o uso da “torre de temperatura”, Figura 18, torna-se ideal para calibrar rapidamente a temperatura da sua impressora 3D. Dessa maneira, ao se construir a torre com a faixa estipulada pelo fabricante, verifica-se em qual valor dentro do intervalo que ficou com uma melhor qualidade de impressão (3D Lab, 2017).

Figura 18 – Representação de uma torre de temperatura



Fonte: Zachary (2022).

A Tabela 9 sintetiza quantitativamente a média das temperaturas de impressão para o PETG, ABS e PLA, de acordo com o catálogo de diversos fabricantes (Esun3D, 3DXTECH, Polymaker, F3DB, Gembird, Ultrafuse e MatWeb).

Tabela 9 – Média das temperaturas de impressão para o PETG, ABS e PLA

Material	Temperatura Média de Impressão (°C)
PETG	230-250
ABS	220-260
PLA	190-230

Fonte: Alves (2021, com adaptações).

### 2.4.2 Temperatura de mesa

A temperatura de mesa é a temperatura adequada que a plataforma de impressão deve estar submetida. Como resultado, o objetivo de uma mesa aquecida é garantir melhor adesão de base ao material que está sendo extrudado. Assim, deve-se buscar um equilíbrio entre as temperaturas, visto que uma temperatura muito baixa pode causar o empenamento do material (Bhavnagarwala, 2023).

Dado o exposto, a Tabela 10 reúne a média das temperaturas de mesa para o PETG, ABS e PLA, de acordo com o catálogo de diversos fabricantes (Esun3D, 3DXTECH, Polymaker, F3DB, Gembird, Ultrafuse e MatWeb).

Tabela 10 – Média das temperaturas de mesa para o PETG, ABS e PLA

<b>Material</b>	<b>Temperatura Média de Mesa (°C)</b>
<b>PETG</b>	25-80
<b>ABS</b>	80-110
<b>PLA</b>	25-70

Fonte: Alves (2021, com adaptações).

### 2.4.3 Nível e tipo de preenchimento

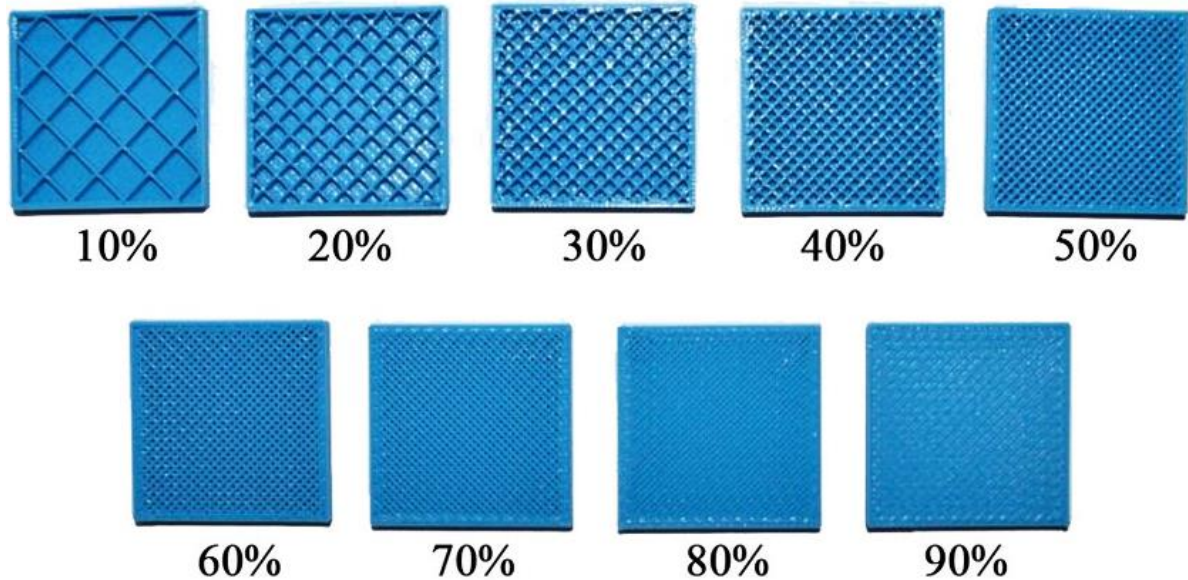
O nível de preenchimento no processo de impressão 3D FDM/FFF está relacionado ao percentual de material (filamento) que será depositado na parte interna da peça. Por conseguinte, a densidade de preenchimento depositada afetará de forma direta as propriedades mecânicas a serem adquiridas. Com isso, uma peça com menor densidade de preenchimento tem propriedades inferiores do que uma peça com densidade superior; entretanto, a última leva a um aumento no tempo de impressão (Solomon; Sevvel; Gunasekaran, 2021).

A porcentagem de material a ser extrudada internamente a um componente pode ir desde 0% (peça oca) até 100% (peça totalmente maciça). Apesar disso, os objetos impressos na prototipagem rápida raramente são totalmente preenchidos, tal que a maioria dos programas de “fatiamento” FDM produzirá peças com padrões percentuais de 18% a 20% de preenchimento (Hubs, 2022).

As principais influências do volume de material depositado estão relacionadas ao peso do objeto, resistência mecânica, flexibilidade, acabamento, tempo de impressão e,

sobretudo, o custo devido ao uso de material (Filament2print, 2019). A Figura 19 ilustra oito percentuais de nível de preenchimento em uma peça fabricada por FDM/FFF.

Figura 19 – Níveis de preenchimento de 10 a 90% na impressão 3D



Fonte: Hanon, Marczis e Zsidai (2021).

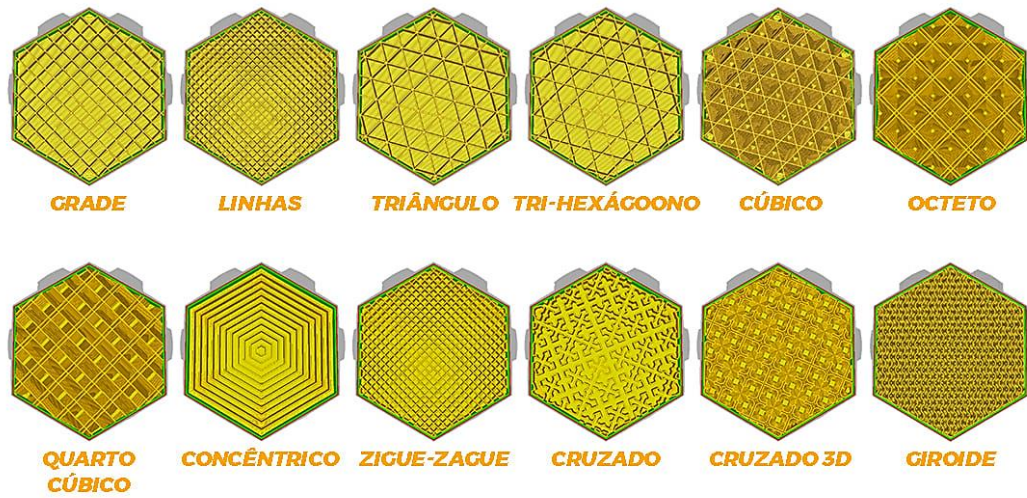
O tipo/padrão de preenchimento é a metodologia utilizada para imprimir a estrutura interna do componente que está sendo fabricado. Os diferentes padrões a serem impressos dependem de quais modelos estão disponíveis no software que está sendo utilizado para realizar o projeto – tal que o tipo hexagonal é um dos mais comumente usados.

Em relação as propriedades mecânicas, diferentes padrões podem fornecer melhores resultados para propriedades de tração ou compressão, enquanto o mesmo padrão pode não ser válido para um componente submetido a outros tipos de carga. Dessa maneira, sugere-se a importância de correlacionar o padrão de preenchimento com a finalidade final de uso para o componente impresso (forças que estará submetido), o que pode desempenhar um papel inevitável na determinação propriedades do componente fabricado (Solomon; Sevel; Gunasekaran, 2021).

A Figura 20 ilustra dez diferentes tipos de preenchimentos disponíveis no *Software* Ultimaker Cura, que podem ser usados no processo de impressão 3D FDM/FFF.



Figura 20 – Tipos/padrões de preenchimento na impressão 3D

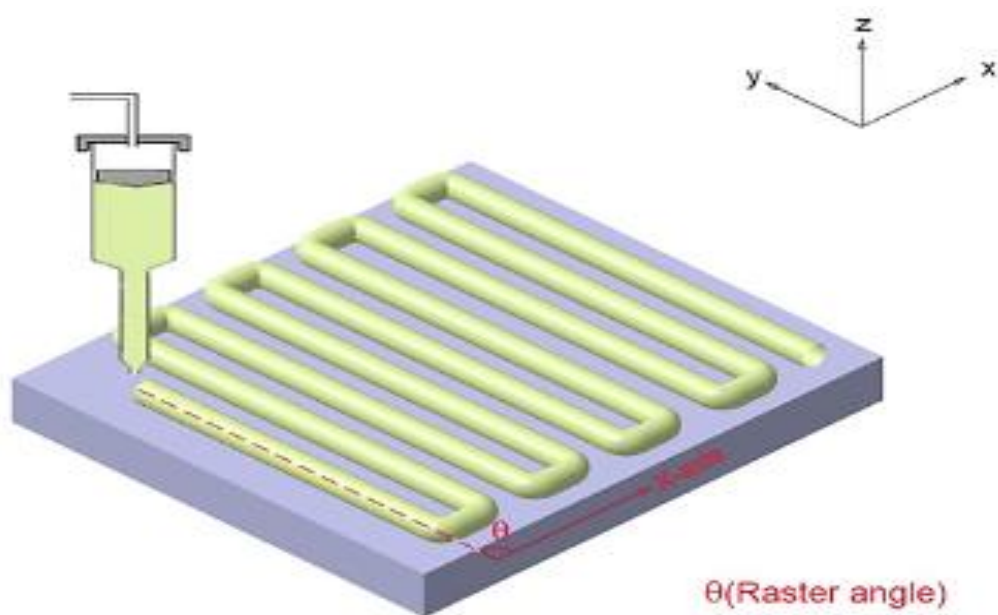


Fonte: 3D Lab (2017).

#### 2.4.4 Orientação de impressão

Esse parâmetro está relacionado a direção de deposição do material extrudado ao longo da peça que está sendo impressa, orientado a partir da área de construção e em relação ao eixo-x da máquina FDM empregada (Solomon; Sevvell; Gunasekaran, 2021). Portanto, a Figura 21 mostra como o filamento é orientado a depositar o material na peça em relação ao eixo-x.

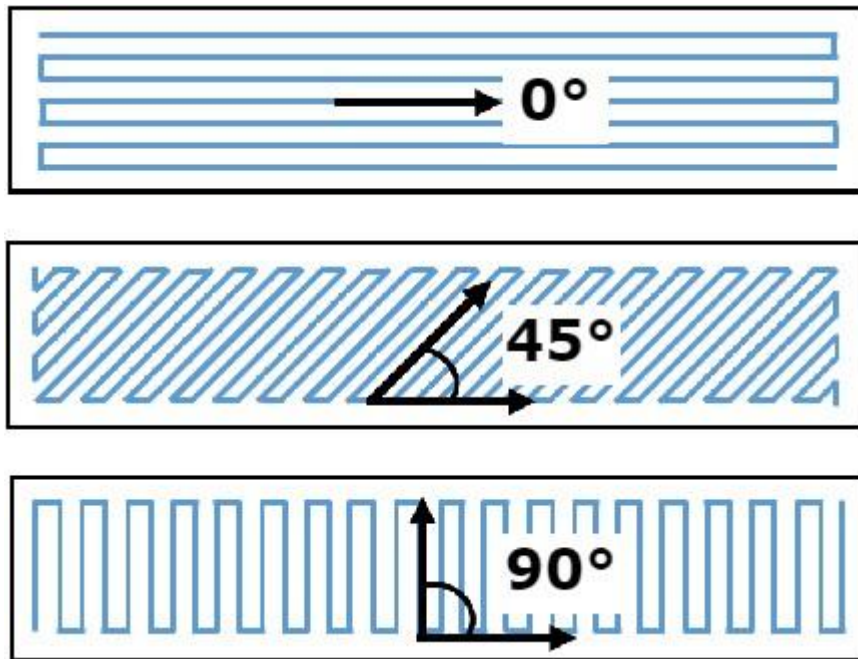
Figura 21 – Representação da orientação de impressão



Fonte: Solomon, Sevvell e Gunasekaran (2021).

Os ângulos de orientação de impressão usados vão de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , sendo possível controlar essa variável para cada camada. Contudo, regularmente são usados os ângulos ( $0^\circ/90^\circ$ ) e ( $45^\circ/-45^\circ$ ). Conseqüentemente, esse parâmetro de impressão provou afetar as propriedades mecânicas e, dessa forma, vários experimentos foram realizados para estudar seu impacto na peça obtida (Rajan *et al.*, 2022). A Figura 22 mostra os ângulos de orientação mais relevantes na impressão 3D e a Figura 23 ilustra as respectivas combinações desses ângulos.

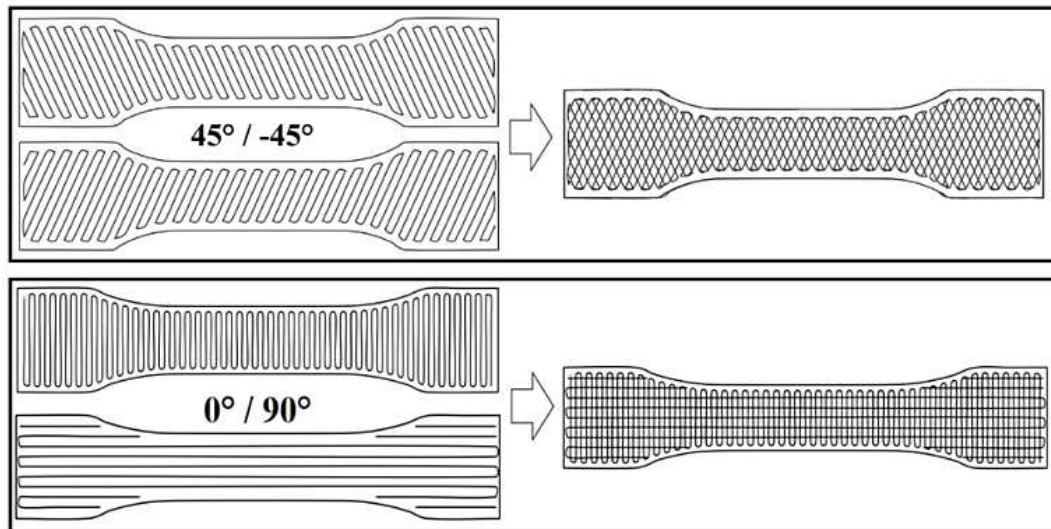
Figura 22 – Ângulos de orientação  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  para FDM/FFF



Fonte: Gordelier *et al.* (2019).



Figura 23 – Combinação dos ângulos de orientação em  $(-45^\circ, 45^\circ)$  e  $(0^\circ, 90^\circ)$



Fonte: Laoutid *et al.* (2021).

De acordo com Rajpurohit e Dave (2018) e Es-Said *et al.* (2007), ao analisarem os efeitos da variação da orientação nas propriedades mecânicas, avaliaram que a orientação de impressão de  $0^\circ$  obteve o melhor resultado perante a resistência a tração e impacto. Assim também, Nancharaiah, Ranga Raju e Ramachandra Raju (2010) relataram a orientação de  $0^\circ$  como tendo o melhor acabamento superficial e o pior a  $60^\circ$ .

Vale salientar que para diferentes modelos CAD e outros parâmetros podem levar a diferenças na interpretação de vários autores.

### 2.4.5 Altura de camada e diâmetro de bico

A altura de camada (medida em mm) está diretamente relacionada a qualidade superficial da peça a ser impressa. Esse parâmetro refere-se a espessura do filamento extrudado através do bico da máquina aditiva, o qual é depositado em relação ao eixo vertical, gerando camadas finas ou grossas de acordo com o projeto anteriormente estabelecido. Com efeito, alturas menores acarretam em melhores acabamentos e um aumento na resistência a tração, mas afeta consideravelmente o tempo de impressão, Gráfico 2. Dessa forma, o tempo de impressão é inversamente proporcional a espessura da camada (3D Lab, 2017).

Gráfico 2 – Altura de camada x tempo de impressão

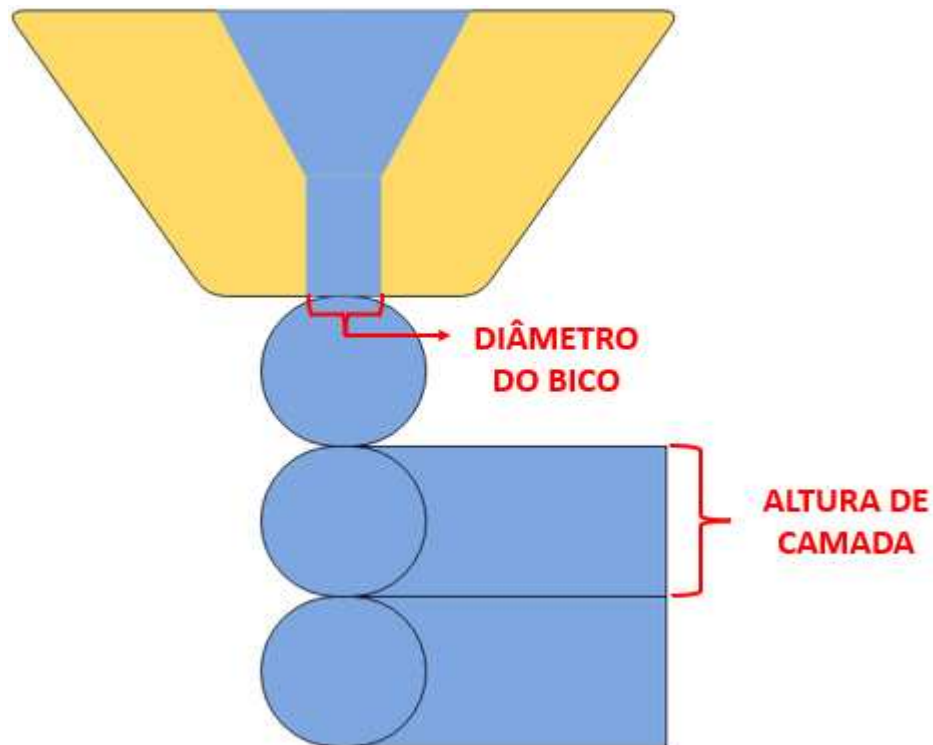


Fonte: 3D Fila (2023).

Paralelamente, de acordo com a 3D Lab (2017), o principal fator que determina a altura de camada é a taxa de vazão de filamento que é extrudado pelo bico, além da variação do eixo-z da mesa de impressão em relação a última camada.

Atualmente, o mercado das impressoras 3D FDM/FFF trabalha com limitações de camada que variam as resoluções entre 0,05 a 0,4 mm; tal que não há necessidade de alterar o bico extrusor (3D FILA, 2023). Conforme Solomon, Sevvel e Gunasekaran (2021): “as alturas de deposição do material sempre serão menores que o diâmetro do bico da extrusora”. A Figura 24 ilustra como é dimensionado a altura de camada.

Figura 24 – Medida da altura de camada

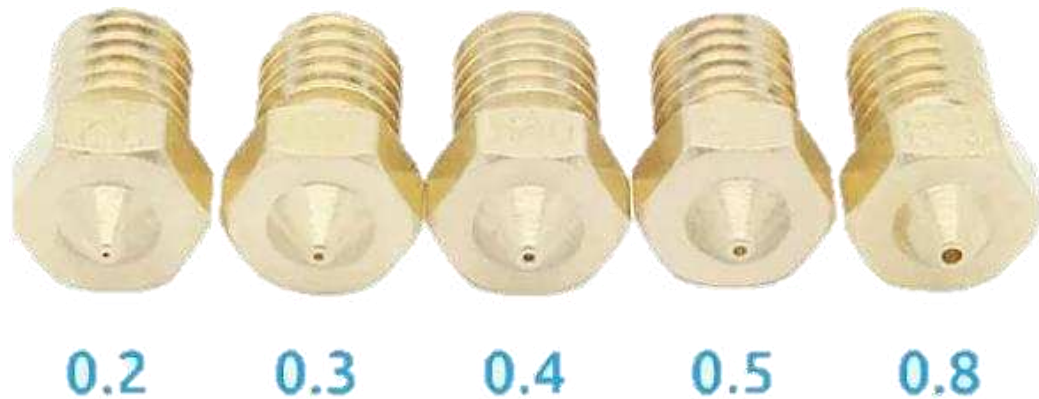


Fonte: Carrier (2021, com adaptações).

Nos estudos experimentais de Toro *et al.* (2019), avaliaram que a altura de camada desempenha um papel inevitável nas propriedades de flexão e impacto do componente fabricado. Dessa maneira, buscando otimizar essas propriedades, sugeriram que o uso de uma espessura mínima da camada resulta no aumento da resistência à flexão, assim como o aumento da espessura da camada mostrou boas propriedades na resistência ao impacto.

O tamanho do diâmetro do bico afeta diretamente a qualidade e velocidade da impressão, visto que está relacionado a taxa de deposição do filamento. Existem vários tamanhos de bicos disponíveis no mercado, tais como: 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm e 0,8 mm. Além disso, os principais materiais utilizados na fabricação do bico são o latão, aço inox e o aço endurecido (Acelera3D, 2020). A Figura 25 mostra cinco diferentes tipos de diâmetros de bico disponíveis no mercado.

Figura 25 – Diâmetros de bico (mm) disponíveis no mercado



Fonte: Acelera3D (2020).

#### 2.4.6 Velocidade de impressão e de retração

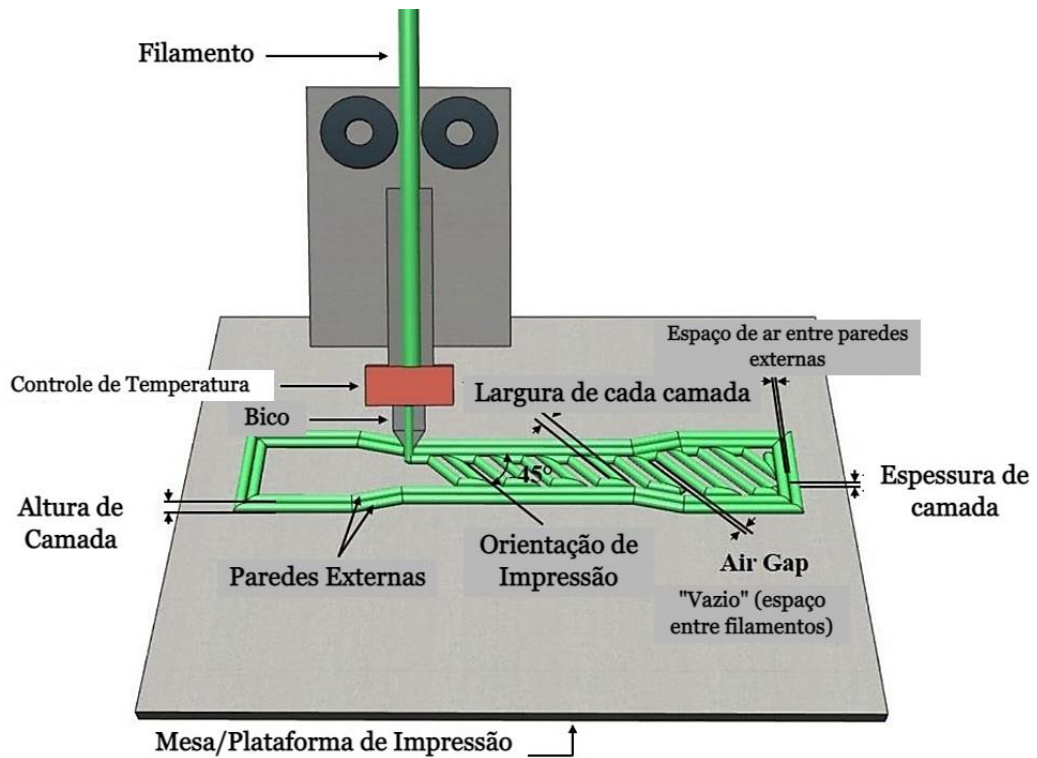
A velocidade de impressão (mm/s) está devidamente relacionada aos parâmetros anteriores – diâmetro do bico, por exemplo -, aspectos desejáveis na produção (tempo e custo), além da qualidade final da peça.

Esse parâmetro pode ser definido como a velocidade de deslocamento (motores de acionamento) do bico extrusor ao depositar o material na mesa de impressão ao longo do plano de X-Y. Portanto, um processo de extrusão mais rápido tem um impacto importante na deformação do bico, uma vez que há uma quantidade significativa de tensão residual produzida durante a deposição do material. No entanto, o efeito da velocidade de impressão é considerado insignificante ao imprimir camadas mais finas (Solomon; Sevel; Gunasekaran, 2021).

Outro ponto a se atentar é relacionado a velocidade de retração. Esse fator está relacionado a velocidade com que a impressora retrai o filamento antes do movimento de deslocamento. Com efeito, um bom ajuste da velocidade de retração diminui o *stringing* (fios soltos ao se iniciar uma nova camada). Logo, esse ajuste contribui para evitar bolhas e melhorar o fluxo do filamento, ocasionando um enriquecimento na qualidade final da peça (Wishbox Technologies, 2016).

Em síntese ao que foi explanado ao longo desta seção secundária, a Figura 26 resume ilustrativamente alguns dos principais parâmetros de impressão durante a fabricação de um corpo de prova padrão para ensaios mecânicos.

Figura 26 – Síntese dos principais parâmetros de impressão



Fonte: Heidari-Rarani *et al.* (2020, com adaptações).

## 2.5 Ensaio de Resistência à Tração em Polímeros

Dentre os diversos tipos de ensaios disponíveis para a caracterização mecânica dos materiais, o ensaio de resistência à tração é o mais utilizado para os polímeros. Com efeito, esse ensaio consiste na aplicação de uma carga (em MPa) no sentido axial de um corpo de prova padronizado, promovendo a deformação do material (alongamento) até seu ponto de ruptura (Universidade de São Paulo - USP, 2022). Isto posto, a Figura 27 exemplifica um ensaio de tração com foco no processo de carga e onde acontece a deformação no corpo de prova.

Figura 27 – Representação de um ensaio de tração



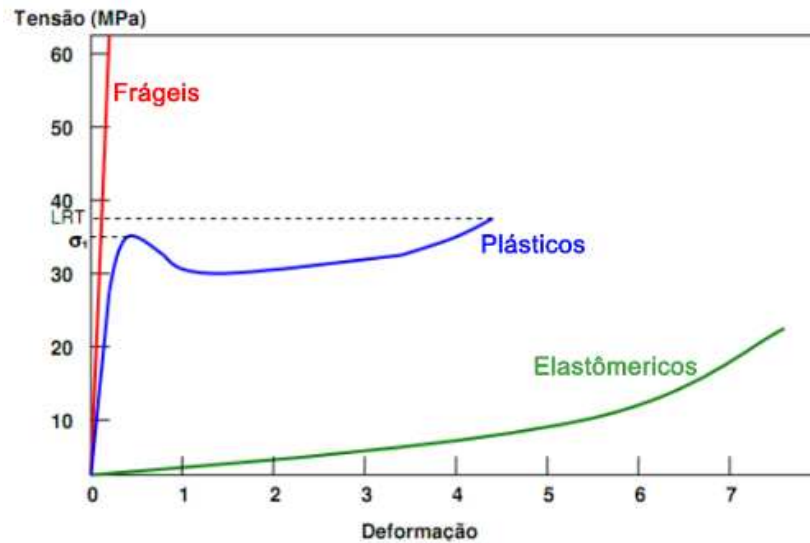
Fonte: Biopdi (2023).

A resistência a tração (limite), deformação no escoamento, módulo de elasticidade – ou módulo de Young -, ductilidade, coeficiente de Poisson, deformação máxima e, no escoamento, são alguns dos importantes dados quantitativos que podem ser obtidos através do ensaio de tração (Zwick Roell, 2023). Dessa forma, uma vez que os resultados são fáceis de executar e reproduzir, eles podem ser analisados criticamente através do gráfico “tensão versus deformação” gerado após o término dos ensaios.

Devido serem compostos orgânicos com moléculas de grande tamanho, os polímeros são materiais muito flexíveis. Em virtude de ser um material que dispõe de um comportamento viscoso-elástico, o ensaio mecânico de tração para esse material é sensível a parâmetros estruturais e externos, tais como: fabricação do corpo de prova, velocidade de tração, além das condições ambientais onde está sendo submetido o ensaio. Em síntese, os polímeros podem ser classificados em três principais grupos: os frágeis, os plásticos e os elastômeros (Biopdi, 2023).

O Gráfico 3 mostra o gráfico tensão versus deformação para os três respectivos grupos de polímeros.

Gráfico 3 – Curva tensão x deformação para polímeros



Fonte: Campos (2022).

Para que o teste de tração seja plenamente executado deve-se ter todos os requisitos necessários. A máquina de tração, a célula de carga (posicionada entre o braço móvel e a garra), além de indicadores de deslocamento e da carga resultante, são os principais componentes que asseguram a plena realização do ensaio. Por conseguinte, para aferir a deformação que o material sofre, dois pontos fixos distantes um do outro são definidos no corpo de prova para que sejam avaliados em função do tempo. Como resultado, o uso do extensômetro é o principal instrumento para realizar essa medição, sendo os tipos mecânico e o óptico como modelos mais comuns (USP, 2022).

A Figura 28 e a Figura 29 expõem, respectivamente, um exemplo de uma máquina de ensaio de resistência à tração e seus componentes, assim como um exemplo de extensômetro – ambos da empresa BIOPDI.

Figura 28 – Máquina de ensaio de tração



Fonte: Biopdi (2023).

Figura 29 – Exemplo de extensômetro



Fonte: Biopdi (2023).

### 2.5.1 Resistência à tração do PETG

Diversos materiais utilizados na impressão 3D por FDM/FFF possuem várias faixas de resistência à tração e módulo de elasticidade (Young). Segundo Rajan *et al.* (2022), a grande maioria dos materiais tem resistência à tração entre 40 e 70 MPa, além de possuírem a faixa de módulo de Young entre 0,5 e 2,5. Dado o exposto, a Figura 30 indica a resistência à tração máxima (MPa) e o módulo de Young (GPa) de vários polímeros, misturas de polímeros e diversos materiais compósitos.





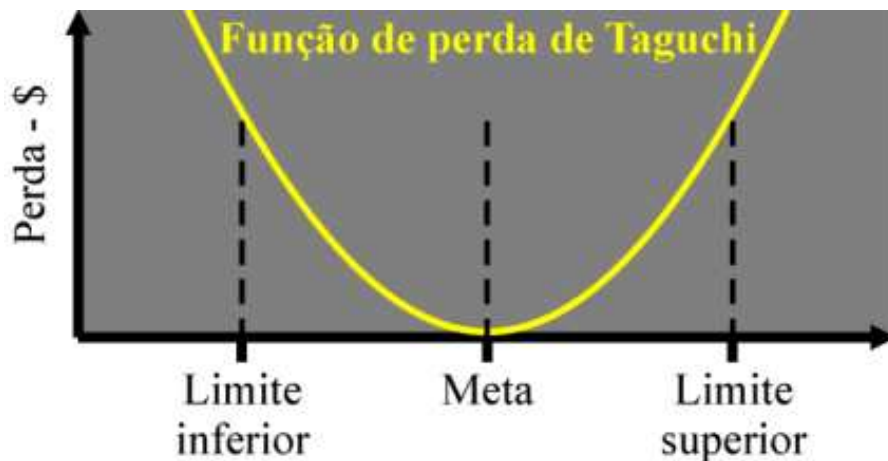
## 2.6 Método de Taguchi

O método de Taguchi, também conhecido como “Projeto Robusto”, foi idealizado e desenvolvido pelo engenheiro e estatístico Genichi Taguchi (1924-2012) na segunda metade do século XX com o intuito de apresentar uma nova abordagem em relação à qualidade de um produto, tanto em relação ao processo de produção quanto aos parâmetros de projeto.

Essa abordagem busca minimizar a variabilidade do processo produtivo e, conseqüentemente, reduzir a probabilidade de falhas e defeitos nos produtos finais. Dessa forma, o método se tornou uma importante ferramenta para garantir a qualidade dos produtos e a satisfação dos clientes (Garreto, 2021).

De acordo com Taguchi, o custo pode ser entendido como a perda imposta à sociedade antes que um produto seja distribuído. Já a qualidade, é a perda que um produto causa à sociedade após sua distribuição (Lizardo *et al.*, 2016). Desse modo, a qualidade de um produto sempre busca atingir um valor ótimo ou esperado, ainda que haja limites de tolerância. No entanto, é comum que ocorram desvios em relação a esse valor, o que pode comprometer a satisfação do cliente e, conseqüentemente, a imagem da empresa. A Figura 31 ilustra o modo como ocorre os desvios em relação ao valor ótimo.

Figura 31 – Gráfico da função perda de Taguchi



Fonte: Roos, Pacheco Paladini e Cantorski Da Rosa (2009).

Dessa forma, essa variabilidade do processo em torno de um valor alvo é causada por fatores de “ruído” – temperatura, umidade, vibração, poeira e etc. Assim, os prejuízos causados pelos fatores de ruído podem ser modelados por meio da utilização de uma função chamada “função perda”.

Dado o exposto, segundo Paredes (2012), o método de Taguchi tem por objetivo determinar a função perda do produto com o intuito de otimizá-la por meio de técnicas estatísticas. Já Brandt H, Brandt F e Santos (2016) complementam expondo que, ao identificar e ajustar os fatores controláveis, o método Taguchi de Projeto Robusto visa fortalecer as características de um produto ou processo.

Em suma, o método de Taguchi compreende o conjunto de técnicas propostas para projetar produtos que minimizem os fatores ambientais, por meio da otimização da função perda e projetos de experimentos fatoriais com matrizes ortogonais.

A escolha desse método para conduzir este trabalho, justificou-se pela sua possibilidade de determinar a combinação eficaz de fatores e interações que influenciam o desempenho das variáveis de resposta em um determinado processo. Consequentemente, convergindo com os objetivos da pesquisa, a qual visa analisar a influência dos parâmetros de impressão 3D que maximizam as propriedades mecânicas do PETG. Assim, de acordo com Garreto (2021): “esse método requer menos esforço de amostragem e menores custos de teste, sem afetar significativamente as conclusões tiradas”.

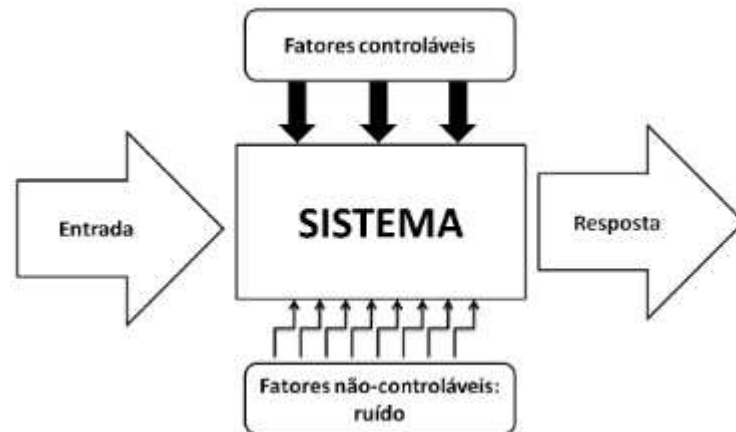
### **2.6.1 Fatores**

Conforme Paredes (2012), o projeto robusto define em sua metodologia três características que afetam a qualidade de um produto:

- a) fatores controláveis: níveis podem ser definidos pelo projetista;
- b) fatores de ruído (não controláveis): não podem ser controlados durante o processo e são os que causam a variação no desempenho do produto; podem ser externos, internos e de variação peça a peça;
- c) fatores de sinal: são as variáveis definidas para alterar o valor de uma característica funcional em direção a um valor desejado.

Dessa maneira, a Figura 32 mostra a modelagem geral de um produto ou processo.

Figura 32 – Representação de um sistema



Fonte: Lizardo *et al.* (2016).

### 2.6.2 Experimentos fatoriais fracionados

Realizar todas as combinações de vários conjuntos de tratamentos ou fatores demanda um elevado número de ensaios, recursos financeiros, recursos humanos e de material, assim como uma grande quantidade de tempo. Em vista disso, essa prática é conhecida como “experimentos fatoriais completos ou saturados” que é uma das bases do método clássico de planejamento de experimentos, ou seja, *Design of Experiments* (DOE).

Em vista disso, Moura (2023) considera que a metodologia de projeto robusto ao se utilizar experimentos fatoriais fracionados é muito mais vantajoso em relação ao DOE; visto que proporciona a obtenção de resultados em tempo hábil e de maneira econômica. Esse tipo de experimento utiliza frações de experimentos completos que, por sua vez, tem como princípio o arranjo de fatores (ou parâmetros) e observações, com o objetivo de tornar o experimento mais eficiente. Dessa forma, é possível variar todos os fatores simultaneamente, sendo possível determinar tanto o efeito individual dos fatores, assim como sua interação com os demais (Paredes, 2012).

Taguchi (1990) utilizou a metodologia fracionada e arranjos ortogonais, com o propósito de analisar vários parâmetros e níveis, buscando sua otimização.

### 2.6.3 Matriz ortogonal

O planejamento experimental de matriz ortogonal (MO) desenvolvido por Taguchi, remonta a partir de projetos de experimentos de “arranjos ortogonais de quadros latinos” à época da Segunda Guerra Mundial. Assim, a pesquisa em torno de diferentes combinações

desses arranjos, deu ao estatístico e engenheiro uma nova maneira de MO capaz de ser usada em diversas situações experimentais (Roy, 2010).

O conceito de quadros latinos (QL), segundo Negrini (2018), foi fundamentado por Leonard Euler em 1782 a partir do “problema dos 36 oficiais”. Com isso, define-se quadrados latinos como uma matriz  $n \times n$ , tal que possui  $n$  símbolos distintos, sem que haja nenhuma repetição de qualquer linha ou coluna. Com efeito, um exemplo clássico de QL é o popular jogo de lógica *Sudoku* (desenvolvido nos anos 1970). Logo, para Negrini (2018): “dois quadrados latinos são ditos ortogonais se sua sobreposição tem somente pares ordenados distintos”.

A Figura 33 ilustra dois exemplos de QL (C e D) ortogonais de ordem 3 e sua respectiva sobreposição.

Figura 33 – Representação de quadros latinos

$$C = \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{matrix} \quad D = \begin{matrix} 0 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{matrix}, \quad \longrightarrow \quad \begin{matrix} (0,0) & (1,2) & (2,1) \\ (1,2) & (2,1) & (0,0) \\ (2,1) & (0,0) & (1,2) \end{matrix}$$

Fonte: Negrini (2018, com adaptações).

Dado o exposto, a matriz ortogonal concebida por Taguchi tem como objetivo selecionar a melhor combinação de parâmetros de controle para o que o produto ou processo seja o mais robusto em relação aos fatores de ruído, através da análise de um grande número de variáveis com um pequeno número de experimentos (Unal; Dean, 1990).

Phadke (1989) afirma que: “as conclusões tiradas de experimentos de pequena escala são válidas em toda a região experimental abrangida pelos fatores de controle e suas configurações”.

Na MO, as colunas correspondem aos fatores e as respectivas combinações de níveis (identificados por números inteiros positivos), já as linhas correspondem aos experimentos – ensaios ou observações. Por conseguinte, em cada par de colunas, todas as combinações de fatores ocorrem no mesmo número de vezes (Minitab, 2021). Assim, a notação que representa a matriz de Taguchi é indicada por:  $L_{(\text{ensaios})}(\text{níveis}^{\text{fatores}})$ .

Planejar um experimento é selecionar a MO mais adequada, atribuir fatores de controle as respectivas colunas e, finalmente, examinar as combinações dos experimentos (Roy, 2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Estabelece o referencial que lista os principais mecanismos que compuseram a aplicação da pesquisa. O conteúdo é norteado em dois tópicos centrais: material e equipamentos, e metodologia. Dessa forma, o tipo de filamento, dispositivos utilizados, parâmetros estabelecidos, método básico e procedimentos de operação compõem os fundamentos desta respectiva seção.

#### 3.1 Material e Equipamentos

O estudo das propriedades mecânicas deste trabalho é conduzido em um único tipo de filamento de impressão 3D, o PETG, sem qualquer reforço em sua composição de outro material, como carbono ou grafeno; ou seja, foi adotado o PETG na forma base. Além disso, todos os equipamentos utilizados na impressão, ensaio e análise dimensional do material foram disponibilizados pelo laboratório da Universidade Federal do Ceará (UFC) - Campus Russas.

##### 3.1.1 Filamento PETG

O tipo de filamento de PETG escolhido, com base no custo, qualidade e disponibilidade, foi da fabricante *PrintaLot*, que atua desde 2013 no mercado de impressão 3D. O filamento adquirido possui comprimento total de 123,4 metros, densidade de 1,27 g/cm<sup>3</sup>, espessura de 1,75 mm, peso líquido de 1 kg e cor amarela.

De acordo com a Filament2print (2017), essa espessura é a mais adequada para uso não profissional com impressoras desktop, nas quais não se costuma imprimir por várias horas ou dias. A Figura 34 ilustra o filamento de PETG a ser utilizado.

Figura 34 – Filamento PETG (*PrintaLot*)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### **3.1.2 Impressora 3D FDM/FFF**

A impressora utilizada é uma Core XY, modelo H5 da marca GTMax3D. A Core XY possui um eixo independente, eixo-z, que é responsável pelo movimento da altura da mesa de impressão, além de dois eixos acoplados (x-y) que direcionam o movimento do bico extrusor com a ajuda de arranjos de polias e correias.

“Essa configuração é mais complexa em relação à cartesiana, porém apresenta velocidades superiores à primeira, já que permite a livre movimentação do carro de impressão, sem a necessidade de carregar os sistemas de nenhum outro eixo” (Eletrogate, 2022).

Esse modelo utilizado possui área de impressão de  $(x, y, z) = (300 \times 300 \times 500)$  mm, respectivamente. Possui temperatura máxima de mesa de 135 °C (mesa de alumínio aquecida com tampo de vidro), resolução de 0,05 mm a 0,4 mm, velocidade máxima de 400 mm/s, temperatura máxima de bico de até 295°C, além de nivelamento automático e detecção de fim de filamento.

Com isso, a Figura 35 mostra a impressora Core XY manuseada.

Figura 35 – Impressora GTMax3D H5



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### ***3.1.3 Máquina de ensaio de tração***

O ensaio de tração realizado nos corpos de prova foi através de uma máquina universal de ensaios. Dessa forma, o equipamento utilizado é da fabricante EMIC que, por sua vez, é uma empresa que desenvolve máquinas que são utilizadas no controle de qualidade, pesquisa e desenvolvimento de materiais, possuindo a maior equipe de profissionais especializados em ensaios mecânicos da América Latina.

A máquina é do modelo DL-30000, possui 300 kN de força, velocidade de 0,01 a 500 mm/min e detém curso máximo, sem garras, de 1200 mm. A Figura 36 mostra a máquina disponibilizada pelo laboratório da UFC – Campus Russas.



Figura 36 – Máquina de Ensaio de Tração (EMIC)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### ***3.1.4 Equipamentos de medição***

O paquímetro digital em aço 150 mm - ZAAS-1.0004 foi operado na verificação das dimensões dos corpos de prova impressos. Esse instrumento possibilita a medição externa, interna, profundidade e ressalto, uma vez que se trata de um equipamento de bom nível de precisão e confiabilidade.

Dessa forma, o paquímetro é essencial para constatar que as variações dimensionais das amostras estão dentro do padrão dimensional estabelecido pela norma ASTM D638-22. Assim sendo, a Figura 37 mostra o respectivo paquímetro utilizado.

Em relação a variação dimensional de massa, a Figura 38, ilustra a respectiva balança eletrônica de precisão utilizada, pertencente ao modelo HL – Series.

Figura 37 – Paquímetro digital ZAAS



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 38 – Balança eletrônica de precisão

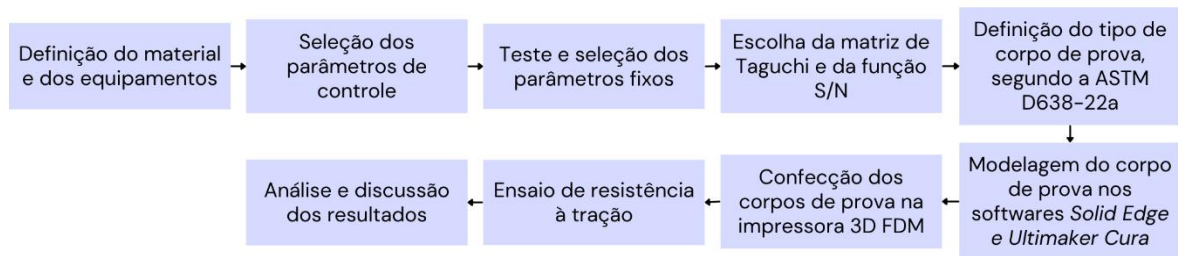


Fonte: Elaborado pelo Autor.

### 3.2 Métodos

O referencial estabelece como os objetivos específicos foram alcançados. Desse modo, os métodos empregados nesta seção especificam os parâmetros escolhidos (controle e fixos) para a configuração de impressão, bem como os principais conceitos do método experimental adotado, assim como os procedimentos de confecção para o corpo de prova e ensaio de resistência à tração. A Figura 39 por meio de um fluxograma metodológico condensa de forma sequencial as etapas de desenvolvimento.

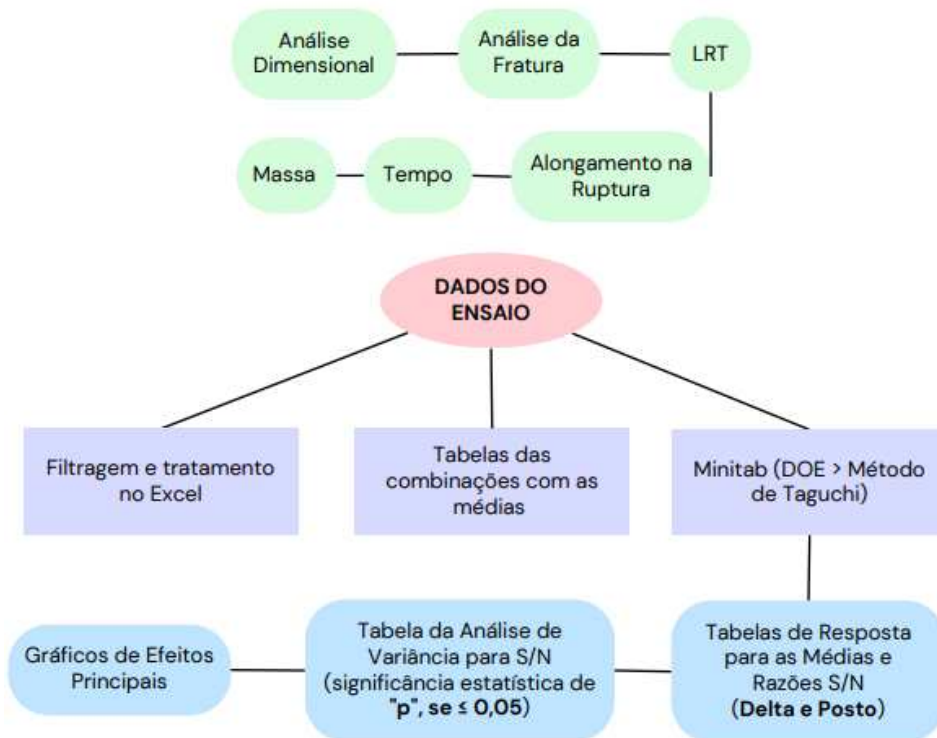
Figura 39 – Fluxograma metodológico



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Já o fluxograma da Figura 40 resume a sequência da análise e discussão dos resultados.

Figura 40 – Fluxograma das etapas de interpretação dos resultados



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.1 Parâmetros de controle

Dentre os diversos parâmetros de impressão 3D, há aqueles que exercem maior influência sob determinadas propriedades mecânicas dos materiais, além do efeito sobre a qualidade de impressão, tempo de impressão e a massa das peças fabricadas. Com isso, definir os parâmetros mais relevantes é de suma importância para que, através da matriz experimental utilizando o método de Taguchi, seja possível identificar as combinações de parâmetros de controle que potencializam a resistência à tração e o alongamento do PETG.

Wibawa, Mastriswadi e Ismianti (2020), mapearam resultados de pesquisas que vêm sendo realizadas a respeito da otimização do processo de impressão 3D, em especial da tecnologia FDM. Nesse sentido, relataram que a altura de camada, nível e padrão de preenchimento, temperatura de extrusão e velocidade de impressão são os principais parâmetros que afetam as propriedades mecânicas.

Srinivasan *et al.* (2020), investigaram como diferentes padrões de preenchimento afetam a resistência à tração do PETG. Já Panneerselvam, Raghuraman e Vamsi Krishnan (2021), além do padrão de preenchimento, examinaram em conjunto os efeitos do nível de preenchimento e altura de camada na resistência à tração.

Os polímeros, por serem materiais anisotrópicos, apresentam diferentes propriedades mecânicas em diferentes direções, devido sobretudo à forma de fabricação. Conseqüentemente, diferentes disposições do preenchimento no corpo de prova favorecem uma direção ou outra (Lizardo *et al.*, 2016). Assim, a orientação de impressão torna-se um relevante fator a ser analisado.

Dado o exposto, para este trabalho foram escolhidos quatro parâmetros de controle de impressão: nível de preenchimento, padrão de preenchimento, altura de camada e orientação de impressão. Com efeito, devido à quantidade de combinações e replicação, assim como o tempo e custo, foram estabelecidos quatro diferentes níveis para cada parâmetro.

Ainda assim, vale ressaltar que a escolha desses parâmetros foi baseada em estudos prévios e na literatura científica, sendo que outros parâmetros poderiam ter sido escolhidos dependendo da natureza do estudo.

Para o nível de preenchimento, foram adotadas peças com percentuais de preenchimento nas faixas baixa, média e alta. O padrão de preenchimento foi designado a partir das opções disponíveis do *Software Ultimaker Cura*. Ademais, para a altura de camada, adotou-se nas faixas com aumento gradual e, a orientação de impressão, estudou-se os ângulos mais relevantes.

A Tabela 11 demonstra os quatros parâmetros com seus respectivos níveis

Tabela 11– Parâmetros de controle

<b>Parâmetros de Controle</b>	<b>Níveis</b>			
Nível de Preenchimento (%)	25	50	75	100
Padrão de Preenchimento (Cura)	Grade, Triângulos, Giróide, Linhas			
Altura de Camada (mm)	0,16	0,20	0,24	0,28
Orientação de Impressão (°)	0	(-45,45)	90	(0,90)

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.1.1 Parâmetros fixos

Os parâmetros fixos são aqueles que são mantidos constantes durante todo o processo de impressão. O PETG, por não ser um material simples de imprimir, requer que o projetista realize pequenos testes primários para inferir quais parâmetros e configurações que facilitam a impressão das peças, visando garantir uma boa qualidade, facilidade de remoção da mesa e, também, evitar o *stringing*. Nesse aspecto, o fabricante do filamento fornece algumas recomendações tais como: utilizar uma faixa de temperatura entre 240 °C e 250 °C, temperatura de mesa entre 80 °C e 90 °C, além de sugerir a utilização de *spray* fixador.

Objetivando reunir orientações sobre a modelagem, foi realizado o estudo da literatura para impressões realizadas com o PETG tais como os trabalhos de Ribeiro (2023), Valvez, Silva e Reis (2022), O’Connell (2022) . Em paralelo, foi analisado recomendações de conteúdo especializado em impressão 3D como, por exemplo, a 3D Printerly, ALL 3DP, Filament2Print, 3D Fila e 3D Print Academy. Dessa forma, as informações sobre os demais parâmetros foram colhidas e condensadas para que fossem usadas nas impressões de teste.

Assim, após realizado as impressões e as inspeções das peças de teste, foram estabelecidos, de acordo com a Tabela 12, os parâmetros fixos de impressão 3D para a realização do trabalho.

Tabela 12 – Parâmetros fixos

<b>Parâmetro Fixos</b>	<b>Dados</b>
Temperatura de Impressão/Extrusão	240 °C
Temperatura de Mesa	80° C
Velocidade de Impressão	40 mm/s
Velocidade de Impressão (1° Camada)	20 mm/s
Altura da Primeira Camada	0,2 mm
Distância da Retração ( <i>Bowden</i> )	5,8 mm
Velocidade de Retração	70 mm/s
Número de Filetes na Parede	2
<i>Fan</i> (Ventilação)	50 %
Ventilação Inicial do <i>Cooler</i>	0 %
Tipo de Adesão	<i>Skirt</i>
Taxa de Fluxo	100 %
Camadas Superior/Inferior	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2 Matriz de procedimento experimental

A Tabela 13 une os pontos necessários para selecionar e construir a matriz de Taguchi para o desenvolvimento desse trabalho.

Tabela 13 – Resumo dos elementos centrais para o experimento

<b>Resposta do Sistema</b> →	gráfico tensão-deformação do PETG
<b>Parâmetros de Controle</b> →	4 parâmetros
<b>Níveis por Parâmetro</b> →	4 níveis
<b>Ruído</b> →	Condições ambientais de operação, vibração, desgaste do equipamento, degradação do material, cansaço do operador e etc.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo Quadro 1 vemos que a matriz que melhor se adequa aos parâmetros estabelecidos, é a matriz  $L_{16}(4^5)$ . Isto significa que, para até 5 fatores de controle com 4 níveis, Taguchi propõe uma matriz com 16 diferentes combinações para se otimizar o referido estudo do produto ou processo.

Quadro 1 – Diferentes arranjos de matriz ortogonal

Arranjo ortogonal	Número de experimentos	Máximo N <sup>o</sup> . fatores	Máximo número de colunas na matriz			
			2 níveis	3 níveis	4 níveis	5 níveis
L <sub>4</sub>	4	3	3	—	—	—
L <sub>8</sub>	8	7	7	—	—	—
L <sub>9</sub>	9	4	—	4	—	—
L <sub>12</sub>	12	11	11	—	—	—
L <sub>16</sub>	16	15	15	—	—	—
L' <sub>16</sub>	16	5	—	—	5	—
L <sub>18</sub>	18	8	1	7	—	—
L <sub>25</sub>	25	6	—	—	—	6
L <sub>27</sub>	27	13	—	13	—	—
L <sub>32</sub>	32	31	31	—	—	—
L' <sub>32</sub>	32	10	1	—	9	—
L <sub>36</sub>	36	23	11	12	—	—
L' <sub>36</sub>	36	16	3	13	—	—
L <sub>50</sub>	50	12	1	—	—	11
L <sub>54</sub>	54	26	1	25	—	—
L <sub>64</sub>	64	63	63	—	—	—
L' <sub>64</sub>	64	21	—	—	2	—
L <sub>81</sub>	81	40	—	40	—	—

Fonte: Paredes (2012, com adaptações).

O Quadro 2 mostra a representação da matriz  $L_{16}(4^5)$ .

Quadro 2 – Matriz padrão de no máximo 4 níveis e até 5 fatores

NO.	$L_{16}(4^5)$				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

\* Reprinted with permission of the American Supplier Institute, Inc.

Fonte: Roy (2010).

No entanto, como nesse trabalho propõe estudar apenas o efeito de quatro fatores de controle, a matriz  $L_{16}(4^5)$  pode ser modificada; ou seja, removendo a última coluna que designaria o quinto fator. Com isso, a matriz ortogonal de Taguchi que será utilizada para esse trabalho é ilustrada no Quadro 3.



Quadro 3 – Matriz L16 rearranjada para 4 fatores com 4 níveis

<b>MATRIZ L16 (4 fatores com 4 níveis)</b>				
<b>CORPOS DE PROVA (CP's)</b>	<b>FATOR A</b>	<b>FATOR B</b>	<b>FATOR C</b>	<b>FATOR D</b>
<b>CP 01</b>	1	1	1	1
<b>CP 02</b>	1	2	2	2
<b>CP 03</b>	1	3	3	3
<b>CP 04</b>	1	4	4	4
<b>CP 05</b>	2	1	2	3
<b>CP 06</b>	2	2	1	4
<b>CP 07</b>	2	3	4	1
<b>CP 08</b>	2	4	3	2
<b>CP 09</b>	3	1	3	4
<b>CP 10</b>	3	2	4	3
<b>CP 11</b>	3	3	1	2
<b>CP 12</b>	3	4	2	1
<b>CP 13</b>	4	1	4	2
<b>CP 14</b>	4	2	3	1
<b>CP 15</b>	4	3	2	4
<b>CP 16</b>	4	4	1	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Isto posto, a coluna mais à esquerda é dada pela representação dos corpos de prova que assumirão as combinações de cada respectiva linha, partindo dos balanceamentos dos níveis de cada fator. Com efeito, o Quadro 4 mostra os parâmetros de controle com seus respectivos códigos e níveis, e o Quadro 5 mostra a matriz ortogonal correspondente para o estudo do trabalho.

Quadro 4 – Parâmetros de controle com seus respectivos níveis

<b>PARÂMETROS DE CONTROLE</b>					
<b>FATOR</b>	<b>CÓDIGO</b>	<b>NÍVEL 1</b>	<b>NÍVEL 2</b>	<b>NÍVEL 3</b>	<b>NÍVEL 4</b>
<b>Nível de Preenchimento (%)</b>	<b>A</b>	25	50	75	100
<b>Padrão de Preenchimento</b>	<b>B</b>	Grade	Triangular	Giróide	Linhas
<b>Altura de Camada (mm)</b>	<b>C</b>	0,16	0,2	0,24	0,28
<b>Orientação de Impressão</b>	<b>D</b>	0°	(-45,45°)	90°	(0°,90°)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5 – Matriz ortogonal final

MATRIZ L16				
CORPOS DE PROVA (CP's)	FATOR A	FATOR B	FATOR C	FATOR D
CP 01	25	Grade	0,16	0°
CP 02	25	Triangular	0,2	(-45,45°)
CP 03	25	Giróide	0,24	90°
CP 04	25	Linhas	0,28	(0°,90°)
CP 05	50	Grade	0,2	90°
CP 06	50	Triangular	0,16	(0°,90°)
CP 07	50	Giróide	0,28	0°
CP 08	50	Linhas	0,24	(-45,45°)
CP 09	75	Grade	0,24	(0°,90°)
CP 10	75	Triangular	0,28	90°
CP 11	75	Giróide	0,16	(-45,45°)
CP 12	75	Linhas	0,2	0°
CP 13	100	Grade	0,28	(-45,45°)
CP 14	100	Triangular	0,24	0°
CP 15	100	Giróide	0,2	(0°,90°)
CP 16	100	Linhas	0,16	90°

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada experimento, 3 réplicas de corpos de prova (CPs) foram fabricados para manter um bom intervalo de confiança dos resultados. Assim, ao todo serão impressos 48 CPs em material PETG.

### 3.2.2.1 Relação *signal-to-noise* (S/N-sinal ruído)

Após realizar o ensaio de resistência à tração para os CPs, o exame dos resultados, de acordo com Taguchi, é realizado através de um método estatístico denominado de *Signal-to-Noise* (Sinal Ruído – S/N). A razão S/N é uma medida de desempenho para escolher os níveis de controle que melhor lidam com o ruído, tendo como base a função-perda quadrática (Phadke, 1989).

Conforme Unal e Dean (1990), a relação S/N leva em consideração tanto a média quanto a variabilidade, uma vez que depende do critério para a característica de qualidade a ser otimizada. Desse modo, há três tipos padrão para análise:

- a) maior é melhor (ideal para mensurar resistência, força, produção, rendimento);
- b) menor é melhor (ideal para mensurar defeitos, poluição, vibração, corrosão);
- c) nominal é melhor (ideal para dimensionar controle de fluxo, viscosidade, diâmetros e etc.).

A razão S/N converte os resultados do ensaio em uma escala logarítmica. Em vista disso, altera os resultados do comportamento não linear desconhecido em uma relação linear com os fatores de influência, proporcionando a identificação da condição ótima e do desempenho esperado com a menor variabilidade dos fatores controláveis e incontroláveis (Roy, 2010). Dessa forma, para se obter a razão S/N utiliza-se a equação 1 a seguir:

$$S/N_{LB} = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \right] \quad (1)$$

tal que  $S/N_{LB}$  é a relação sinal-ruído (dB),  $n$  é o número de observações nas mesmas condições experimentais e  $R_i$  é o valor de resposta obtido pelo desempenho da medição.

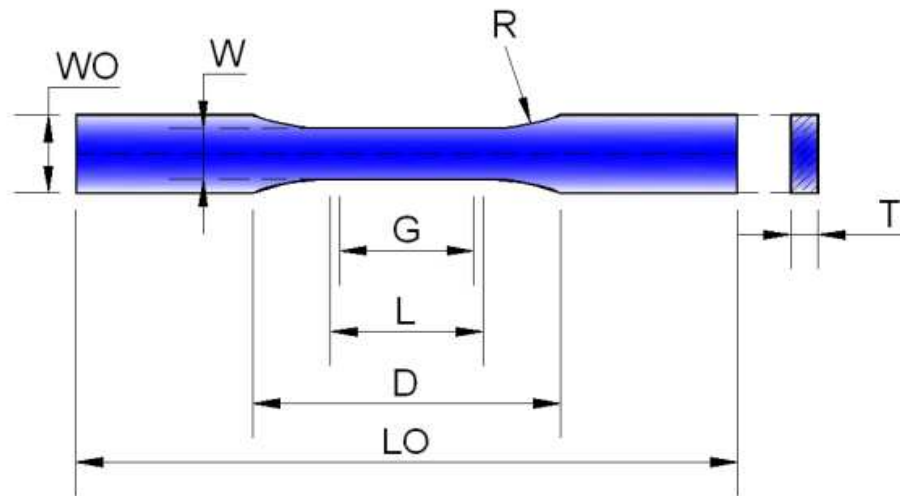
Em síntese, como o objetivo desse trabalho é analisar a combinação de parâmetros de impressão 3D que maximizam as propriedades mecânicas, então a função S/N escolhida é a “maior é melhor”. Com efeito, todo o procedimento é realizado através do *software* estatístico Minitab® 21.4 (64-bit), tal que após coletar os dados pelo gráfico tensão-deformação, eles são inseridos no *software* que, por sua vez, conceberá os resultados necessários.

### 3.2.3 Procedimentos para os corpos de prova e ensaio de tração

A norma ASTM D638-22 fornece quatro diferentes tipos de corpos de prova para que seja realizado o ensaio de resistência à tração: tipos I, II, III e IV. Dessa forma, quando o corpo de prova apresenta espessura de até 7 mm (0,28 polegadas) ou menos, a norma padroniza a metodologia de testes de tração em plásticos rígidos e semirrígidos no modelo tipo I.

Em vista disso, a Figura 41 clarifica os pontos de medição imprescindíveis para realizar a fabricação, a análise dimensional e mensurar as propriedades. Em complemento, a Tabela 14 nomeia essa pontos de dimensão.

Figura 41 – Corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: Terra Ruchert (2022).

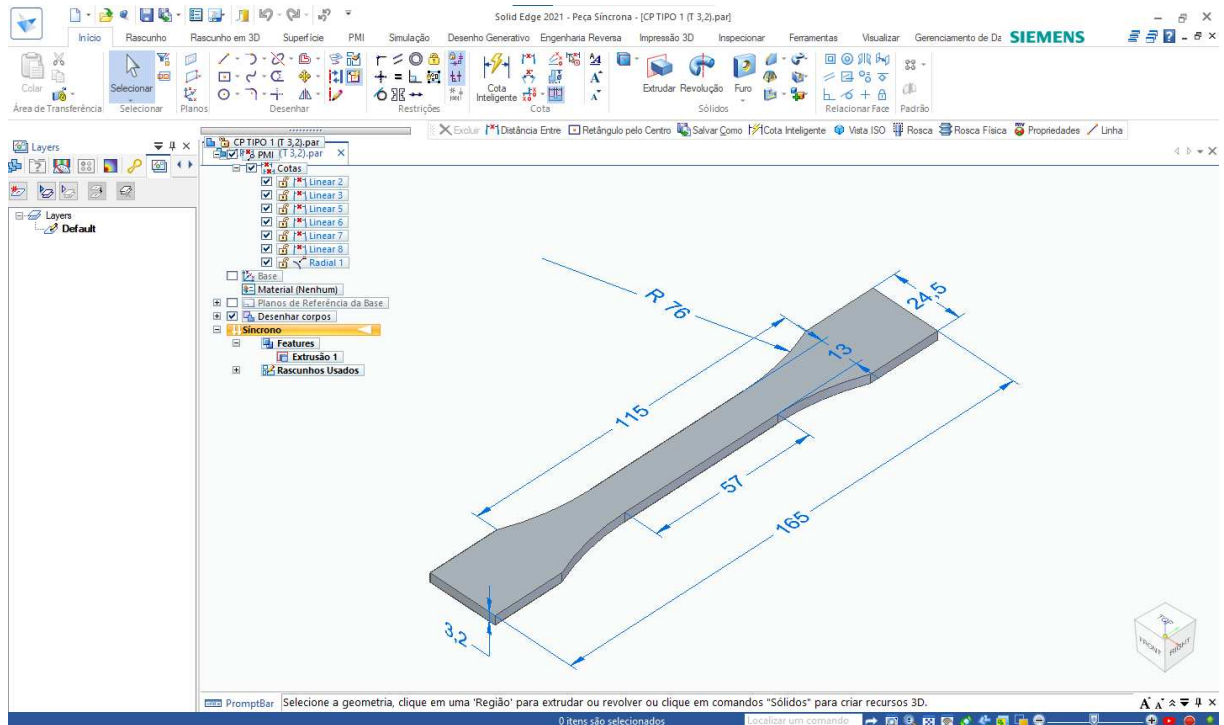
Tabela 14 – Dimensões (mm)

Dimensões (mm)
W – Largura da seção delgada
WO – Largura total
L – Comprimento da seção delgada
LO – Comprimento total
G – Comprimento para instrumentação
D – Distância entre garras
R – Raio
T – Espessura

Fonte: Terra Ruchert (2022).

Assim, de acordo com os valores dimensionais e suas respectivas tolerâncias fornecidas pela ASTM D638-22 para CPs do tipo I, o modelo CAD foi elaborado no *software Solid Edge (Academic Edition)* – Versão 221.00.00.114 x64, Figura 42.

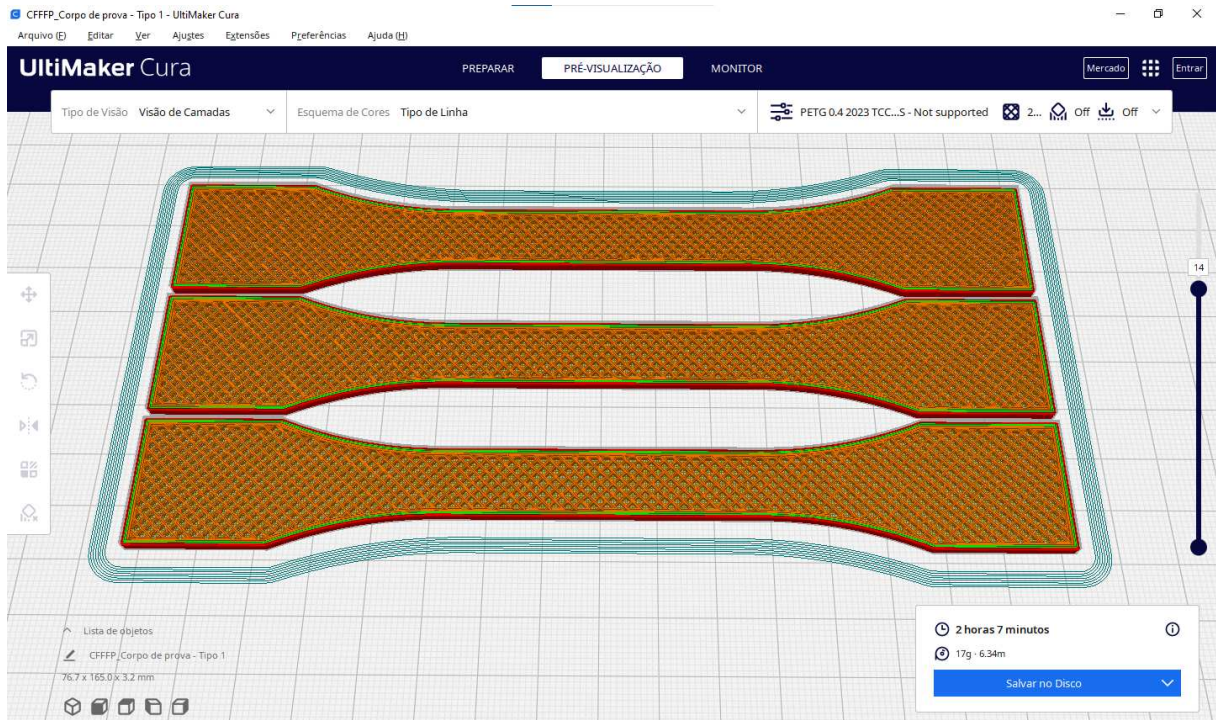
Figura 42 – Modelagem do CP no *Solid Edge*



Fonte: Elaborado pelo autor.

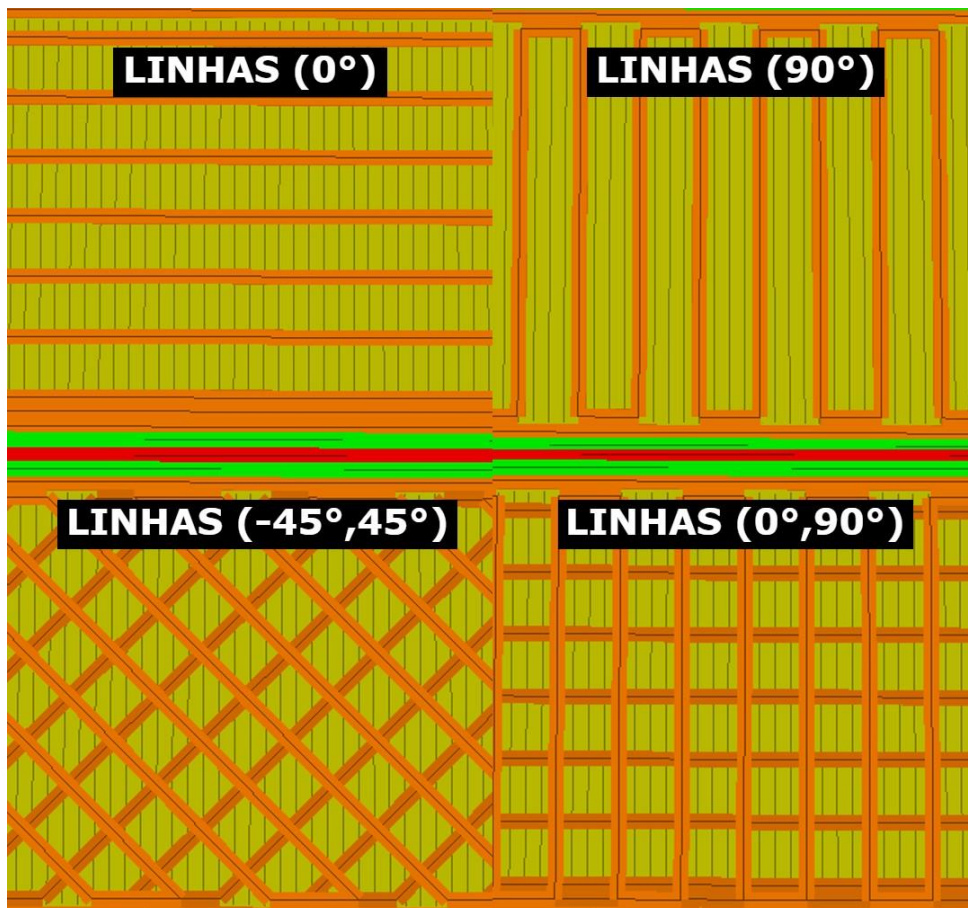
Em seguida, o arquivo do projeto é exportado no formato *Standard Template Library* (STL) para que seja utilizado no *software* Cura® 5.3.0 (programa fatiador). Após a definição dos parâmetros fixos, são projetados 16 CPs com base em cada um dos parâmetros de controle (nível, padrão, altura e orientação), correspondentes aos seus respectivos níveis. Dado o exposto, a Figura 43 mostra o *layout* do Cura® 5.3.0 e a Figura 44 ilustra a modelagem de quatro orientações de impressão para o parâmetro de controle “padrão de preenchimento tipo linhas”.



Figura 43 – Modelagem no *Ultimaker Cura*

Fonte: Elaborado pelo autor.

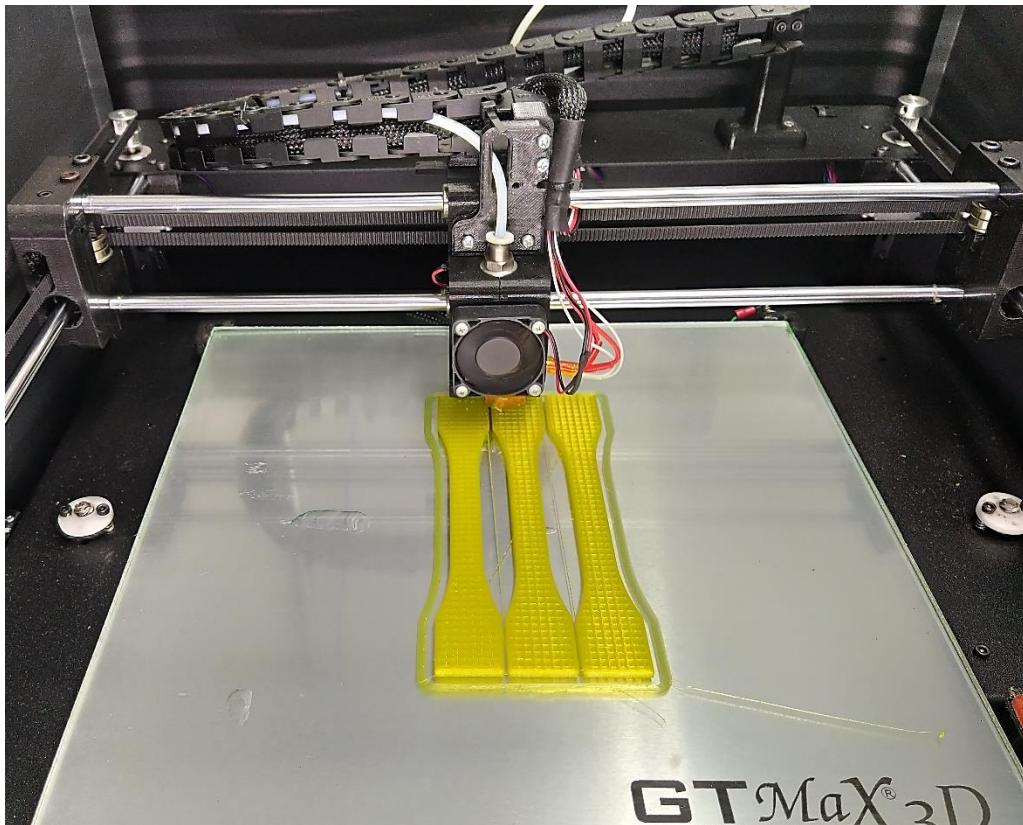
Figura 44 – Padrão de Preenchimento "Linhas" e suas orientações



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa maneira, finalizado as configurações, os CPs são novamente exportados (formato G-CODE) para que a impressora 3D realize a leitura e impressão dos modelos. Vale salientar que, o tempo de impressão pode variar de acordo com os parâmetros fornecidos e o tamanho, mas não com a complexidade do projeto (Srinivasan *et al.*, 2020). A Figura 45 exemplifica o procedimento de confecção das peças na impressora GT Max.

Figura 45 – Confecção dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

Impressos os CPs, foi realizada uma inspeção visual para aferir possíveis defeitos de fabricação e identificação das 16 combinações realizadas. Assim sendo, afim de evitar umidade e variações de temperatura, as peças foram armazenadas em saco plástico *ziplock* com o uso de sílica gel, Figura 46.

Figura 46 – CPs impressos, demarcados e armazenados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realizar o ensaio de tração na máquina de ensaios universais já descrita anteriormente, é necessário utilizar o parâmetro relacionado à velocidade de teste. Seguindo a recomendação da ASTM D638-22 e de outros trabalhos acadêmicos, foi definida uma velocidade de ensaio padrão de 2 mm/min. Os corpos de prova (CPs) são posicionados no sistema de fixação (garras) da máquina de ensaios a uma distância ( $D$ ) de 57,5 mm de seus respectivos centros, garantindo a fixação e o alinhamento axial dos mesmos. Além disso, a Figura 47 mostra as demarcações realizadas nos locais de posicionamento das garras, bem como a delimitação da região útil de análise dos testes ( $L$ ).



Figura 47 – Procedimento do ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, iniciado o ensaio, os dados são gerados por meio de um software que o equipamento possui. Com isso, é possível obter os resultados em formato de texto (.txt) referentes ao tempo (s), a variação do comprimento  $\Delta L$  (mm) e a força (N). Assim, as informações obtidas são essenciais para aferir a curva tensão-deformação e, dessa forma, obter os parâmetros necessários de estudo para que possa ser realizada a análise estatística com o intuito de conduzir as conclusões do trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise cuidadosa dos resultados e a subsequente discussão são essenciais para o avanço do conhecimento sobre materiais, como o PETG, e para a melhoria dos parâmetros de impressão utilizados em sua produção. Nesse contexto, o presente tópico aborda a análise dos dados obtidos por meio do *software* estatístico Minitab<sup>®</sup> ao se empregar o método de Taguchi por meio do planejamento de experimentos (DOE).

As principais respostas a serem consideradas para a análise e interpretação são obtidas pela avaliação das tabelas de resposta, tanto para as médias quanto para as razões sinal-ruído, relacionadas aos valores de delta e classificação. Além disso, a tabela de análise de variância para as razões S/N, referente aos valores-p de significância estatística, e os gráficos de efeitos principais para as médias e razões S/N são de grande importância.

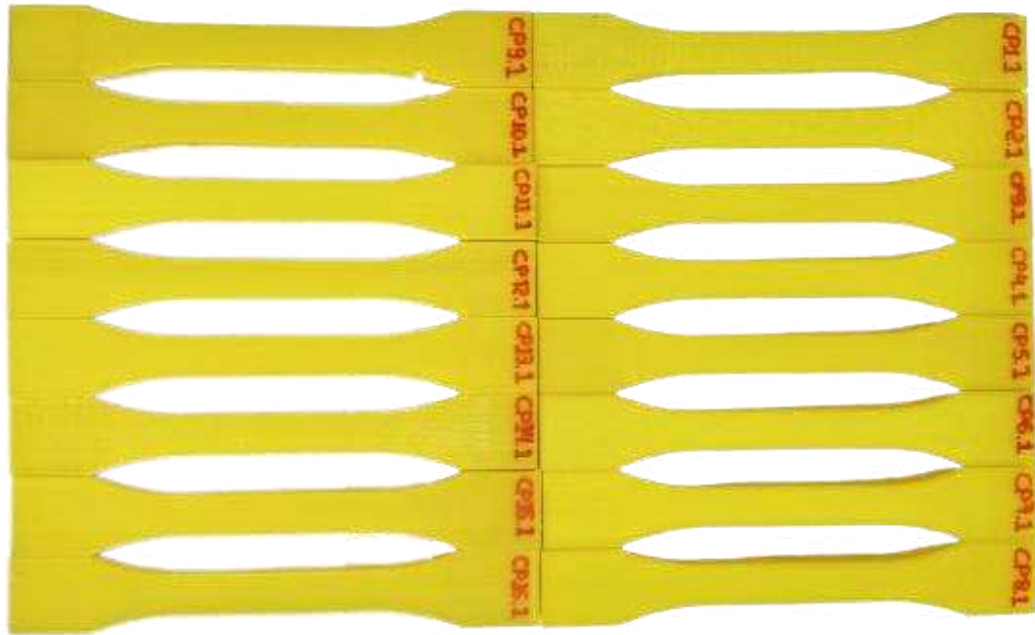
Dessa forma, os resultados partem da análise dimensional, análise da fratura, resistência à tração máxima, alongamento na ruptura, tempo de impressão e as massas das amostras. Assim, é possível aferir quais combinações dentre os fatores de controle estudados que tem maior influência sobre as propriedades do PETG.

### 4.1 Análise dimensional dos corpos de prova

Para obter resultados adequados, é imprescindível verificar se as peças fabricadas estão dentro dos padrões de tolerância designados pela ASTM D638. Nesse sentido, a largura (W) em milímetros e a espessura (T) em milímetros são as principais medidas que foram realizadas por meio do paquímetro digital, uma vez que é por meio delas que se obtém a área (mm<sup>2</sup>) da região útil do CP. Dessa forma, a partir da área e dos valores de força durante o ensaio de tração, torna-se possível obter os resultados das respectivas tensões.

Com isso, foram realizadas três repetições para cada corpo de prova em relação a cada medida de W e T, obtendo-se a média dos resultados. Nesse contexto, como a região útil é uma seção retangular, a área média é obtida multiplicando-se a largura pela espessura. A Figura 48 mostra os todos os CPs impressos e identificados.

Figura 48 – CPs impressos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, a Tabela 15 apresenta as dimensões das 16 combinações de CPs impressos com material PETG.

Tabela 15 – Dimensões dos CPs

Combinação - CP	Nível (%)	Padrão	Altura (mm)	Orientação (°)	Largura W (mm)	Espessura T (mm)
<b>CP 01</b>	25	Grade	0,16	0°	13,3 ± 0,2	3,3 ± 0,1
<b>CP 02</b>	25	Triangular	0,20	(-45,45°)	13,1 ± 0,2	3,3 ± 0,1
<b>CP 03</b>	25	Giróide	0,24	90°	13,0 ± 0,1	3,2 ± 0,2
<b>CP 04</b>	25	Linhas	0,28	(0°,90°)	13,0 ± 0,1	3,4 ± 0,1
<b>CP 05</b>	50	Grade	0,20	90°	13,2 ± 0,2	3,3 ± 0,1
<b>CP 06</b>	50	Triangular	0,16	(0°,90°)	12,9 ± 0,1	3,4 ± 0,1
<b>CP 07</b>	50	Giróide	0,28	0°	13,0 ± 0,1	3,4 ± 0,1
<b>CP 08</b>	50	Linhas	0,24	(-45,45°)	13,1 ± 0,1	3,1 ± 0,1
<b>CP 09</b>	75	Grade	0,24	(0°,90°)	13,1 ± 0,1	3,1 ± 0,1
<b>CP 10</b>	75	Triangular	0,28	90°	13,1 ± 0,1	3,3 ± 0,1
<b>CP 11</b>	75	Giróide	0,16	(-45,45°)	13,0 ± 0,1	3,3 ± 0,2
<b>CP 12</b>	75	Linhas	0,20	0°	13,0 ± 0,1	3,3 ± 0,1
<b>CP 13</b>	100	Grade	0,28	(-45,45°)	13,2 ± 0,1	3,3 ± 0,3
<b>CP 14</b>	100	Triangular	0,24	0°	13,0 ± 0,1	3,0 ± 0,2
<b>CP 15</b>	100	Giróide	0,20	(0°,90°)	12,9 ± 0,1	3,4 ± 0,2
<b>CP 16</b>	100	Linhas	0,16	90°	12,9 ± 0,1	3,4 ± 0,2

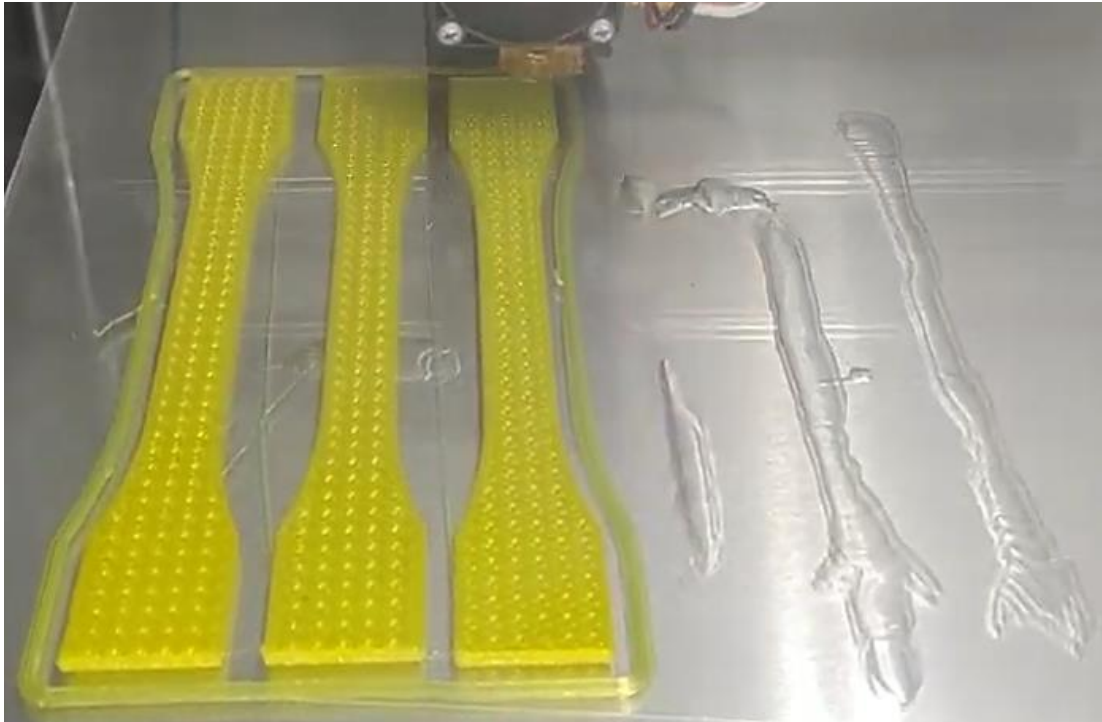
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Tabela 15, é possível notar as variações das amostras em relação às suas medidas iniciais, ou seja, 13 mm para a largura e 3,2 mm para a espessura. Tal fato ocorre principalmente devido a diversas variáveis que afetam a variação dimensional dos corpos de prova.

A temperatura de impressão, assim como a taxa de deposição (fluxo de material) afetam a viscosidade do PETG e a quantidade de material depositado, visto que há quatro percentuais de preenchimento a serem trabalhados durante as combinações. Além disso, tanto a temperatura da mesa de impressão quanto a temperatura ambiente podem afetar a aderência do material PETG à mesa, bem como sua contração após a impressão, o que pode levar a variações dimensionais. Dessa maneira, nota-se que a combinação CP 14 foi a mais afetada por essas variáveis.

A Figura 49 exemplifica essa influência do fator da temperatura da mesa em relação a fixação da peça.

Figura 49 – Influência da temperatura e do material na mesa de aderência



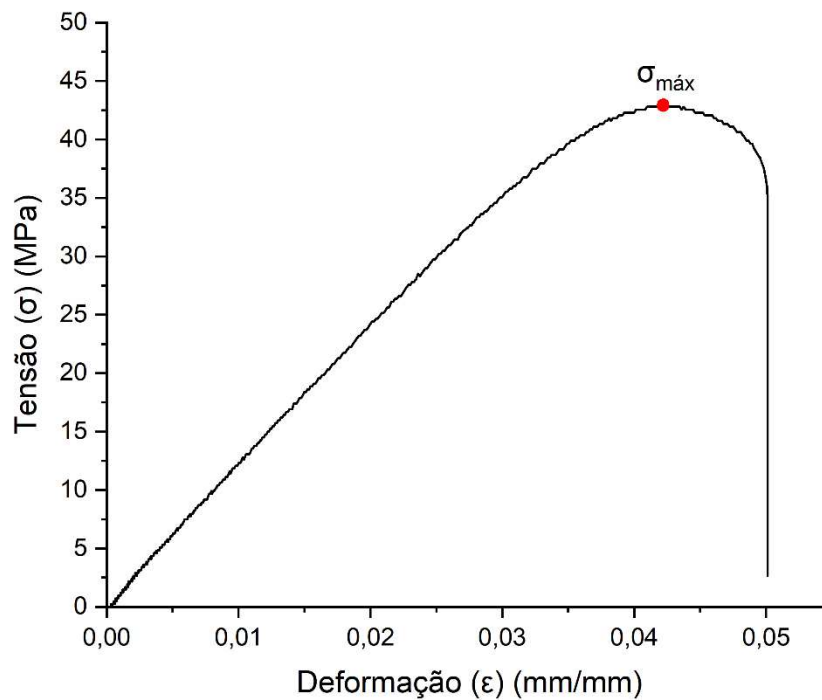
Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro fator importante diz respeito às propriedades do próprio material PETG, como sua taxa de contração, que também pode influenciar a precisão dimensional dos corpos de prova impressos em 3D. Em resumo, apesar das variações dimensionais apresentadas nos CPs, todas as peças apresentaram medidas dentro dos limites estabelecidos pela norma, que são  $13 \text{ mm} \pm 0,5$  para a largura (W) e  $3,2 \text{ mm} \pm 0,4$  para a espessura (T).

## 4.2 Curva tensão-deformação

A Figura 50 ilustra o comportamento típico da curva tensão-deformação para uma das amostras impressas em PETG durante o ensaio de resistência à tração.

Figura 50 – Curva tensão *versus* deformação para a amostra CP 15.1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após analisar cuidadosamente o gráfico de tensão versus deformação para o PETG é possível constatar a fase plástica de deformação desse material. Para os polímeros, determinar ao certo o limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) - que separa as fases elástica e plástica no gráfico - pode ser uma tarefa um pouco mais complexa do que em materiais metálicos, uma vez que os polímeros geralmente não apresentam um ponto de cedência tão claro como os metais. No entanto, é comum definir o limite de escoamento em polímeros como a tensão na qual a taxa de deformação plástica se torna significativamente maior do que a taxa de deformação elástica, resultando em uma deformação permanente mensurável.

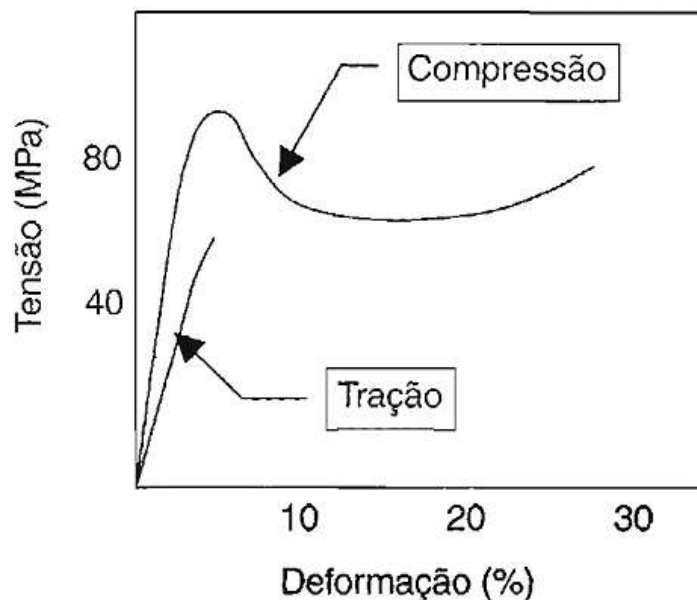
No limite de escoamento, o material atinge a tensão  $\sigma_e$  em MPa, resultando em uma deformação permanente. Com efeito, essa capacidade de deformação plástica é um indicativo

de que o material PETG é dúctil. É notório, por sua vez, a tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) que representa o limite de resistência à tração (LRT) do material.

Essa característica dúctil torna o PETG adequado para aplicações em que a capacidade de resistir a deformações e absorver energia é desejada, como em componentes sujeitos a cargas cíclicas ou impactos.

De acordo com Canevarolo Jr (2006), para cada tipo de ensaio, as curvas de tensão versus deformação apresentam aspectos característicos distintos. A Figura 51 ilustra esse efeito para o termoplástico “poliestireno cristal” quando submetido a compressão (comportamento frágil) e quando submetido a tração (comportamento dúctil).

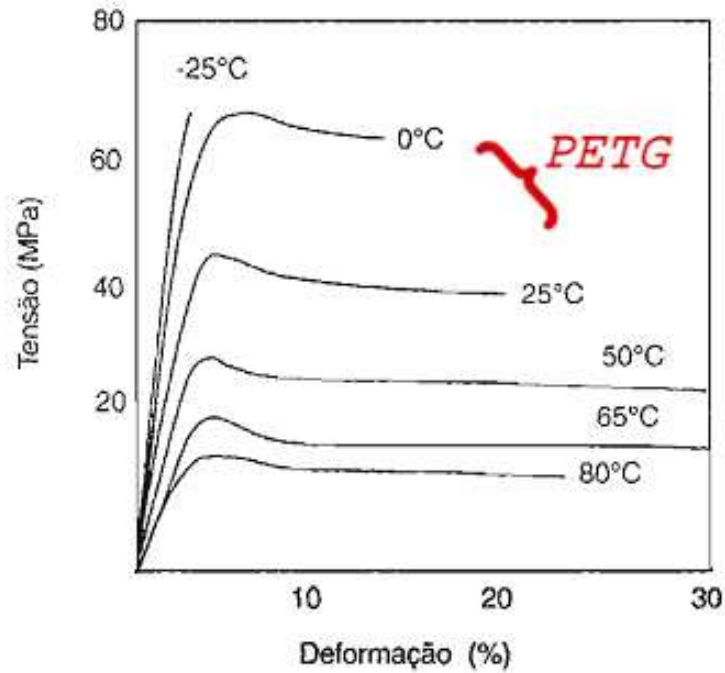
Figura 51 – Aspecto da curva tensão-deformação para compressão e tração



Fonte: Canevarolo Jr (2006).

Essa diferença decorre da redução dos defeitos (falhas e microtrincas) ocasionados pela compressão, ao passo que a tração acentua a propagação das microtrincas. Ainda segundo Canevarolo Jr (2006), a taxa de deformação, a temperatura e o ambiente afetam diretamente as propriedades dos polímeros, sobretudo, em virtude desses materiais apresentarem um comportamento viscoelástico. Com isso, a Figura 52 mostra a influência de diferentes temperaturas no comportamento dúctil-frágil para o polímero acetato de celulose quando submetido a um ensaio de tração.

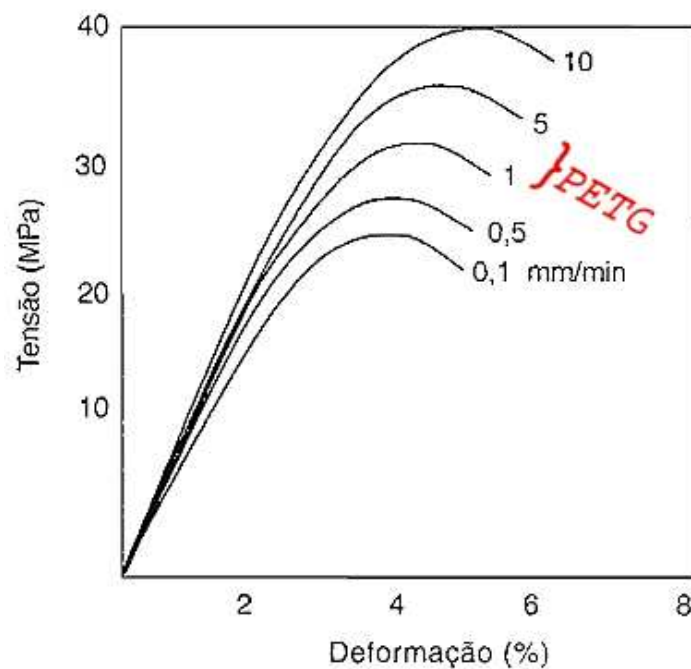
Figura 52 – Influência da temperatura na curva tensão-deformação



Fonte: Canevarolo Jr (2006).

Já a Figura 53, mostra a influência da taxa de deformação (mm/min) para o épxi. Com efeito, é possível constatar que quanto mais rápido é o movimento de deformação, maior é o módulo.

Figura 53 – Influência da taxa de deformação na curva tensão-deformação



Fonte: Canevarolo Jr (2006).



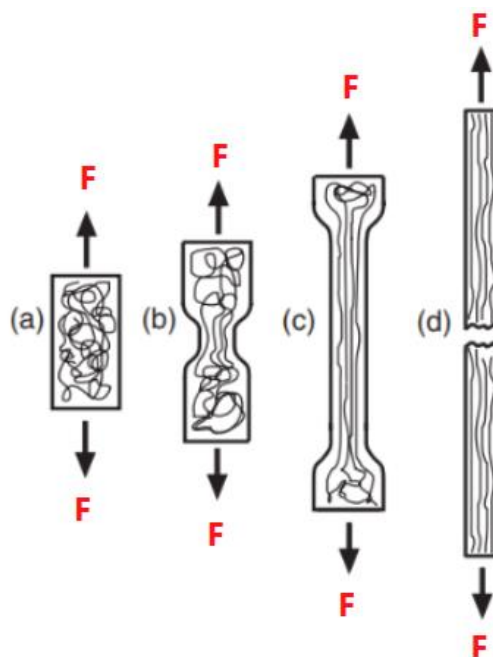
Em suma, nota-se que o comportamento gráfico obtido para o PETG quando submetido a tração está de acordo com os aspectos essenciais que caracterizam os polímeros dúcteis. Além disso, é notório que para o PETG, sua curva de tensão versus deformação se enquadra nas características básicas de comportamento quando avaliadas a influência de temperatura e taxa de deformação. O ensaio foi realizado em sala climatizada em temperatura entre 22 °C e 25°C, assim como uma taxa de deformação 2 mm/min.

#### 4.2.1 Análise da fratura

A fratura em polímeros dúcteis é um processo complexo que envolve a propagação de trincas, mas vai além disso. Essa fratura ocorre em várias etapas, começando com o escoamento das moléculas poliméricas quando atingem níveis de deformações irreversíveis. Nesse estágio, a tensão registrada reflete a resistência do material a deformações permanentes.

A Figura 54, mostra que à medida que o escoamento começa, as moléculas se alinham na direção da força aplicada e, quando atingem um alto grau de alinhamento, o processo de ruptura propriamente dito se inicia. Geralmente, o estágio de deformação irreversível ocorre simultaneamente ao fenômeno de empescoamento em testes de tração (Canevarolo Jr, 2006).

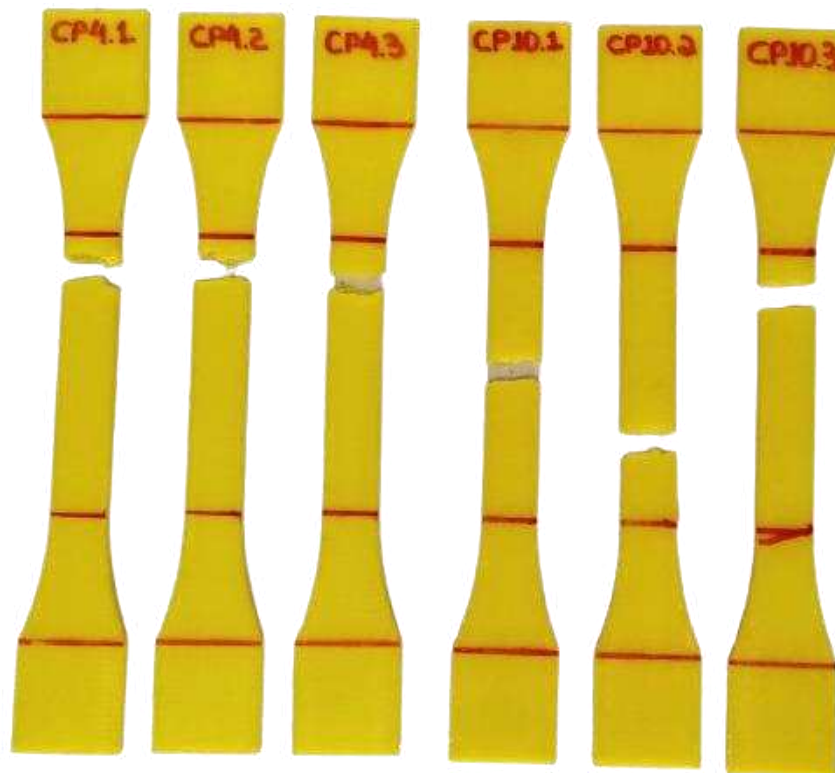
Figura 54 – Estágios característicos presente durante a deformação nos polímeros



Fonte: Campos (2022, com adaptações).

Assim sendo, ao avaliar a fratura das 48 amostras estudadas é possível observar que ocorre variações em relação ao ponto de falha dentro da região útil (delimitada entre as linhas vermelhas internas). Com efeito, para uma mesma combinação, o modelo de falha pode ocorrer tanto no mesmo ponto (CP 04) quanto variar ao longo da região estudada (CP 10). A Figura 55 ilustra os aspectos de perfil de fratura para o PETG sob ensaio de resistência à tração.

Figura 55 – Perfis de fratura para o PETG



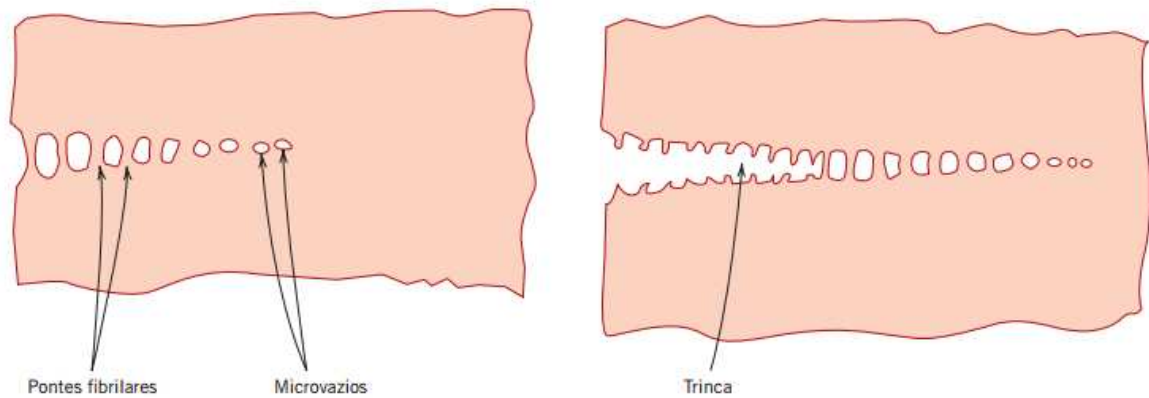
Fonte: Elaborado pelo autor.

A *fibrilação ou fissuramento (crazing)* é um fenômeno frequentemente observado como um precursor da fratura em alguns polímeros termoplásticos. Durante a fibrilação, ocorrem deformações plásticas localizadas, resultando na formação de microvazios interligados. Esses microvazios são conectados por pontes fibrilares, onde as cadeias moleculares se orientam. Sob uma carga de tração suficiente, essas pontes se alongam e se rompem, promovendo o crescimento e coalescimento dos microvazios.

À medida que os microvazios se unem, surgem trincas. No entanto, ao contrário das trincas, as fibrilações têm a capacidade de suportar cargas ao longo de sua extensão. Além disso, o processo de crescimento da fibrilação antes da formação das trincas absorve energia de fratura, aumentando efetivamente a tenacidade à fratura do polímero (Callister Jr; Rethwisch,

2016). Diante do exposto, a Figura 56 exhibe uma sucinta diferença entre pontes fibrilares, microvazios e trincas.

Figura 56 – Desenho esquemático entre pontes fibrilares, microvazios e trincas



Fonte: Callister Jr e Rethwisch (2016).

Outro fator perceptível durante a análise das amostras é que quanto maior foi o nível de preenchimento, mais estável internamente foi o perfil da fissura; ou seja, apresentou um perfil “liso”. Além disso, a falha na direção perpendicular na direção de propagação da força foi o perfil de maior predominância. Tal fato, justifica-se devido a elevada influência da orientação de impressão, sobretudo dos ângulos de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $(0^\circ, 90^\circ)$ , assim como dos padrões de preenchimento. Com efeito, esses fatores exercem impacto na distribuição e concentração de tensão (Lee; Huang, 2013).

Entretanto, a orientação de  $(-45^\circ, 45^\circ)$  presente na amostra CP 2.3 de 25% de preenchimento apresenta um perfil de falha diagonal, assim como a não uniformidade da fissura, visto que é possível observar as fibras do material após a ruptura. Tal fato se deve, principalmente, pela direção angular em que os filamentos estão dispostos dentro do corpo de prova, assim como o padrão de preenchimento no tipo “triangular”. Já o CP 15.3 de 100% de preenchimento e de orientação  $0^\circ, 90^\circ$  detém uma fratura perpendicular e um perfil interno “liso”.

Dessa maneira a Figura 57 expõe as duas principais direções da fratura (diagonal e perpendicular) para as combinações 02 e 15, respectivamente. Já a Figura 58 ilustra a região interna tanto de CP 02 quanto de CP 15.

Figura 57 – Direção de falha diagonal e perpendicular para o PETG



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58 – Regiões internas dos CPs após a ruptura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em suma, nesta seção foi possível avaliar os aspectos essenciais que compõem a fratura do material PETG, corroborando com as principais características presentes nos polímeros quando estes estão submetidos à tração. Além dos atributos mencionados, as características estruturais do polímero, como cristalinidade, presença de grupos polares, massa

molar, copolimerização, ligações cruzadas, entre outros, podem alterar drasticamente o seu comportamento mecânico.

#### 4.2.2 Limite de resistência à tração (LRT)

O ensaio de resistência à tração foi realizado em 48 CPs e, para cada um deles, foi gerado um arquivo de texto com os dados de tempo (s), variação de comprimento ( $\Delta L$ ) e força (N). Nesse sentido, utilizando os resultados da tabela de análise dimensional, sobretudo, da área ( $\text{mm}^2$ ) para cada corpo de prova, através do Microsoft Excel foram calculadas as devidas tensões máximas, ou seja, o limite de resistência à tração em MPa para cada combinação, assim como suas respectivas médias e tolerâncias. Diante disso, a Tabela 16 fornece os resultados de LRT para as 16 combinações estudadas.

Tabela 16 – Limites de resistência à tração médios para cada combinação (CP)

Combinação - CP	Nível (%)	Padrão	Altura (mm)	Orientação (°)	Limite de resistência à tração (MPa)
CP 01	25	Grade	0,16	0°	16 ± 0,9
CP 02	25	Triangular	0,20	(-45,45°)	18 ± 0,3
CP 03	25	Giróide	0,24	90°	19 ± 1,2
CP 04	25	Linhas	0,28	(0°,90°)	22 ± 0,2
CP 05	50	Grade	0,20	90°	23 ± 0,4
CP 06	50	Triangular	0,16	(0°,90°)	17 ± 1,2
CP 07	50	Giróide	0,28	0°	25 ± 0,5
CP 08	50	Linhas	0,24	(-45,45°)	22 ± 0,4
CP 09	75	Grade	0,24	(0°,90°)	25 ± 1,7
CP 10	75	Triangular	0,28	90°	25 ± 0,2
CP 11	75	Giróide	0,16	(-45,45°)	27 ± 1,7
CP 12	75	Linhas	0,20	0°	36 ± 1,0
CP 13	100	Grade	0,28	(-45,45°)	31 ± 2,2
CP 14	100	Triangular	0,24	0°	27 ± 2,3
CP 15	100	Giróide	0,20	(0°,90°)	41 ± 1,6
CP 16	100	Linhas	0,16	90°	42 ± 3,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dado o exposto, nota-se que a combinação CP 16 que possui nível de preenchimento de 100%, padrão de preenchimento do tipo “linhas”, altura de camada de 0,16 mm e orientação de impressão de 90° foi a que apresentou o maior limite de resistência à tração médio, ou seja, de 42 MPa. Por outro lado, a combinação CP 01 que possui nível de



preenchimento de 25%, padrão de preenchimento do tipo “grade”, altura de camada de 0,16 mm e orientação de impressão de 0° foi a que apresentou o menor limite de resistência à tração médio, ou seja, de 16 MPa.

A tabela de resposta para as médias, Tabela 17, apresenta os valores médios das respostas (no caso, a resistência à tração) para cada combinação dos níveis dos fatores. Cada célula da tabela contém a média das observações obtidas para aquela combinação específica dos níveis dos fatores. Essa tabela é útil para identificar quais combinações dos fatores resultam em maiores ou menores valores médios da resposta. Ela fornece informações sobre o efeito dos diferentes níveis dos fatores na média da resistência à tração. No entanto, essa tabela não leva em consideração a variabilidade dos dados.

Tabela 17 – Resposta para as médias de cada nível de cada combinação do LRT

Nível	Nível de Preenchimento (%)	Padrão de Preenchimento	Altura de Camada (mm)	Orientação de Impressão (°)
1	19,14	28,49	25,87	24,68
2	22,18	24,18	<u>29,75</u>	26,84
3	28,59	<u>30,68</u>	23,69	26,48
4	<u>35,61</u>	22,17	26,20	<u>27,52</u>
Delta	16,46	8,51	6,06	2,84
Posto	1	2	3	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, para ponderar esses efeitos, as medidas de delta e posto são avaliadas. Elas se referem às medidas de importância relativa dos fatores estudados. O delta, que é a diferença entre o maior e menor valor, indica a magnitude do efeito de cada fator individual na resposta da resistência. Quanto maior o valor de delta, maior é a influência do fator na resposta. Já o posto indica a ordem de importância dos fatores, em relação ao efeito que exercem na resposta. O fator com o posto mais alto é considerado o mais significativo em termos de impacto na média da resistência à tração.

Dito isso, podemos identificar pela Tabela 17 que o fator de controle "nível de preenchimento" é o que possui a maior influência sobre a média da resistência à tração do PETG, enquanto o fator de "orientação de impressão" apresenta a menor influência. Assim, com base nos resultados do posto, observamos que a ordem de impacto significativo em relação à

média do LRT é a seguinte: nível de preenchimento, padrão de preenchimento, altura de camada e orientação de impressão.

Seguindo adiante, a tabela de resposta para as razões sinal-ruído, Tabela 18, apresenta as razões s/n para cada combinação dos níveis dos fatores, com o objetivo de determinar os fatores que maximizam o limite de resistência à tração do material PETG. Essa tabela é particularmente relevante quando a função "maior é melhor" é utilizada, pois a razão sinal-ruído representa a relação entre o sinal (a resposta desejada, no caso, a resistência à tração) e o ruído (a variabilidade indesejada) do processo. Portanto, quanto maior a razão sinal-ruído, mais desejável é a resposta, indicando uma resistência à tração mais elevada e com menor variação em relação ao objetivo do experimento. Essa tabela se concentra na otimização da propriedade desejada, considerando tanto a média quanto a variabilidade.

A tabela de resposta para as razões sinal-ruído auxilia na identificação das combinações ideais dos níveis dos fatores, permitindo a seleção daqueles que resultam em uma resistência à tração máxima para o material PETG. Além de fornecer informações sobre a influência dos fatores na resposta, essa tabela é especialmente útil para orientar a tomada de decisões e o aprimoramento dos parâmetros de produção com o intuito de otimizar a resistência à tração do PETG.

Tabela 18 – Resposta para as razões s/n do LRT

Maior é melhor

Nível	Nível de Preenchimento (%)	Padrão de Preenchimento	Altura de Camada (mm)	Orientação de Impressão (°)
1	25,59	28,77	27,61	27,67
2	26,84	27,44	<u>29,01</u>	28,13
3	29,03	<u>29,38</u>	27,42	28,13
4	<u>30,88</u>	26,75	28,30	<u>28,41</u>
Delta	5,29	2,63	1,59	0,73
Posto	1	2	3	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dado o exposto, pode-se observar pela Tabela 18, através dos resultados de delta e posto, que o fator de controle "nível de preenchimento" apresentou a maior relação sinal-ruído. Isso indica que esse parâmetro produz os melhores resultados em relação à resistência do PETG.

De igual modo, o segundo fator mais influente é o padrão de preenchimento, seguido da altura de camada e da orientação de impressão.

Comparando os resultados do posto da tabela de resposta S/N com os da tabela das médias, verifica-se que não há alternância entre as posições. Ou seja, o fator que apresenta uma maior média em relação ao LRT é também o mais influente na maximização da resistência à tração.

Dessa forma, nota-se que a combinação ideal dos níveis dos fatores para obter uma resistência à tração máxima no material PETG é a seguinte: nível 4 para o fator "nível de preenchimento", nível 3 para o fator "padrão de preenchimento", nível 2 para o fator "altura de camada" e nível 4 para o fator "orientação de impressão".

Dando prosseguimento nas etapas de interpretação de resultados para um experimento de Taguchi, de acordo com o *Software* Estatístico Minitab, após identificar o melhor nível para cada fator de controle a partir das tabelas de resposta, é imprescindível determinar quais deles exercem efeitos estatisticamente significativos sobre o LRT. Nesse aspecto, visando avaliar esses efeitos, é utilizado a tabela de Análise de Variância (ANOVA) para razões S/N.

Tabela 19 – ANOVA para as razões s/n do LRT

Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Nível de Preenchimento (%)	3	66,030	66,030	22,0098	51,97	<u>0,004</u>
Padrão de Preenchimento	3	17,286	17,286	5,7620	13,61	<u>0,030</u>
Altura de Camada (mm)	3	6,267	6,267	2,0889	4,93	0,111
Orientação de Impressão (°)	3	1,114	1,114	0,3714	0,88	0,542
Erro de Resíduos	3	1,270	1,270	0,4235		
Total	15	91,967				

Fonte: Elaborado pelo autor.

De fato, comparar o valor-p do termo com o nível de significância estabelecido é uma das ferramentas mais usadas para determinar se um resultado é ou não estatisticamente significativo. O valor-p é uma medida que indica a probabilidade de obter um efeito igual ou mais extremo do que o observado, considerando a hipótese nula de que não há associação entre o termo e a resposta.

A hipótese nula assume que o coeficiente do termo é igual a zero, o que significa que não há associação entre o termo e a resposta. Ao comparar o valor-p com o nível de significância (normalmente fixado em 0,05 ou 5%), podemos avaliar se devemos rejeitar ou



não a hipótese nula. Se o valor-p for menor que o nível de significância, concluímos que existe uma associação estatisticamente significativa entre o termo e a resposta. Por outro lado, se o valor-p for maior que o nível de significância, não temos evidências estatísticas suficientes para afirmar que existe uma associação real.

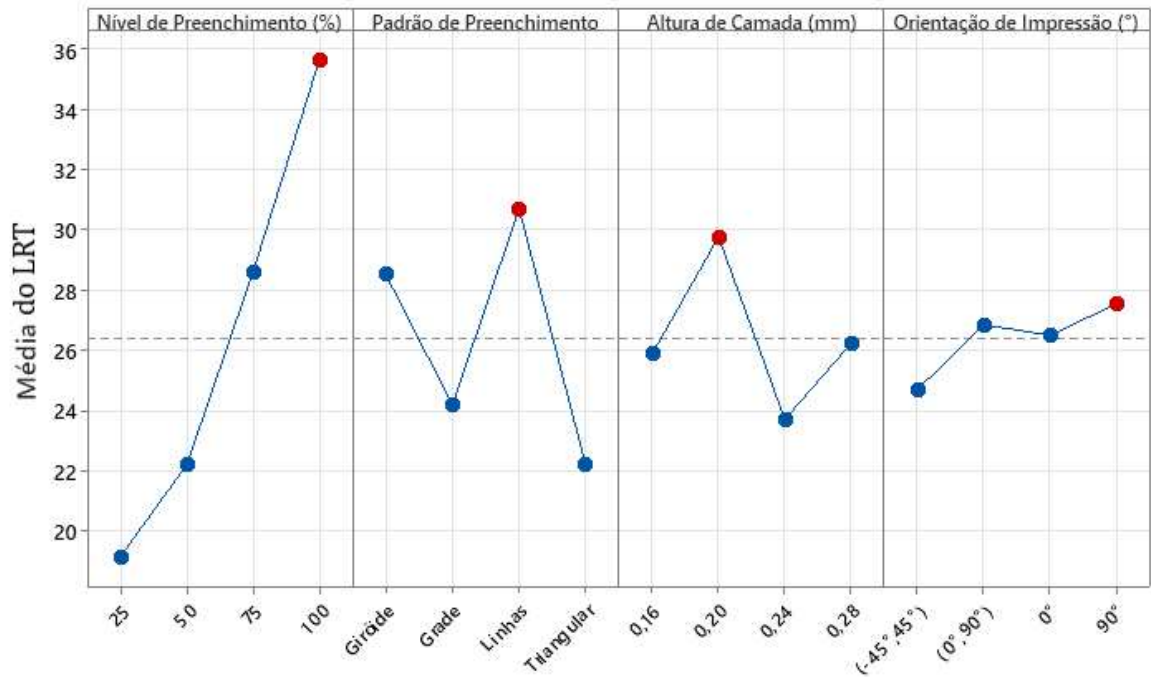
Em vista disso, ao se analisar a Tabela 19 é possível interpretar os valores de p obtidos para cada nível dos fatores estudados. Assim, nota-se que somente o nível de preenchimento ( $p = 0,004$ ) e o padrão de preenchimento ( $p = 0,030$ ) obtiveram um valor de p menor que nível de significância normalmente estabelecido, ou seja,  $p \leq 0,05$ . Logo, podemos concluir que há uma associação estatisticamente significativa entre o nível de preenchimento e o padrão de preenchimento em relação a resistência à tração do material PETG.

A altura de camada apresentou um valor de  $p = 0,111$ , enquanto que a orientação de impressão obteve um valor de  $p = 0,542$ . Dessa forma, isso sugere que não há evidências estatísticas suficientes para afirmar uma associação significativa entre a altura de camada e a orientação de impressão em relação à resistência à tração do PETG.

Em suma, ser "estatisticamente significativo" significa que os resultados obtidos são estatisticamente robustos e fornecem evidências confiáveis para afirmar a presença de uma associação, diferença ou efeito entre as variáveis em análise, que não pode ser atribuído ao acaso ou à variabilidade aleatória.

Por fim, também é essencial o exame dos gráficos de efeitos principais tanto para as médias quanto para as razões S/N em relação ao LRT, tal que ambos são as representações dos resultados das tabelas de resposta no plano. O Gráfico 4 representa a média das medidas obtidas para cada nível dos fatores estudados no experimento. É um gráfico que apresenta a tendência central dos resultados em função dos fatores estudados. Com ele, é possível verificar se existe uma variação significativa nas médias para cada nível dos fatores.

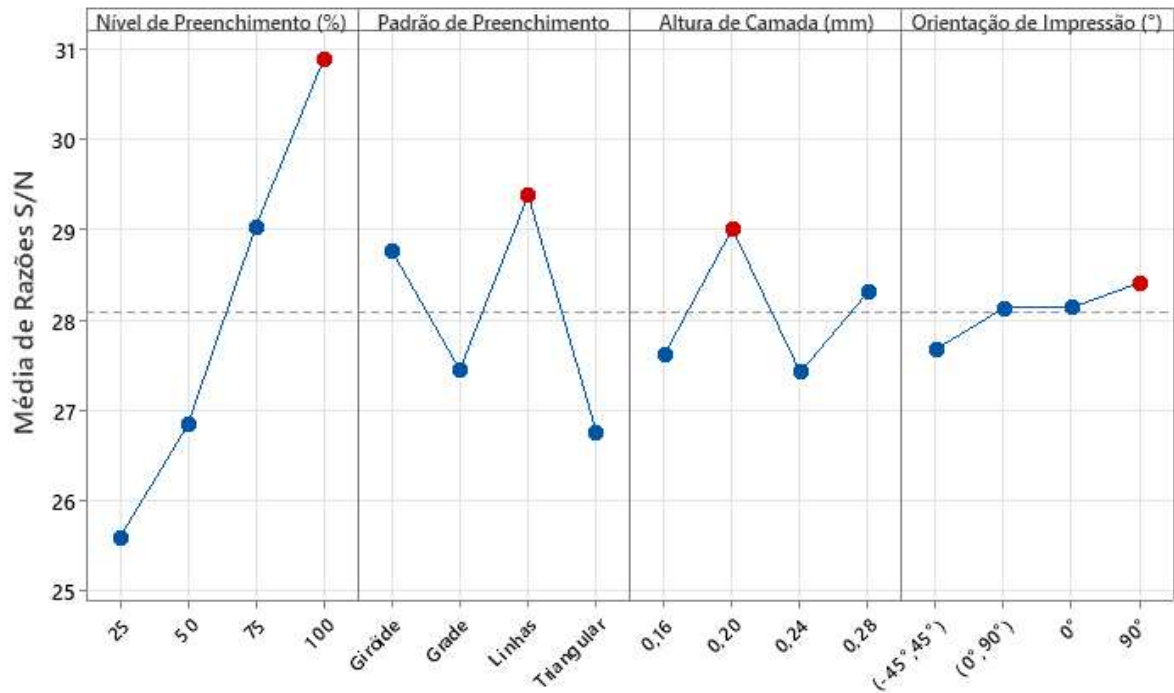
Gráfico 4 – Efeitos principais para médias do LRT



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o Gráfico 5 representa a relação sinal-ruído (S/N) em função dos fatores estudados no experimento. É um gráfico que avalia o desempenho do processo em relação à razão sinal-ruído. Com ele, é possível identificar qual é o nível ideal dos fatores estudados para maximizar a relação sinal-ruído e, conseqüentemente, obter um desempenho melhor do processo.

Gráfico 5 – Efeitos principais para razões s/n do LRT



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Minitab 2023: “Um efeito principal existe quando diferentes níveis de um fator afetam a característica de forma diferente”. As médias representadas nos gráficos pelos pontos são as mesmas que aquelas indicadas nas tabelas de resposta. Em vista disso, uma linha liga os pontos para cada fator e, ao comparar as inclinações das linhas em relação a horizontal, é possível aferir a magnitude relativa dos efeitos de fatores.

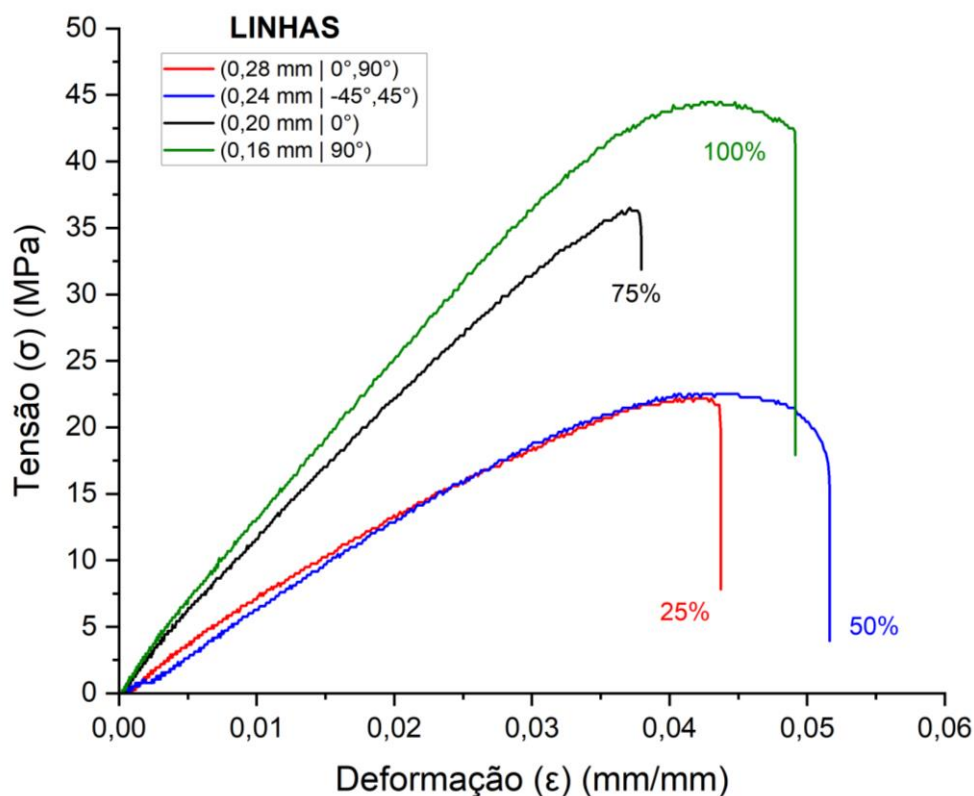
Para ambos os gráficos de efeitos, é aparente uma maior magnitude nas respostas tanto para as médias quanto para as razões S/N quando o nível de preenchimento aumenta a partir de 50%, assim como um decaimento de maior magnitude quando há uma mudança do padrão tipo “linhas” para o padrão “triangular”. Também é perceptível o decaimento de maior magnitude quando a altura de camada vai de 0,20 mm para 0,24 mm. Por outro lado, é visível que na orientação de impressão os pontos destoam pouco em relação a horizontal, o que implica que ele tem pouca influência no LRT quando comparado aos outros fatores de controle, dessa maneira confirmando ser o quarto fator mais preponderante (posto 4).

Em vista disso, para ambos os gráficos e corroborando com as informações fornecidas de delta e posto, verifica-se que o nível de preenchimento é o fator de controle que possui uma maior inclinação em relação à horizontal, seguido do padrão de preenchimento, altura de camada e, por fim, a orientação de impressão.

Para evidenciar ainda mais esse efeito do nível de preenchimento no LRT, a Figura 59 exhibe as curvas de tensão *versus* deformação para os quatro diferentes tipos de níveis

estudados, de acordo com as amostras CP 4, CP 8, CP 12 e CP 16 que possuem o padrão de preenchimento “linhas” (segundo padrão mais influente). Com isso, é possível corroborar que quanto maior foi o percentual de preenchimento, maior a tensão obtida.

Figura 59 – Gráfico tensão *versus* deformação para diferentes níveis do PETG



Fonte: Elaborado pelo autor.

Então, para maximizar a resistência a tração do PETG deve-se fabricar a(s) peça(s) com os níveis mais influentes de cada fator de controle. Dessa forma, identificados pelos pontos de pico no Gráfico 5, assim como referenciados os valores nas tabelas de resposta, nota-se que a combinação que otimiza o LRT é, respectivamente: nível de preenchimento de 100% (nível 4), padrão de preenchimento do tipo “linhas” (nível 3), altura de camada de 0,20 mm (nível 2) e orientação de impressão de 90° (nível 4).

### 4.2.3 Alongamento na ruptura

A Tabela 20 exibe os resultados médios, em termos percentuais, de cada combinação para o alongamento até a ruptura.

Tabela 20 – Alongamento na ruptura médio para cada combinação (CP)

Combinação - CP	Nível (%)	Padrão	Altura (mm)	Orientação (°)	Alongamento na ruptura (%)
<b>CP 01</b>	25	Grade	0,16	0°	3,5 ± 0,2
<b>CP 02</b>	25	Triangular	0,20	(-45,45°)	3,8 ± 0,3
<b>CP 03</b>	25	Giróide	0,24	90°	4,2 ± 0,3
<b>CP 04</b>	25	Linhas	0,28	(0°,90°)	4,4 ± 0,1
<b>CP 05</b>	50	Grade	0,20	90°	3,8 ± 0,2
<b>CP 06</b>	50	Triangular	0,16	(0°,90°)	3,3 ± 0,2
<b>CP 07</b>	50	Giróide	0,28	0°	4,2 ± 0,1
<b>CP 08</b>	50	Linhas	0,24	(-45,45°)	5,2 ± 1,4
<b>CP 09</b>	75	Grade	0,24	(0°,90°)	3,7 ± 0,1
<b>CP 10</b>	75	Triangular	0,28	90°	3,6 ± 0,2
<b>CP 11</b>	75	Giróide	0,16	(-45,45°)	3,9 ± 0,2
<b>CP 12</b>	75	Linhas	0,20	0°	3,8 ± 0,3
<b>CP 13</b>	100	Grade	0,28	(-45,45°)	4,0 ± 0,7
<b>CP 14</b>	100	Triangular	0,24	0°	3,1 ± 0,3
<b>CP 15</b>	100	Giróide	0,20	(0°,90°)	4,7 ± 0,4
<b>CP 16</b>	100	Linhas	0,16	90°	4,3 ± 0,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a tabela é possível notar que os percentuais ficaram em torno de 3% e 4% de alongamento. Nota-se que a combinação CP 08 que possui nível de preenchimento de 50%, padrão de preenchimento do tipo “linhas”, altura de camada de 0,24 mm e orientação de impressão de -45°,45° foi a que apresentou o maior alongamento médio até a ruptura, ou seja, de 5,16%.

Por outro lado, a combinação CP 14 que possui nível de preenchimento de 100%, padrão de preenchimento do tipo “triangular”, altura de camada de 0,24 mm e orientação de impressão de 0° foi a que apresentou o menor alongamento médio até a ruptura, ou seja, de 3,15%.

Através da Tabela 21 é possível identificar quais combinações dos fatores resultam em maiores ou menores valores médios da resposta. Ela fornece informações sobre o efeito dos diferentes níveis dos fatores na média da extensão na ruptura.

Tabela 21 – Resposta para as médias de cada nível de combinação do alongamento

Nível	Nível de Preenchimento (%)	Padrão de Preenchimento	Altura de Camada (mm)	Orientação de Impressão (°)
1	3,973	4,260	3,737	<u>4,210</u>
2	<u>4,127</u>	3,737	4,013	4,022
3	3,735	<u>4,425</u>	<u>4,047</u>	3,663
4	4,035	3,448	4,072	3,975
Delta	0,392	0,977	0,335	0,547
Posto	3	1	4	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base no exposto, podemos reconhecer pela Tabela 21 por meio dos resultados de delta e posto que o fator de controle "padrão de preenchimento" é o que possui a maior influência sobre a medida média do alongamento na ruptura do PETG, enquanto o fator de "altura de camada" apresenta a menor influência. Ademais, quando comparados os postos dos fatores de controle em relação aos do LRT, constata-se que não há repetição perante a ordem de influência dos fatores.

Assim, com base nos resultados do posto, observamos que a ordem de impacto significativo em relação à média do alongamento é a seguinte: padrão de preenchimento, orientação de impressão, nível de preenchimento e altura de camada.

Com o auxílio da tabela de resposta para as razões sinal-ruído, Tabela 22, é possível averiguar quais são as combinações ideais dos níveis dos fatores que permitem selecionar aqueles que resultam em uma deformação máxima para o material PETG.

Tabela 22 – Resposta para as razões s/n do alongamento

Maior é melhor

Nível	Nível de Preenchimento (%)	Padrão de Preenchimento	Altura de Camada (mm)	Orientação de Impressão (°)
1	11,94	12,57	11,41	<u>12,42</u>
2	<u>12,20</u>	11,44	12,03	12,00
3	11,44	<u>12,87</u>	12,00	11,22
4	12,03	10,73	<u>12,17</u>	11,96
Delta	0,76	2,14	<u>0,76</u>	1,19
Posto	4	1	3	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar pela Tabela 22, através dos resultados de delta, que o fator de controle "padrão de preenchimento" apresentou a maior relação sinal-ruído. Isso indica que esse parâmetro produz os melhores resultados em relação alongamento do PETG. Em seguida, no que diz respeito à otimização do alongamento do PETG, a orientação de impressão é o segundo fator mais influente, seguido da altura de camada e do nível de preenchimento.

Comparando com a Tabela 21 das médias, é perceptível uma alternância de posto entre o nível de preenchimento e a altura de camada. Em outras palavras, embora o nível de preenchimento tenha apresentado uma média maior das observações em relação à altura de camada, os resultados da razão sinal-ruído indicam que a altura de camada exerce maior influência no alongamento. Portanto, em termos de otimização, a altura de camada é o terceiro fator mais impactante a ser considerado.

Além disso, comparando com as respostas obtidas para o LRT, nota-se que a ordem de importância dos fatores de controle não se repete para três dos quatro fatores apresentados em relação ao efeito que exercem na influência sobre o alongamento, tal que somente a altura de camada permanece no posto 3 como terceiro fator mais preponderante na razão sinal-ruído, tanto para o LRT quanto para o alongamento (%).

Dessa forma, observando os postos, nota-se que a combinação ideal dos níveis dos fatores para obter um alongamento máximo na ruptura no material PETG é a seguinte: nível 3 para o fator "padrão de preenchimento", nível 1 para o fator "orientação de impressão", nível 4 para o fator "altura de camada" e nível 2 para o fator "nível de preenchimento".



Em continuidade, é necessário o exame da Tabela 23 de ANOVA para as razões S/N para verificar se os resultados são ou não significativos estatisticamente.

Tabela 23 – ANOVA para razões s/n do alongamento

Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Nível de Preenchimento (%)	3	1,266	1,266	0,4220	0,79	0,574
Padrão de Preenchimento	3	11,862	11,862	3,9540	7,41	0,067
Altura de Camada (mm)	3	1,375	1,375	0,4584	0,86	0,548
Orientação de Impressão (°)	3	2,957	2,957	0,9856	1,85	0,314
Erro de Resíduos	3	1,601	1,601	0,5338		
Total	15	19,061				

Fonte: Elaborado pelo autor.

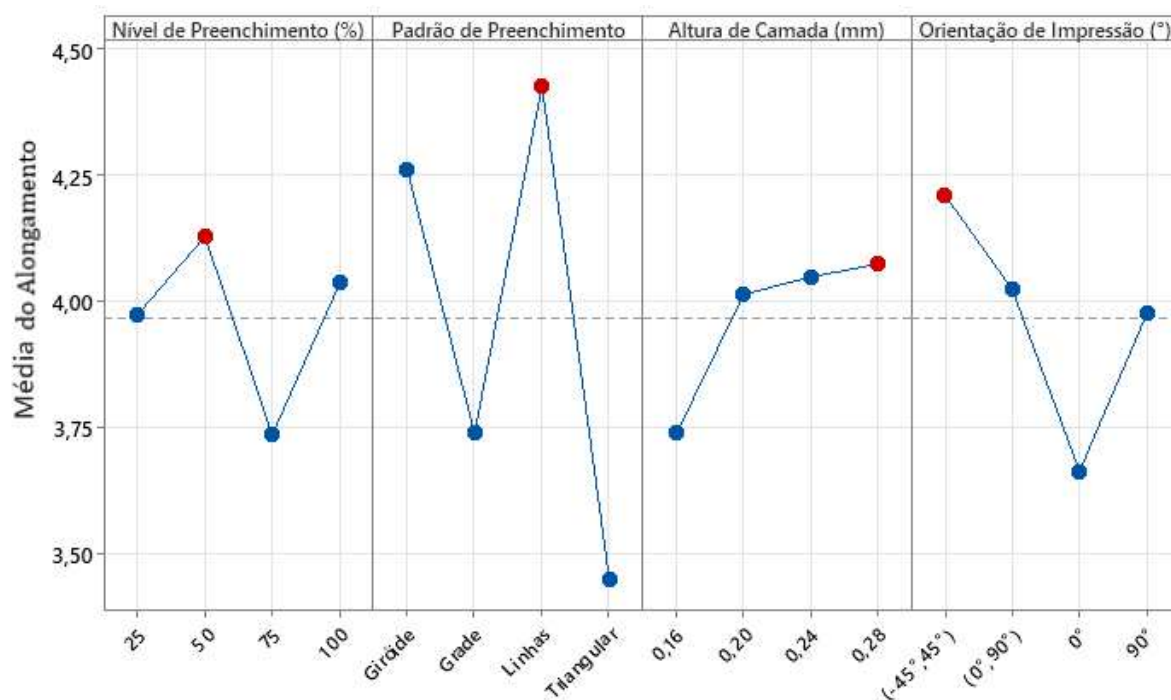
Com isso, observando os resultados do valor-p diante de cada fator de controle, é notável que todos eles são superiores ao valor de referência de 0,05. Assim, isso sugere que não há evidências estatísticas suficientes para afirmar uma associação significativa entre os fatores de controle estudados e o alongamento na ruptura do PETG.

Em suma, algumas soluções para o fato apresentado seriam ajustar os níveis dos fatores estudados, ampliar o tamanho da amostra e realizar ensaios em condições diferentes, considerando variações ambientais ou diferentes processos de fabricação. Dessa maneira, permitiriam uma investigação mais abrangente e detalhada dos fatores que podem influenciar o alongamento na ruptura do PETG, proporcionando o aumento da confiabilidade dos resultados e a obtenção de conclusões mais robustas.

Em última análise, o Gráfico 6 e o Gráfico 7 representam os efeitos principais para as médias e para as razões S/N, respectivamente. Logo, é através deles que é possível aferir a combinação ótima que maximiza o alongamento na ruptura para o PETG.

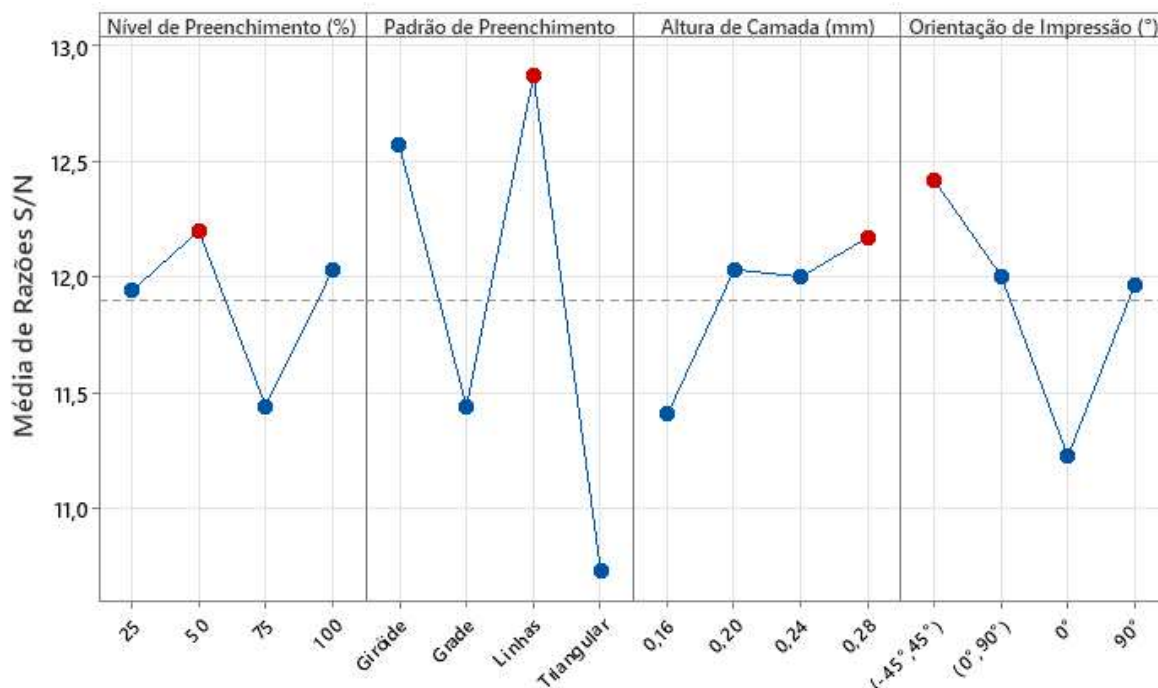


Gráfico 6 – Efeitos principais para as médias do alongamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7 – Efeitos principais para as razões s/n do alongamento



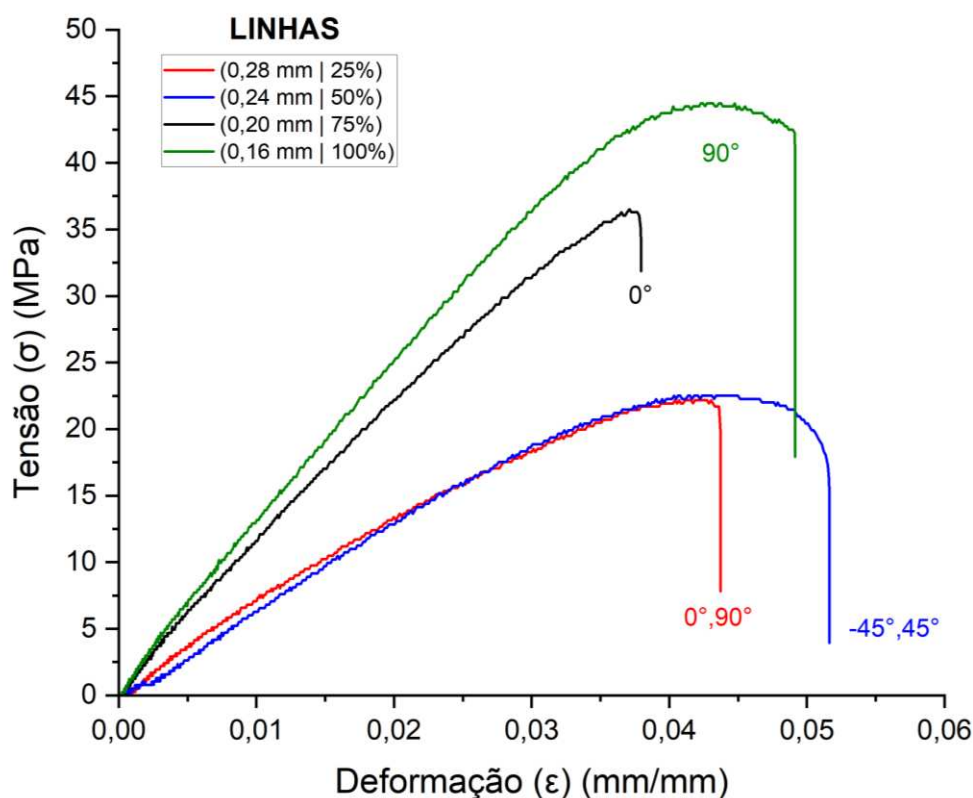
Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se para ambos os gráficos de efeitos que as maiores inclinações em relação a horizontal são referentes ao padrão de preenchimento e a orientação de impressão, respectivamente. É aparente uma maior magnitude nas respostas tanto para as médias quanto

para as razões S/N quando o nível de preenchimento muda de 50% para 75% e depois para 100%. É notório, também, uma maior mudança na magnitude quando há uma alteração do padrão tipo “linhas” para o padrão “triangular”. Em relação à altura de camada, o maior impacto na resposta é quando a altura de camada altera de 0,16 mm para 0,20. Por último, também é perceptível uma maior mudança quando a orientação de impressão modifica de 0°,90° somente para 0°.

Para ilustrar ainda mais o efeito sobre o alongamento até a ruptura, a Figura 60 exhibe as curvas de tensão *versus* deformação para o padrão de preenchimento (linhas) que, como constatado, é o fator de maior impacto sobre essa propriedade. Com isso, também é possível observar a influência da orientação de impressão sobre o alongamento, tal que como evidenciado no Gráfico 7, a orientação de (-45°,45°) é a significativa perante a resposta. A linha expõe o resultado para CP 8 que, por sua vez, foi a combinação que apresentou o resultado médio máximo para o alongamento.

Figura 60 – Gráfico tensão *versus* deformação para o padrão linhas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, para maximizar o alongamento na ruptura do PETG deve-se fabricar a(s) peça(s) com os níveis mais influentes de cada fator de controle (gráfico da razão S/N). Dessa

forma, identificados pelos pontos de pico no Gráfico 7, assim como referenciados os valores nas tabelas de resposta, nota-se que a combinação que otimiza o alongamento até a ruptura é, respectivamente: padrão de preenchimento tipo linhas (nível 3), orientação de impressão de  $-45^{\circ}, 45^{\circ}$  (nível 1), altura de camada de 0,28 mm (nível 4) e nível de preenchimento de 50% (nível 2).

### 4.3 Tempo de impressão

A Tabela 24 exhibe os resultados médios, em minutos, de cada combinação em relação ao tempo de impressão para um conjunto de três corpos de prova.

Tabela 24 – Tempo de médio de impressão para cada conjunto de combinação (CP)

<b>Combinação - CP</b>	<b>Nível (%)</b>	<b>Padrão</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Orientação (°)</b>	<b>Tempo (min)</b>
<b>CP 01</b>	25	Grade	0,16	0°	131,5
<b>CP 02</b>	25	Triangular	0,20	(-45,45°)	120,2
<b>CP 03</b>	25	Giróide	0,24	90°	110,5
<b>CP 04</b>	25	Linhas	0,28	(0°,90°)	103,5
<b>CP 05</b>	50	Grade	0,20	90°	144,4
<b>CP 06</b>	50	Triangular	0,16	(0°,90°)	163,5
<b>CP 07</b>	50	Giróide	0,28	0°	133,2
<b>CP 08</b>	50	Linhas	0,24	(-45,45°)	125,6
<b>CP 09</b>	75	Grade	0,24	(0°,90°)	144,4
<b>CP 10</b>	75	Triangular	0,28	90°	135,1
<b>CP 11</b>	75	Giróide	0,16	(-45,45°)	247,4
<b>CP 12</b>	75	Linhas	0,20	0°	162,3
<b>CP 13</b>	100	Grade	0,28	(-45,45°)	148,6
<b>CP 14</b>	100	Triangular	0,24	0°	155,1
<b>CP 15</b>	100	Giróide	0,20	(0°,90°)	251,5
<b>CP 16</b>	100	Linhas	0,16	90°	229,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a tabela é possível notar que o tempo médio ficou acima de 100 minutos para 13 dos 16 CPs, tal que somente as combinações CP 11, CP 15 e CP 16 ultrapassaram a marca de 200 minutos. Nota-se que a combinação CP 15 que possui nível de preenchimento de 100%, padrão de preenchimento do tipo “giróide”, altura de camada de 0,20 mm e orientação de impressão de  $0^{\circ}, 90^{\circ}$  foi a que apresentou o maior tempo médio de impressão, ou seja, de 251,51 minutos.

Por outro lado, a combinação CP 04 que possui nível de preenchimento de 25%, padrão de preenchimento do tipo “linhas”, altura de camada de 0,28 mm e orientação de impressão de 0°,90° foi a que apresentou o menor tempo médio de impressão, ou seja, de 103,49 minutos.

Em continuidade, a Tabela 25 fornece informações sobre o efeito dos diferentes níveis dos fatores na média do tempo de impressão.

Tabela 25 – Resposta para as médias de cada nível de combinação referentes ao tempo

Nível	Nível de Preenchimento (%)	Padrão de Preenchimento	Altura de Camada (mm)	Orientação de Impressão (°)
1	116,4	142,2	<u>192,9</u>	145,5
2	141,7	143,5	169,6	160,4
3	172,3	<u>185,7</u>	133,9	154,8
4	<u>196,1</u>	155,2	130,1	<u>165,7</u>
Delta	<u>79,7</u>	43,4	62,8	<u>20,2</u>
Posto	1	3	2	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base no exposto, podemos reconhecer pela Tabela 25 por meio dos resultados de delta e posto que o fator de controle "nível de preenchimento" é o que possui a maior influência sobre a medida média do tempo de impressão do PETG, enquanto o fator de "orientação de impressão" apresenta a menor influência.

Ademais, com base nos resultados do posto, observamos que a ordem de impacto significativo em relação à média do tempo é a seguinte: nível de preenchimento, altura de camada, padrão de preenchimento e, por último, a orientação de impressão.

Paralelamente, com o auxílio da tabela de resposta para as razões sinal-ruído, Tabela 26, é possível averiguar quais são as combinações dos níveis dos fatores que exercem a maior influência perante o tempo de impressão.

Tabela 26 – Resposta para as razões s/n eferentes ao tempo

Maior é melhor

Nível	Nível de Preenchimento (%)	Padrão de Preenchiemento	Altura de Camada (mm)	Orientação de Impressão (°)
1	41,28	43,05	<u>45,43</u>	43,22
2	42,98	43,07	44,25	43,72
3	44,47	<u>44,81</u>	42,46	43,47
4	<u>45,62</u>	43,42	42,21	<u>43,94</u>
Delta	4,33	1,76	3,22	0,72
Posto	1	3	2	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar pela Tabela 27, através dos resultados de delta, que o fator de controle "nível de preenchimento" apresentou a maior relação sinal-ruído. Isso indica que esse parâmetro produz os maiores resultados em relação ao tempo de impressão para CPs fabricados em PETG. Em seguida, a altura de camada é o segundo fator mais influente, seguido do padrão de preenchimento e da orientação de impressão.

Comparando os resultados do posto da tabela de resposta S/N com os da tabela das médias, verifica-se que não há alternância entre as posições. Ou seja, o fator que apresenta uma maior média em relação ao tempo é também o mais influente na maximização do tempo de impressão.

Dessa forma, como a função S/N trabalhada é a "maior é melhor" para todas as propriedades analisadas, observando os postos, nota-se que a combinação ideal dos níveis dos fatores que torna a impressão 3D material PETG a mais demorada possível é a seguinte: nível 4 para o fator "nível de preenchimento", nível 1 para o fator "altura de camada", nível 2 para o fator "padrão de preenchimento" e nível 4 para o fator "orientação de impressão".

Em contrapartida, a combinação ideal que minimiza o tempo de impressão, ou seja, imprime os CPs de forma mais rápida é a seguinte: nível 1 para o fator "nível de preenchimento", nível 4 para o fator "altura de camada", nível 1 para o fator "padrão de preenchimento" e nível 1 para o fator "orientação de impressão".

Para verificar se os resultados são ou não significativos estatisticamente, a Tabela 27 de ANOVA para as razões S/N é utilizada.

Tabela 27 – ANOVA para razões s/n referentes ao tempo

Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Nível de Preenchimento (%)	3	42,2915	42,2915	14,0972	47,59	<u>0,005</u>
Padrão de Preenchimento	3	8,2906	8,2906	2,7635	9,33	<u>0,050</u>
Altura de Camada (mm)	3	27,9884	27,9884	9,3295	31,49	<u>0,009</u>
Orientação de Impressão (°)	3	1,1610	1,1610	0,3870	1,31	0,416
Erro de Resíduos	3	0,8887	0,8887	0,2962		
Total	15	80,6202				

Fonte: Elaborado pelo autor.

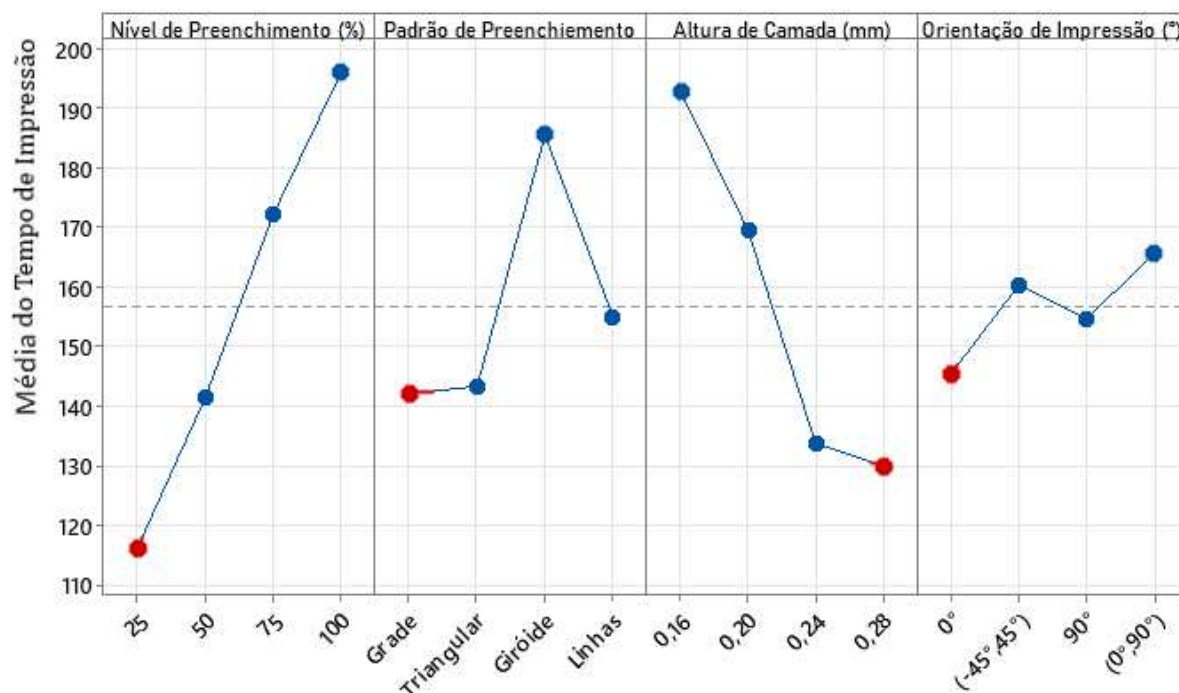
Em vista disso, ao se analisar a Tabela 27 é possível interpretar os valores de p obtidos para cada nível dos fatores estudados. Assim, nota-se que o nível de preenchimento ( $p = 0,005$ ), a altura de camada ( $p = 0,009$ ) e padrão de preenchimento ( $p = 0,050$ ) obtiveram um valor de p menor ou igual que nível de significância normalmente estabelecido, ou seja,  $p \leq 0,05$ . Logo, podemos concluir que há uma associação estatisticamente significativa entre o nível de preenchimento, altura de camada e o padrão de preenchimento em relação ao tempo de fabricação dos corpos de prova em PETG.

A orientação de impressão apresentou um valor de  $p = 0,416$ . Dessa forma, isso sugere que não existem evidências estatísticas suficientes para afirmar uma associação significativa entre a orientação de impressão e o tempo de impressão.

Em última análise, o Gráfico 8 e o Gráfico 9 representam os efeitos principais em relação ao tempo de fabricação para as médias e para as razões S/N, respectivamente. Com isso, é através deles que é possível aferir de forma mais específica as combinações que tornam o tempo de impressão mais longo e, também mais curto.

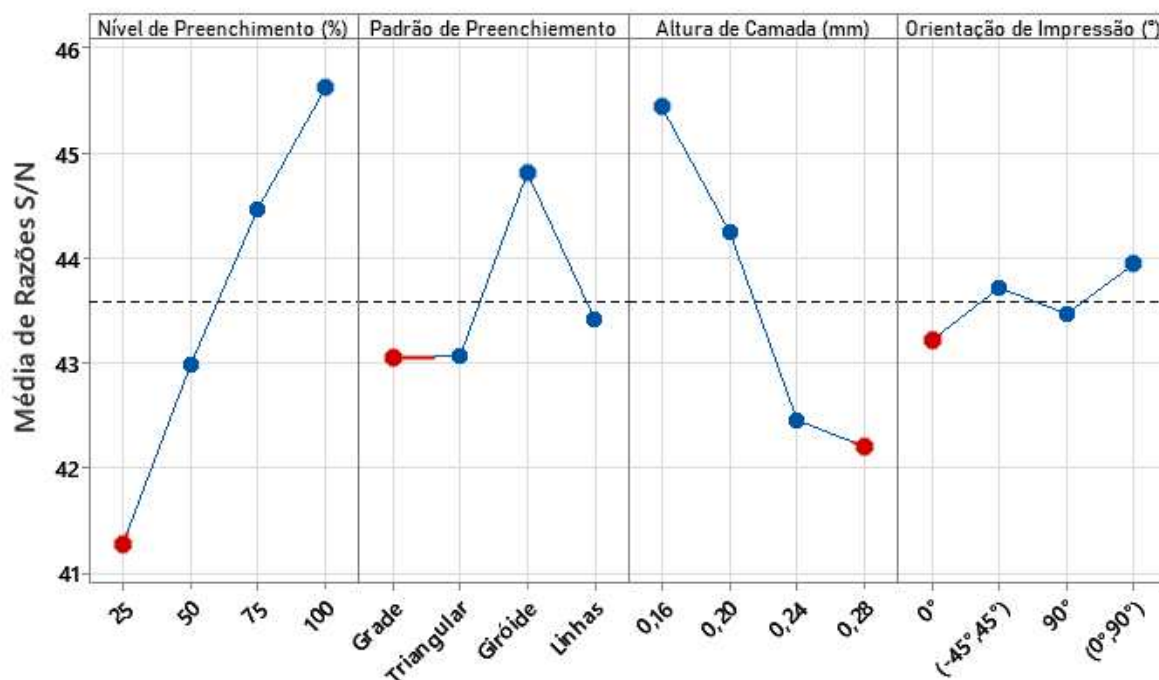


Gráfico 8 – Efeitos principais para as médias referentes ao tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9 – Efeitos principais para as médias de razões s/n ao tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se para ambos os gráficos de efeitos que as maiores inclinações em relação a horizontal são referentes ao nível de preenchimento e a altura de camada, seguidos do padrão de preenchimento e da orientação de impressão. É aparente uma maior magnitude nas respostas

tanto para as médias quanto para as razões S/N à medida que o nível de preenchimento aumenta, tal que a maior diferença de delta ocorre na mudança de percentual 50% para 75%. É notório, também, que o tempo é mais impactado quando há uma alteração do padrão de preenchimento do tipo “triangular” para o padrão “giróide”. Em relação à altura de camada, vemos que à medida que a altura de camada aumenta, o seu impacto no tempo de impressão diminui. Por último, a orientação de impressão é que apresenta menor influência sobre o tempo, contudo é perceptível que a maior magnitude de delta ocorre quando a orientação de impressão modifica de  $0^\circ$  para  $-45^\circ, 45^\circ$ .

Logo, com os níveis mais influentes de cada fator de controle (gráfico da razão S/N), identificados pelos pontos de pico no Gráfico 9, assim como referenciados os valores nas tabelas de resposta, nota-se que a combinação que torna o tempo mais prolongado é, respectivamente: nível de preenchimento de 100% (nível 4), altura de camada de 0,16 mm (nível 1), padrão de preenchimento do tipo “giróide” (nível 2) e orientação de impressão de  $0^\circ, 90^\circ$  (nível 4).

Da mesma forma, a combinação ideal que minimiza o tempo de impressão, ou seja, imprime os CPs de forma mais rápida é a seguinte: nível de preenchimento de 25% (nível 1), altura de camada de 0,28 mm (nível 4), padrão de preenchimento do tipo “grade” (nível 1) e orientação de impressão de  $0^\circ$  (nível 1).



#### 4.4 Massas das Amostras

A Tabela 28 manifesta os resultados médios, em gramas, da quantidade de massa de filamento necessária para fabricar um conjunto de CPs para cada combinação.

Tabela 28 – Médias das massas para cada conjunto de cada combinação (CP)

Combinação - CP	Nível (%)	Padrão	Altura (mm)	Orientação (°)	Massa (g)
<b>CP 01</b>	25	Grade	0,16	0°	19,3 ± 0,9
<b>CP 02</b>	25	Triangular	0,20	(-45,45°)	19,4 ± 0,1
<b>CP 03</b>	25	Giróide	0,24	90°	19,8 ± 0,1
<b>CP 04</b>	25	Linhas	0,28	(0°,90°)	21,0 ± 0,2
<b>CP 05</b>	50	Grade	0,20	90°	23,9 ± 0,1
<b>CP 06</b>	50	Triangular	0,16	(0°,90°)	24,0 ± 0,3
<b>CP 07</b>	50	Giróide	0,28	0°	26,2 ± 0,1
<b>CP 08</b>	50	Linhas	0,24	(-45,45°)	24,4 ± 0,1
<b>CP 09</b>	75	Grade	0,24	(0°,90°)	27,7 ± 0,1
<b>CP 10</b>	75	Triangular	0,28	90°	29,8 ± 0,1
<b>CP 11</b>	75	Giróide	0,16	(-45,45°)	29,7 ± 1,0
<b>CP 12</b>	75	Linhas	0,20	0°	29,6 ± 0,2
<b>CP 13</b>	100	Grade	0,28	(-45,45°)	32,7 ± 1,1
<b>CP 14</b>	100	Triangular	0,24	0°	30,1 ± 0,8
<b>CP 15</b>	100	Giróide	0,20	(0°,90°)	35,1 ± 0,7
<b>CP 16</b>	100	Linhas	0,16	90°	35,8 ± 0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a tabela é possível notar que a combinação CP 16 que possui nível de preenchimento de 100%, padrão de preenchimento do tipo “linhas”, altura de camada de 0,16 mm e orientação de impressão de 90° foi a que apresentou a maior massa para fabricar o conjunto, ou seja, de 35,77 gramas.

Por outro lado, a combinação CP 01 que possui nível de preenchimento de 25%, padrão de preenchimento do tipo “grade”, altura de camada de 0,16 mm e orientação de impressão de 0° foi a que apresentou a menor massa para fabricar o conjunto, ou seja, de 19,39 gramas.

Em continuidade, a Tabela 29 fornece informações sobre o efeito dos diferentes níveis dos fatores na média das massas das amostras.

Tabela 29 – Resposta para as médias de cada nível de combinação referentes a massa

Nível	Nível de Preenchimento (%)	Padrão de Preenchimento	Altura de Camada (mm)	Orientação de Impressão (°)
1	19,92	25,94	27,23	26,32
2	24,61	25,82	27,02	26,58
3	29,25	<u>27,72</u>	25,51	<u>27,33</u>
4	<u>33,40</u>	27,71	<u>27,43</u>	26,96
Delta	13,49	1,89	1,92	1,01
Posto	1	3	2	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base no exposto, podemos reconhecer pela Tabela 29 por meio dos resultados de delta e posto que o fator de controle "nível de preenchimento" é o que possui a maior influência sobre a medida média para a massa, enquanto o fator de "orientação de impressão" apresenta a menor influência.

Com efeito, com base nos resultados do posto, observamos que a ordem de impacto significativo em relação à média em gramas para se fabricar as respectivas combinações é a seguinte: nível de preenchimento, altura de camada, padrão de preenchimento e, por último, a orientação de impressão.

Então, comparando com os resultados do tempo de impressão percebe-se que os postos dos respectivos fatores não se alteram, ou seja, os mesmos fatores que influenciam na resposta média no tempo são os mesmos que afetam a quantidade de filamento que é depositado para fabricar os corpos de prova.

Paralelamente, com o auxílio da tabela de resposta para as razões sinal-ruído, Tabela 30, é possível averiguar quais são as combinações dos níveis dos fatores que exercem a maior influência perante a massa de cada conjunto.

Tabela 30 – Resposta para as razões s/n referentes a massa

Maior é melhor

Nível	Nível de Preenchimento (%)	Padrão de Preenchiemento	Altura de Camada (mm)	Orientação de Impressão (°)
1	25,98	28,12	28,48	28,28
2	27,82	28,10	28,42	28,32
3	29,32	28,67	28,03	<u>28,52</u>
4	<u>30,46</u>	<u>28,68</u>	<u>28,65</u>	28,46
Delta	4,48	0,57	0,62	0,24
Posto	1	3	2	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar pela Tabela 30, através dos resultados de delta, que o fator de controle "nível de preenchimento" apresentou a maior relação sinal-ruído. Isso indica que esse parâmetro produz os maiores resultados em relação a quantidade de filamento PETG que é necessário na fabricação. Em seguida, a altura de camada é o segundo fator mais influente, seguido do padrão de preenchimento e da orientação de impressão.

Comparando os resultados do posto da tabela de resposta S/N com os da tabela das médias, verifica-se que não há alternância entre as posições. Assim, constata-se que a combinação ideal dos níveis dos fatores que torna a impressão 3D material PETG a mais pesada possível é a seguinte: nível 4 para o fator "nível de preenchimento", nível 4 para o fator "altura de camada", nível 4 para o fator "padrão de preenchimento" e nível 3 para o fator "orientação de impressão".

Em contrapartida, a combinação ideal que minimiza as massas, ou seja, deposita menos filamento, tornando os CPs mais leve é a seguinte: nível 1 para o fator "nível de preenchimento", nível 3 para o fator "altura de camada", nível 2 para o fator "padrão de preenchimento" e nível 1 para o fator "orientação de impressão".

Para verificar se os resultados são ou não significativos estatisticamente, a Tabela 31 de ANOVA para as razões S/N é utilizada.

Tabela 31 – ANOVA para as razões s/n referentes a massa

Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Nível de Preenchimento (%)	3	45,0632	45,0632	15,0211	267,85	<u>0,000</u>
Padrão de Preenchimento	3	1,2672	1,2672	0,4224	7,53	0,066
Altura de Camada (mm)	3	0,8207	0,8207	0,2736	4,88	0,113
Orientação de Impressão (°)	3	0,1531	0,1531	0,0510	0,91	0,530
Erro de Resíduos	3	0,1682	0,1682	0,0561		
Total	15	47,4724				

Fonte: Elaborado pelo autor.

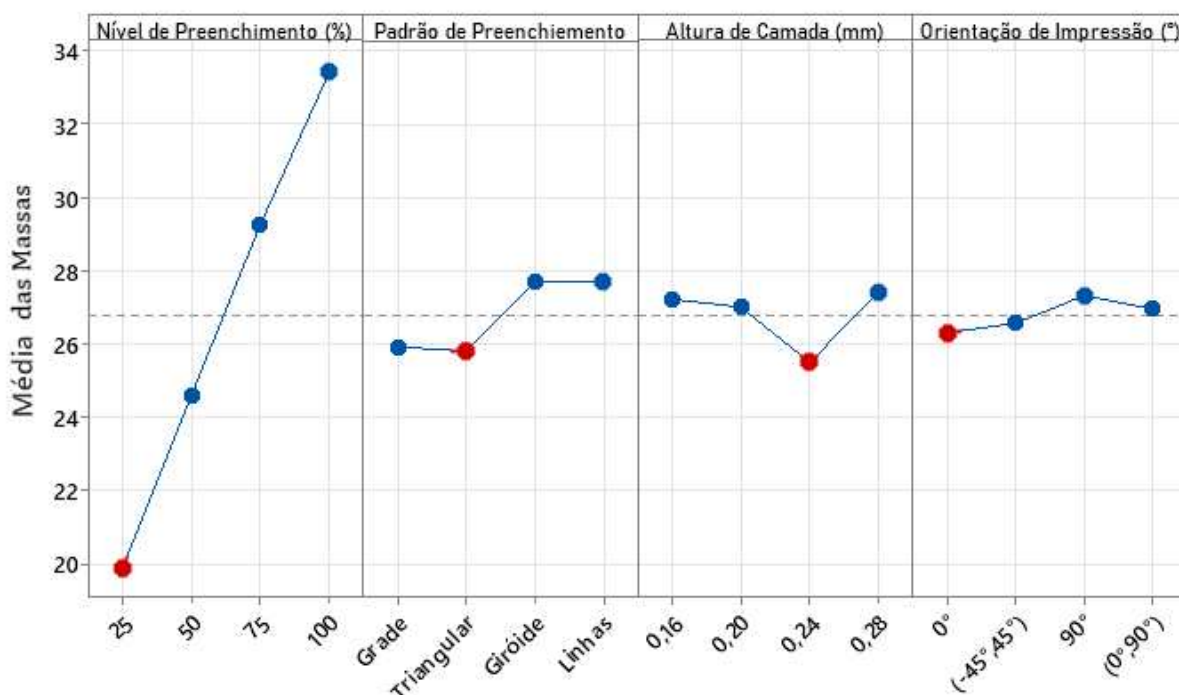
Em vista disso, ao se analisar a Tabela 31 é possível interpretar os valores de p obtidos para cada nível dos fatores estudados. Assim, nota-se que o nível de preenchimento ( $p = 0,000$ ) obteve um valor de p menor ou igual que nível de significância normalmente estabelecido, ou seja,  $p \leq 0,05$ . Logo, podemos concluir que há uma associação estatisticamente significativa entre o nível de preenchimento em relação a massa de dos corpos de prova em PETG.

Já o padrão de preenchimento, altura de camada e orientação de impressão apresentaram um valor de  $p \geq 0,05$ . Dessa forma, isso sugere que não existem evidências estatísticas suficientes para afirmar uma associação significativa entre esses fatores de controle e a massa.

Nesse sentido, para proporcionar o aumento da confiabilidade dos resultados e a obtenção de conclusões mais robustas, algumas das principais alternativas seriam ajustar os níveis dos fatores estudados, ampliar o tamanho da amostra, assim como realizar ensaios em condições diferentes.

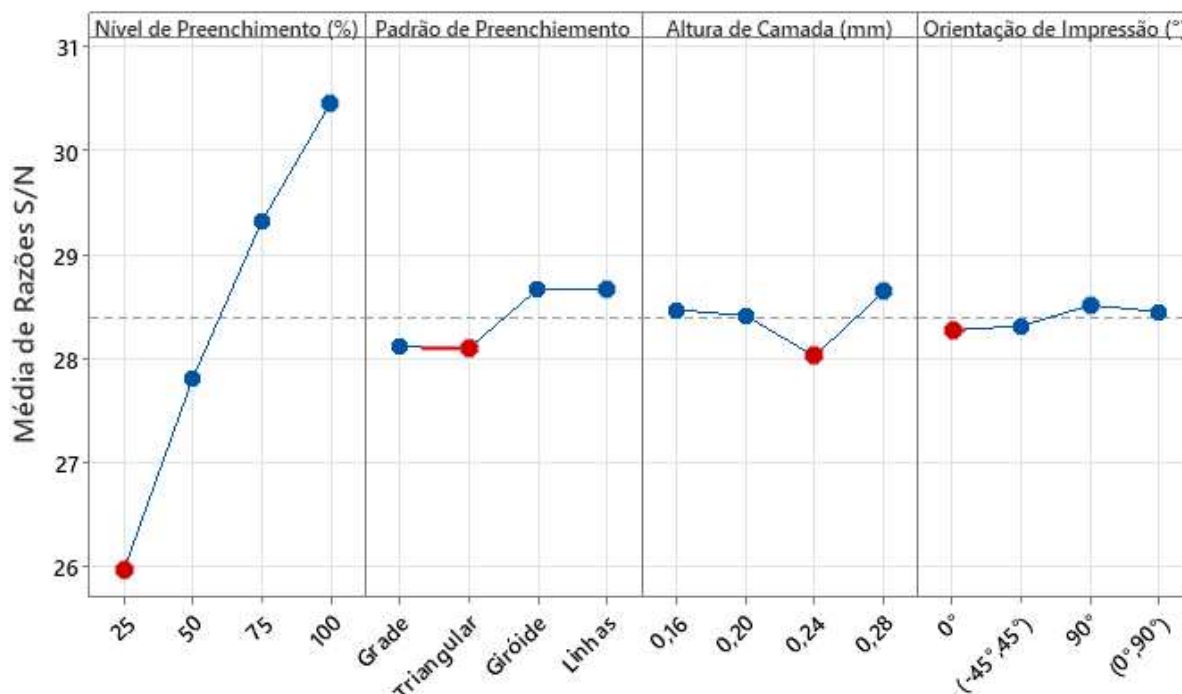
Em última análise, o Gráfico 10 e o Gráfico 11 representam os efeitos principais para as médias e para as razões S/N, respectivamente. Com isso, é através deles que é possível aferir de forma mais específica as combinações que tornam o CP mais pesado e, também mais leve.

Gráfico 10 – Efeitos principais para as médias referentes a massa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 – Efeitos principais para as razões s/n referentes a massa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se para ambos os gráficos de efeitos que as maiores inclinações em relação a horizontal são referentes ao nível de preenchimento e a altura de camada, seguidos do padrão de preenchimento e da orientação de impressão. É aparente uma maior magnitude nas respostas

tanto para as médias quanto para as razões S/N à medida que o nível de preenchimento aumenta, tal que a maior diferença de delta ocorre na mudança de percentual 25% para 50%. É notório, também, que a massa é mais impactada quando há uma alteração do padrão de preenchimento do tipo “triangular” para o padrão “giróide”. Em relação à altura de camada, vemos que o maior efeito ocorre na mudança de 0,24 mm para 0,28 mm. Por último, a orientação de impressão é que apresenta menor influência sobre a massa, contudo é perceptível que a maior magnitude de delta ocorre quando a orientação de impressão modifica de  $-45^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  para  $90^{\circ}$ .

Logo, com os níveis mais influentes de cada fator de controle (gráfico da razão S/N), identificados pelos pontos de pico no Gráfico 11, assim como referenciados os valores nas tabelas de resposta, nota-se que a combinação que torna a fabricação do CP mais pesado é, respectivamente: nível de preenchimento de 100% (nível 4), altura de camada de 0,28 mm (nível 4), padrão de preenchimento do tipo “linhas” (nível 3) e orientação de impressão de  $90^{\circ}$  (nível 3).

Da mesma forma, a combinação ideal que minimiza a massa, ou seja, imprime os CPs de forma mais leve é a seguinte: nível de preenchimento de 25% (nível 1), altura de camada de 0,24 mm (nível 3), padrão de preenchimento do tipo “linhas” (nível 4) e orientação de impressão de  $0^{\circ}$  (nível 1).

## 4.5 Discussão

No intuito de facilitar a visualização dos resultados obtidos, a Tabela 32 condensa os respectivos resultados.

Tabela 32 – Resumo dos resultados sob cada propriedade

	<b>LRT</b>	<b>ALONGAMENTO</b>	<b>TEMPO</b>	<b>MASSA</b>
<b>CP<sub>máx</sub></b>	CP 16	CP 08	CP 15	CP 16
<b>CP<sub>mín</sub></b>	CP 01	CP 14	CP 04	CP 01
<b>Posto na Média</b>	Nível	Padrão	Nível	Nível
	Padrão	Orientação	Altura	Altura
	Altura	Nível	Padrão	Padrão
	Orientação	Altura	Orientação	Orientação
<b>Posto na Razão S/N</b>	Nível	Padrão	Nível	Nível
	Padrão	Orientação	Altura	Altura
	Altura	Altura	Padrão	Padrão
	Orientação	Nível	Orientação	Orientação
<b>Combinação Ótima</b>	100%	50%	25%	25%
	Linhas	Linhas	Grade	Triangular
	0,20 mm	0,28 mm	0,28 mm	0,24 mm
	90°	-45°,45°	0°	0°

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dado o exposto, é possível notar que para três das quatro propriedades analisadas, o fator de controle de nível de preenchimento foi o mais significativo, respectivamente para o LRT, tempo e massa. Srinivasan *et al.* (2020b) avaliaram os parâmetros de nível de preenchimento e rugosidade após o PETG também ser submetido ao ensaio de resistência à tração. Dessa forma, os autores constataram que quanto maior o nível de preenchimento maior a resistência a tração do PETG, além de diminuir a rugosidade de superfície.

Segundo Srinivasan, a razão para isso é que os espaços de ar são muito pequenos e o material é densamente compactado no caso de 100% de densidade de preenchimento. Componentes com menos espaços de ar têm mais densidade, mas consomem mais tempo para serem fabricados e, conseqüentemente, se tornam mais pesados.

Durgashyam *et al.* (2019), além de investigar a influência do nível de preenchimento, também estudou o efeito da altura de camada e taxa de extrusão. Dessa forma, o autor constatou que para uma melhor resistência à tração do material, a taxa de extrusão e a altura de camada devem ser mínimas, assim como o nível de preenchimento deve ter o percentual alto.

Ademais, Valvez, Silva e Reis (2022) também justifica que espessuras de camada menores promovem propriedades mecânicas mais altas devido a menores folgas intercamadas e, conseqüentemente, menos poros de ar na seção transversal.

A Tabela 32 nos mostra que o padrão de preenchimento do tipo linhas foi o mais influente para o LRT, alongamento e massa. Panneerselvam, Raghuraman e Vamsi Krishnan (2021) e Srinivasan *et al.* (2020a) também analisaram a influência de padrões de preenchimento nas propriedades mecânicas do PETG quando ele é submetido à tração.

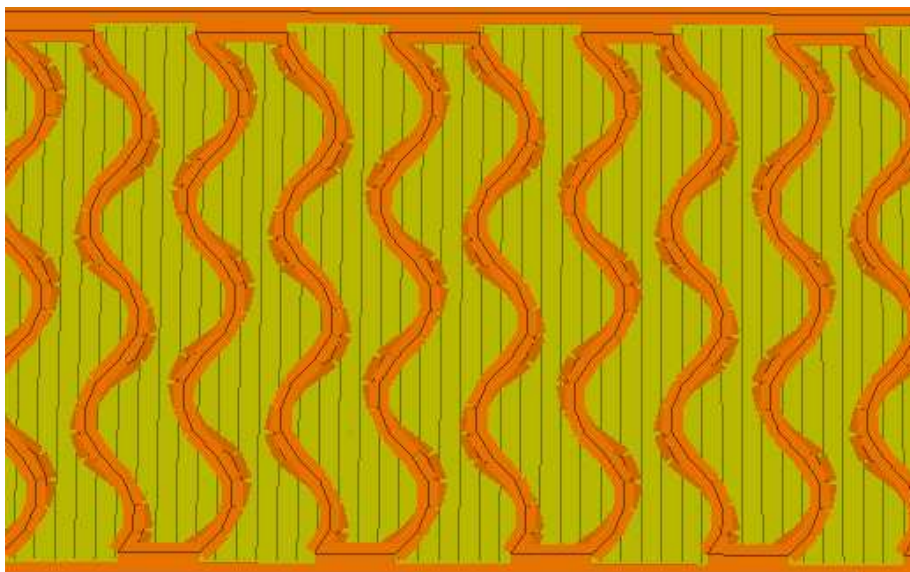
Segundo os autores, o padrão linhas, devido as camadas serem dispostas em uma única direção, resulta em uma orientação mais uniforme das moléculas do material e, conseqüentemente, uma melhor distribuição das forças ao longo das camadas.

As linhas servem como rotas de transferência de carga, dissipando as tensões e reduzindo os pontos de concentração de estresse. Isso resulta em uma maior capacidade de deformação antes da ruptura e, portanto, um maior alongamento na ruptura. Ademais, outro ponto importante nesse padrão é que há uma maior interação e adesão entre as camadas adjacentes.

Já o padrão de preenchimento do tipo “giróide”, Figura 61, foi o mais influente em relação ao tempo de impressão. Tal fato se justifica devido o bico de impressão seguir um caminho mais complexo e sinuoso, fazendo movimentos de zigue-zague. Isso resulta em um trajeto mais longo para preencher uma determinada área em comparação com outros padrões mais simples, como linhas retas, grade ou triangular. Conseqüentemente, o tempo de impressão é aumentado, pois são necessários mais movimentos e deslocamentos para completar a impressão.



Figura 61 – Padrão de preenchimento do tipo giróide



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, a orientação de impressão é o segundo fator mais influente em relação ao alongamento na ruptura, mas é o último em relação ao LRT, tempo e massa. Sepahi *et al.* (2021) estudou diferentes orientações tanto para PETG, ABS e PLA. O autor, por meio de análise de um microscópio eletrônico, constatou que a adesão entre camadas era a principal causa das mudanças entre as propriedades mecânicas para diferentes ângulos. Lee e Huang (2013), acrescentam que as orientações de impressão influenciam diretamente as concentrações de tensões ao longo da peça.

Nota-se que, para o LRT, a orientação perpendicular de  $90^\circ$  juntamente com as outras devidas combinações, mostra ser o nível ideal para se obter a melhor resistência. Agarwal *et al.* (2020) também encontrou essa orientação como a ideal para maximizar a resistência do PLA.

Em relação ao alongamento na ruptura, a orientação de  $(-45^\circ, 45^\circ)$  mostrou ser a ideal. A orientação de impressão em ângulos opostos  $(-45^\circ, 45^\circ)$  cria um padrão em forma de “xadrez” nas linhas de preenchimento. Essa disposição diagonal ajuda a distribuir as tensões de forma mais uniforme ao longo da peça, permitindo uma maior deformação e alongamento antes da ruptura.

Em suma, de Assis *et al.* (2019), conclui que escolher bem o material, assim como sua respectiva orientação de deposição durante a impressão 3D revelou ser uma abordagem relevante para a fabricação de peças, sobretudo quando se deseja boa funcionalidade e desempenho do produto.

## 5 CONCLUSÃO

A análise dos parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PETG utilizando o método de Taguchi foi o foco central deste estudo na impressão FDM. Este trabalho teve como objetivo geral investigar a influência do nível de preenchimento, padrão de preenchimento, altura de camada e orientação de impressão nos corpos de prova fabricados com PETG, submetidos ao ensaio de resistência à tração.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram a significativa influência do nível de preenchimento nas propriedades de resistência à tração, tempo de impressão e massa das amostras. A relação direta entre um maior percentual de preenchimento e uma maior resistência do material, embora promissora, também demonstrou um aumento correspondente no tempo de impressão e na massa das peças. Isso ressalta a relevância estatística do nível de preenchimento para essas propriedades, indicando sua importância na fabricação de peças impressas em 3D.

Em relação ao padrão de preenchimento, observou-se que este teve uma influência preponderante no alongamento na ruptura, destacando-se o padrão "linhas" como o mais eficaz para otimizar essas propriedades mecânicas. Esse padrão proporcionou uma distribuição mais uniforme das tensões e deformações no material, resultando em melhorias tanto no alongamento quanto na resistência do material.

A altura de camada demonstrou ser o segundo fator mais influente no tempo de impressão e na massa das amostras. O aumento na altura de camada resultou em um acréscimo na massa da peça, enquanto uma diminuição na altura de camada implicou em um tempo de impressão mais longo devido à necessidade de mais camadas para completar a peça. Este fator mostrou-se crucial para a qualidade superficial das peças, uma vez que alturas menores de camada contribuíram para uma melhor qualidade, mas demandaram mais tempo de impressão.

Por fim, a orientação de impressão demonstrou ser o fator de controle menos influente em três das quatro propriedades estudadas. Apenas no alongamento na ruptura, essa orientação mostrou uma influência significativa, onde as orientações de  $-45^\circ$  e  $45^\circ$  se destacaram para maximizar essa propriedade. Para o limite de resistência à tração, a orientação perpendicular de  $90^\circ$  foi considerada a mais adequada.

Diante desses resultados, a configuração ideal para otimizar as propriedades mecânicas estudadas está associada às condições de projeto e ao desempenho desejado. No entanto, o tempo de impressão e a massa das amostras são diretamente influenciados pela quantidade de material depositado e pela espessura das camadas. Esses achados oferecem *insights* valiosos para aprimorar a fabricação de peças impressas em 3D com base nas

propriedades mecânicas desejadas. Recomenda-se, para estudos futuros, a exploração de outros materiais e a investigação de novos parâmetros de impressão, visando uma compreensão mais abrangente e uma melhoria contínua nos processos de impressão 3D.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar matrizes de Taguchi maiores para ampliar o tamanho da amostra, ajustar os níveis dos fatores estudados e realizar ensaios em condições diferentes, considerando variações ambientais ou diferentes processos de fabricação;
- Realizar a impressão 3D em PETG com as combinações ideais que maximizam as propriedades e verificar se elas condizem com os resultados encontrados;
- Realizar para o PETG sob os mesmos parâmetros e níveis estudados, o efeito para flexão e compressão;
- Analisar a impressão em diferentes modelos de impressora 3D e comparar seus resultados quanto a qualidade superficial e rugosidade;
- Analisar meios de utilização dos dados obtidos para aplicação das propriedades de materiais impressos em simulações de elementos finitos;
- Explorar a influência de outros parâmetros de impressão, como velocidade de impressão, temperatura da mesa de impressão e taxa de resfriamento, nas propriedades mecânicas do PETG;
- Realizar estudos aprofundados sobre a adesão entre filamentos e sua influência nas propriedades mecânicas, investigando métodos de melhoria da interação entre as camadas impressas;
- Investigar a viabilidade da utilização de diferentes técnicas de pós-processamento, como tratamentos térmicos ou tratamentos químicos, para melhorar as propriedades mecânicas do PETG.

## REFERÊNCIAS

3D FILA. **O que é PETG e por que é utilizado na Impressão 3D? - 3D Fila.** Disponível em: <https://3dfila.com.br/blog/o-que-e-petg-e-por-que-e-utilizado-na-impressao-3d/>. Acesso em: 21 jan. 2023.

3D LAB. **4 características do melhor filamento para impressão 3D.** Disponível em: <https://3dlab.com.br/melhor-filamento-para-impressao-3d/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

3D PRINTERLY. **How to 3D Print PETG Filament Like a Pro – Ultimate Guide & FAQ – 3D Printerly.** Disponível em: <https://3dprinterly.com/filament-printing-guide/petg/>. Acesso em: 6 fev. 2023.

ACELERA3D. **Qual Bico Escolher para Minha Impressora 3D? - Acelera3D.** Disponível em: <https://acelera3d.com/qual-bico/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

AGARWAL, P. P. *et al.* Experimental Analysis of Mechanical properties of PETG Material 3D Printed Material by Using Fused Deposition Modelling Technique. **Mechanical and Mechanics Engineering**, v. 6, n. 1, 2020.

ALEX M. **The Types Of FDM 3D Printer.** Disponível em: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#!>. Acesso em: 19 jan. 2023.

ALVES, P. H. T. F. **Influência do padrão e densidade de preenchimento na resistência mecânica de amostras fabricadas em PETG via deposição de material fundido.** Ouro Preto - MG: Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, 2021.

**Análise de Mercado de Manufatura Aditiva e Materiais | Crescimento da indústria 2021 a 2026 – Mordor Intelligence.** Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/global-additive-manufacturing-and-material-market-industry>. Acesso em: 17 jan. 2023.

ANDERSON, C. **Makers: a nova revolução industrial. Tradução de: SERRA, ACC Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.**

ANIWAA. **Revisão da impressora 3D polar polar 3D - impressora 3D.** Disponível em: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/polar-3d-polar-3d-printer>. Acesso em: 19 jan. 2023.

BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gest. Technol. Inov**, v. 01, n. 3, 2017.

BHAVNAGARWALA, H. **The Best ABS Print & Bed Temperature Settings | All3DP.** Disponível em: <https://all3dp.com/2/abs-print-bed-temperature-all-you-need-to-know/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

BIOPDI. **Ensaio de tração | Resistência a tração | Teste de tração.** Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

BRANDT, T. H.; BRANDT, D. F.; SANTOS, S. N. DOS. **Uso do planejamento ortogonal de Taguchi para a melhoria de parâmetros de fresamento com ferramenta de metal**

**duro.** Batatais: [s.n.].

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 9ª ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN - LTC, 2016.

CAMPOS, L. V. D. **Avaliação do efeito do nível e do tipo de preenchimento nas propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por impressão 3D utilizando o material ABS.** Trabalho de Conclusão de Curso—Russas: Universidade Federal do Ceará, 2022.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** Artliber Editora Ltda., 2ª ed, São Paulo, SP, 2006.

CANO-VICENT, A. *et al.* Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. **Additive Manufacturing**, v. 47, 1 nov. 2021.

CARRIER, P. **3D Print Speed: How to find the optimal speed for reliable and constant print quality.** Disponível em: <https://dyzedesign.com/2018/07/3d-print-speed-calculation-find-optimal-speed/>. Acesso em: 2 abr. 2023.

COSTA, R. M. B. **Atualização de uma Impressora 3D FDM tipo Delta.** [s.l.] Universidade do Porto, jul. 2019.

CUNICO, M. W. M. **Impressoras 3D: o novo meio produtivo.** [s.l.] Concep3d Pesquisas Científicas, 2015.

DE ASSIS, C. L. F. *et al.* **Influência do tipo de material polimérico na resistência de peças impressas em 3D.** p. 22–30, jan. 2019.

DE TORO, E. V. *et al.* Analysis of the influence of the variables of the Fused Deposition Modeling (FDM) process on the mechanical properties of a carbon fiber-reinforced polyamide. **Procedia Manufacturing**, v. 41, p. 731–738, 1 jan. 2019.

DURGASHYAM, K. *et al.* **Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method.** 2019.

ELETROGATE. **Impressoras 3D: tipos e funcionamento.** Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/impressoras-3d-como-funcionam-e-quais-os-tipos-existentis/>. Acesso em: 19 jan. 2023a.

ELETROGATE. **Impressoras 3D: tipos e funcionamento - Blog Eletrogate.** Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/impressoras-3d-como-funcionam-e-quais-os-tipos-existentis/>. Acesso em: 5 fev. 2023b.

ENGINEERING PRODUCT DESIGNER. **O que é a Modelagem de Deposição Fundida (FDM) e suas aplicações.** Disponível em: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/fused-deposition-modeling/>. Acesso em: 18 jan. 2023.

ES-SAID, O. S. *et al.* Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. <http://dx.doi.org/10.1080/10426910008912976>, v. 15, n. 1, p. 107–122, 2007.

FILAMENT2PRINT. **Que é o PETG?** Disponível em: [https://filament2print.com/pt/blog/49\\_petg.html](https://filament2print.com/pt/blog/49_petg.html). Acesso em: 21 jan. 2023.

FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1573–1587, 20 nov. 2016.

GARRETO, M. S. OTIMIZAÇÃO DO SABOR DE UMA BEBIDA UTILIZANDO O MÉTODO DE TAGUCHI. **Engenharias: Da genialidade à profissão e seu desenvolvimento** 2, p. 148–160, 18 nov. 2021.

GORDELIER, T. J. *et al.* Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. **Rapid Prototyping Journal**, v. 25, n. 6, p. 953–971, 21 ago. 2019.

HAMOD, H.; ANDERSSON, M. **Suitability of recycled HDPE for 3D printing filament.** 2015.

HANON, M. M.; MARCZIS, R.; ZSIDAI, L. Influence of the 3D printing process settings on tensile strength of PLA and HT-PLA. **Periodica Polytechnica Mechanical Engineering**, v. 65, n. 1, p. 38–46, 2021.

HEIDARI-RARANI, M. *et al.* **Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method.** <https://doi.org/10.1177/0892705720964560>, v. 35, n. 12, p. 2435–2452, 12 out. 2020.

HIEMENZ, J.; STRATASYS, I. **3D PRINTING WITH FDM: How it Works.** [s.d.].

**História das Impressoras 3D | Done 3D.** Disponível em: <https://done3d.com.br/historia-das-impressoras-3d/>. Acesso em: 17 jan. 2023.

HUBS. **O que é a impressão 3D FDM (modelagem de deposição fundida)? | Hubs.** Disponível em: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/#post-processing-for-fdm-3d-printing>. Acesso em: 18 jan. 2023.

KAKABADZE, G. **ANISOTROPIC BEHAVIOUR ANALYSIS OF 3D PRINTED STRUCTURES.** [s.l: s.n.].

KUMAR, M. A.; KHAN, M. S.; MISHRA, S. B. **Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics.** *Materials Today: Proceedings*. Anais...Elsevier Ltd, 1 jan. 2020.

LAOUTID, F. *et al.* Valorization of Recycled Tire Rubber for 3D Printing of ABS- and TPO-Based Composites. **Materials** 2021, Vol. 14, Page 5889, v. 14, n. 19, p. 5889, 8 out. 2021.

LEAPFROG 3D PRINTERS. **3D Printer Filament Types and Uses | Leapfrog 3D Printers.** Disponível em: <https://www.lpfrg.com/guides/3d-printer-filament-types/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

LEE, J.; HUANG, A. Fatigue analysis of FDM materials. **Rapid Prototyping Journal**, v. 19, n. 4, p. 291, 2013.

LIZARDO, B. F. *et al.* Utilização do método de Taguchi para estudo da influência dos parâmetros de fabricação nas propriedades mecânicas de peças em PLA obtidas por manufatura aditiva. **Anais do IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2016.

MAX, C. *et al.* Impressoras 3D: uma mudança na dinâmica do consumo. **Signos do Consumo**, v. 10, n. 1, p. 15–22, 15 jan. 2018.

MINITAB. **Visão geral de Criar experimento Taguchi - Minitab**. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/taguchi/create-taguchi-design/before-you-start/overview/>. Acesso em: 26 jan. 2023.

MOURA, E. C. **DOE e Taguchi: uma comparação**. Disponível em: <https://qualiplus.com.br/doe-e-taguchi-uma-comparacao/>. Acesso em: 9 fev. 2023.

NANCHARAI AH, T.; RANGA RAJU, D.; RAMACHANDRA RAJU, V. **An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components**. 2010.

NEGRINI, M. V. **Quadrados Latinos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)—Cornélio Procópio: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

O'CONNELL, J. **The Best Cura PETG Settings/Profile for Optimal Results | All3DP**. Disponível em: <https://all3dp.com/2/cura-petg-settings-profile/>. Acesso em: 6 fev. 2023a.

O'CONNELL, J. **The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY, & More |** . Disponível em: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scarra-belt-corexy-polar/>. Acesso em: 19 jan. 2023b.

PANNEERSELVAM, T.; RAGHURAMAN, S.; VAMSI KRISHNAN, N. Investigating Mechanical Properties of 3D-Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Material Under Fused Deposition Modeling. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, v. 102, n. 2, p. 375–387, 1 abr. 2021.

PAREDES, R. S. C. **Projeto Robusto**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME714/Projeto%20Robusto.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2022a.

PAREDES, R. S. C. **Metodologia e Planejamento Experimental**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME714/Planejamento%20experimento%20Taguchi.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2022b.

PASHA SHAIK, Y.; SCHUSTER, J.; SHAIK, A. A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes. **Journal** 2021, v. 8, p. 7698, 2021.

PHADKE, S. M. **Quality Engineering Using Robust Design**. Prentice Hall, , 1989.

PITÁGORA, H. C.; DE VASCONCELOS, K. CICLO DE VIDA DE PATENTES: UMA ANÁLISE DO CENÁRIO GLOBAL DA MANUFATURA ADITIVA A PARTIR DE 2009 E 2014. **Cadernos de Prospecção**, v. 11, n. 1, p. 64, 2018.

PITARU, A. A. *et al.* Investigating Commercial Filaments for 3D Printing of Stiff and Elastic Constructs with Ligament-Like Mechanics. **Micromachines** 2020, Vol. 11, Page 846, v. 11, n. 9, p. 846, 11 set. 2020.



PORSANI, R. N.; SILVA, B. B. DA; HELLMEISTEIR, L. A. V. **Revisão teórica da história da manufatura aditiva e das propriedades dos principais insumos e estruturas de preenchimento nas impressoras 3D FDM open material**. ANAIS DO CONGRESSO INTERNACIONAL E WORKSHOP DESIGN & MATERIAIS. **Anais...2017**.

R3DY. **O que é o plástico PETG? - R3DY Filamentos para Impressora 3D**. Disponível em: <https://www.r3dy.com.br/o-que-e-o-plastico-petg/>. Acesso em: 21 jan. 2023.

RAJAN, K. *et al.* Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2022** **120:3**, v. 120, n. 3, p. 1531–1570, 26 fev. 2022.

RAJPUROHIT, S. R.; DAVE, H. K. Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part. **Rapid Prototyping Journal**, v. 24, n. 8, p. 1317–1324, 14 nov. 2018.

RANI, P. S.; MUBEEN, M. A. OPTIMIZATION OF FUSED DEPOSITION MODELING PROCESS PARAMETERS FOR IMPACT STRENGTH CARBON FIBER (PLA) **MOHD ABDUL MUBEEN**. v. 13, 2022.

RIBEIRO, M. **Bicos - Diâmetros - 3DPine**. Disponível em: <https://www.3dpine.com.br/artigos/bicos-diametros/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

ROOS, C.; PACHECO PALADINI, E.; CANTORSKI DA ROSA, L. **CONTROLE DE CUSTOS RELACIONADOS À FALTA DE QUALIDADE EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO CONTÍNUA: UMA GENERALIZAÇÃO PROPOSTA**. XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Anais...Salvador, BA, Brasil: 6 out. 2009**. Acesso em: 9 fev. 2023

ROY, R. K. **Taguchi Approach to Quality and Cost Improvement**. Second Edition ed. [s.l.] Society of Manufacturing Engineers, 2010.

SANTOS, L. M. *et al.* Tipos de polímeros utilizados como matéria-prima no método de manufatura aditiva por FDM: uma abordagem conceitual. **XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2018.

SEPAHI, M. T. *et al.* **Mechanical Properties of 3D-Printed Parts Made of Polyethylene Terephthalate Glycol**. 2021.

SHAH RUBUDIN, N.; LEE, T. C.; RAMLAN, R. **ScienceDirect ScienceDirect and Applications**. 2019.

SIMPLIFY 3D. **Ultimate 3D Printing Materials Guide | Simplify3D**. Disponível em: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

SOLOMON, I. J.; SEVVEL, P.; GUNASEKARAN, J. A review on the various processing parameters in FDM. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, n. Part 2, p. 509–514, 1 jan. 2021.

SRINIVASAN, R. *et al.* **Impact of fused deposition process parameter (infill pattern) on the strength of PETG part**. 2020a.

SRINIVASAN, R. *et al.* Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 1838–

1842, 1 jan. 2020b.

STAMPOMATICA. **PLA vs ABS vs PETG vs TPU vs NYLON? Qual é a diferença?** Disponível em: <https://stampomatica.com/pla-vs-abs-vs-petg-vs-tpu/>. Acesso em: 21 jan. 2023.

STANDARD, A. Standard terminology for additive manufacturing technologies. **ASTM International F2792-12a**, 2012.

STRATASYS. **Modelagem de Deposição Fundida - FDM 3D Printers**. Disponível em: <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/fdm-technology/>. Acesso em: 18 jan. 2023.

TAGUCHI, G. Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity. **Organization**, p. 1–24, 1990.

TERRA RUCHERT, C. O. **Ensaio Tração Polímero SMM0342-Introdução aos Ensaios Mecânicos dos Materiais**. 2022.

TRILAB. **TRILAB DeltiQ - Impressora 3D FDM | Filament2Print**. Disponível em: <https://filament2print.com/pt/filamento-fdm/965-trilab-deltiq-impressora-3d-fdm.html>. Acesso em: 19 jan. 2023.

UNAL, R.; DEAN, E. B. **Taguchi Approach to Design Optimization for Quality and Cost: An Overview**. 1990. Acesso em: 10 fev. 2023

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Ensaio de Tração em Polímeros: Curva tensão-deformação**. 2022.

VALVEZ, S.; SILVA, A. P.; REIS, P. N. B. Optimization of Printing Parameters to Maximize the Mechanical Properties of 3D-Printed PETG-Based Parts. **Polymers 2022, Vol. 14, Page 2564**, v. 14, n. 13, p. 2564, 24 jun. 2022.

VAN HEMELRIJCK, D. *et al.* **Additive Manufacturing: the next industrial revolution?** 23rd International Acoustic Emission Symposium, the Inauguration Conference of International Institute of Innovative Acoustic Emission & the 8th International Conference on Acoustic Emission. **Anais...**2016.

VICTOR, J. **Impressão 3D: mais importante do que se imaginava**. Disponível em: <https://medium.com/@joaovamaralb/impres%C3%A3o-3d-mais-importante-do-que-imaginava-2aac1576c4d3>. Acesso em: 16 jan. 2023.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. [s.l.] Editora Blucher, 2017.

WANG, Y. *et al.* Additive manufacturing is sustainable technology: citespace based bibliometric investigations of fused deposition modeling approach. **Rapid Prototyping Journal**, v. 28, n. 4, p. 654–675, 29 mar. 2022.

WIBAWA, T.; MASTRISISWADI, H.; ISMIANTI, I. 3D Print Parameter Optimization: A Literature Review. **Proceeding of LPPM UPN “Veteran” Yogyakarta Conference Series 2020 – Engineering and Science Series**, v. 1, n. 1, p. 146–151, 2020.

WIMPENNY, D. I.; PANDEY, P. M.; JYOTHISH KUMAR, L. Advances in 3D Printing & additive manufacturing technologies. **Advances in 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies**, p. 1–186, 1 jan. 2016.

WISHBOX TECHNOLOGIES. **Filamentos para Impressão 3D: O que você precisa saber**. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/filamentos-para-impressao-3d/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

ZACHARY, H. **The Best 3D Printing Temperatures for PLA, TPU, ABS, PETG, Nylon | All3DP**. Disponível em: <https://all3dp.com/2/the-best-printing-temperature-for-different-filaments/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

ZHARYLKASSYN, B.; PERVEEN, A.; TALAMONA, D. Effect of process parameters and materials on the dimensional accuracy of FDM parts. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 1307–1311, 1 jan. 2021.

ZWICK ROELL. **ASTM D638: Características de tração de plásticos | ZwickRoell**. Disponível em: <https://www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/plasticos/compostos-para-moldagem-termoplasticos-e-termoendurecidos/caracteristicas-de-tracao-astm-d638/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DE CORPO DE PROVA TIPO I CONFORME A ASTM D638-22

