



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**ANIELLY FERNANDA REIS PEREIRA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CORPOS DE PROVAS  
PRODUZIDOS POR IMPRESSÃO 3D COM DIFERENTES PARÂMETROS  
UTILIZANDO O TERMOPLÁSTICO PLA**

São Luís

2023

**ANIELLY FERNANDA REIS PEREIRA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CORPOS DE PROVAS  
PRODUZIDOS POR IMPRESSÃO 3D COM DIFERENTES PARÂMETROS  
UTILIZANDO O TERMOPLÁSTICO PLA**

Trabalho de Conclusão Curso II apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Maranhão, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Dr. Andrei Bavaresco Rezende.

São Luís  
2023

**ANIELLY FERNANDA REIS PEREIRA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CORPOS DE PROVAS  
PRODUZIDOS POR IMPRESSÃO 3D COM DIFERENTES PARÂMETROS  
UTILIZANDO O TERMOPLÁSTICO PLA.**

Trabalho aprovado. São Luís – MA, 20 de Julho de 2023

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Orientador – Andrei Bavaresco Rezende – UFMA / Orientador

---

Prof. Dra. Maria Eliziane Pires de Souza – UFMA / Engenharia Mecânica

---

Prof. Dr. Dalmo Inacio Galdez Costa – UFMA / Engenharia Mecânica

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Pereira, Anielly Fernanda Reis.

Análise da resistência mecânica de corpos de provas produzidos por impressão 3D com diferentes parâmetros utilizando o termoplástico PLA / Anielly Fernanda Reis Pereira. - 2023.

52 f.

Orientador(a): Andrei Bavaresco Rezende.

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

1. Impressoras 3D. 2. Parâmetros de impressão. 3. PLA. 4. Resistência mecânica. I. Rezende, Andrei Bavaresco. II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me proporcionado saúde e força para superar os obstáculos nesses anos como universitária.

A Universidade Federal do Maranhão, pelas experiências vividas, conhecimento e a oportunidade de concluir mais uma etapa importante na minha vida.

Ao meu orientador, o Professor Andrei Bavaresco Rezende pela sua instrução, apoio e paciência durante toda a elaboração deste trabalho, minha gratidão.

A banca examinadora composta pelos professores Dalmo Inacio Galdez Costa e Maria Eliziane Pires de Souza, junto com todos os docentes que compõem o Departamento do Curso de Engenharia Mecânica que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional, compartilhando seu vasto conhecimento.

Aos meus pais, meus irmãos e toda a minha família, pelo incentivo, apoio, dedicação e necessário suporte ao longo de minha vida.

Parceiros de graduação, amigos e colegas da universidade, em especial do BICT, pela assistência e incentivo durante esses anos compartilhados.

Para cada um, que de forma direta ou indiretamente fizeram parte desta conquista, o meu muito obrigado.

## RESUMO

As impressoras 3D são equipamentos que possuem diversas formas de fabricação de produtos, como a estereolitografia (SLA), sinterização seletiva laser (SLS) e modelagem por deposição fundida (FDM). Essas máquinas surgiram com objetivo de produzir protótipos tridimensionais, com geometrias complexas e mais leves. Nesse contexto, o presente trabalho realizou-se ensaios mecânicos em corpos de prova fabricados a partir do termoplástico PLA, no qual analisou a resistência mecânica das peças em diferentes parâmetros como temperatura de impressão, espessura de linha, velocidade, porcentagem e tipo de preenchimento. Utilizou-se uma impressora 3D com o método FDM, uma máquina de ensaio a tração e corpos de provas com dimensões de acordo com a norma ASTM D638. Os resultados obtidos mostraram que a maioria dos parâmetros se comportaram como esperado em comparação com outros resultados de referências bibliográficas, enfatizando que uma escolha adequada do parâmetro de impressão tem influência de forma positiva na resistência a tração de peças impressas em impressoras 3D.

Palavras chaves: Impressoras 3D. PLA. Parâmetros de impressão. Resistência mecânica.

## **ABSTRACT**

3D printers are equipment that have several ways of manufacturing products, such as stereolithography (SLA), selective laser sintering (SLS) and fused deposition modeling (FDM). These machines emerged with the aim of producing three-dimensional prototypes, with complex and lighter geometries. In this context, the present paper carried out mechanical tests on specimens manufactured from thermoplastic PLA, in which the mechanical resistance of the pieces was analyzed in different parameters such as printing temperature, line thickness, speed, percentage and type of filling. A 3D printer with the FDM method, a tensile testing machine and specimens with dimensions according to ASTM D638 were used. The results obtained showed that most of the parameters behaved as expected compared to other results of bibliographic references, emphasizing that an adequate choice of the printing parameter has a positive influence on the tensile strength of parts printed on 3D printers.

Keywords: 3D printers. PLA. Print parameters. Mechanical resistance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Tecnologias para impressão 3D .....	16
Figura 2 – Técnica de estereolitografia e seus componentes .....	17
Figura 3 – Impressora 3D pelo método estereolitografia.....	18
Figura 4 – Princípio de construção de máquina 3D de sinterização .....	19
Figura 5 – Modelagem por deposição fundida (FDM) .....	20
Figura 6 – Corpos de prova modelados na impressora 3D com níveis de preenchimento variáveis .....	22
Figura 7 – Orientações do preenchimento.....	23
Figura 8 – Filamento do termoplástico PLA.....	24
Figura 9 – Impressora 3D a ser utilizada na impressão dos corpos de prova ..	25
Figura 10 – Corpo de prova com suas respectivas dimensões em milímetros .	27
Figura 11 – Máquina universal de ensaios mecânicos Instron M10-16927 .....	28
Figura 12 – Modelo carregado no software makertbot.....	29
Figura 13 – Corpos de prova impressos.....	29
Figura 14 – Processo de ensaio a tração .....	30
Figura 15 – Gráfico tensão x deformação para a condição 1 – temperatura. a) 185 °C; b) 198 °C; c) 210 °C.....	32
Figura 16 – Gráfico tensão x deformação para a condição 2 – espessura de linha. a) 0,08 mm; b) 0,1 mm; c) 0,4 mm .....	35
Figura 17 – Gráfico tensão x deformação para a condição 3 – porcentagem de preenchimento - a) 10%; b) 30%; c) 50%.....	38
Figura 18 – Tipos de Preenchimento: (a) Diamante, (b) Hexagonal e (c) Linear . .....	40
Figura 19 – Gráfico tensão x deformação para a condição 4 – tipo de preenchimento. a) Diamante; b) Hexagonal; c) Linear .....	41
Figura 20 – Gráfico tensão x deformação para a condição 5 – velocidade de impressão. a) 10 mm/s; b) 25 mm/s; c) 50 mm/s .....	44
Figura 21 – Valores de máxima tensão de tração e deformação para as diferentes temperaturas de impressão .....	46

Figura 22 – Valores de máxima tensão de tração e deformação para as diferentes espessuras de linha de impressão .....	47
Figura 23 – Valores de máxima tensão de tração e deformação para as diferentes porcentagens de preenchimento de impressão.....	47
Figura 24 – Valores de máxima tensão de tração e deformação para os diferentes tipos de preenchimento de impressão .....	48
Figura 25 – Valores de máxima tensão de tração e deformação para as diferentes velocidades de impressão .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas PLA .....	24
Tabela 2 – Especificações técnicas impressora 3D <i>Makerbot</i> .....	25
Tabela 3 – Combinações de parâmetros.....	26
Tabela 4 – Distribuição dos Corpos de prova (CPs) com a variação dos parâmetros .....	27
Tabela 5 – Dimensões das peças nas diversas condições de temperatura .....	31
Tabela 6 – Dimensões das peças nas diversas condições de espessura de linha .....	34
Tabela 7 – Dimensões das peças nas diversas condições de porcentagem de preenchimento.....	37
Tabela 8 – Dimensões das peças nas diversas condições de preenchimento .....	39
Tabela 9 – Dimensões das peças nas diversas condições de velocidade .....	43

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	13
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
<b>3.1</b>	<b>Geral</b> .....	14
<b>3.2</b>	<b>Específicos</b> .....	14
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
<b>4.1</b>	<b>Conceituação</b> .....	15
<b>4.2</b>	<b>Tipos de impressoras 3D</b> .....	15
4.2.1	Estereolitografia (SLA) .....	16
4.2.2	Sinterização seletiva laser (SLS) .....	18
4.2.3	Modelagem por deposição fundida (FDM).....	19
<b>4.3</b>	<b>Materiais poliméricos</b> .....	20
4.3.1	Polímeros.....	20
4.3.2	Ácido Poliático (PLA).....	21
<b>4.4</b>	<b>Parâmetros de impressão 3D</b> .....	21
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	23
<b>5.1</b>	<b>Material e equipamento para impressão 3D</b> .....	23
5.1.1	Filamento de impressão .....	23
5.1.2	Impressora 3D .....	24
<b>5.2</b>	<b>Parâmetros de impressão 3D</b> .....	26
<b>5.3</b>	<b>Material e equipamento para ensaio de tração</b> .....	27
5.3.1	Corpos de provas para ensaio .....	27
5.3.2	Equipamento para ensaio de tração .....	28
<b>5.4</b>	<b>Procedimento de impressão 3D</b> .....	28
<b>5.5</b>	<b>Procedimento de ensaio de tração</b> .....	30
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	31
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	49
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	51

## 1 INTRODUÇÃO

Na indústria, frequentemente, surge a necessidade por novos equipamentos que possam atender vários campos, como da medicina e engenharia. As impressoras 3D são máquinas que surgiram na década de 80 com o engenheiro físico Charles Hull, com objetivo de produzir protótipos tridimensionais. Essa tecnologia ganha cada dia mais espaço em processos industriais, tais como na produção de peças automotivas e aeroespaciais complexas, próteses médicas, dentárias e moldes personalizados, na qual desempenha um papel fundamental no desenvolvimento para esses setores (ZAPAROLLI, 2019).

Ao longo dos anos a impressão 3D evoluiu de forma significativa com a propagação da informática e utilização de computadores, aliado a isso, as patentes originais perderam validade, proporcionando assim, o uso de plataformas livres, que reduziram os custos desse equipamento (CABREIRA, 2018). De acordo com Zaparolli (2019), a manufatura aditiva, como também é conhecida a impressão 3D, cresce financeiramente 25% anualmente, se expandindo no mercado produtivo, sendo o valor estimado gasto em 2021 de US\$ 20 bilhões.

As impressoras 3D funcionam de acordo com a deposição de material fundido, em que são empilhadas várias camadas, originando o objeto final. Os processos usados, variam, sendo o FDM o processo mais comum, em virtude de ser mais acessível e simples (CABREIRA, 2018). Os termoplásticos fizeram com que essa técnica se ampliasse, e atualmente, o material mais consumido na impressão 3D é o Ácido Poliático (PLA). O PLA é um polímero com característica amorfa, onde é resistente e apresenta alta dureza. No processo de extrusão, esse material é apontado para a produção de objetos que não exigem altos esforços mecânicos e temperaturas elevadas (ALVES et al, 2021).

Com a alta aplicabilidade na indústria em confecções de objetos, até mesmo na fabricação por adição de tecidos humanos, se faz necessário estudos das propriedades mecânicas das peças produzidas pelas impressoras 3D. Uma vez que, propriedades mecânicas das peças produzidas por impressão 3D alteram conforme os parâmetros usados, tais estudos têm a finalidade de assegurar a confiabilidade nas aplicações e estimar a influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas (MEDEIROS *et al.*, 2020).

## 2 JUSTIFICATIVA

A impressão 3D possibilita a fabricação de objetos de todos os formatos, sem grandes investimentos orçamentários, pois essa técnica dispensa formas tradicionais de fabricação que geram altos custos. Com a redução de despesas, se ampliou as áreas de aplicação das impressoras 3D (CABREIRA, 2018).

Conforme afirma Zaparolli (2019, p. 63),

O Instituto de Estudos Avançados (IEAv), unidade de pesquisa do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial da Força Aérea Brasileira (FAB), usa a impressão 3D na produção de um motor aeronáutico hipersônico, conhecido como scramjet (supersonic combustion ramjet), com a finalidade de reduzir custos. [...]

Devido ao seu grande poder construtivo e aprimoramento, as impressoras 3D estão cada vez mais presentes em várias setores da sociedade, trazendo maior liberdade a profissionais, que podem projetar peças com geometrias complexas e mais leves (MORANDINI; VECHIO, 2020). Nesse contexto é de suma importância garantir a segurança nas aplicações que solicitam algum tipo de esforço. A variação de parâmetros de impressão está diretamente ligada na aparência e propriedades mecânicas das peças impressas. Esses parâmetros variam pelo padrão de preenchimento, números de camadas, altura e espessura das camadas (MEDEIROS *et al.*, 2020).

Desta forma, torna-se imprescindível estudos que proporcionam maior assertividade quanto aos parâmetros usados nas mais variadas técnicas previstas nas impressoras 3D. Conhecer essa tecnologia de forma detalhada eleva seu potencial de uso em várias áreas da indústria.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Analisar alguns parâmetros de impressão que influenciam na resistência mecânica de corpos de provas produzidos por impressão 3D utilizando o termoplástico PLA.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- a) Produzir corpos de provas de acordo com a norma ASTM D638;
- b) Realizar ensaios mecânicos de tração nos corpos de prova;
- c) Avaliar a resistência mecânica aplicando diferentes parâmetros de impressão;
- d) Comparar os resultados obtidos com outros estudos já realizados com outros critérios.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Conceituação

A impressão 3D ou a Prototipagem rápida é um conjunto de tecnologias capaz de confeccionar objetos físicos com dimensões tridimensionais, na qual por meio de um equipamento, é depositado camada a camada de material de forma sucessiva até concluir o objeto final. Os modelos são obtidos utilizando sistemas computacionais como o CAD para sua modelagem (GOZZO, 2017). Assis (2018), descreve a impressão 3D como um processo de manufatura aditiva que se inicia em softwares de desenhos e projetos, que em posse de dados, como altura, largura e forma, essas dimensões são enviadas para a impressora, para que em seguida as camadas sejam impressas.

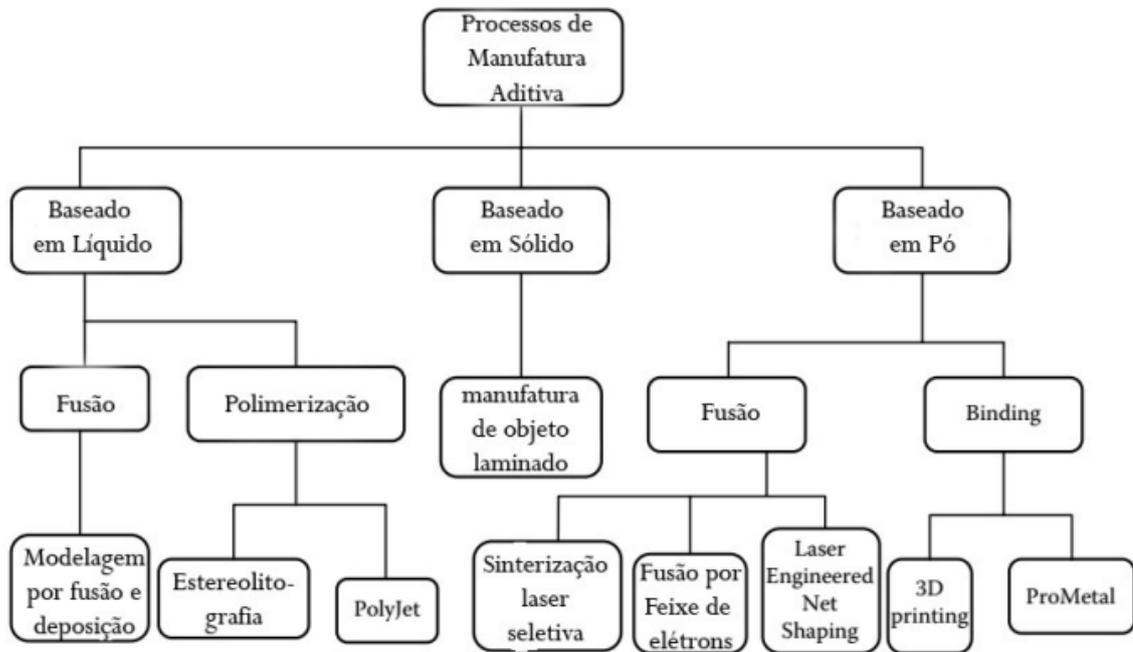
Existem atualmente no mercado diversos tipos de tecnologia e materiais para impressão 3D, no entanto o processo de fabricação é equivalente entre os mesmos. A classificação das impressoras 3D está baseada na tecnologia empregada na confecção dos objetos e materiais utilizados como plásticos, resinas, géis e polímeros (ASSIS, 2018). Os tipos mais usuais são estereografia (SLA), modelagem por deposição fundida (FDM) e sinterização seletiva laser (SLS).

### 4.2 Tipos de impressoras 3D

Na década de 80 surgiram as primeiras impressoras 3D, a tecnologia era descrita pelo japonês *Hideo Kodama* como “cuba de material fotopolímero, exposta a luz UV, que endurece uma peça e constrói um modelo em camadas”, no entanto *Kodama* não conseguiu patentear seu modelo por meio do fotopolímero. De acordo com Morandini e Vechio (2020), a primeira impressora 3D foi registrada em 1983 pelo engenheiro Charles Hull, que buscava produzir produtos plásticos sem gastos e esperas desnecessárias, tal modelo operava pela técnica chamada de estereolitografia (SLA). Ao longo dos anos surgiram outros tipos de tecnologias, no qual se popularizou o uso de materiais plásticos e resinas. Os plásticos ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e PLA (Ácido Poliático) são os mais comuns, visto que possuem fácil manuseio e preços acessíveis (ASSIS, 2018). Os tipos de

tecnologias estão baseados em três processos: líquido, sólido e em pó, retratados na Figura 1.

**Figura 1-** Tipos de Tecnologias para impressão 3D.

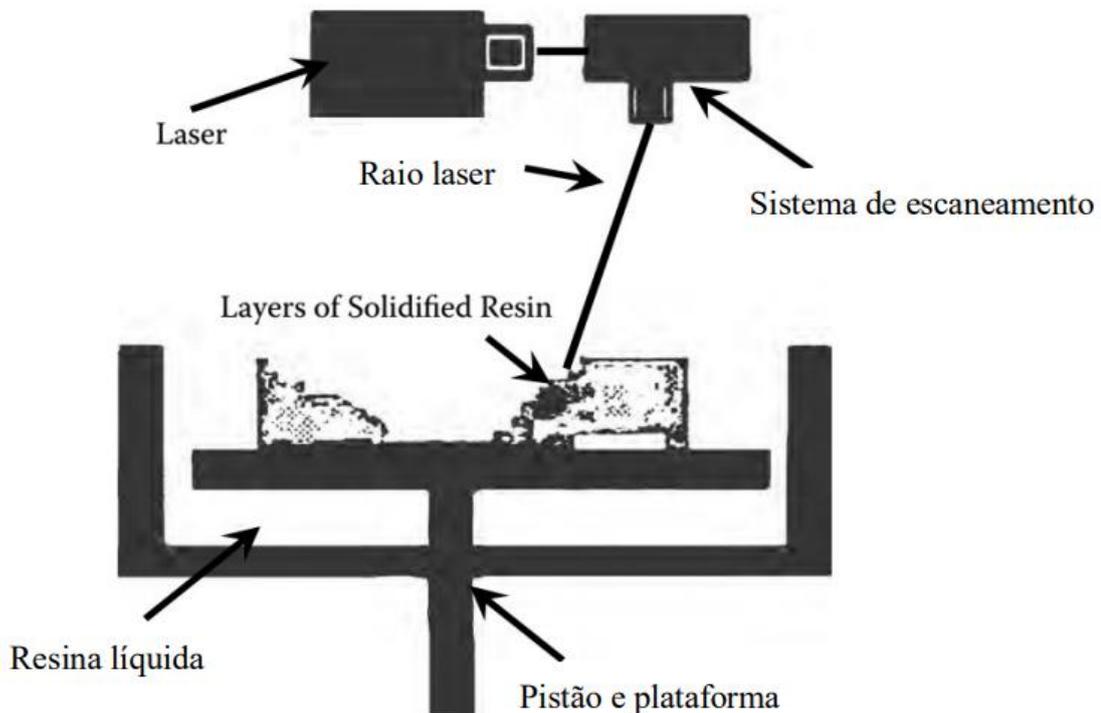


Fonte: (GOZZO, 2017).

#### 4.2.1 Estereolitografia (SLA)

A estereolitografia é uma técnica à base líquida que o objeto se forma por meio de sucessivas camadas solidificadas, onde o material sofre incidência de luz ultravioleta, formando assim, o objeto final (AMBRÓS, 2019). Para Gozzo (2017), o processo de impressão por estereolitografia se inicia construindo um modelo no software CAD que será modificado para um arquivo em STL, em seguida a peça é dividida por partes (camadas) contendo suas devidas informações, a peça é sustentada por meio de uma plataforma que suporta sua estrutura. Então, um laser ultravioleta é aplicado sobre a resina, após esse processo a solidificação se inicia em cada camada, se repetindo para todas as camadas, até a peça ser finalizada, depois de finalizado o objeto, a plataforma é abaixada. Todo o excesso de material que resulta da impressão posteriormente é reutilizado. Na Figura 2 tem-se os principais componentes de um equipamento de estereolitografia.

**Figura 2** - Técnica de estereolitografia e seus componentes.



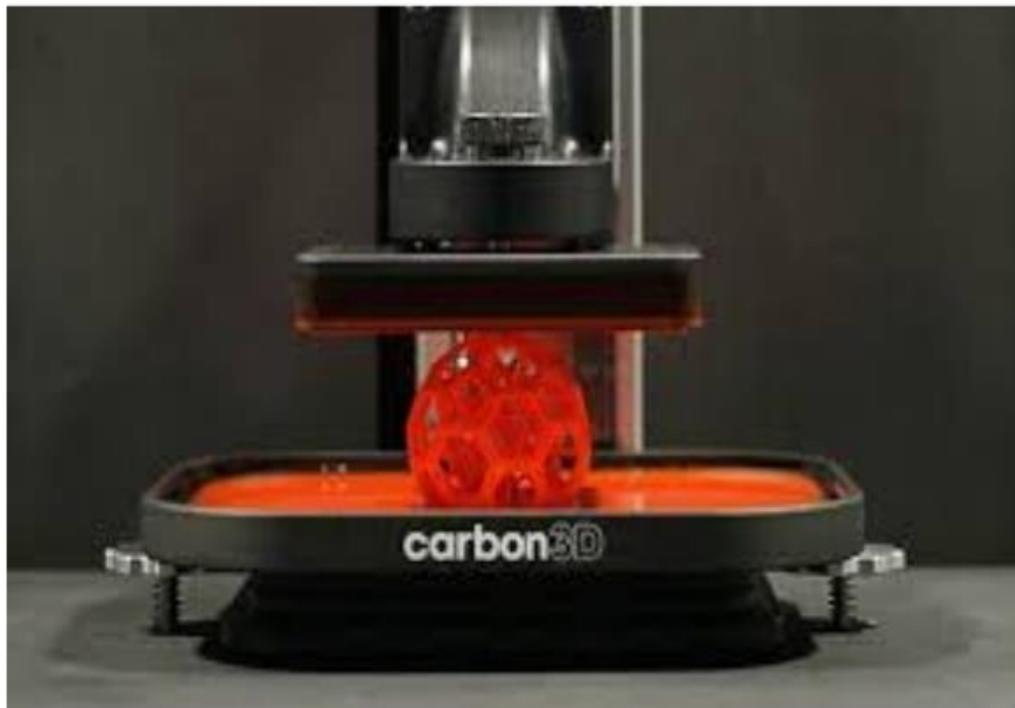
Fonte: (GOZZO, 2017).

As impressoras 3D pelo método da estereolitografia passaram por diversos progressos nos anos posteriores da sua criação, resultando na melhora da resolução de cada peça, alcançando espessura menor que 10 microns, sendo este conhecido como microstereolitografia. A nova técnica de estereolitografia oferece microestruturas tridimensionais presente na indústria de eletrônicos (GOZZO, 2017). A seguir exemplos de eletrônicos de consumo:

- Eletrônica incorporada em componentes estruturais de um veículo ou edifício;
- Eletrônica implantável composta por materiais biocompatíveis;
- Eletrônicos utilizáveis que são feitos para uma indústria específica.

A estereolitografia é um dos processos que mais apresenta vantagens na impressão 3D, uma vez que, tem maior precisão, acabamento superficial, assegura uma superfície mais lisa que os demais métodos, e confecção mais rápida dependendo do tamanho e geometria da peça (AMBRÓS, 2019). Na Figura 3 é mostrado uma impressora 3D pelo método estereolitografia.

**Figura 3** - Impressora 3D pelo método estereolitografia.

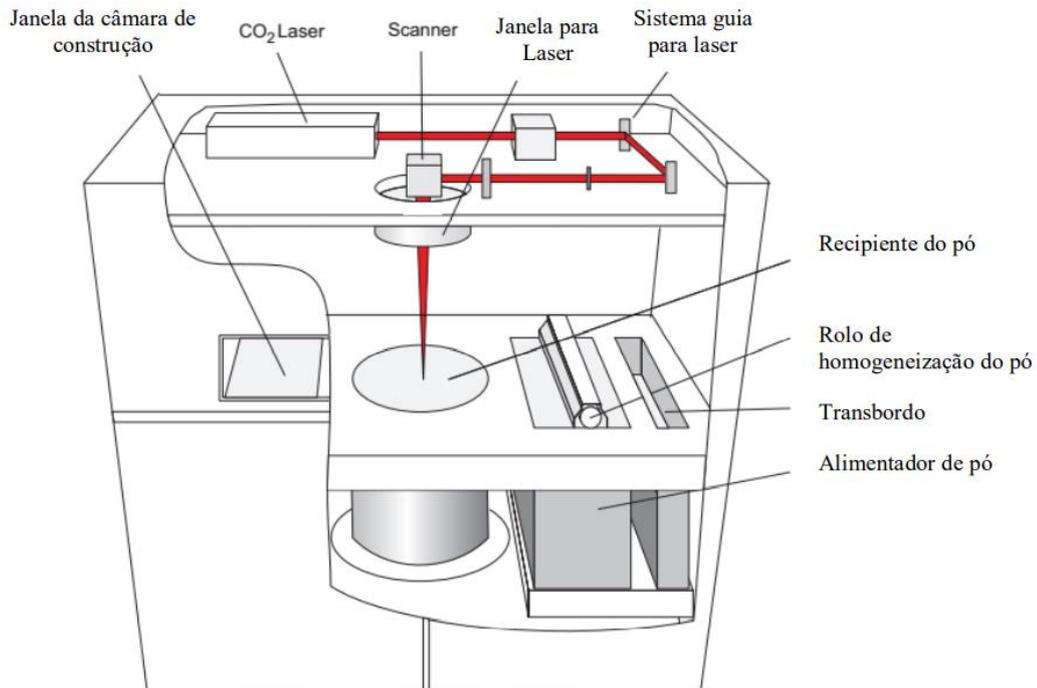


Fonte: (ASSIS, 2018).

#### 4.2.2 Sinterização seletiva laser (SLS)

O método de sinterização seletiva a laser consiste em uma camada em pó termofundível, no qual um feixe de laser se encontra com a camada em pó, criando uma ligação química entre o material e a peça. Segundo Gozzo (2017), esse método foi desenvolvido em 1990, sendo que a escolha do laser tem grande influência na forma como o material em pó será consolidado. A alta potência do laser funde as partículas do leito em pó, formando as devidas camadas. Assim, a peça é desenhada, utilizando o laser para sinterizar cada camada. O mecanismo usado é semelhante ao processo de estereolitografia, no entanto o material é uma resina em pó. A Figura 4 apresenta o modelo de uma impressora 3D pelo método de sinterização seletiva a laser.

**Figura 4 - Princípio de construção de máquina 3D de sinterização.**



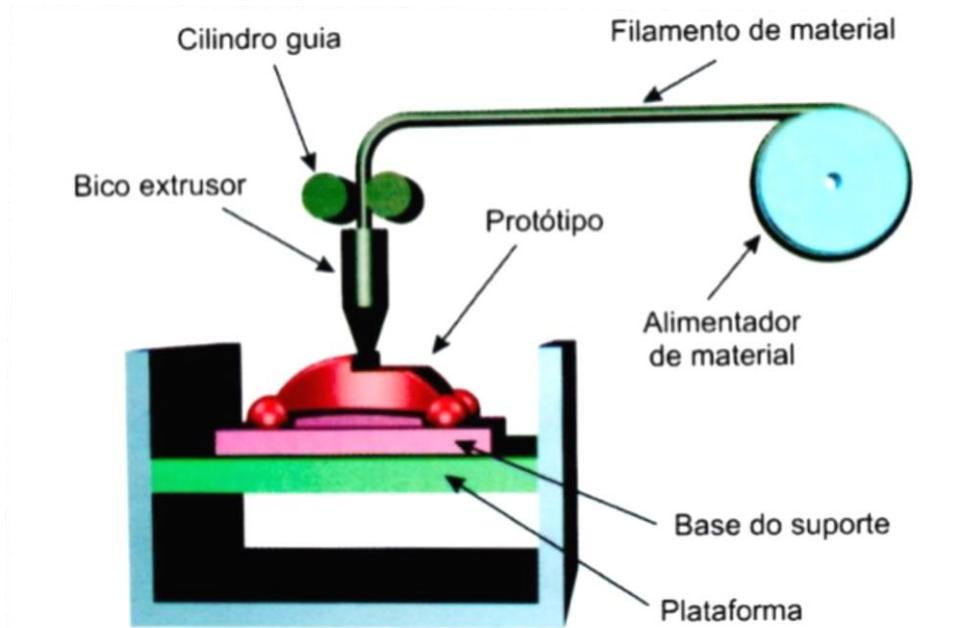
Fonte: (GOZZO, 2017).

Essa tecnologia permite a produção de peças mais complexas e duráveis em comparação a outros processos de impressão 3D. Além disso, a sinterização seletiva a laser tem a vantagem de usar vários materiais como plásticos, metais, ligas de metais, combinação de metais e polímeros e combinação de metais e cerâmicos, os metais só podem ser usados com auxílio de aglutinantes (GOZZO, 2017).

#### 4.2.3 Modelagem por deposição fundida (FDM)

A modelagem por deposição fundida (FDM) é um tipo de impressora 3D que apresenta a construção de seus objetos por meio de um material semilíquido, depositado na forma das camadas da peça. A máquina possui um bico extrusor que se movimenta na direção X-Y, e a mesa de extrusão possui movimento no eixo Z (AMBRÓS, 2019). O filamento é aquecido entre as temperaturas de 180° C e 250° C, onde o fundido sai do bico de forma pastosa se solidificando sobre um suporte chamado de mesa de impressão (GOZZO, 2017). Na Figura 5 é mostrado o esquema da tecnologia modelagem por deposição fundida (FDM).

**Figura 5 - Modelagem por deposição fundida (FDM).**



Fonte: (AMBRÓS, 2019).

Geralmente o material usado no filamento é o termoplástico, como o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PLA (Ácido Poliático) e o (PVA) álcool polivinílico solúvel em água. Suas vantagens consistem em fácil manuseio, rapidez na produção de peças de pequeno porte e geometrias complexas (AMBRÓS, 2019).

### 4.3 Materiais Poliméricos

#### 4.3.1 Polímeros

Plásticos e metais são alguns dos materiais utilizados nas impressoras 3D, no entanto os plásticos dominam as aplicações para este tipo de equipamento, já que esse material tem baixa temperatura de fusão, baixo custo e boa resistência. A acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), o Ácido poliático (PLA), Poli Tereftato de Etileno Glicol (PETG), *Nylon* (Ny) e Policarbonato (PC) são os polímeros mais empregados nas impressões (CAMPOS, 2022). Os polímeros termoplásticos apresentam longas cadeias moleculares que agem entre si mediante de forças intermoleculares fracas, quando submetidos ao aquecimento, a energia térmica movimenta as cadeias deixando no estado líquido viscoso, com fácil modelagem (CABREIRA, 2018).

A modelagem dos termoplásticos realizados por sopro, rotomoldagem, injeção, termoformagem e extrusão, no processo de extrusão o material passa por um cilindro aquecido, no qual a rosca do equipamento impulsiona o material sob aquecimento até uma matriz, formando assim o produto. As características térmicas dos polímeros são afetadas pela maneira que é realizado o resfriamento, visto que a microestrutura do material é definida por essa convergência (CABREIRA, 2018).

#### 4.3.2 Ácido Poliático (PLA)

O PLA é um material termoplástico semicristalino e biodegradável que apresenta temperatura de fusão menor que o ABS, sendo esse material o mais usado nas impressoras 3D (BESKO, *et al.*, 2017). O PLA apresenta características como alta transparência, rigidez, elasticidade, baixo crescimento de cristalinos e inofensivo ao organismo humano, por tais qualidades é considerado um material mais seguro para trabalhar, suas principais aplicações são a produção de filmes, peças termo formadas, injeção, embalagens e implantes biológicos (CABREIRA, 2018).

No entanto, o PLA têm suas desvantagens, peças que exigem grandes alongamentos não devem utilizar esse material, já que o PLA é quebradiço, apresentando taxas reduzidas de alongação na fratura. Em razão de absorver com maior facilidade a umidade do ar, possui facilidade em entupir o extrusor, bem como tornar o fio quebradiço (BESKO *et al.*, 2017). Para evitar tais problemas, se deve fazer modificações no material, como utilização de fibras ou outros elementos, ou aplicação de aquecimento prévio a fim de reduzir a umidade.

#### 4.4 Parâmetros de impressão 3D

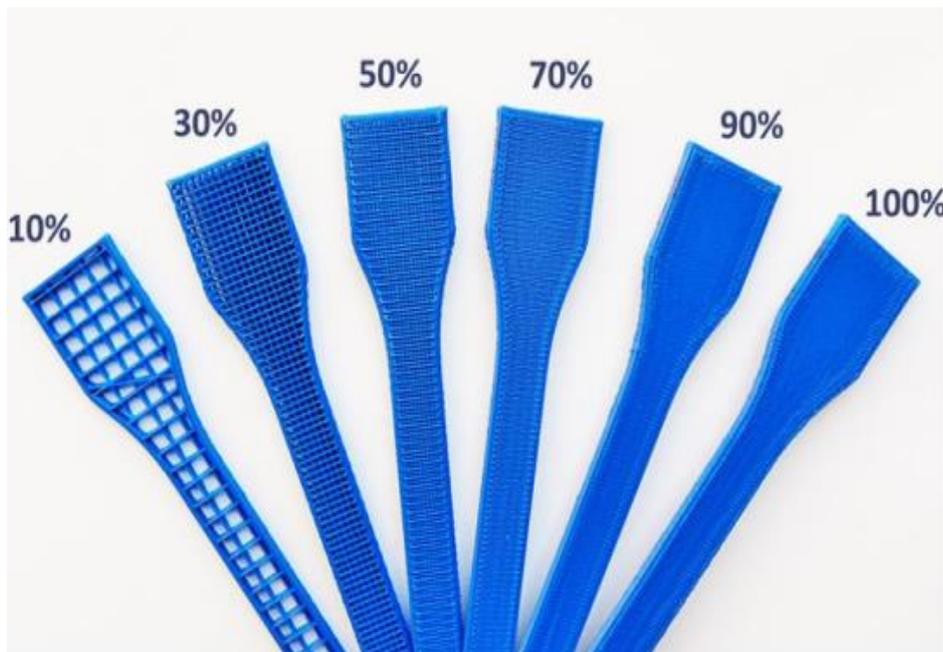
As qualidades dos objetos impressos pelas impressoras 3D dependem de vários fatores ou parâmetros, são eles que influenciam de forma positiva ou negativa nas propriedades mecânicas do produto final. Abaixo tem-se alguns parâmetros que afetam a resistência mecânica das peças.

- Nível e tipo de preenchimento;
- Altura e número de camada;
- Orientação do preenchimento;

- Temperatura de impressão;
- Velocidade de impressão;
- Diâmetro do bico.

O nível e o tipo de preenchimento influenciam na resistência mecânica dos objetos, visto que aumentando a densidade de preenchimento ocorrerá um aumento na sua estrutura, elevando sua resistência. Para impressão não é necessário a parte interior está totalmente preenchida, já que programas fatiadores preenchem esses espaços vagos. Esses programas fatiadores facilitam na economia de material, tempo de impressão e peso do objeto, contudo esses motivos não comprometem a estrutura da peça (CAMPOS, 2022). Na Figura 6 tem-se modelos de corpos de prova com vários níveis de preenchimento.

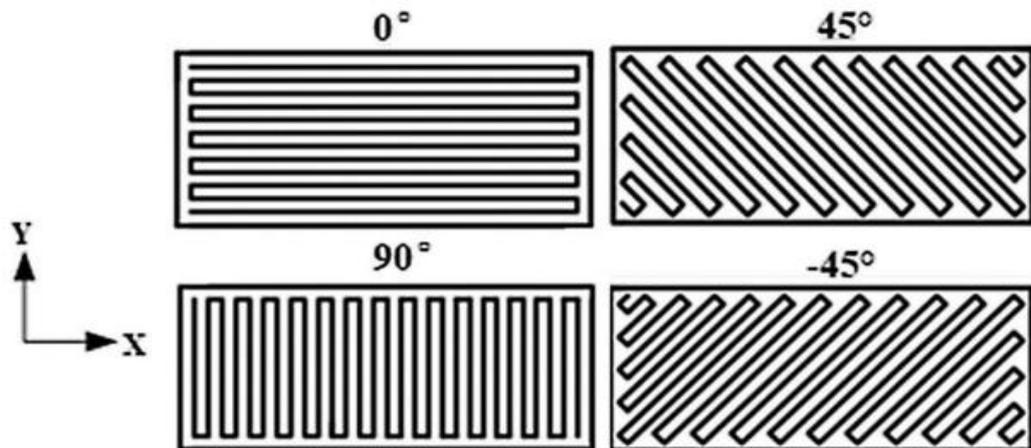
**Figura 6** - Corpos de prova modelados na impressora 3D com níveis de preenchimentos variáveis.



Fonte: (CAMPOS, 2022).

Campos (2022) constatou que as orientações de preenchimento (Figura 7) influenciam diretamente nas propriedades mecânicas das peças, sendo que as orientações de preenchimento  $0^\circ$  e  $90^\circ$  mostraram melhores resultados com relação a resistência do que com orientações de preenchimento  $45^\circ$  e  $-45^\circ$ .

**Figura 7 - Orientações do preenchimento.**



Fonte: (CAMPOS, 2022).

A temperatura de impressão é um outro parâmetro significativo, visto que os polímeros se degradam facilmente, entupindo o bico de impressão e consequentemente, contaminando o material. Essa temperatura é definida ainda no software usado para fatiar a peça, durante a impressão a temperatura pode ser ajustada se adequando as condições impostas (CAMPOS, 2022).

A temperatura nos bicos também deve ser regulada quando se utilizar novos filamentos, já que temperaturas muito altas podem acarretar extrusão excessiva e com formação de bolhas. Entretanto, necessita encontrar um equilíbrio na temperatura, uma vez que baixas temperaturas provocam sub extrusão em que nem todas as camadas são impressas (CAMPOS, 2022).

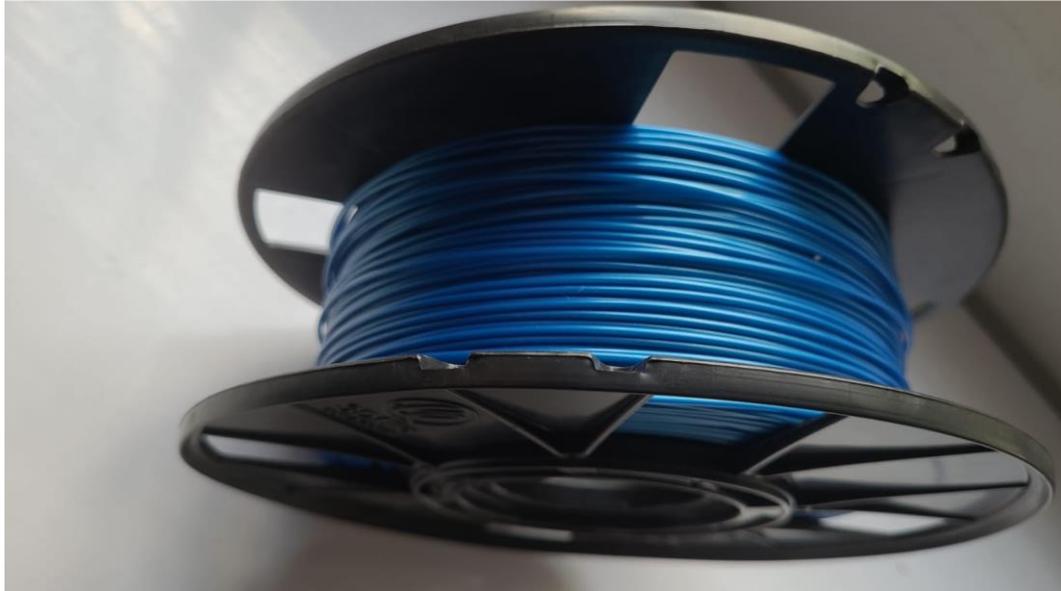
## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Material e equipamento para impressão 3D

#### 5.1.1 Filamento de impressão

O material PLA é um termoplástico muito utilizado na impressão 3D, pela facilidade de manuseio e indicado para iniciantes. No processo de impressão o material não apresenta mal odor ao ser extrudado (AMBRÓS, 2019.) Na Figura 8 é mostrado o PLA utilizado na impressão.

**Figura 8** - Filamento do termoplástico PLA.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Tabela 1 tem-se as especificações técnicas disponibilizada pelo fornecedor 3D Fila:

**Tabela 1** - Especificações técnicas PLA.

Propriedades	Valor	Unidade
Diâmetro	1.75	Mm
Temperatura de transição vítrea	54	°C
Temperatura de processamento	180-220	°C
Densidade	1,23	g/cm <sup>3</sup>

Fonte: (3D FILA, 2023).

### 5.1.2 Impressora 3d

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado uma impressora 3D do tipo FDM, marca Makerbot modelo Replicador Mini, conforme a Figura 9.

**Figura 9** - Impressora 3D a ser utilizada na impressão dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A impressora 3D *Makerbot* permite configurá-la sem fio através do aplicativo *Makerbot* mobile, possibilitando monitorar e definir parâmetros de impressão, recebendo notificações sobre conclusão de impressão, possíveis erros e monitoramento visual pela câmera integrada (MAKERBOT, 2015). Na Tabela 2 tem-se as especificações técnicas da impressora 3D.

**Tabela 2** - Especificações técnicas impressora 3D *Makerbot*.

Características	Dimensão	Unidade
Tecnologia de impressão	FDM	-
Volume da impressão	10 x 12.6 x 12.6	Cm
Diâmetro do filamento	1.75	Mm
Arquivos suportados	STL e OBJ	-
Resolução da camada	0,1	mm
Conexões	USB e Wi-fi	-

Fonte: (MAKERBOT, 2015).

## 5.2 Parâmetros de impressão 3d

O atual trabalho tem como objetivo principal verificar a influência de parâmetros de impressão 3D na resistência à tração dos corpos de prova impressos em PLA pelo tipo FDM, foram examinados 5 parâmetros de impressão. Abaixo tem-se os parâmetros analisados.

- Temperatura;
- Espessura de linha
- Porcentagem de impressão;
- Tipos de preenchimento;
- Velocidade;

Para realizar impressões dos corpos de prova foram definidas combinação dos parâmetros acima, com 3 possibilidades cada uma, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3 – Combinações de parâmetros.**

Combinação dos parâmetros			
Parâmetros	Condição 1	Condição 2	Condição 3
Temperatura (°C)	185	198	210
Espessura de linha (mm)	0,08	0,1	0,4
Porcentagem de impressão (%)	10	30	50
Tipos de preenchimento	Diamante	Hexagonal	Linear
Velocidade (mm/s)	10	25	50

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

No total foram impressas 44 amostras com todas as combinações analisadas, na Tabela 4 abaixo tem-se todas as distribuições das amostras.

**Tabela 4** - Distribuição dos Corpos de prova (CPs) com a variação dos parâmetros.

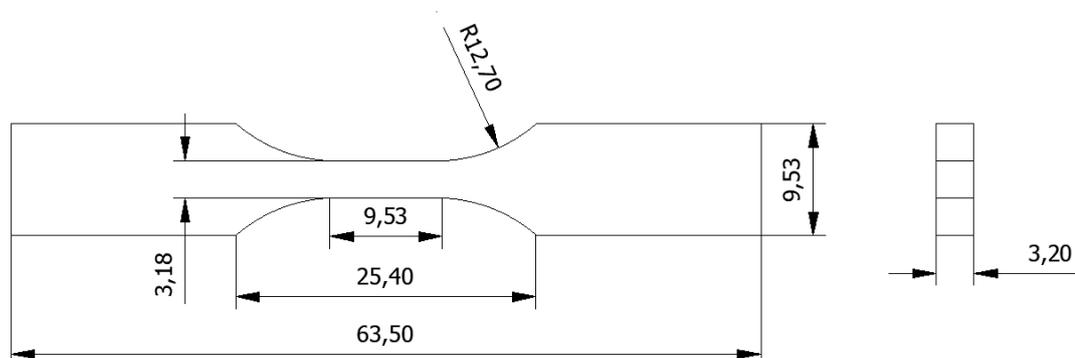
CPs	Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Preenchimento (%)	Padrão de preenchimento	Velocidade (mm/s)
1A a 4A	185	0,1	30	Hexagonal	25
5A a 8A	198	0,1	30	Hexagonal	25
9A a 12A	210	0,1	30	Hexagonal	25
13A a 16A	185	0,08	30	Hexagonal	25
17A a 20A	185	0,4	30	Hexagonal	25
21A a 24A	185	0,1	10	Hexagonal	25
25A a 28A	185	0,1	50	Hexagonal	25
29A a 32A	185	0,1	30	Diamante	25
33A a 36A	185	0,1	30	Linear	25
37A a 40A	185	0,1	30	Hexagonal	10
41A a 44A	185	0,1	30	Hexagonal	50

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

### 5.3 Material e equipamento para ensaio de tração

#### 5.3.1 Corpos de prova para ensaio

Para modelagem dos corpos de prova para o ensaio de tração utilizou-se o software *AutoCad*, seguindo as dimensões determinadas pela norma ASTM D638 do tipo V de corpo de prova, conforme a Figura 10.

**Figura 10** - Corpo de prova com suas respectivas dimensões em milímetros.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

### 5.3.2 Equipamento para ensaio de tração

Os ensaios mecânicos foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios mecânicos *Instron* M10-16927 (Figura 11), presente no laboratório de materiais do Curso de Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Para cada combinação de parâmetros de impressão foram realizadas 4 repetições a fim de garantir a dispersão de dados suficientes. Utilizou-se uma garra do tipo plana com acionamento pneumático.

**Figura 11:** Máquina universal de ensaios mecânicos *Instron* M10-16927.

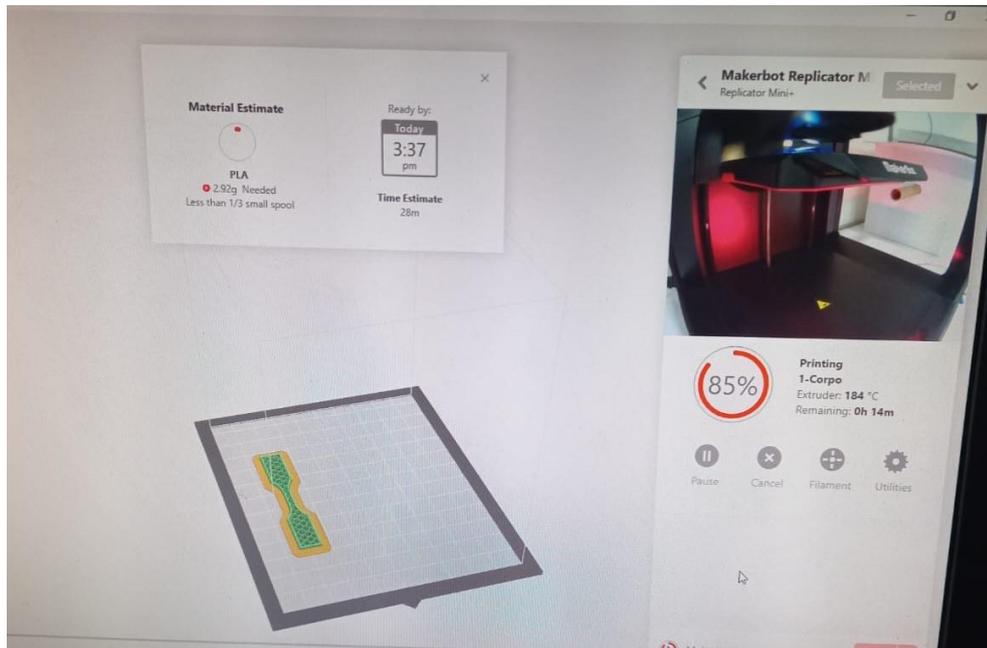


Fonte: (INSTRON, 2019).

### 5.4 Procedimento de impressão 3D

Após a modelagem do corpo de prova no *AutoCad*, o arquivo foi salvo em formato STL e transferido para a impressora. O desenho depois de carregado na impressora, se faz os ajustes nos parâmetros para o início do processo de impressão. A Figura 12 tem-se a figura do corpo de prova para impressão carregado no *software*.

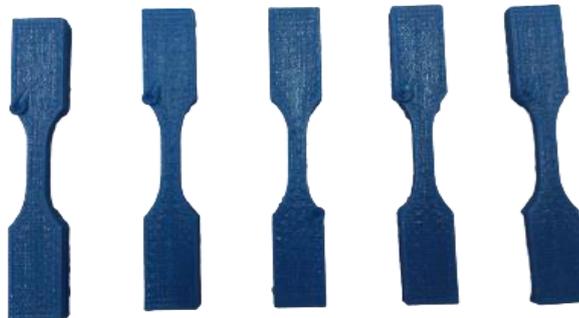
**Figura 12:** Modelo carregado no *software makertbot*.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Logo após de configurar a impressora de acordo com os parâmetros, o processo de impressão é iniciado. O bico extrusor é aquecido até 185 °C, posteriormente a mesa de impressão é elevada no eixo Z, em seguida o material fundido sai do bico e o corpo de prova é impresso. A Figura 13 apresenta os corpos de prova totalmente impressos.

**Figura 13 -** Corpos de prova impressos.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

## 5.5 Procedimento de ensaio de tração

Após a finalizar a impressão dos corpos de prova iniciou-se o procedimento de ensaio a tração. Os corpos de prova foram separados por parâmetros e com auxílio de um paquímetro foram obtidas suas respectivas dimensões. Em seguida os dados coletados (espessura, largura e comprimento) foram inseridos na máquina, o corpo de prova é fixado nas garras, iniciando o processo de carregamento até a fratura, conforme a Figura 14 abaixo.

**Figura 14** - Processo de ensaio a tração.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados ocorreu na avaliação dos corpos de prova após a impressão 3D e obtenção das curvas de tração x deformação. A análise das peças compete demonstrar se as peças atingem as medidas adequadas, conforme modelo projetado.

### Condição 1 - Temperatura

As avaliações da geometria dos corpos de provas impressos em três temperaturas diferentes de extrusão estão apresentadas na Tabela 5, na qual tem-se as dimensões dos corpos de provas após ser finalizada a impressão.

**Tabela 5** - Dimensões das peças nas diversas condições de temperatura.

Temperatura - 185 °C			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,3	3,4	64,2
Amostra 2	3,1	3,2	63,2
Amostra 3	3,2	3,3	63,3
Amostra 4	3,2	3,3	63,3
<b>Média</b>	<b>3,2</b>	<b>3,3</b>	<b>63,5</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

Temperatura - 198 °C			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,3	3,4	63,2
Amostra 2	3,5	3,4	63,1
Amostra 3	3,4	3,4	63,1
Amostra 4	3,3	3,4	63,2
<b>Média</b>	<b>3,4</b>	<b>3,4</b>	<b>63,2</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

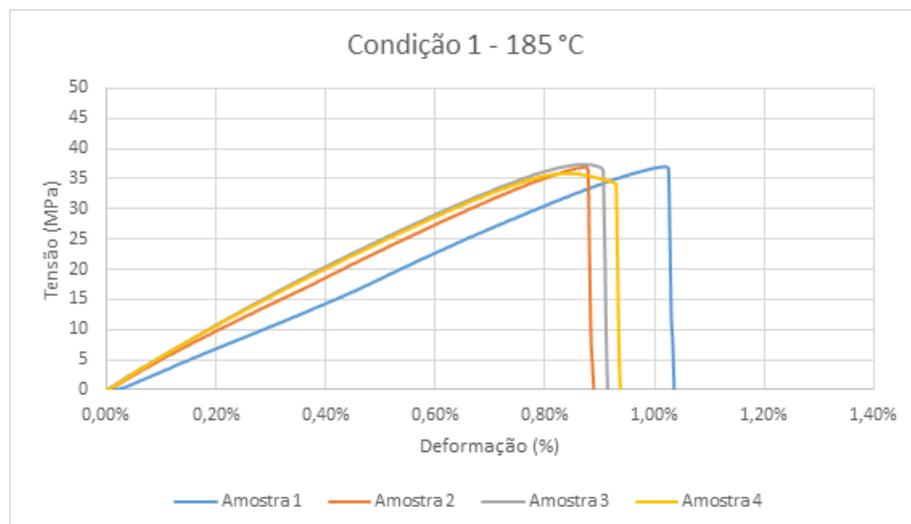
Temperatura - 210 °C			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,5	3,4	63,1
Amostra 2	3,6	3,4	63,1
Amostra 3	3,5	3,4	63,1
Amostra 4	3,6	3,4	63,1
<b>Média</b>	<b>3,6</b>	<b>3,4</b>	<b>63,1</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

As amostras impressas com a temperatura de 185 °C as dimensões foram obtidas através do auxílio de um paquímetro. Nota-se que as amostras impressas a 210 °C tiveram os valores dimensionais mais discrepantes em relação aos valores do projeto inicial ( $E = 3,20$  mm,  $L = 3,18$  mm,  $C = 63,5$  mm), apresentando menor precisão. A precisão pode variar de acordo com o parâmetro de impressão, a maior imprecisão das peças na temperatura de 210 °C pode ter sido causada pela difusão molecular, processo natural em impressões em altas temperaturas (FERNANDES, 2016).

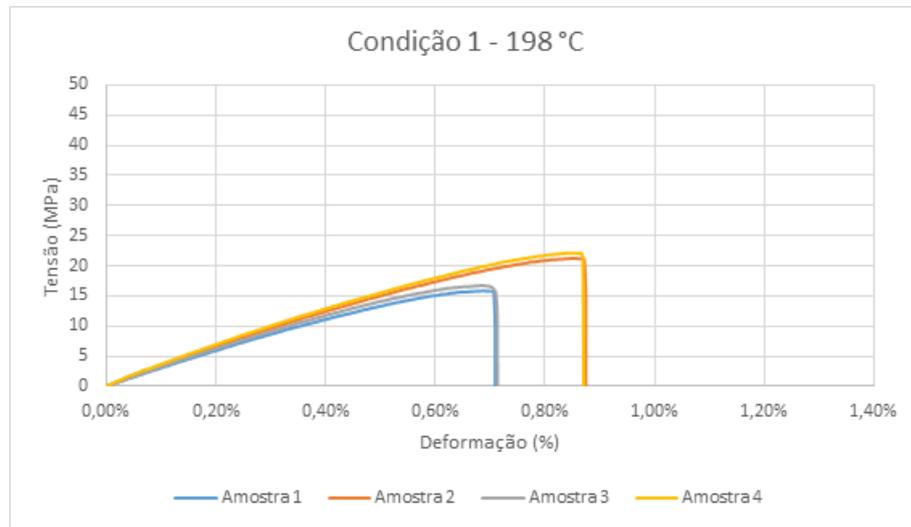
A Figura 15 apresenta os resultados no formato de “Tensão x Deformação” nas diversas condições de temperatura. Para melhor visualização, os gráficos foram agrupados como mostrado a seguir. Foram impressas 4 amostras por temperatura, totalizando 12 amostras para Condição 1.

**Figura 15** - Gráfico tensão x deformação para a condição 1 – temperatura. a) 185 °C; b) 198 °C; c) 210 °C (continua).

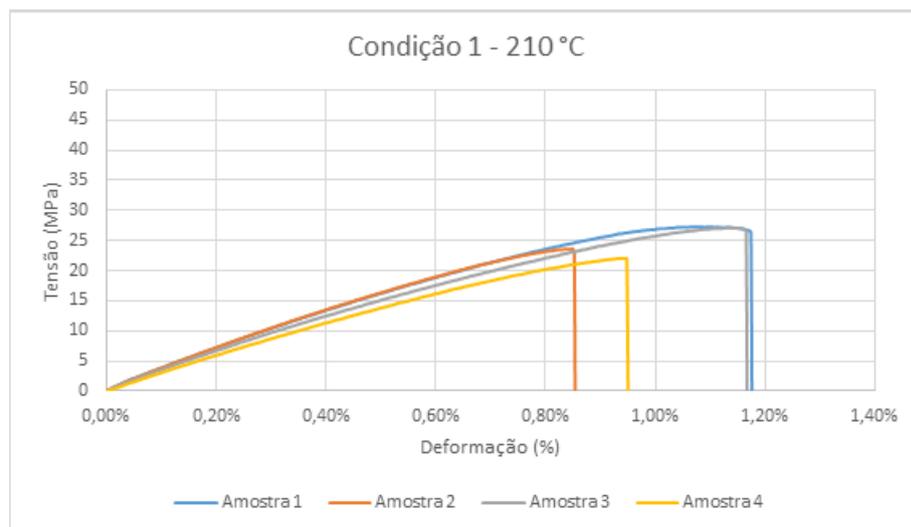


a)

**Figura 15** - (continuação) Gráfico tensão x deformação para a condição 1 – temperatura. a) 185 °C; b) 198 °C; c) 210 °C.



b)



c)

Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

Na condição 1 em que as peças são impressas em diferentes temperaturas de extrusão, as amostras apresentam um fenômeno chamado de difusão molecular, em que “quando uma camada é depositada sobre outra, a camada inferior irá, localmente, voltar a fundir devido ao calor emitido pela camada superior” (FERNANDES, 2016). Esse processo interfere diretamente na qualidade das ligações, pois quanto maior a temperatura de extrusão, menor será a viscosidade do polímero, fazendo com que as cadeias poliméricas sejam mais fracas.

Segundo Callister (2008), o aumento da temperatura dos materiais poliméricos ocasiona uma diminuição no módulo de elasticidade, reduz o limite de resistência a tração e melhora a ductilidade. Na Figura 15 acima pode ser observado que na temperatura de 185 °C tem-se os valores de tensão maiores em comparação com as outras temperaturas. As demais temperaturas os resultados de tensão mantêm os valores similares, no entanto a deformação é maior para a temperatura de 210 °C. Este comportamento é esperado de acordo com a literatura, pois com aumento da temperatura o polímero se torna mais dúctil (CALLISTER, 2008).

Condição 2 - Espessura de linha.

Na Tabela 6 é mostrado as dimensões para cada espessura de linha utilizada após a impressão. Os resultados das dimensões portaram de forma semelhante, sem grandes variações de uma condição para outra.

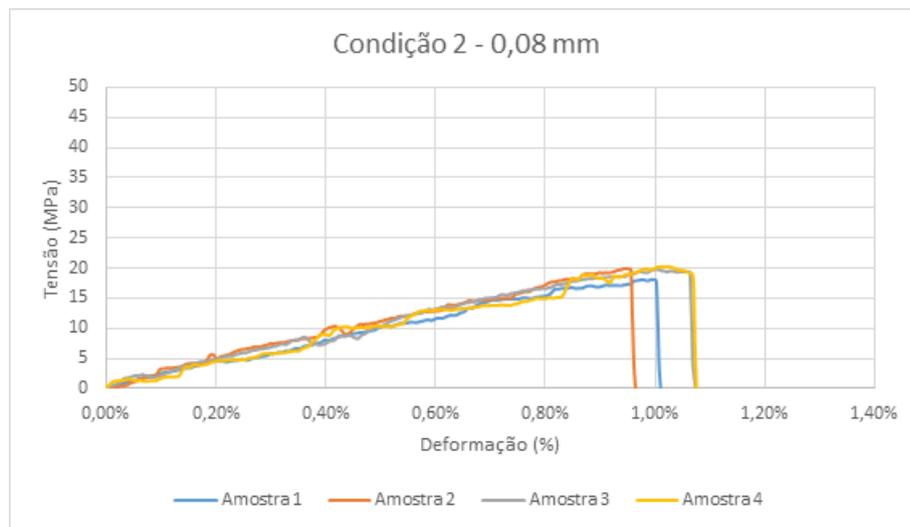
**Tabela 6** - Dimensões das peças nas diversas condições de espessura de linha.

Espessura de Linha - 0,08 mm			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,2	3,4	63,2
Amostra 2	3,2	3,3	63,2
Amostra 3	3,1	3,3	63,2
Amostra 4	3,2	3,3	63,3
<b>Média</b>	<b>3,2</b>	<b>3,3</b>	<b>63,2</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>
Espessura de Linha - 0,1 mm			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,3	3,4	64,2
Amostra 2	3,1	3,2	63,2
Amostra 3	3,2	3,3	63,3
Amostra 4	3,2	3,3	63,3
<b>Média</b>	<b>3,2</b>	<b>3,3</b>	<b>63,5</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>
Espessura de Linha - 0,4 mm			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,1	3,5	64,2
Amostra 2	3,1	3,6	63,1
Amostra 3	3,1	3,4	63,3
Amostra 4	3,1	3,5	63,3
<b>Média</b>	<b>3,1</b>	<b>3,5</b>	<b>63,5</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

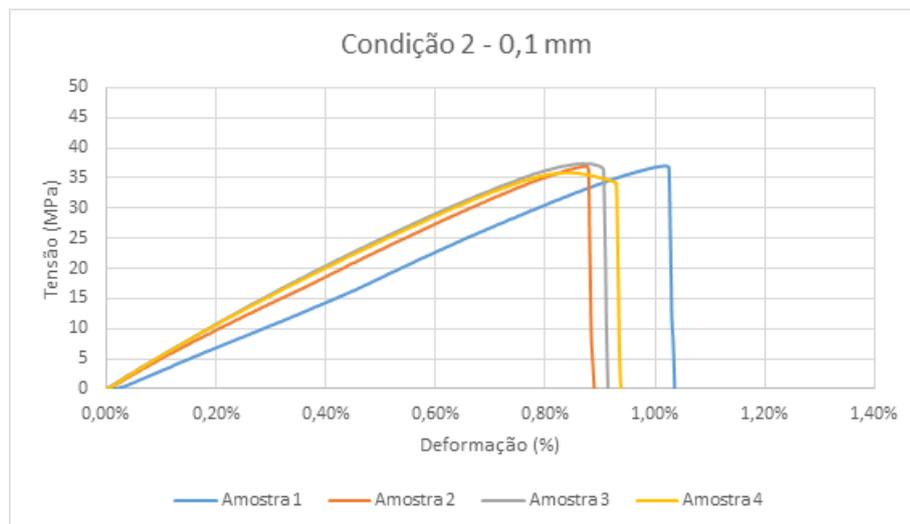
Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

A Figura 16 apresenta o comportamento em tração das amostras para as diferentes espessuras de linha. Observa-se que a espessura de 0,1 mm apresentou maiores valores de resistência, enquanto a espessura de 0,4 mm mostrou os menores valores de resistência a tração.

**Figura 16** - Gráfico tensão x deformação para a condição 2 – espessura de linha. a) 0,08 mm; b) 0,1 mm; c) 0,4 mm. (continua)

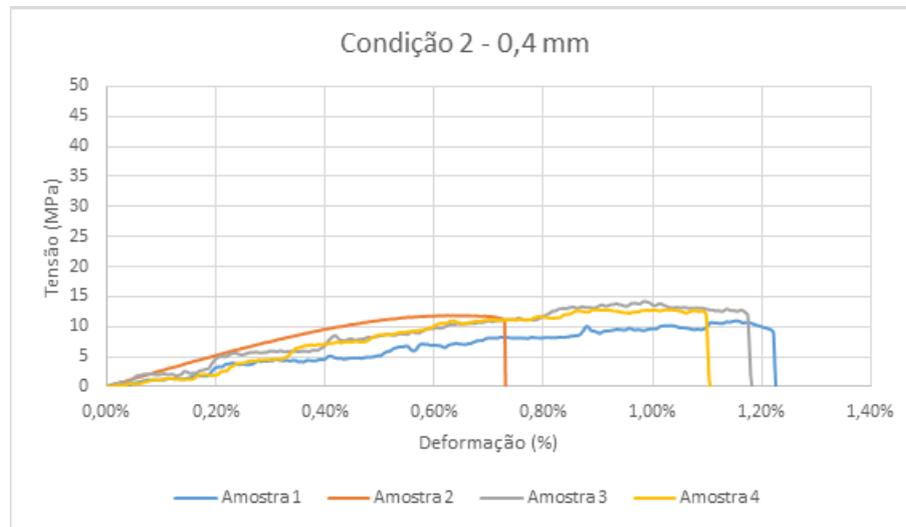


a)



b)

**Figura 16** - (continuação) Gráfico tensão x deformação para a condição 2 – espessura de linha. a) 0,08 mm; b) 0,1 mm; c) 0,4 mm.



c)

Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

Segundo Galina *et al.* (2018), a resistência mecânica da peça impressa está diretamente relacionada ao número de camadas, pois quanto menor o filamento extrudado, maior o número de camadas na peça, já que com a espessura de linha menor, há um aumento do contato e a adesão entre as camadas, resultando no aumento da resistência. Dessa forma, analisando a Figura 16 percebe-se que espessura de 0,4 mm apresentou a menor resistência a tração. A espessura de 0,08 mm, apresentou pior resultado em relação a 0,1 mm. Esse resultado pode ter sido interferido, devido a função do bico da extrusora não comportar espessuras menores que 0,1 mm, o que prejudica a estabilidade da linha depositada.

Condição 3 - Porcentagem de preenchimento.

Na Tabela 7, tem-se as dimensões dos corpos de prova para a condição 3: porcentagem de preenchimento. As amostras mantiveram resultados sem grandes diferenças.

**Tabela 7** - Dimensões das peças nas diversas condições de porcentagem de preenchimento.

Porcentagem de preenchimento – 10%			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,3	3,6	63,2
Amostra 2	3,2	3,4	63,2
Amostra 3	3,2	3,3	63,3
Amostra 4	3,2	3,4	63,3
<b>Média</b>	<b>3,2</b>	<b>3,4</b>	<b>63,3</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

Porcentagem de preenchimento – 30%			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,3	3,4	64,2
Amostra 2	3,1	3,2	63,2
Amostra 3	3,2	3,3	63,3
Amostra 4	3,2	3,3	63,3
<b>Média</b>	<b>3,2</b>	<b>3,3</b>	<b>63,5</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

Porcentagem de preenchimento – 50%			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,3	3,6	63,1
Amostra 2	3,3	3,6	63,1
Amostra 3	3,3	3,6	63,1
Amostra 4	3,2	3,3	63,3
<b>Média</b>	<b>3,3</b>	<b>3,5</b>	<b>63,2</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

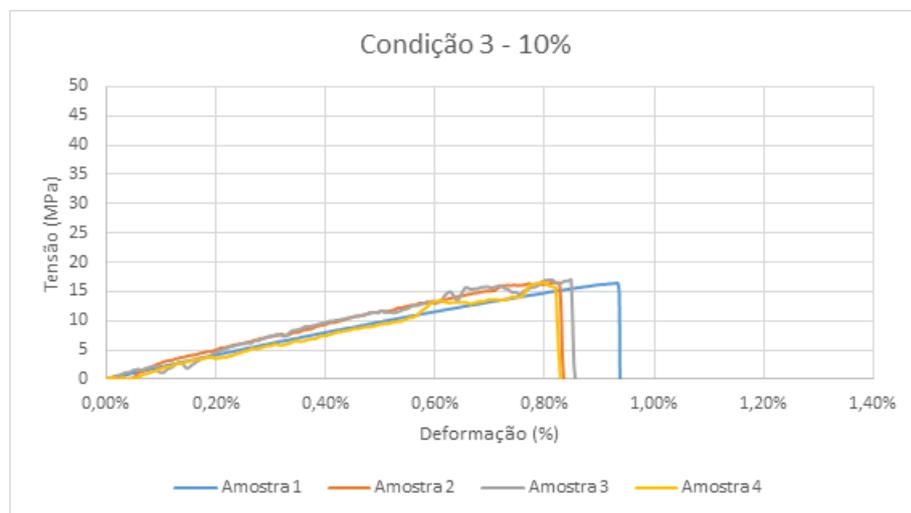
Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

A porcentagem de preenchimento configura a quantidade de material utilizado no interior da peça, podendo variar entre 0-100% do preenchimento da amostra. A quantidade de preenchimento da peça reforça sua estrutura, estabelecendo a resistência e peso final da peça (MARTINS, 2021). A densidade de preenchimento interfere no tempo de impressão, quantidade de material e resistência, pois quanto maior a densidade do material, mais gasta-se material, aumentando o seu peso que resultará em uma maior resistência da peça (DOMINGOS, 2022).

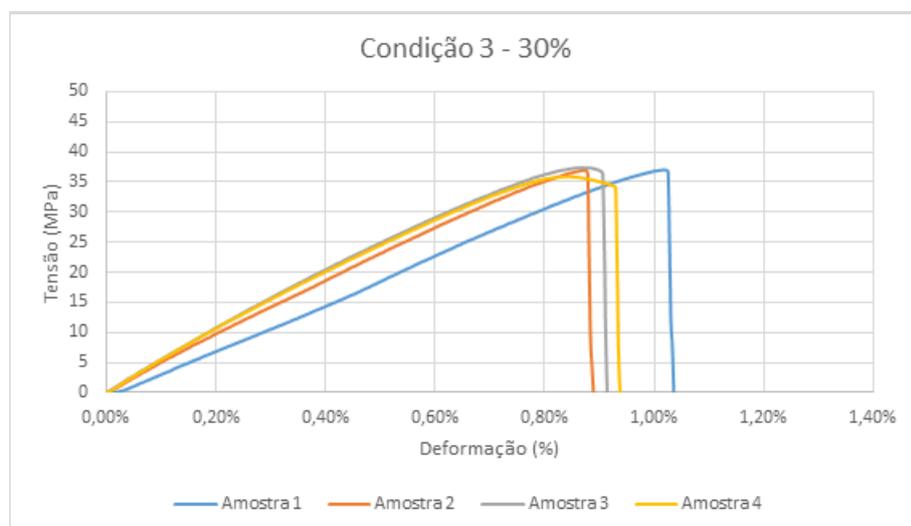
A Figura 17 ilustra-se a tensão x deformação das porcentagens de preenchimento das amostras. A Figura 17 – a (10%) tem-se um valor menor resistência a tração comparado aos demais gráficos, em conformidade com a literatura, pois quanto menor o preenchimento, menor a resistência da peça. No

entanto, a condição de 30% apresentou os maiores valores de resistência a tração, fugindo do esperado. O preenchimento de 50% apresentou baixa resistência da peça comparado a 30%, em que a uma teoria levantada para tal discrepância seja o tipo de preenchimento usado nas amostras (hexagonal). Conforme o percentual de preenchimento aumenta, a geometria hexagonal expande a espessura das linhas que à estruturam. Assim, essa expansão pode ter impactado nas ligações internas da estrutura.

**Figura 17** - Gráfico tensão x deformação para a condição 3 – porcentagem de preenchimento - a) 10%; b) 30%; c) 50%. (continua)

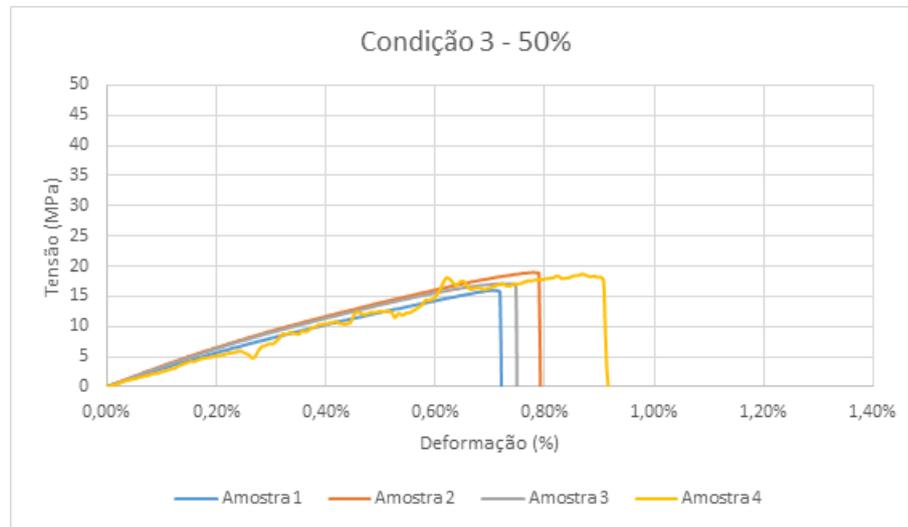


a)



b)

**Figura 17** - (continuação) Gráfico tensão x deformação para a condição 3 – porcentagem de preenchimento - a) 10%; b) 30%; c) 50%.



c)

Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

#### Condição 4 - Tipos de preenchimento.

Na Tabela 8 apresenta as dimensões das amostras impressas conforme o parâmetro de tipos de preenchimento, no qual tem-se 3 tipos: diamante, hexagonal e linear. Os valores médios das dimensões das amostras mostraram-se com pouca variação com relação as medidas projetadas das peças, ou seja, medidas similares ao original.

**Tabela 8** - Dimensões das peças nas diversas condições de preenchimento. (continua)

Preenchimento – Diamante			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,2	3,4	63,4
Amostra 2	3,2	3,5	63,2
Amostra 3	3,2	3,4	63,3
Amostra 4	3,2	3,4	63,4
<b>Média</b>	<b>3,2</b>	<b>3,4</b>	<b>63,3</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

**Tabela 8 – (continuação) Dimensões das peças nas diversas condições de preenchimento.**

Preenchimento – Hexagonal			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,3	3,4	64,2
Amostra 2	3,1	3,2	63,2
Amostra 3	3,2	3,3	63,3
Amostra 4	3,2	3,3	63,3
<b>Média</b>	<b>3,2</b>	<b>3,3</b>	<b>63,5</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

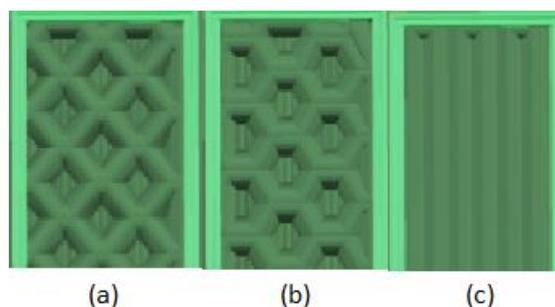
  

Preenchimento – Linear			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,2	3,3	63,3
Amostra 2	3,2	3,4	63,2
Amostra 3	3,1	3,4	63,3
Amostra 4	3,2	3,3	63,3
<b>Média</b>	<b>3,2</b>	<b>3,4</b>	<b>63,3</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

Determinar a geometria interna das peças, ou seja, o tipo de preenchimento apresenta vantagens em sua estrutura, visual e econômica. A escolha de um preenchimento adequado é fundamental para adquirir propriedades mecânicas desejáveis nas peças. Alguns tipos apresentam tempo de impressão mais rápidas, como preenchimentos retilíneos, devido a poucas mudanças na direção do cabeçote de extrusão (MARTINS, 2021). A Figura 18 apresenta as geometrias utilizadas nas impressões:

**Figura 18 - Tipos de Preenchimento: a) Diamante, b) Hexagonal e c) Linear.**

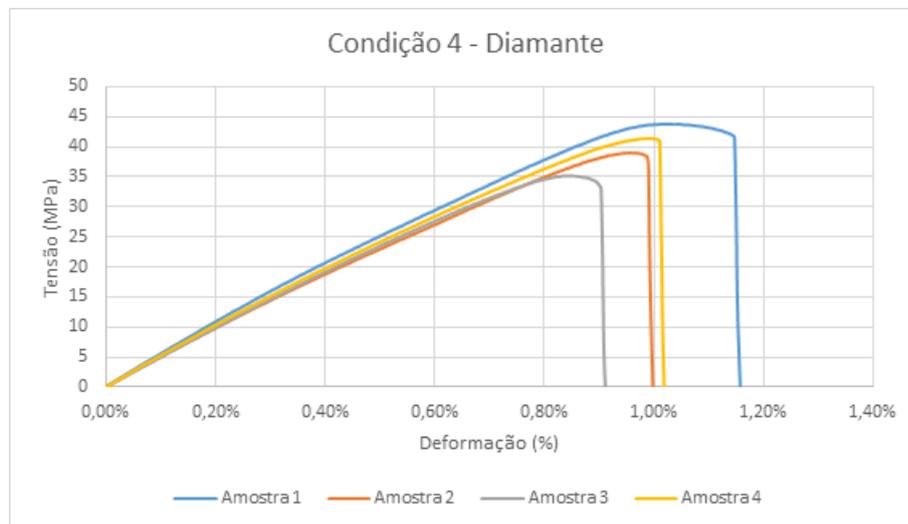


Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

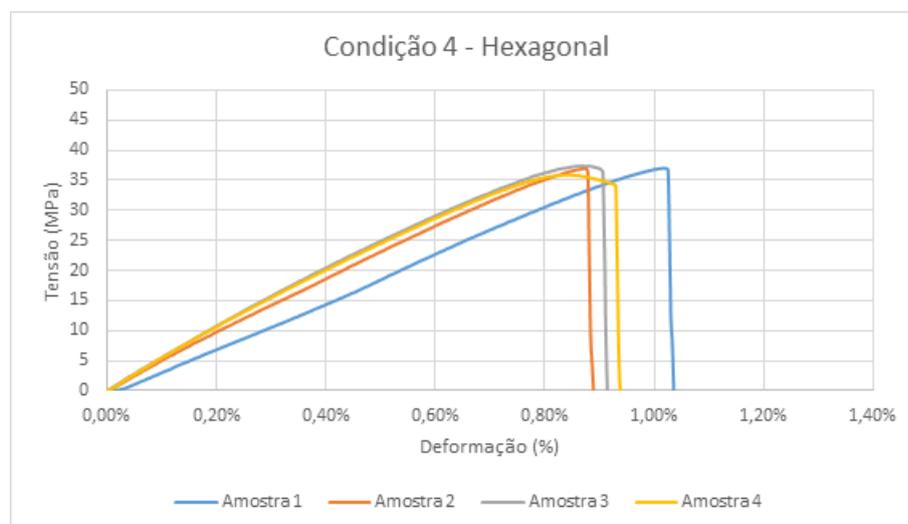
A Figura 19 tem-se a representação gráfica tensão x deformação das diferentes geometrias de preenchimento. O preenchimento do tipo diamante apresentou o maior valor de resistência a tração em comparação as outras amostras, porém a dispersão dos valores se mostrou maior em relação ao tipo hexagonal e linear. As geometrias com linhas simples são consideradas mais frágeis como apresentou o tipo de preenchimento linear, no entanto esse tipo de geometria é impresso com menor tempo (MARTINS, 2021).

**Figura 19** - Gráfico tensão x deformação para a condição 4 – tipo de preenchimento.

a) Diamante; b) Hexagonal; c) Linear. (continua)

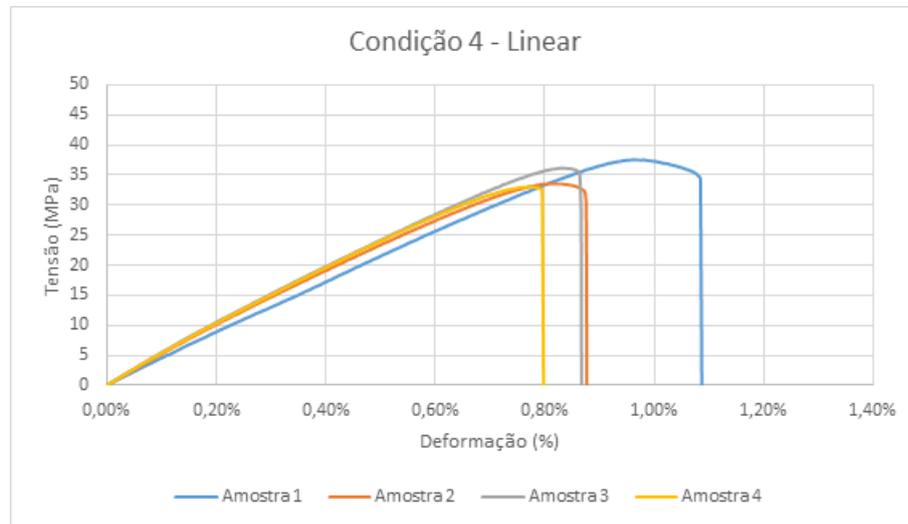


a)



b)

**Figura 19 - (continuação)** Gráfico tensão x deformação para a condição 4 – tipo de preenchimento. a) Diamante; b) Hexagonal; c) Linear.



c)

Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

Condição 5 - Velocidade de impressão.

No experimento realizado foram impressas amostras em três velocidades, 10 mm/s, 25 mm/s e 50 mm/s. Na Tabela 9 tem-se as dimensões das amostras da condição 5 – velocidade de impressão, não havendo grande variação das dimensões entre condições. A velocidade de impressão determina a velocidade no qual o cabeçote se move no decorrer da impressão da peça. Esse é um parâmetro que influencia diretamente no tempo de impressão, tornando mais curto, reduzindo o tempo de impressão (RIBEIRO *et al.*, 2021). Contudo, o aumento da velocidade pode causar resfriamento insuficiente e problemas de vibração na peça devido o movimento repentino do cabeçote em alta velocidade, podendo gerar imperfeições na qualidade da peça (ANTONELLI, 2019).

**Tabela 9** - Dimensões das peças nas diversas condições de velocidade.

Velocidade – 10 mm/s			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,2	3,4	63,3
Amostra 2	3,2	3,2	63,3
Amostra 3	3,2	3,5	63,3
Amostra 4	3,2	3,3	63,3
<b>Média</b>	<b>3,2</b>	<b>3,4</b>	<b>63,3</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

Velocidade – 25 mm/s			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,3	3,4	64,2
Amostra 2	3,1	3,2	63,2
Amostra 3	3,2	3,3	63,3
Amostra 4	3,2	3,3	63,3
<b>Média</b>	<b>3,2</b>	<b>3,3</b>	<b>63,5</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

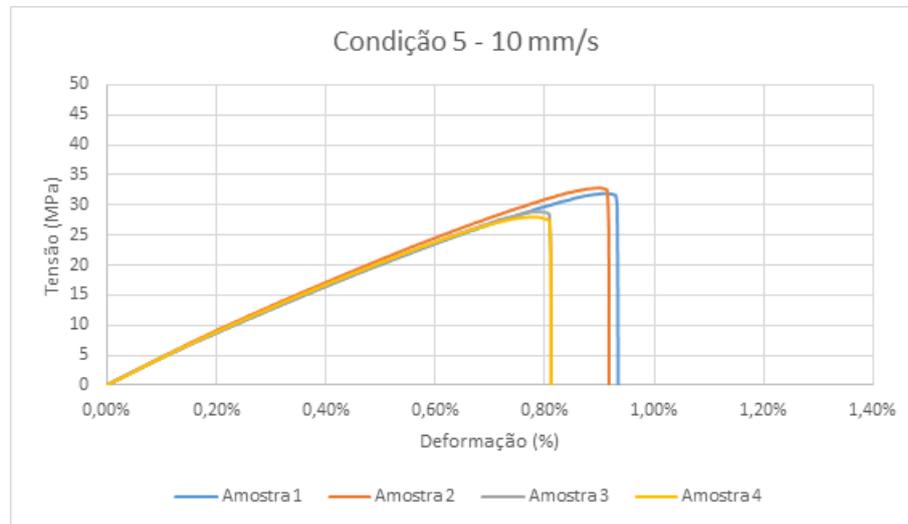
  

Velocidade – 50 mm/s			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Amostra 1	3,2	3,4	63,3
Amostra 2	3,3	3,3	63,4
Amostra 3	3,3	3,3	63,3
Amostra 4	3,2	3,3	63,5
<b>Média</b>	<b>3,3</b>	<b>3,3</b>	<b>63,4</b>
<b>Teórico</b>	<b>3,2</b>	<b>3,2</b>	<b>63,5</b>

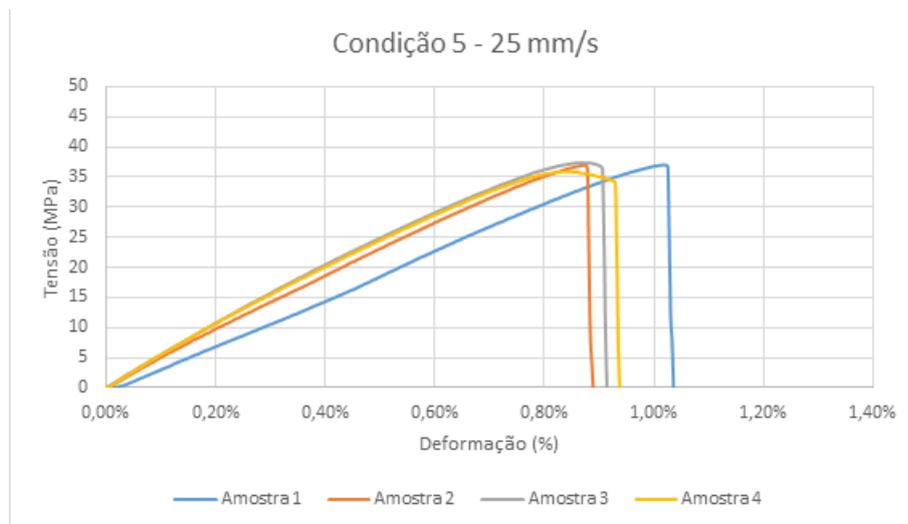
Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

Na Figura 20 pode-se observar que as amostras com diferentes velocidades de impressão obtiveram valores parecidos de tensão x deformação (Pior para condição de 10 mm/s), pois pode ter ocorrido alguma deformação nas peças devido à baixa velocidade de impressão. No entanto, as diferentes velocidades indicaram pouca interferência na qualidade da peça, sendo as amostras de maior velocidade (50 mm/s) se mostraram mais uniformes na análise.

**Figura 20** - Gráfico tensão x deformação para a condição 5 – velocidade de impressão. a) 10 mm/s; b) 25 mm/s. (continua)

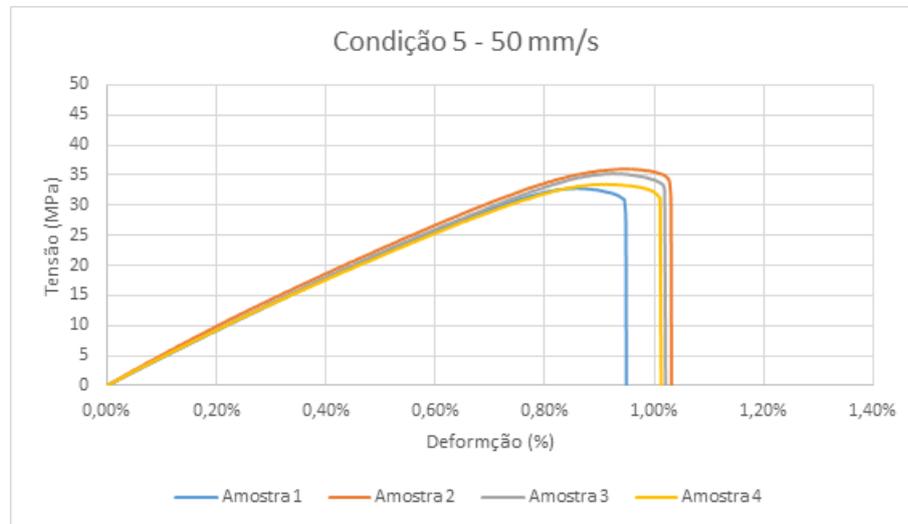


a)



b)

**Figura 20** - (continuação) Gráfico tensão x deformação para a condição 5 – velocidade de impressão. a) 10 mm/s; b) 25 mm/s; c) 50 mm/s.



c)

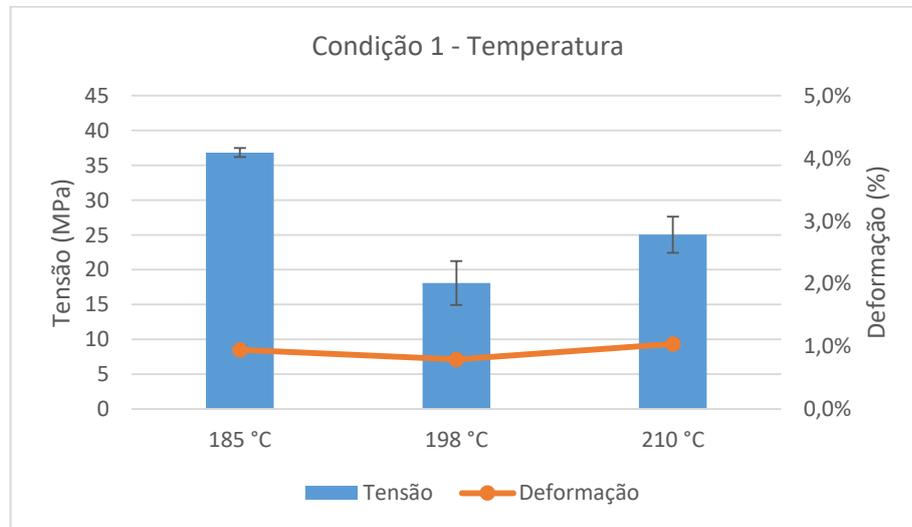
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

### **Análise dos dados médios de tensão x deformação**

Por meio das análises da máxima tensão e deformação para cada condição estudada, pode-se observar mais detalhadamente aquelas condições com melhores resultados avaliando a dispersão apresentada.

A Figura 21 apresenta os valores de máxima tensão de tração e deformação para as diferentes temperaturas de impressão. Pode se observar que a temperatura de 185 °C apresentou o maior valor de resistência a tração, exibindo pouca variabilidade na máxima tensão entre as amostras ensaiadas. Assim, trabalhar com menores temperaturas é benéfico para maiores valores de resistência a tração. As temperaturas de 198 e 210 °C apresentaram dispersões mais acentuadas entre as repetições, sendo um fator negativo juntamente a menor resistência a tração. A deformação entre as amostras foram similares, com a temperatura de 210 °C apresentando maior deformação média entre as condições de temperatura.

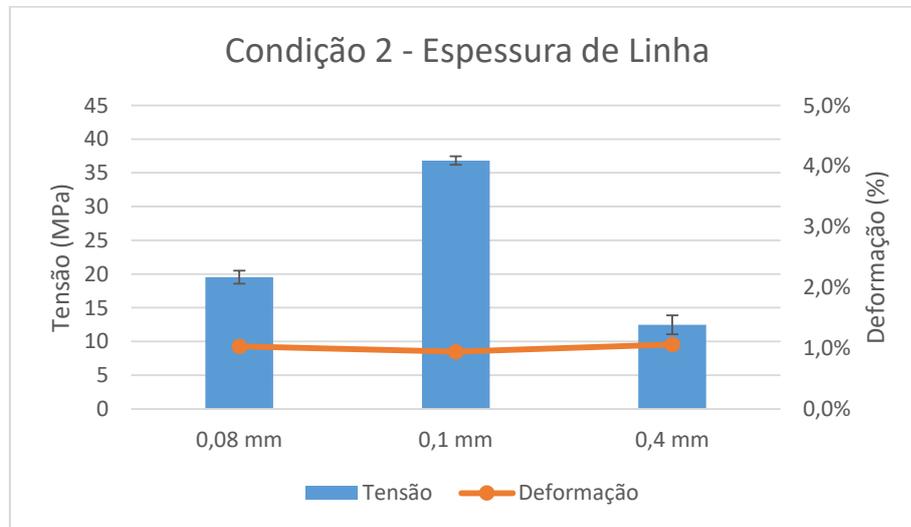
**Figura 21** - Valores de máxima tensão de tração e deformação para as diferentes temperaturas de impressão.



Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

A Figura 22 observa-se que a espessura de linha 0,1 mm apresentou maior resistência em relação as outras espessuras, exibindo maior tensão e menor dispersão nos dados. A espessura de 0,4 mm mostrou o maior valor de dispersão dos dados das amostras e menor resistência a tração. Assim, para este equipamento a menor espessura de linha até o valor de 0,1 mm tende a ser benéfico para o aumento da resistência da peça impressa. Os valores de deformação não apresentaram variabilidade relevante.

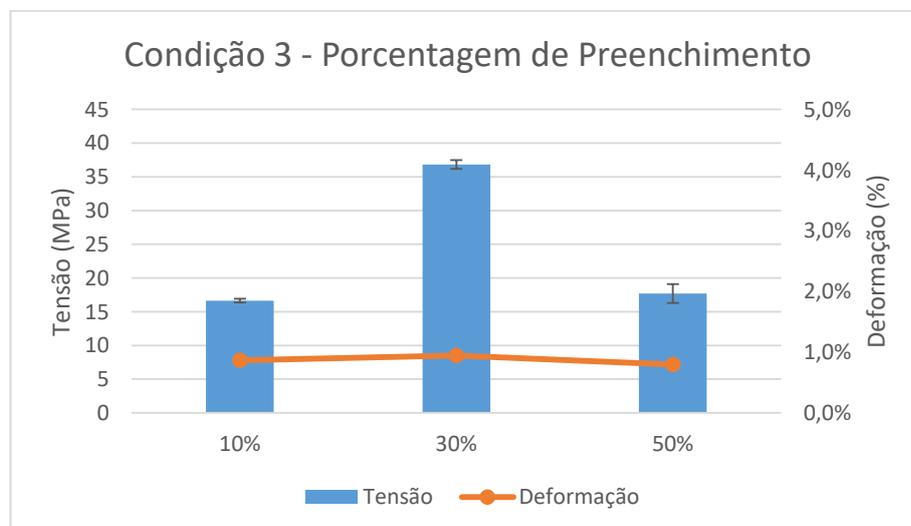
**Figura 22** - Valores de máxima tensão de tração e deformação para as diferentes espessuras de linha de impressão.



Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

A Figura 23 nota-se que a porcentagem de 30% apresenta o maior de valor de resistência a tração. O percentual de 50% e 10% que apresentaram valores estatisticamente similares de máxima resistência a tração. Podendo ter havido influência do tipo de preenchimento nas propriedades mecânicas das amostras, conforme identificado anteriormente.

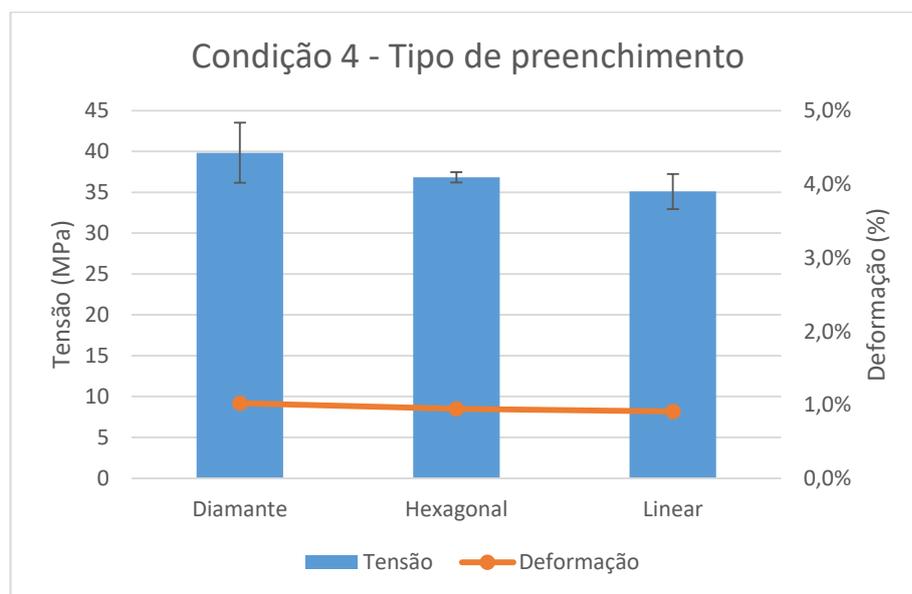
**Figura 23** - Valores de máxima tensão de tração e deformação para as diferentes porcentagens de preenchimento de impressão.



Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

A Figura 24 apresenta a máxima resistência a tração e deformação para a condição 4 sobre tipo de preenchimento. Os resultados de máxima resistência a tração apresentaram dados estatisticamente iguais dentro do desvio padrão. Em média, o preenchimento diamante poderia ser uma opção mais vantajosa, porém sua elevada dispersão é um fator negativo. Um ponto positivo para o preenchimento hexagonal foi sua baixa dispersão de resultados. Para a máxima deformação, a condição linear apresentou piores resultados que a hexagonal e diamante, devido sua estrutura.

**Figura 24** - Valores de máxima tensão de tração e deformação para os diferentes tipos de preenchimento de impressão.

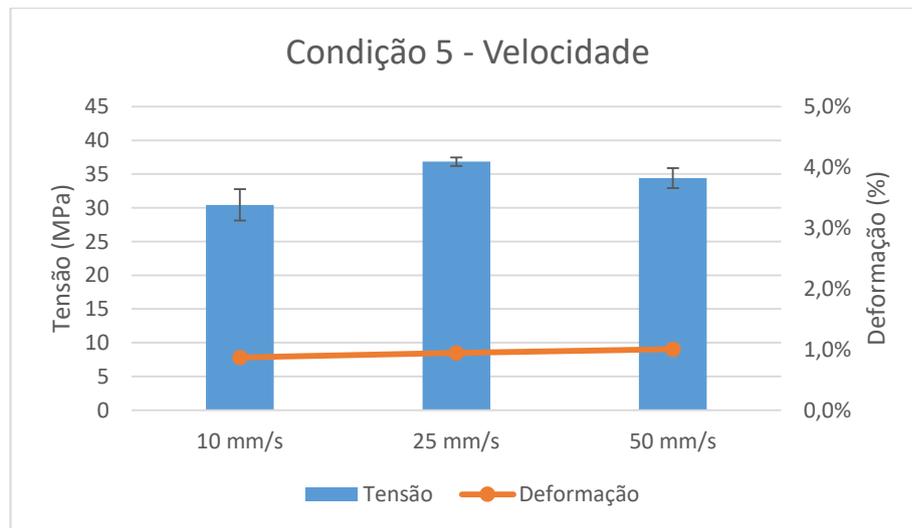


Fonte: Elaborado pela autora, (2023)

A Figura 25 apresenta o resultado da resistência a tração para as diferentes velocidades de impressão. A condição de velocidade 25 mm/s apresentou maior valor médio de resistência máxima a tração, bem como uma impressão mais uniforme pelo menor desvio padrão. A velocidade de 10 mm/s apresentou maior dispersão entre os dados obtidos e menor valor de máxima resistência. Isso demonstra que uma deposição de material muito lenta causa impacto direto na qualidade da impressão. Aumentar a velocidade para 50 mm/s pode ser benéfico pelo ganho de produtividade,

pois o mesmo apresentou valor de máxima resistência próximo a condição ideal de 25 mm/s. As máximas deformações são em média estatisticamente iguais.

**Figura 25** - Valores de máxima tensão de tração e deformação para as diferentes velocidades de impressão.



Fonte: Elaborado pela autora, (2023).

## 7 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos através do ensaio de tração de corpos de prova fabricados por impressão 3D utilizando o material PLA, variando os parâmetros como temperatura de impressão, altura de camada, velocidade de impressão, tipo e porcentagem de preenchimento têm-se as seguintes conclusões:

- Todas as condições foram capazes de imprimir corpos de prova com dimensões próximas ao modelo esperado.
- Com relação a temperatura de impressão, a menor temperatura de 185 °C apresentou maiores valores de resistência a tração. Assim, quanto maior a temperatura de impressão, tende-se a ter peças menos resistentes.
- Para a condição de espessura de linha o comportamento das amostras de 0,1 mm mostraram-se mais eficientes que as demais espessuras de 0,8 e 0,4 mm, pois

quanto menor a espessura das camadas, maior é aderência do material, resultando no aumento da resistência, sendo a espessura 0,08 prejudicada em função do bico da extrusora.

- Na condição de porcentagem de preenchimento, as condições de 10 e 50% obtiveram menor resistência mecânica em relação as peças impressas com 30% de preenchimento. Era esperado que quanto maior o preenchimento maior seria a resistência. Uma teoria para este comportamento seria a combinação de 50% com o perfil de preenchimento de geometria hexagonal.
- O tipo de preenchimento com geometria diamante apresenta maiores valores de resistência mecânica, porém com alta dispersão. O tipo hexagonal apresentou menor dispersão e valor de média estatisticamente igual.
- A velocidade de impressão de 25 mm/s possui os melhores resultados de resistência mecânica. A escolha de 50 mm/s pode ser interessante pois reduz em 50% o tempo de impressão, com pouca perda em relação a resistência mecânica.
- O presente estudo mostrou que os parâmetros de impressão podem influenciar de forma positiva ou negativa a resistência mecânica de peças, sendo necessário realizar de forma adequada escolha de parâmetros para obter melhores propriedades mecânicas das peças.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, T. P. *et al.* **Análise da influência do padrão de preenchimento e da altura de camada de deposição na tensão de ruptura de corpos de prova fabricados em poli ácido láctico (PLA) a partir da impressão 3D.** Salvador: Revista Desafios, 2021.
- AMBRÓS, G. S. **Influência dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de corpos de provas impressos em PLA utilizando modelagem por fusão e deposição.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2019.
- ANTONELLI, L. A. **Impressora 3D de baixo custo.** Toledo: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- ASSIS, M. A. P. de. **Impressão 3D, modelos de negócios e os novos cenários para a propriedade intelectual.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- ASTM D638-10: **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** 2010. American Society for Testing and Materials.
- BESKO, M. *et al.* **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D.** Curitiba: Faculdade Opet, 2017.
- CABREIRA, V. **Avaliação dos parâmetros de processamento em impressão 3D nas propriedades do poliácido láctico.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- 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.** Russas: Universidade Federal do Ceará, 2022.
- DOMINGOS, C. M. **Análise Comparativa das Propriedades do Poliácido Láctico (PLA) de Fornecedores Distintos para Aplicações em Manufatura Aditiva: Uma avaliação dos parâmetros de impressão na busca da otimização do processo de impressão 3D via Fabricação Filamento Fundido (FFF).** Blumenau: Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.
- 3D FILA. Filamento PLA azul. Belo horizonte: 3D FILA, 2023. Disponível em: <https://3dfila.com.br/produto/filamento-pla-azul/> Acesso em: 26 de Jun de 2023
- FERNANDES, J. F. M. **Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA.** Lisboa: Técnico Lisboa, 2016.

GALINA, D. M. et al. **Influência da espessura de camada de impressão 3D nas propriedades mecânicas de peças fabricadas com o copolímero ABS**. Litorâneo: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, 2018.

GOZZO, L. F. **Projeto e construção de uma impressora 3D baseada na tecnologia da modelagem por fusão e deposição**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

INSTRON. **Sistemas de ensaio universais industriais até 2000 KN**. Instron, 2019. Disponível em: Sistemas de Ensaio Universais Industriais até 2000 kN - Instron. Acesso em: 28 de novembro de 2022.

MAKERBOT REPLICATOR MINI. **Reference Guide**. [S.l.]: LLC, 2015.

MARTINS, J. F. de R. **Estudo do efeito do tipo de preenchimento no comportamento mecânico de peças fabricadas por fused deposition modelling usando o compósito pla-fibra de carbono**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2021.

MEDEIROS, M. M. *et al.* **Influência da densidade de preenchimento e do número de perímetros nas propriedades mecânicas de peças fabricadas em PLA a partir da impressão 3D**. Salvador: CALIBRE, 2020.

MORANDINI, M. M.; VECHIO, G. H. D. **Impressão 3D, tipos e possibilidades: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências**. Interface Tecnológica – v. 17 n. 2 (2020).

RIBEIRO, A. M. V. et al. **Impressora 3D creality 10 manual do software um guia completo do ultimaker cura 3D**. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

ZAPAROLLI, D. **O avanço da impressão 3D**. São Paulo: FAPESP, 2019.