

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL - CAMPUS IBIRUBÁ  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**VITOR CARGNIN MOLINARI SILVA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Estudo do comportamento mecânico em diferentes preenchimentos de corpo de prova  
feitos por uma impressora 3D**

**Ibirubá**

**2023**

VITOR CARGNIN MOLINARI SILVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Estudo do comportamento mecânico em diferentes preenchimentos de corpo de prova feitos  
por uma impressora 3D

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Banca Examinadora designada pelo Curso de  
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia, Campus  
Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador : Prof. Cristiano Kulman, Dr. Eng

Ibirubá

2023

Estudo do comportamento mecânico em diferentes preenchimentos de corpo de prova feitos por uma impressora 3D

**Vitor Cargin Molinari Silva**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 06 de Dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Cristiano Kulman, Dr. Eng.

Instituto Federal do Rio Grande do Sul, campus Ibirubá.

Prof. Alexandre Bittencourt De Sá, Dr Eng

Instituto Federal do Rio Grande do Sul, campus Ibirubá.

Prof. Luciano Machado Cirino, Dr. Eng.

Instituto Federal do Rio Grande do Sul, campus Ibirubá.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer à minha mãe Adriana, meu pai Luis Cloves e meu irmão Bernardo pelo apoio e incentivo durante todos os anos de graduação.

Agradecer à minha namorada Paola por estar ao meu lado, me apoiando e incentivando durante minha graduação.

Aos meus familiares, em especial ao meu primo Pedro, que de alguma forma ajudaram de qualquer forma nesta caminhada.

Agradeço ao meu orientador Eng. Dr. Cristiano Kulman pelo tempo e orientação disponibilizados na realização deste trabalho.

Agradeço ao técnico de laboratório Iuri Quaglia, que ajudou nos ensaios de tração.

Agradeço ao IFRS campus Ibirubá por disponibilizar os laboratórios para as pesquisas e ensaios deste trabalho, e aos professores por todo o conhecimento adquirido durante a graduação.

Agradeço à banca avaliadora por disponibilizar seu tempo e contribuir para enriquecer este trabalho.

## RESUMO

A tecnologia de impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, destacou sua relevância na indústria devido à flexibilidade e eficiência na produção de peças e protótipos. O foco está na Modelagem de Deposição Fundida (FDM), onde o preenchimento interno das peças é crucial para características como resistência, flexibilidade e economia de material. O estudo visa explorar a influência da variação dos parâmetros de preenchimento nas propriedades mecânicas dos objetos produzidos por FDM, visando otimizar a eficiência do processo e garantir a qualidade das peças. Após a impressão dos corpos de prova seguindo parâmetros da norma ASTM D638, foram verificadas alterações na espessura após a impressão dos corpos de prova, especialmente no PLA, indicando a necessidade de ajustes nas configurações de impressão, embora dentro das tolerâncias normativas. As análises focaram na influência dos padrões de preenchimento na resistência à tração, destacando o Giroide em PLA pela superioridade em resistência, enquanto o Cúbico mostrou consistência. No ABS, o padrão Ziguezague revelou resistência ligeiramente superior, mas com maior variabilidade. A análise estrutural evidenciou a costura de impressão como ponto crítico na fragilidade dos corpos de prova, indicando a importância da otimização dos parâmetros de impressão. Em síntese, o estudo ressalta a importância da escolha criteriosa de materiais, configurações de impressão e padrões de preenchimento para assegurar a qualidade e consistência de peças impressas em 3D.

**Palavras chave:** Impressão 3D; Modelagem por fusão e deposição (FDM); PLA; ABS; Padrões de preenchimento; .

## **ABSTRACT**

The 3D printing technology, also known as additive manufacturing, has highlighted its relevance in the industry due to its flexibility and efficiency in producing parts and prototypes. The focus is on Fused Deposition Modeling (FDM), where the internal filling of parts is crucial for characteristics such as strength, flexibility, and material economy. The study aims to explore the influence of variation in filling parameters on the mechanical properties of objects produced by FDM, aiming to optimize the process efficiency and ensure the quality of parts. After printing test specimens following ASTM D638 standard parameters, changes in thickness were observed, especially in PLA, indicating the need for adjustments in printing settings, although within normative tolerances. The analyses focused on the influence of filling patterns on tensile strength, highlighting the Giroide in PLA for its superior strength, while the Cubico showed consistency. In ABS, the Ziguezague pattern revealed slightly higher strength but with greater variability. Structural analysis highlighted the print seam as a critical point in the fragility of test specimens, indicating the importance of optimizing printing parameters. In summary, the study emphasizes the importance of careful selection of materials, printing configurations, and filling patterns to ensure the quality and consistency of 3D-printed parts.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Representação das principais etapas de impressões 3D.....	11
Figura 2: Processo FDM.....	12
Figura 3: Processo SLA.....	13
Figura 4: Processo DLP.....	14
Figura 5: Processo SLS.....	15
Figura 6: Processo Binder Jetting.....	15
Figura 7: Processo de jateamento de material.....	16
Figura 8: Padrões de preenchimento no Cura.....	21
Figura 9: Fluxograma de etapas experimentais e de análise.....	23
Figura 10: Corpo de prova norma ASTM D638-22.....	24
Figura 11: Impressora Ender 3 V2.....	27
Figura 12: Impressora CR-200B.....	28
Figura 13: Interface UltiMaker Cura versão 5.4.0.....	29
Figura 14: Máquina de ensaio de tração.....	30
Figura 15: Tensão x Deformação Giroide PLA.....	34
Figura 16: Tensão x Deformação Cúbico PLA.....	34
Figura 17: Tensão x Deformação Ziguezague PLA.....	35
Figura 18 : Tensão máxima PLA.....	37
Figura 19 : Tensão média PLA.....	37
Figura 20: Tensão x Deformação Giroide ABS.....	38
Figura 21: Tensão x Deformação Cúbico ABS.....	38
Figura 22: Tensão x Deformação Ziguezague ABS.....	39
Figura 23: Tensão máxima ABS.....	40
Figura 24: Tensão média ABS.....	41
Figura 25: Ruptura dos corpos de prova.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição dos padrões de preenchimento.....	21
Tabela 2: Dimensões do corpo de prova.....	24
Tabela 3: Especificação técnica do filamento ABS.....	25
Tabela 4: Especificação técnica do filamento PLA.....	25
Tabela 5: Parâmetros de impressão fixos.....	26
Tabela 6: Parâmetros de impressão de cada material.....	26
Tabela 7: Padrão de preenchimento.....	26
Tabela 8: Espessura medida do corpo de prova PLA.....	31
Tabela 9: Espessura medida do corpo de prova ABS.....	32



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	10
1.2 OBJETIVOS.....	10
1.2.1 Objetivos específicos.....	10
<b>2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....</b>	<b>11</b>
2.1 INTRODUÇÃO À IMPRESSÃO 3D: CONCEITOS BÁSICOS E FUNCIONAMENTO.....	11
2.1.1 Modelagem de deposição fundida (FDM).....	12
2.1.2 Estereolitografia SLA e DLP.....	13
2.1.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS).....	14
2.1.4 Binder Jetting.....	15
2.1.5 Material Jetting ou Jateamento de material.....	16
2.2 MODELAGEM CAD.....	16
2.3 CONVERSÃO FORMATO STL.....	17
2.4 PROGRAMA DE PRÉ-PROCESSAMENTO EM FATIAS DE SEÇÃO TRANSVERSAL.....	17
2.5 MATÉRIA-PRIMA PARA IMPRESSÕES 3D.....	18
2.6 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO.....	19
2.6.1 Espessura da camada.....	19
2.6.2 Velocidade de impressão.....	19
2.6.3 Densidade de preenchimento.....	20
2.6.4 Padrão de preenchimento.....	20
2.7 COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	22
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	24
3.2 IMPRESSÃO DOS CORPO DE PROVA.....	25
3.2.1 Impressoras.....	27
3.2.2 Programa ultimaker cura versão 5.4.0.....	28
3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	29
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>31</b>
4.1 CORPOS DE PROVA.....	31
4.2 RESULTADOS ENSAIO DE TRAÇÃO.....	32
4.2.1 Ensaio PLA.....	33
4.2.1 Ensaio ABS.....	38
4.3 RUPTURA CORPOS DE PROVA.....	41
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>45</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D, também chamada de manufatura aditiva (*additive manufacturing* – AM), é uma técnica de produção onde o material é colocado em camadas e assim formando a geometria desejada a partir de um modelo digital. Segundo Volpato (2017), o processo de construção é totalmente automatizado e ocorre de maneira relativamente rápida, se comparado aos meios tradicionais de fabricação.

A tecnologia de impressão de modelos 3D tem conquistado um espaço de destaque no cenário industrial devido à sua notável flexibilidade e eficiência na produção de peças e protótipos. A capacidade de criar objetos tridimensionais com precisão e rapidez tornou-se uma ferramenta valiosa em diversas aplicações como engenharia, medicina, artes e espacial. No entanto, para aproveitar todo o potencial dessa tecnologia, é imprescindível compreender o impacto dos parâmetros de fabricação nas propriedades mecânicas.

Nesse contexto, este trabalho se propõe a explorar um aspecto fundamental no processo de impressão 3D: a influência da variação dos parâmetros de preenchimento nas características dos objetos produzidos. As escolhas relacionadas a esses parâmetros não só afetam a qualidade das peças finais, mas também têm implicações significativas no custo e no tempo de impressão.

Para o processo de FDM (Modelagem de Deposição Fundida), o preenchimento interno das peças desempenha um papel fundamental, influenciando características como resistência, flexibilidade, economia de material, peso e tempo de impressão. Compreender como cada parâmetro afeta o projeto é de extrema importância antes de iniciar qualquer impressão.

Este estudo busca preencher uma lacuna no conhecimento, oferecendo informações detalhadas sobre o impacto das alterações nos padrões de preenchimento nas propriedades mecânicas dos materiais produzidos por meio da tecnologia FDM. A compreensão aprofundada dessa relação possibilitará a orientação no desenvolvimento de diretrizes mais precisas para a produção de peças em 3D, otimizando a eficiência do processo e garantindo a qualidade das peças fabricadas.

A importância dessa pesquisa reside na sua capacidade de contribuir para a evolução e aprimoramento contínuo da tecnologia de impressão 3D, tornando-a ainda mais viável e eficaz em uma variedade de aplicações industriais de prototipagem. Portanto, este trabalho busca lançar luz sobre um aspecto essencial desse campo promissor, oferecendo valiosas perspectivas que beneficiarão a indústria e a comunidade acadêmica.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A tecnologia de impressão de modelos 3D tem se mostrado um campo muito promissor no setor industrial devido a sua flexibilidade e capacidade de produção de protótipos rápidos. No entanto, é fundamental o conhecimento sobre seus parâmetros de fabricação, pois eles apresentam grande influência no comportamento mecânico dos materiais impressos.

A necessidade de se obter conhecimentos mais específicos quanto a influência de mudança dos parâmetros de preenchimento e densidade empregados nos modelos 3D, torna-se um ponto a ser definido em um projeto de impressão 3D, pois as escolhas feitas vão afetar diretamente características da peça final, custo e tempo de impressão.

Os resultados obtidos com o estudo podem orientar o desenvolvimento de diretrizes para produção de peças em 3D, mostrando como a mudança de padrão de preenchimento tem efeito nas características mecânicas dos materiais impressos pelo processo de FDM.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo é realizar um estudo sobre a mudança de parâmetros de preenchimentos e densidade de modelos de impressão 3D, pelo processo de FDM. A fim de comparar mudanças de suas características mecânicas por meio de ensaios de resistência em corpos de prova.

### 1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudar parâmetros de densidade de preenchimento;
- Estudar diferentes formatos de preenchimento;
- Comparar a diferença de comportamento mecânico com a mudança de material de fabricação;
- Desenvolver modelos de corpos de prova para avaliar a resistência mecânica através de ensaios;
- Avaliar e comparar os dados obtidos;
- Propor recomendações de parâmetros de processos para a impressão 3D por FDM.





## 2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

### 2.1 INTRODUÇÃO À IMPRESSÃO 3D: CONCEITOS BÁSICOS E FUNCIONAMENTO

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, é uma tecnologia revolucionária que tem transformado a maneira como os objetos são projetados, prototipados e produzidos no mundo atual. Diferentemente dos métodos tradicionais de fabricação, que envolvem a remoção de material (como na usinagem) ou a moldagem (como na injeção de plástico), a impressão 3D constrói objetos camada por camada, adicionando material conforme necessário. Essa abordagem oferece uma flexibilidade sem precedentes, permitindo a criação de uma ampla gama de produtos, desde pequenas peças de precisão até estruturas arquitetônicas complexas (SILVA,2022).

Segundo Volpato (2018) a criação consiste da modelagem de um modelo 3D digital usando um sistema CAD (desenho assistido por computador), onde após é utilizado um outro programa que realiza o fatiamento, dividindo o objeto em camadas, etapas estas mostradas na Figura 1. Será repassado as informações e percursos a um sistema CAM (manufatura auxiliada por computador), gerando assim instruções detalhadas através de controles numéricos.

Figura 1 : Representação das principais etapas de impressões 3D.

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte: VOLPATO (2018)

Segundo Silva (2022), as principais técnicas de impressão 3D são: Modelagem de deposição fundida (FDM), Estereolitografia (SLA), Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Binder Jetting e Material Jetting.

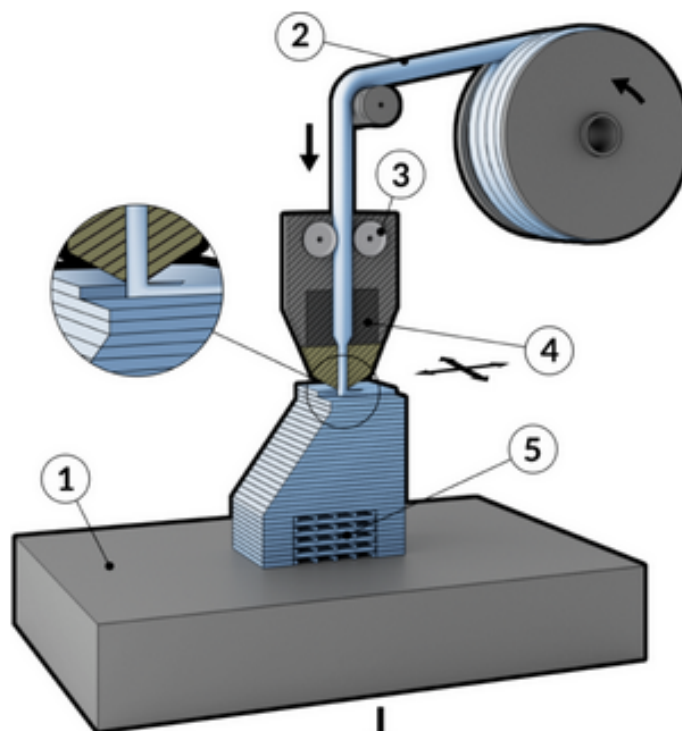
### 2.1.1 Modelagem de deposição fundida (FDM)

O processo consiste na extrusão, geralmente um polímero em forma de filamento, em uma plataforma aquecida. Para deposição uniforme do material é utilizado um rolo alimentador, que faz com que o material gere uma pressão no bico. Os filamentos são aquecidos em uma câmara até poder ser maleados na forma desejada através de extrusão pelo bocal (MALAVOLTA, 2020).

Nesse tipo de impressão é possível fazer o uso de diversos tipos de materiais, como: PLA (Ácido Polilático), ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PETG (Copolímero de Etileno Tereftalato e Glicol), TPU (Poliuretano Termoplástico), Nylon, PVA (Álcool Polivinílico), HIPS (Poliestireno de Alto Impacto), PC (Policarbonato), Metais Compostos, Compostos Avançados, polifenilsulfona (PPSF), além de cera e poliéster (VOLPATO, 2007; SILVA, 2022).

Na figura 2 é mostrado o esquema de impressão 3D, em uma plataforma de construção móvel (1). Um filamento de plástico (2) é fornecido por meio de rolos (3), impulsionando o filamento através de um bico aquecido (4). Nesse ponto, o filamento é aquecido e subsequentemente expelido do bocal a uma velocidade constante, com o propósito de construir uma seção transversal correspondente ao modelo CAD (MANUFACTURING GUIDE, 2023).

Figura 2: Processo FDM

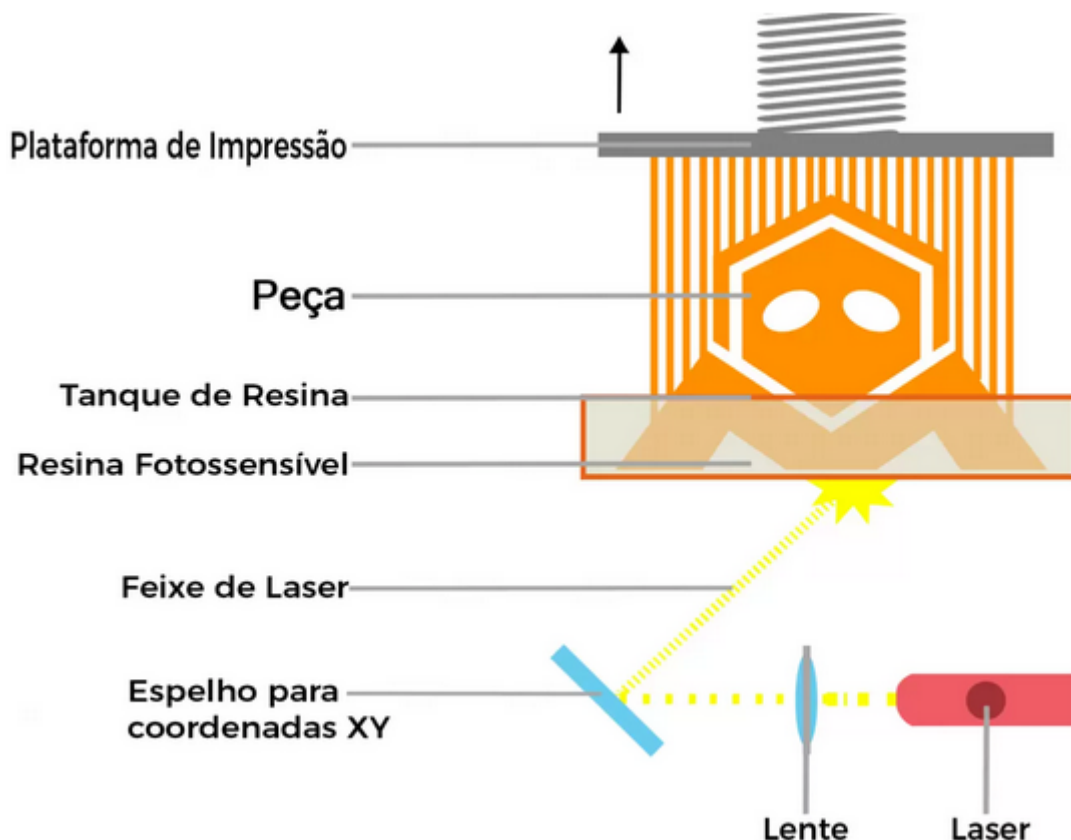


Fonte: MANUFACTURING GUIDE (2023).

### 2.1.2 Estereolitografia SLA e DLP

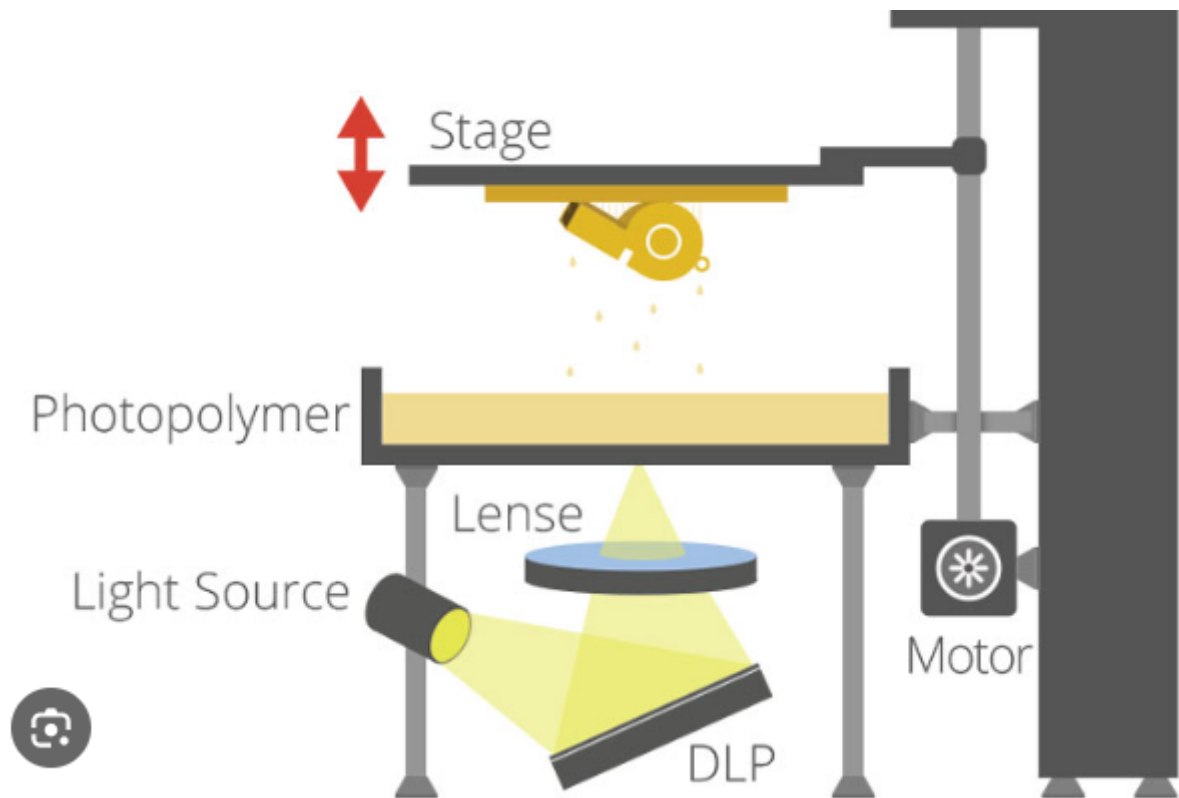
Na Estereolitografia (SLA) (Figura 3) e no processamento digital de luz (DLP) (Figura 4), os modelos tridimensionais são produzidos a partir de foto-polímeros líquidos que solidificam quando expostos à luz ultravioleta. No caso da DLP, em vez de um laser, um projetor digital é utilizado para guiar o endurecimento do polímero em camadas sucessivas. A plataforma que sustenta a peça é gradualmente abaixada, permitindo que o líquido do tanque cubra a superfície recém-criada para formar a próxima camada. Esse processo é repetido até que o protótipo esteja concluído. Após a impressão, os suportes de material devem ser removidos e o modelo é curado em um forno ultravioleta (UV) para garantir sua total solidificação. Tanto a SLA quanto a DLP são técnicas de impressão 3D que utilizam foto-polímeros líquidos e luz ultravioleta para criar objetos tridimensionais camada por camada (HOTZA, 2009; SILVA, 2022).

Figura 3: Processo SLA.



Fonte: WISHBOX (2019).

Figura 4: Processo DLP

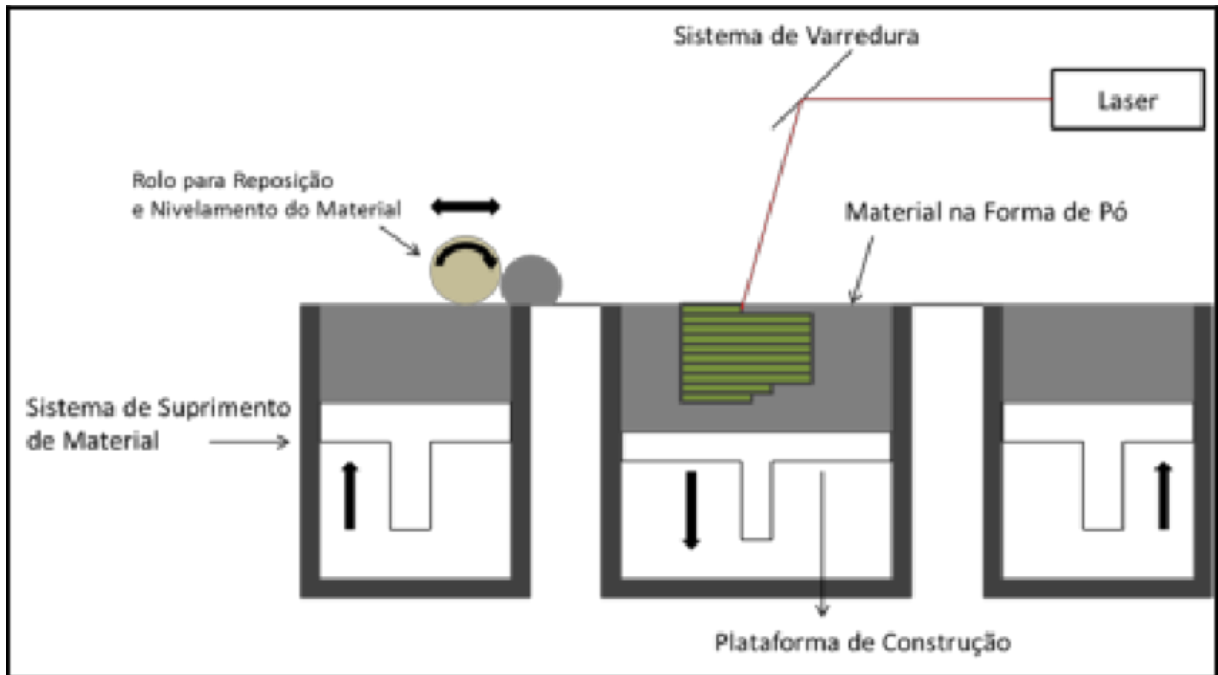


Fonte: CRUZ (2019)

### 2.1.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

A Sinterização Seletiva a Laser (SLS) (Figura 5) é um método de fabricação que utiliza um feixe de laser para sinterizar seletivamente partículas de material em pó, construindo peças tridimensionais camada por camada. Este processo oferece inúmeras vantagens, incluindo a capacidade de trabalhar com diversos materiais como polímeros termoplásticos, como poliamida (nylon), polipropileno, poliestireno e polietileno e assim produzir peças com alta precisão. O processo de sinterização seletiva permite a criação de geometrias complexas sem a necessidade de suportes adicionais (DOMINGOS, 2022; SILVA, 2022).

Figura 5: Processo SLS

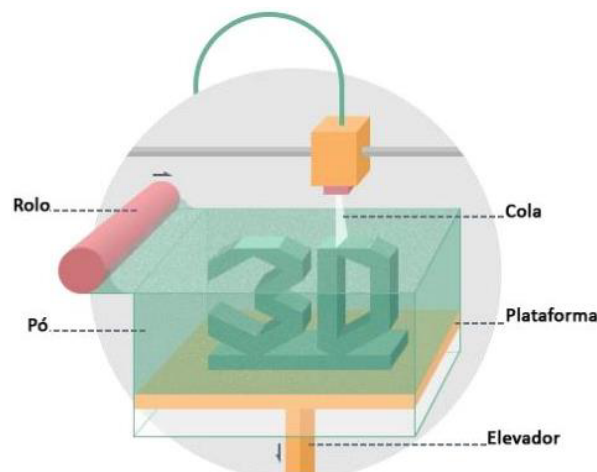


Fonte: GIORDANO et al (2016)

#### 2.1.4 Binder Jetting

O Binder Jetting (Figura 6) é um processo que emprega a deposição controlada de um agente aglutinante em um leito de material em pó para criar objetos tridimensionais de forma eficaz. Oferece a capacidade de produzir peças em uma variedade de materiais, incluindo metais, cerâmicas e polímeros. É um processo rápido e eficiente, permitindo a produção de objetos complexos com alta precisão e detalhamento. É amplamente utilizado na indústria para a fabricação de peças prototipadas, ferramentas, componentes de engenharia e até mesmo produtos finais (HOTZA, 2009; SILVA, 2022; DOMINGOS, 2022).

Figura 6: Processo Binder Jetting.



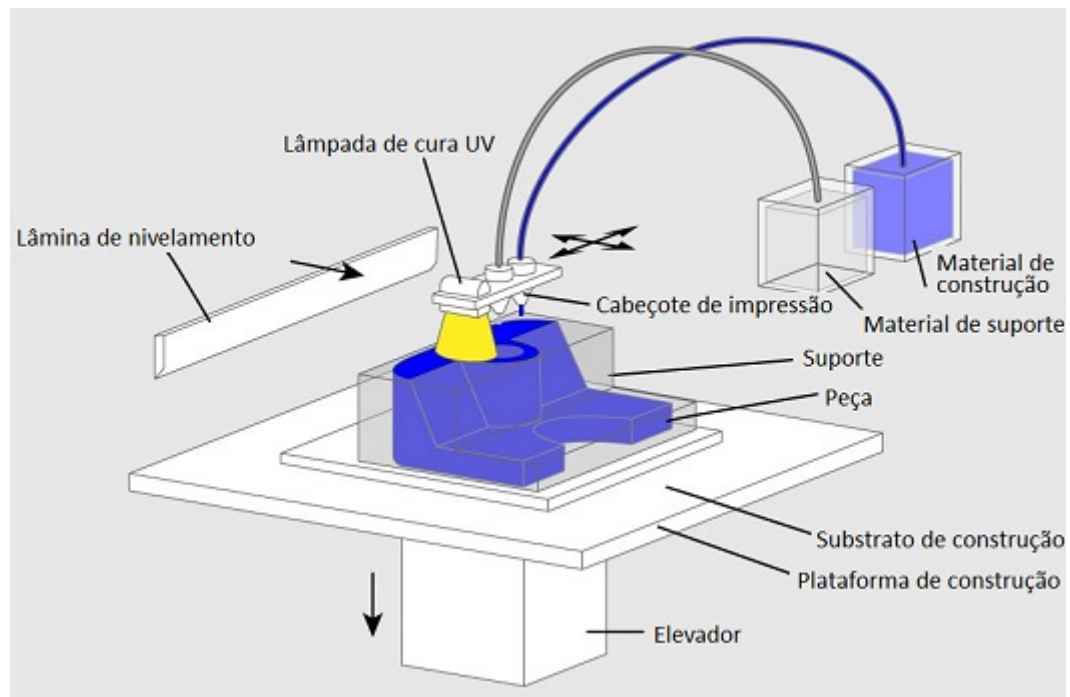
Fonte: SILVA (2022).



### 2.1.5 Material Jetting ou Jateamento de material

Essa técnica utiliza a extrusão controlada de materiais líquidos, geralmente resinas termofixas, para construir objetos camada por camada (Figura 7). O processo de jateamento de material é conhecido por sua versatilidade de materiais, permitindo a utilização de resinas de diferentes propriedades mecânicas e estéticas. É aplicado em uma variedade de setores, incluindo *design* de produtos, odontologia, joalheria, engenharia e medicina, para a criação de protótipos, peças personalizadas e componentes de alta precisão (DIAMANTOPOULOU, 2021).

Figura 7: Processo de jateamento de material.



Fonte: RODA (2018).

## 2.2 MODELAGEM CAD

Na impressão 3D, a primeira etapa do processo é a modelagem tridimensional do objeto que se deseja fabricar. Isso é feito utilizando um programa CAD. Tem-se, nesta etapa, a opção de criar uma nova peça do zero, utilizando as ferramentas de modelagem disponíveis no programa CAD, ou pode importar um arquivo CAD já existente, caso deseje reproduzir ou modificar um projeto pré-existente (HOTZA, 2009).

A modelagem se dá em um ambiente totalmente digital, onde é possível visualizar, analisar e editar o objeto, seja em 2D ou 3D. Também é possível realizar o uso de um *scanner* 3D ou imagem de um tomógrafo para gerar uma peça a partir de um peça física. Diferente de

um desenho normal, com o CAD é possível detalhar informações que vão facilitar o projeto, tais como materiais, procedimentos de fabricação, montagem, dimensões e tolerâncias (3DLAB, 2021).

### 2.3 CONVERSÃO FORMATO STL

Os programas de CAD utilizam algoritmos diferentes para representar objetos sólidos, mas o formato padrão para os programas CAM de impressoras 3D é o STL (*Standart Tessellation Language*). O segundo passo é converter o arquivo CAD para o formato STL, que usa triângulos planos para representar objetos tridimensionais. Embora o STL não possa representar curvas precisamente, aumentar o número de triângulos melhora a aproximação, mas aumenta o tamanho do arquivo. Projetistas precisam equilibrar precisão e tamanho do arquivo ao criar um STL útil. Esse processo é universal para todas as técnicas de impressão 3D (HOTZA,2009).

### 2.4 PROGRAMA DE PRÉ-PROCESSAMENTO EM FATIAS DE SEÇÃO TRANSVERSAL

Os fatiadores 3D desempenham um papel fundamental na transformação de objetos digitais em arquivos GCODE<sup>1</sup>. Sua principal função é subdividir o objeto em uma série de camadas e estabelecer as coordenadas que a impressora 3D seguirá durante o processo de fabricação. Este programa oferece uma gama de opções para configurar estratégias de impressão, incluindo a definição de velocidade, espessura das camadas, densidade de preenchimento do objeto e parâmetros de perímetros, proporcionando controle preciso sobre o resultado final da impressão(REIS, 2021).

O processo de fatiamento envolve a divisão do modelo 3D em camadas finas, geralmente tão finas quanto o filamento da impressora pode depositar, e a geração de instruções para o movimento do cabeçote de impressão e a extrusão de material em cada camada.

Esse programa tem a capacidade de criar estruturas de suporte que servem para manter estáveis as partes mais frágeis do modelo, como projeções, cavidades internas e superfícies finas. É importante notar que cada fabricante de impressoras 3D disponibiliza seu próprio programa de pré-processamento, desenvolvido especificamente para essa tarefa (HOTZA,2009).

---

<sup>1</sup> Os arquivos GCODE consistem em uma sequência de comandos alfanuméricos que instruem a máquina sobre movimentos, velocidades, posições e funções específicas. Cada linha de código contém diretrizes precisas, incluindo o deslocamento e posicionamento dos eixos, controle de velocidade, ativação de ferramentas e outras operações (BAIÃO, 2012).

O programa irá criar a trajetória que a impressora deverá percorrer em cada uma das camadas. Assim o programa gera um arquivo no formato que é responsável de passar as instruções de fabricação (FOGGIATTO, 2005).

## 2.5 MATÉRIA-PRIMA PARA IMPRESSÕES 3D

Dois materiais se destacam como pilares da impressão 3D: PLA e ABS. Ambos apresentam características que os tornam importantes na escolha de materiais para uma ampla gama de aplicações, desde prototipagem rápida até produção de peças funcionais. O PLA, com sua origem sustentável e facilidade de uso, contrasta com o ABS, cuja resistência e durabilidade o tornam ideal para aplicações mecânicas e industriais (SANTANA, 2015).

O PLA é um dos materiais mais populares na impressão 3D devido às suas propriedades favoráveis e à natureza biodegradável. Ele é derivado de fontes renováveis, como amido de milho ou cana-de-açúcar, o que o torna ecologicamente correto e de baixo custo. O PLA é conhecido por sua facilidade de impressão, baixo odor e baixa toxicidade durante o processo de impressão. Além disso, ele apresenta pouca deformação térmica, o que é vantajoso para peças com geometrias complexas. No entanto, o PLA pode ser menos resistente a altas temperaturas e impactos em comparação com outros materiais. Isso o torna mais adequado para objetos decorativos, protótipos e peças de uso não intensivo (SANTANA, 2015; SILVA, 2022).

O ABS é outro material comumente usado na impressão 3D e é conhecido por sua resistência e durabilidade. É amplamente utilizado na fabricação de peças mecânicas e funcionais, bem como protótipos que requerem maior resistência a impactos e temperaturas mais altas. O ABS é derivado de produtos petroquímicos e é reconhecido por sua resistência a solventes e propriedades isolantes. No entanto, o processo de impressão do ABS pode ser mais desafiador devido à tendência de deformação térmica, que pode levar a problemas de empenamento. Além disso, a impressão com ABS normalmente exige um ambiente de impressão mais controlado devido à emissão de odores e vapores potencialmente irritantes (SANTANA, 2015; GALINA, 2018).

O PLA é mais adequado para iniciantes na impressão 3D devido à sua facilidade de uso, baixa deformação térmica e baixa toxicidade. Ele é excelente para criar objetos decorativos, brinquedos e itens menos exigentes em termos de resistência mecânica.

Por outro lado, o ABS é mais indicado para projetos que exijam maior durabilidade, resistência a impactos e temperaturas mais elevadas. É uma escolha preferida para engenheiros e fabricantes que buscam criar peças funcionais e mecânicas mais robustas.

Em resumo, tanto o PLA quanto o ABS são materiais populares na impressão 3D, cada um com suas próprias características e aplicações específicas. A escolha entre PLA e ABS depende das necessidades específicas do projeto e das características desejadas para a peça impressa.

## 2.6 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Um aspecto fundamental nesse processo é a configuração dos parâmetros de impressão 3D, que desempenham um papel crítico na determinação das características finais do objeto produzido. Esses parâmetros abrangem uma variedade de fatores, como espessura da camada, velocidade de impressão, densidade de preenchimento, tipo de material utilizado e padrão de preenchimento. A influência desses parâmetros nas características do objeto impresso é um tópico de grande importância, pois afeta aspectos como resistência, precisão dimensional, acabamento superficial e até mesmo a durabilidade do produto final.

A respeito da deposição das camadas, é evidente que alguns parâmetros exercem uma influência significativa na resistência à tração no eixo vertical de deposição. Dentre esses parâmetros destacam-se os perímetros, o percentual de preenchimento, a altura das camadas e a temperatura de extrusão (CAVALCANTE, 2022).

### 2.6.1 Espessura da camada

A espessura da camada, também conhecida como resolução de impressão, refere-se à dimensão do filamento depositado para formar as camadas na impressão 3D. Uma espessura de camada menor resulta em um acabamento superficial mais refinado na peça impressa. Em contrapartida, uma espessura de camada maior reduz o tempo de impressão, uma vez que menos camadas são necessárias para construir a mesma peça em comparação com uma espessura de camada menor (GALINA et al., 2018).

A dimensão da camada é definida com base no diâmetro do bico extrusor, podendo variar de 0,1 mm até o diâmetro máximo do bico (SILVA, 2022). Variações da espessura da camada tem impacto nas características mecânicas como resistência à tração e cisalhamento, além de influenciar o acabamento final da peça (GALINA et al., 2018).

### 2.6.2 Velocidade de impressão

A velocidade em que o cabeçote de extrusão se movimenta, desempenha um papel significativo na impressão 3D, afetando tanto o tempo de conclusão da peça quanto a sua qualidade final. Em geral, uma velocidade de impressão mais alta reduz o tempo de

impressão, mas pode prejudicar a qualidade. Para equilibrar isso, é comum diminuir a velocidade de impressão ao criar o perímetro externo da peça, garantindo assim um melhor acabamento e maior precisão dimensional (CAVALCANTE, 2022).

Para apresentar um melhor acabamento e conseqüentemente uma melhor qualidade, fazer uso de uma velocidade moderada de impressão é mais indicada. É mais utilizando velocidades em torno de 60 mm/s, reduzindo a velocidade até 40 mm/s é possível obter maiores níveis de qualidade superficiais (SILVA et al., 2020, apud SILVA, 2022).

### 2.6.3 Densidade de preenchimento

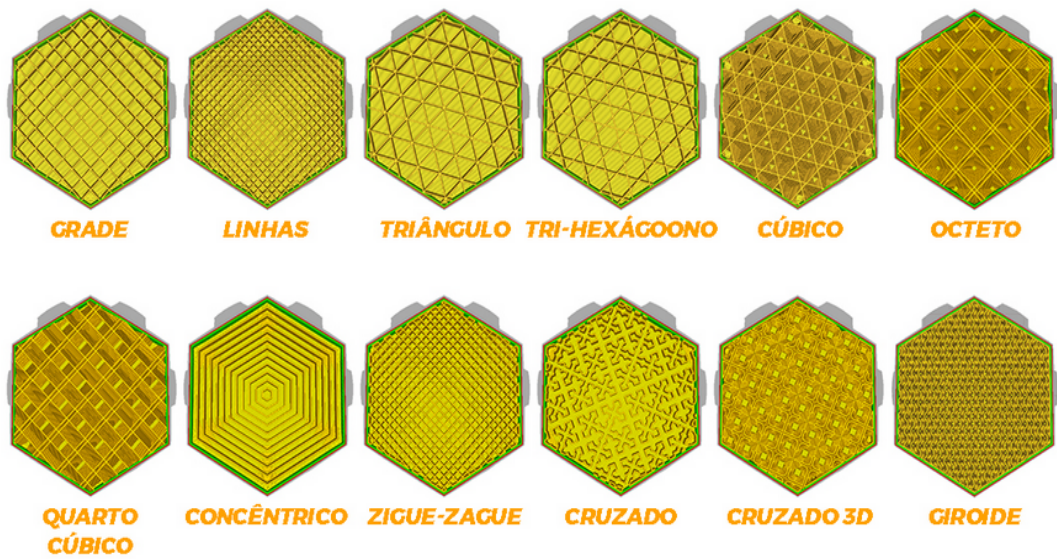
A medida que define a porcentagem de preenchimento no interior das peças. A variação é de 0% a 100%, correspondendo a uma peça totalmente oca e uma completamente sólida, respectivamente. Com o aumento do valor de preenchimento, aumenta-se a densidade da peça, gerando aumento de sua massa total e elevando sua resistência, mas comprometendo, com isso, o tempo e o custo da impressão (SILVA, 2022)

### 2.6.4 Padrão de preenchimento

O padrão de preenchimento interno, também chamado de *infill*, refere-se à parte interna de uma impressão 3D. Seu objetivo principal é otimizar o uso de material, melhorar a resistência e durabilidade do objeto e proporcionar suporte para as camadas superiores de fechamento. Pode ser configurado em diversos padrões com formas geométricas variadas (Figura 8), que vão desde linhas retas e cruzadas até triângulos e desenhos mais complexos, como estrelas, bonecos e favo de abelhas (INDUSMART, 2023). Alguns modelos são explicados no seu preenchimento na Tabela 1 .

A variação da densidade é aplicada diretamente ao padrão escolhido, dependendo da finalidade desejada para o objeto. Essa mudança terá impacto direto na resistência, no tempo de impressão e no consumo de material. A utilização de diferentes padrões de preenchimento pode resultar em diferentes características mecânicas, sendo este o foco de estudo deste trabalho.

Figura 8: Padrões de preenchimento no Cura.



Fonte: 3DLAB (2021)

Tabela 1: Descrição dos padrões de preenchimento.

PADRÕES DE PREENCHIMENTO	
GRADE	preenche o interior do objeto impresso com uma grade regular de linhas horizontais e verticais.
LINHAS	preenche o interior do objeto com linhas paralelas
TRIÂNGULO	preenche o interior do objeto com triângulos interligados
TRI-HEXÁGONO	preenche o interior do objeto com hexágonos e triângulos interligados
CÚBICO	preenche o interior do objeto com cubos interligados
OCTETO	preenche o interior do objeto com octetos interligados
QUARTO CÚBICO	preenche o interior do objeto com cubos interligados, mas com densidade reduzida em comparação com o preenchimento Cúbico
CONCÊNTRICO	preenche o interior do objeto com camadas concêntricas
ZIGUEZAGUE	preenche o interior do objeto com linhas em formato de Ziguezague

CRUZADO	preenche o interior do objeto com linhas cruzadas em ângulos retos
CRUZADO 3D	preenche o interior do objeto com linhas cruzadas em ângulos diferentes em cada camada
GIROIDE	preenche o interior do objeto com linhas curvas em formato de hélice

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

## 2.7 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Conforme Hibbeler (2010), a resistência de um material depende de sua capacidade de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura. Para a quantificação destas características é necessário utilizar métodos experimentais, como é o caso de ensaios de tração e compressão. Com os testes é obtido o diagrama tensão-deformação, com o qual é possível saber muitas características mecânicas do material analisado.

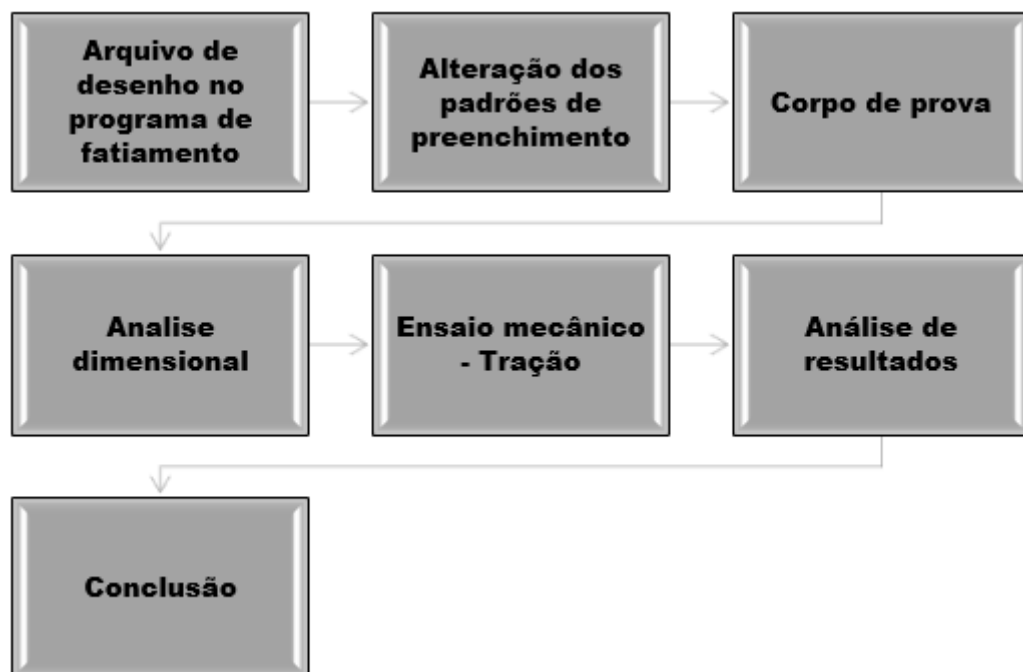
Segundo Beer (2011), é possível dividir em duas categorias principais a partir das características obtidas pelo diagrama tensão-deformação, materiais dúcteis e materiais frágeis.

Materiais dúcteis, se caracterizam pelos materiais que em um ensaio de tração apresentam uma grande deformação antes da ruptura. Materiais frágeis apresentam pouca ou nenhuma deformação antes de ocorrer a fratura (BEER, 2011)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais e métodos utilizados para a confecção dos corpos de prova que foram produzidos em PLA e ABS fazendo uso de modelagem por fusão e deposição (FDM). Além disso, é apresentado os procedimentos utilizados para obtenção de características mecânicas dos modelos confeccionados. Com a proposta de atingir os objetivos desta pesquisa o fluxograma de etapas experimentais são apresentados na Figura 9.

Figura 9: Fluxograma de etapas experimentais e de análise.

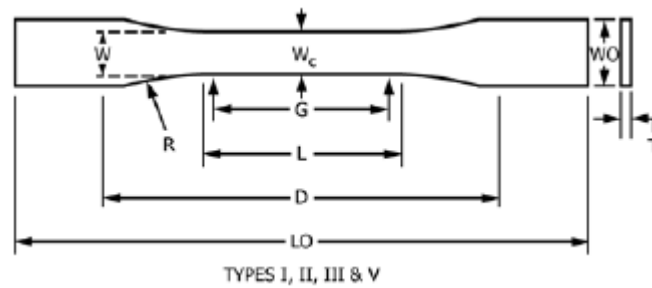


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Foram criados modelos seguindo os padrões que são determinados na norma ASTM D 638-22 fazendo utilização da amostra tipo I conforme figura 10. A criação em 3D do corpo de prova foi realizada no programa online gratuito *Onshape*, utilizando as dimensões fornecidas na norma conforme tabela 2. Utilizando o programa de fatiamento Cura foi gerado o fatiamento do modelo para impressão. Foi utilizado as impressoras Ender 3 v2 e a CR 200B, para a impressão utilizando PLA e ABS respectivamente. Os parâmetros de impressão iniciais foram selecionados para uma melhor impressão de cada modelo com variação do seguinte item: padrão de preenchimento.



Figura 10: Corpo de prova norma ASTM D638-22.



Fonte: ASTM D638-22 (2023)

Tabela 2: Dimensões do corpo de prova.

Dimensão	Medidas (mm)	Dimensão	Medidas (mm)
W	13	D	115
L	57	R	76
WO	19	T	3,6
LO	195	G	50

Fonte: Autor (2023)

Em segundo momento após os corpos de prova prontos, os mesmo foram submetidos a ensaio destrutivo de tração para obter informações de resistência mecânica, e posteriormente análise e comparação de dados.

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a impressão dos corpos de prova em ABS, foi utilizado filamento *premium* do fornecedor 3D Lab com diâmetro de 1,75 mm. As características do material estão na tabela 3.

Tabela 3: Especificação técnica do filamento ABS.

<b>PROPRIEDADES</b>	<b>ABS PREMIUM</b>
COR	BRANCO
TEMPERATURA DE FUSÃO	220 [°C]
DENSIDADE	1,04 [G/CM3]
TENSÃO DE ESCOAMENTO	38 [Mpa]
MÓDULO DE ELASTICIDADE	2200 [Mpa]

Fonte: 3DLAB

Para a impressão com o material PLA, o filamento premium do fornecedor 3D Lab com diâmetro de 1,75 mm. As características técnicas do material são informadas na tabela 4.

Tabela 4: Especificação técnica do filamento PLA.

<b>PROPRIEDADES</b>	<b>PLA PREMIUM</b>
COR	CINZA
TEMPERATURA DE FUSÃO	185 [°C]
DENSIDADE	1,24 [G/CM3]
TENSÃO DE ESCOAMENTO	66 [Mpa]
MÓDULO DE ELASTICIDADE	4350 [Mpa]

Fonte: 3DLAB

### 3.2 IMPRESSÃO DOS CORPO DE PROVA

A escolha dos parâmetros fixos das impressões foi por intermédio de pesquisas na literatura, definindo assim um padrão conforme apresentado na Tabela 5 e 6.

Tabela 5: Parâmetros de impressão fixos.

PARÂMETROS	VALOR UTILIZADO
Porcentagem de preenchimento	50%
Velocidade de impressão	40 mm/s
Velocidade de camada inicial	20 mm/s
Altura da camada	0,16 mm
Espessura de parede	0,8 mm
Espessura inferior/superior	0,6 mm

Fonte: Autor (2023)

Tabela 6: Parâmetros de impressão de cada material.

PARÂMETROS	ABS (°C)	PLA (°C)
Temperatura de impressão	240	200
Temperatura da mesa	100	60

Fonte: Autor (2023)

Para chegar ao objetivo específico deste trabalho foram selecionados três padrões de preenchimento, que são apresentados na Tabela 7, a serem utilizados na impressão dos corpos de prova.

Tabela 7: Padrão de preenchimento

PADRÃO	Giroide	Cúbico	Ziguezague

Fonte: Autor (2023)

O padrão Ziguezague foi selecionado devido à sua prevalência em impressões 3D que exigem menor resistência. Sua escolha é impulsionada pela capacidade de imprimir mais rapidamente, decorrente do preenchimento em linha contínua. Esse padrão é comum em cenários onde a rapidez na produção é prioritária (3DLAB, 2021)

O padrão de preenchimento Cúbico é utilizado em impressões 3D devido à sua resistência, eficiência de material, estabilidade e versatilidade. Esse padrão distribui o material uniformemente, proporcionando resistência à peça impressa, ao mesmo tempo em que utiliza o material de forma eficiente. Além disso, o preenchimento Cúbico é definido como o padrão do programa Cura (3DLAB, 2021; MARIN, 2022).

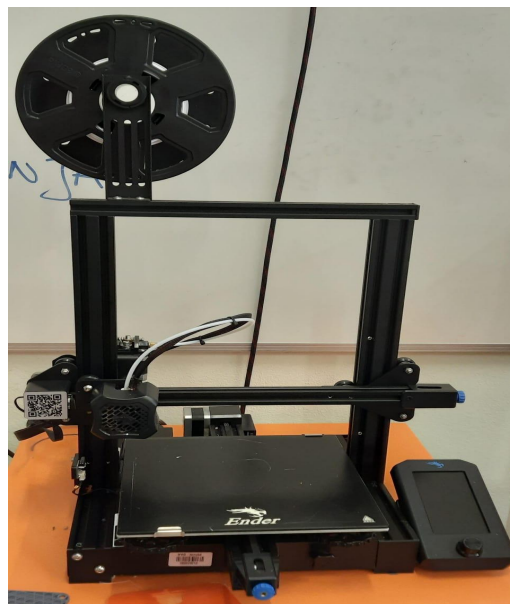
Por fim, o padrão Giroide é escolhido para peças que serão submetidas a tensões em várias direções. Embora ofereça boa resistência, sua seleção tende a resultar em um tempo de impressão mais longo. Esse padrão é preferido em situações em que a peça necessita resistir a diferentes tipos de forças e tensões, oferecendo uma estrutura mais flexível e adaptável (3DLAB, 2021; MARIN, 2022).

### 3.2.1 Impressoras

Para impressão foram utilizadas duas impressoras, uma para a impressão com PLA e a outra para ABS. Para o PLA vai ser usado um Impressora 3D Ender 3 V2 (figura 11) da marca Creality e para o ABS a Impressora 3D CR-200B (figura 12) também da marca Creality.

A Ender 3 V2 é uma impressora do tipo aberta com mesa de vidro aquecida até 110 ° C e o extrusor pode chegar até 255 ° C. Possui uma área de impressão de 220 mm X 220 mm X 250 mm com nivelamento manual. Pode variar de 0,1 a 0,4 mm a altura da camada depositada utilizando um bico de 0,4 mm de diâmetro. A velocidade de impressão é de até 100 mm/s(3DLAB).

Figura 11: Impressora Ender 3 V2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A CR-200B é uma impressora 3D do tipo fechada com a mesa de vidro, podendo ser aquecida até 100 ° C e o extrusor até 260 ° C. Possui uma área de impressão de 200 mm X 200 mm X 200 mm com nivelamento manual. Fornece a mesma altura de camada e diâmetro do bico que a Ender 3 V2. A velocidade de impressão é de 20 a 60 mm/s (GUSE, 2021).

Figura 12: Impressora CR-200B.



Fonte: Autor (2023).

A escolha de impressora fechada proporciona uma temperatura mais estável e mantém livre de interferências externas à impressão. Por ter essas e outras características esse modelo é melhor quando se trabalha com materiais que apresentem uma alta deformação térmica, como é o caso do ABS.

### 3.2.2 Programa ultimaker cura versão 5.4.0

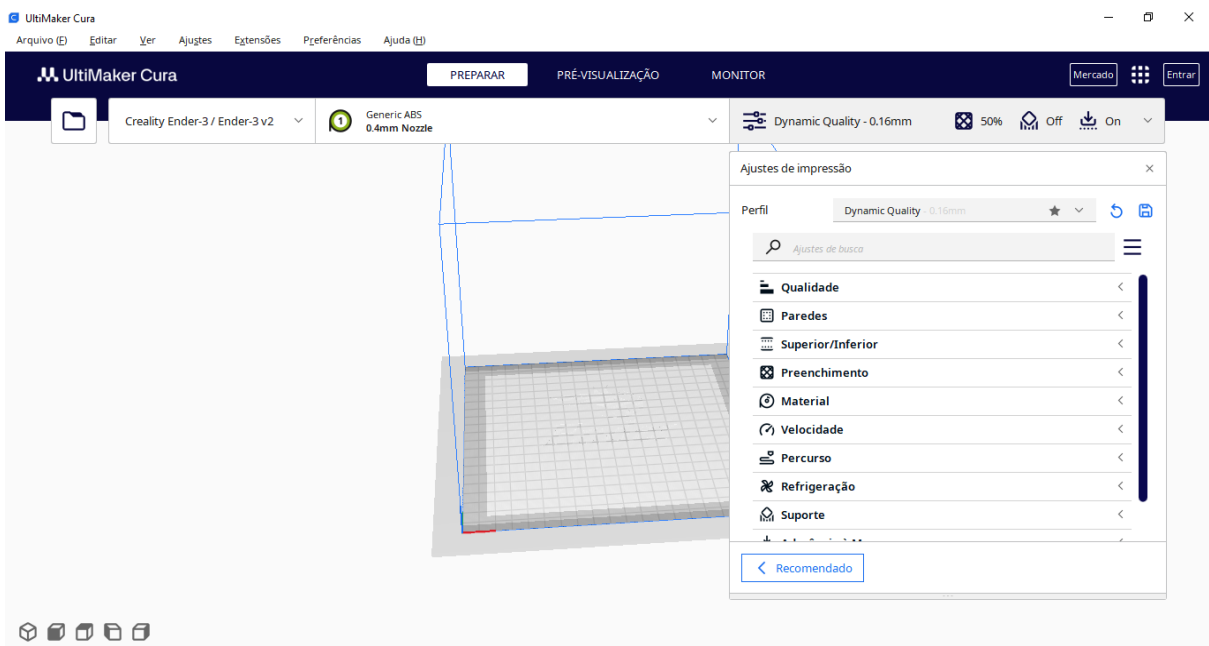
O Cura é um programa de fatiamento de código aberto desenvolvido pela Ultimaker, uma das principais fabricantes de impressoras 3D do mercado. Ele foi projetado para ser

compatível com uma ampla variedade de impressoras 3D e oferece recursos avançados para otimizar a qualidade e a eficiência da impressão.

O usuário pode ajustar uma série de parâmetros para personalizar a impressão de acordo com suas necessidades (Figura 13). Isso inclui escolhas como de material de impressão, a resolução desejada, a velocidade de impressão e a densidade de preenchimento. O Cura também oferece uma ampla variedade de perfis de impressão predefinidos para diferentes materiais e impressoras, facilitando ainda mais o processo de configuração (ULTIMAKER, 2023).

Uma vez que todas as configurações estejam ajustadas, o Cura gera um arquivo G-code, que contém as instruções específicas para a impressora 3D seguir durante a impressão. Esse arquivo pode ser transferido para a impressora 3D via USB ou salvo em um cartão SD para uso posterior.

Figura 13: Interface UltiMaker Cura versão 5.4.0

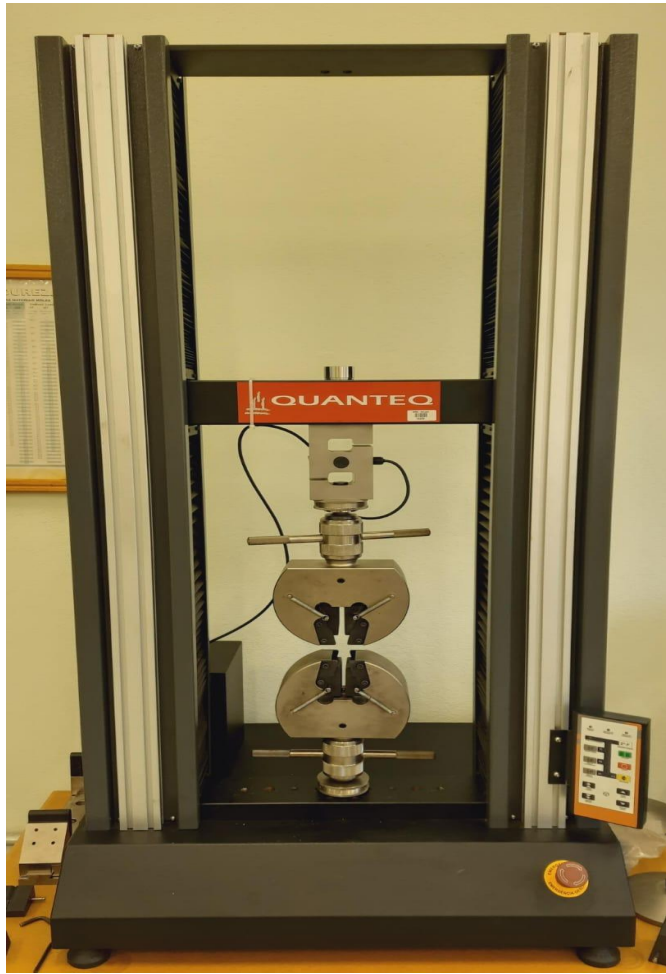


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Fazendo uso de uma máquina universal de ensaio, da marca Quanteq com força máxima de 50000 N (figura 14), os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração. A taxa de carregamento é de 5 mm/mim, que de forma crescente e constante a força é aplicada até a ruptura da peça. Esse ensaio gera curvas de tensão-deformação, que com os dados são calculados a resistência à tração e alongamento até a ruptura.

Figura 14: Máquina de ensaio de tração.



Fonte: Autor (2023)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da realização prática dos objetivos deste trabalho. Os resultados serão apresentados de forma que seja de melhor compreensão e após será apresentado a discussão sobre os mesmos.

### 4.1 CORPOS DE PROVA

Após a conclusão do processo de impressão, procedeu-se à aferição das dimensões dos corpos de prova, revelando variações significativas dos valores do corpo de prova com as medidas da Tabela 2, mostrando variação na espessura (T) de cada amostra, conforme detalhado nas tabelas 8 e 9. Importante ressaltar que as amostras impressas em PLA e ABS foram produzidas em impressoras distintas. Conforme estabelecido pela norma ASTM D638-22, a espessura do corpo de prova deve ser de 3,2 mm, com uma tolerância de  $\pm 0,4$  mm.

Tabela 8: Espessura medida do corpo de prova PLA.

	GIROIDE(mm)	CÚBICO(mm)	ZIGUEZAGUE(mm)
CP1	3,2	3,4	3,4
CP2	3,2	3,4	3,4
CP3	3,15	3,4	3,4
CP4	3,15	3,4	3,45
CP5	3,4	3,4	3,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)



Tabela 9: Espessura medida do corpo de prova ABS.

	GIROIDE(mm)	CÚBICO(mm)	ZIGUEZAGUE(mm)
CP1	3,5	3,6	3,5
CP2	3,6	3,6	3,55
CP3	3,6	3,6	3,6
CP4	3,6	3,6	3,55
CP5	3,6	3,6	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Notavelmente, as impressões utilizando o material PLA demonstraram variações mais expressivas na espessura em relação ao modelo digital original, com reduções que atingiram até 12,5% em determinados corpos de prova. Essa disparidade sugere a necessidade de uma análise mais aprofundada das configurações de impressão e das propriedades específicas do material PLA para otimizar a consistência dimensional. No entanto, os mesmos se mantiveram dentro das tolerâncias impostas.

Por outro lado, as impressões realizadas com ABS apresentaram variações na espessura, embora, em sua maioria, os corpos de prova tenham mantido medidas próximas às originais. É notável que CP1, CP2, CP4 e CP5 no padrão Ziguezague e do padrão Giroide CP1 demonstraram variações inferiores à 3% em relação à medida original.

Portanto, as divergências observadas nos corpos de prova de PLA e ABS podem ser atribuídas não apenas às diferenças nos materiais, mas também aos ambientes de impressão distintos, destacando a influência significativa que a escolha da impressora e suas condições podem exercer sobre as propriedades dimensionais dos objetos impressos. Essa compreensão é essencial para otimizar as configurações de impressão e garantir resultados consistentes, especialmente quando se lida com materiais sensíveis a condições ambientais.

A partir das medidas foi realizado o cálculo da área da seção transversal para conseguir obter a tensão em MegaPascal (MPa) e realizar a apresentação gráfica.

## 4.2 RESULTADOS ENSAIO DE TRAÇÃO

Uma abordagem clássica para apresentar os resultados do ensaio de tração é por meio de um gráfico ou curva de tensão versus deformação. Esse gráfico registra os valores da força

aplicada e da deformação experimentada pelo material em intervalos regulares até a ruptura da amostra. Essa representação gráfica oferece uma visão detalhada do comportamento do material ao longo do ensaio de tração.

Nesse tipo de gráfico, a tensão é representada no eixo vertical e a deformação no eixo horizontal. A tensão é calculada dividindo-se a força aplicada pela área transversal da amostra, enquanto a deformação é calculada dividindo-se a variação no comprimento da amostra pela sua extensão original. Essa abordagem permite visualizar como o material se comporta sob diferentes níveis de tensão, mostrando sua capacidade de resistir à deformação antes de atingir a ruptura.

Os dados obtidos no ensaio de tração são expressos em unidades de MegaPascal (MPa) para a tensão e a deformação de uma unidade adimensional. Essa abordagem gráfica proporciona uma compreensão visual imediata do desempenho do material durante o ensaio de tração, fornecendo uma base sólida para as análises e discussões subsequentes.

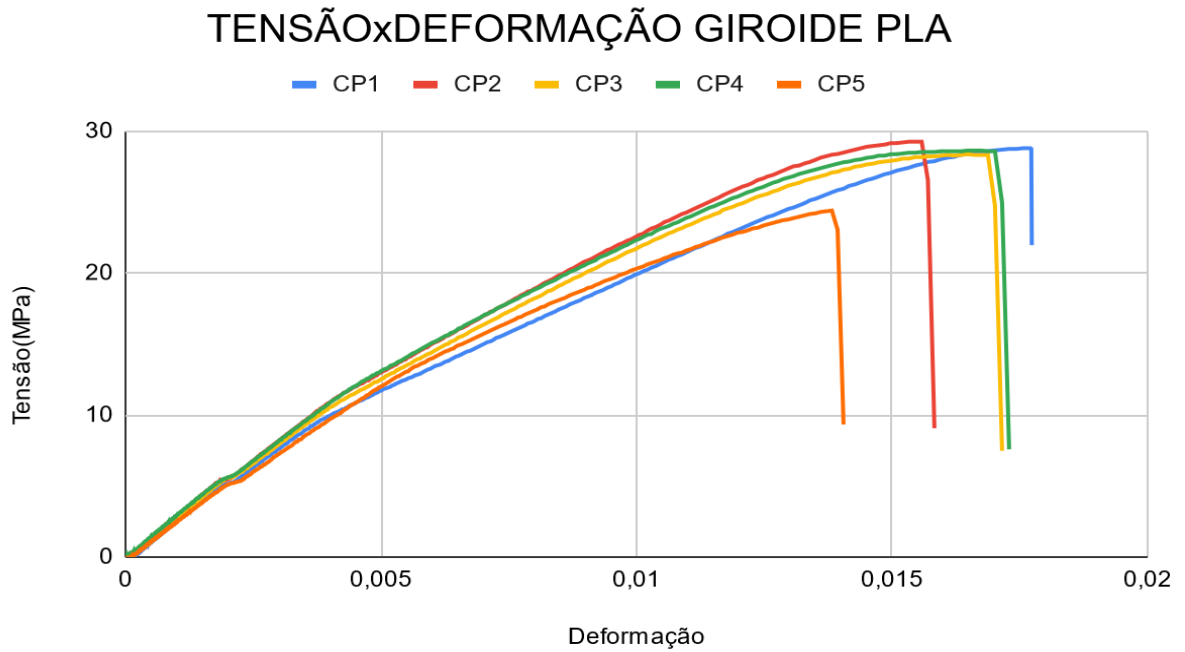
Essa abordagem é amplamente utilizada na engenharia de materiais e fornece informações valiosas sobre as propriedades mecânicas do material, como sua resistência, ductilidade e tenacidade. Com base nesses resultados, é possível tomar decisões importantes no projeto e seleção de materiais, garantindo a segurança e eficiência de estruturas e componentes.

Foram confeccionados 30 corpos de prova, segundo a norma ASTM D638-22 é necessário testar 5 modelos iguais para cada variação de parâmetro.

#### 4.2.1 Ensaio PLA

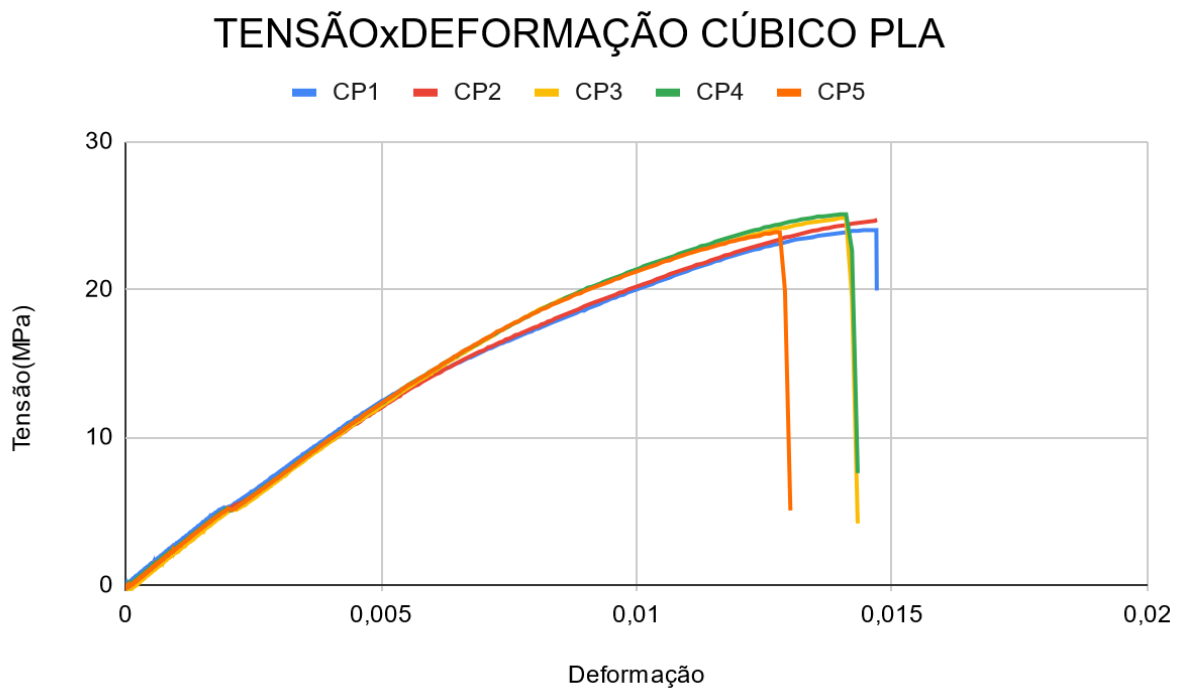
Os gráficos tensão versus deformação dos ensaios dos corpos de prova de PLA são apresentados na figura 15, 16 e 17:

Figura 15: Tensão x Deformação Giroide PLA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

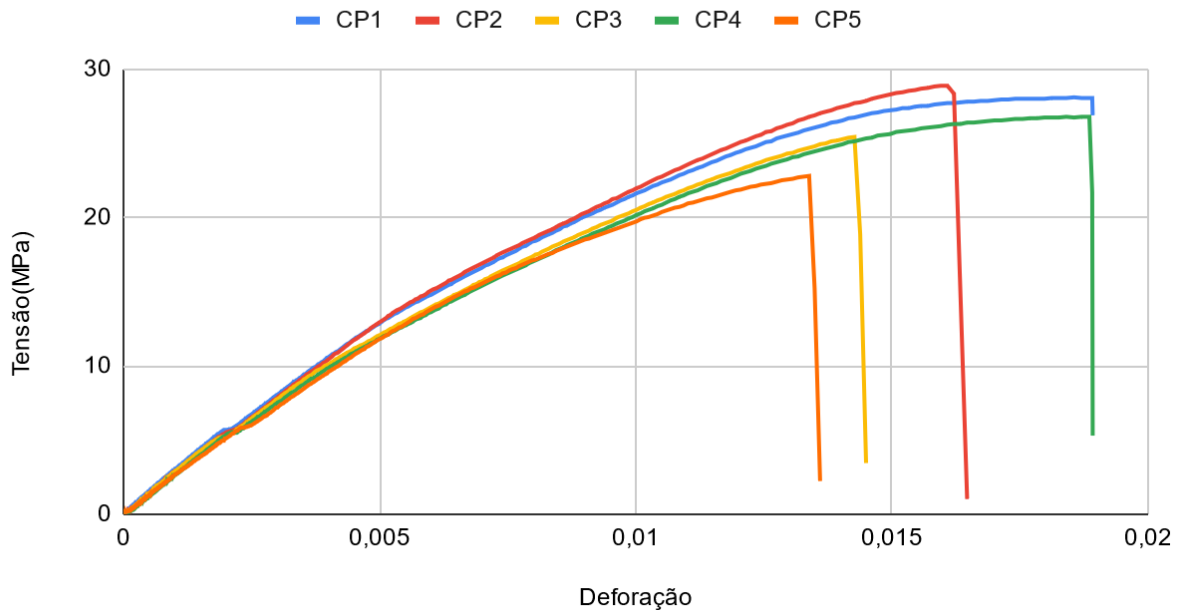
Figura 16: Tensão x Deformação Cúbico PLA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 17: Tensão x Deformação Ziguezague PLA.

## TENSÃO x DEFORMAÇÃO ZIGUEZAG PLA



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Nos resultados dos ensaios de tração em corpos de prova de PLA, uma métrica de destaque é o desvio padrão dada pela Equação 1 (Barbosa, 2019), um indicador estatístico que desempenha um papel crucial na compreensão da consistência e variabilidade dos dados obtidos.

Equação 1: desvio padrão.

$$DP = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

$X_i$  = valor individual

$\bar{X}$  = Média dos valores

$n$  = número de valores

Ao considerar o padrão de preenchimento Giroide, observou-se uma média de tensão máxima de aproximadamente 27,89 MPa (figura 19), com um desvio padrão de cerca de 1,97 MPa (figura 18). Esta variabilidade sugere que, embora o padrão Giroide demonstre uma resistência superior à tração em média, há uma dispersão notável nos resultados individuais, indicando a presença de fatores que influenciam a resposta mecânica do material.

No caso do padrão Cúbico, a média de tensão máxima foi cerca de 24,51 MPa, com um desvio padrão notavelmente menor, aproximadamente 0,54 MPa. Este resultado sugere uma consistência mais estreita nos valores de tensão máxima para o padrão Cúbico, indicando uma resposta mecânica mais previsível e menos sensível a variações experimentais.

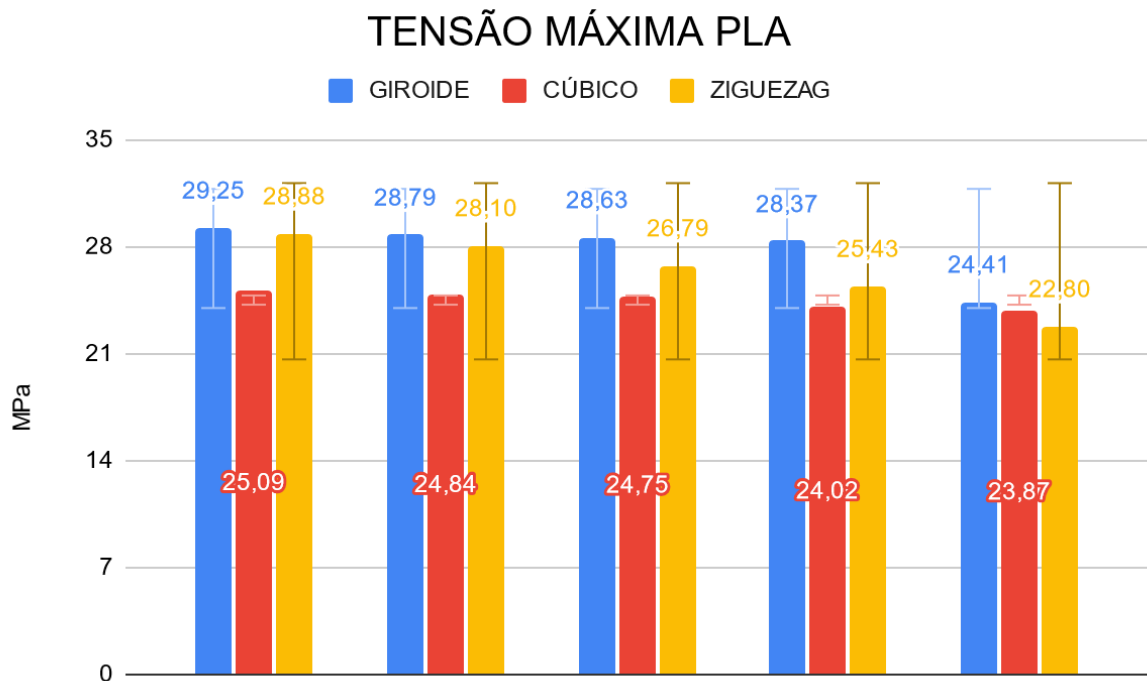
Essa diferença nas médias sugere que, em termos de resistência à tração média, o padrão Giroide se apresenta cerca de 12,1% maior que o Cúbico. No entanto, a análise não pode se basear apenas nas médias, é crucial considerar a variabilidade dos resultados. O desvio padrão para o padrão Giroide indica uma dispersão maior nos valores de tensão máxima. Já o padrão Cúbico exibiu um desvio padrão significativamente menor, indicando uma consistência mais estreita nos resultados.

Portanto, enquanto o padrão Giroide pode oferecer uma resistência média superior à tração, o padrão Cúbico destaca-se pela menor variabilidade nos resultados. A escolha entre esses padrões dependerá das prioridades específicas da aplicação, considerando não apenas a resistência média desejada, mas também a importância da consistência nos resultados. Aplicações que exigem uma resposta mecânica mais previsível podem favorecer o padrão Cúbico, enquanto aquelas que buscam uma resistência média mais elevada podem optar pelo padrão Giroide, aceitando uma certa variação nos resultados.

Já no padrão de preenchimento Ziguezague, a média de tensão máxima foi de aproximadamente 26,4 MPa, com um desvio padrão de cerca de 2,4 MPa. Revela uma resistência à tração competitiva em relação ao padrão Giroide, que apresenta uma média 5,3% mais alta, e uma variabilidade mais baixa que o Ziguezague.

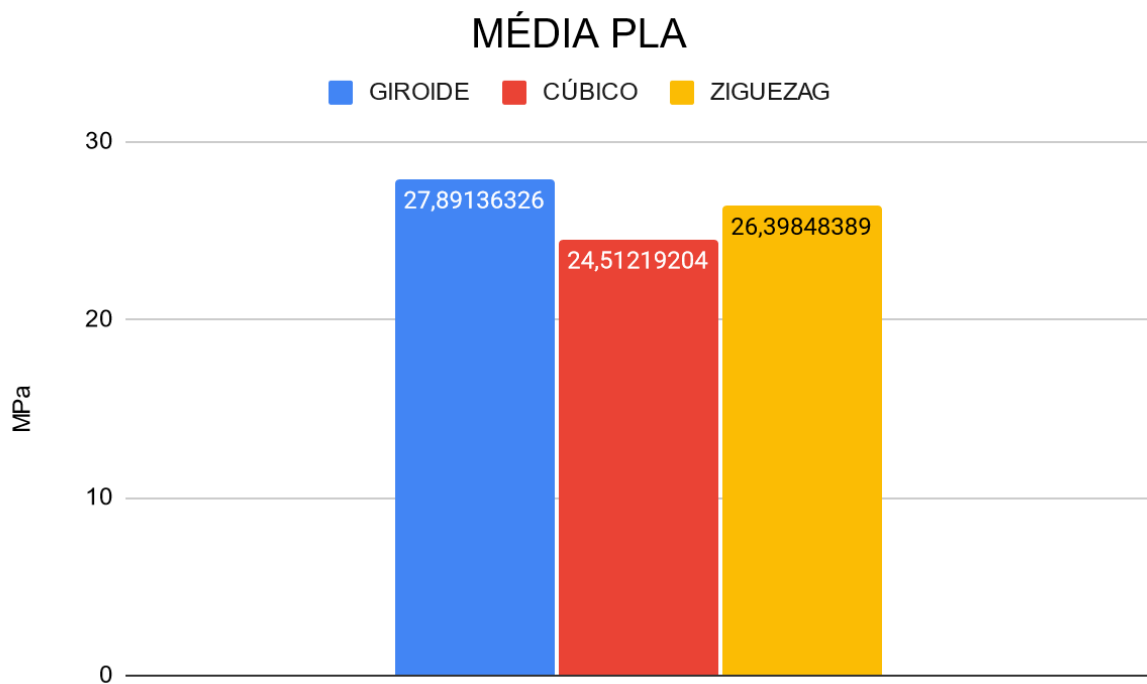
Em comparação com o padrão Cúbico, o Ziguezague demonstra uma média de tensão máxima cerca de 7,2% superior, sugerindo uma possível vantagem em termos de resistência mecânica. Entretanto, é essencial considerar a variabilidade associada a esse padrão. O desvio padrão do Ziguezague é um mais elevado em comparação com o Cúbico, indicando uma dispersão relativamente maior nos resultados de tensão máxima. Isso implica que, embora o padrão Ziguezague possa, em média, exibir uma resistência superior, há uma maior variabilidade nos resultados individuais, o que pode ser relevante para aplicações que demandam uma resposta mecânica mais consistente.

Figura 18 : Tensão máxima PLA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 19 : Tensão média PLA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

#### 4.2.1 Ensaio ABS

Os gráficos tensão versus deformação dos ensaios dos corpos de prova de ABS são apresentados nas Figuras 20, 21 e 22:

Figura 20: Tensão x Deformação Giroide ABS.

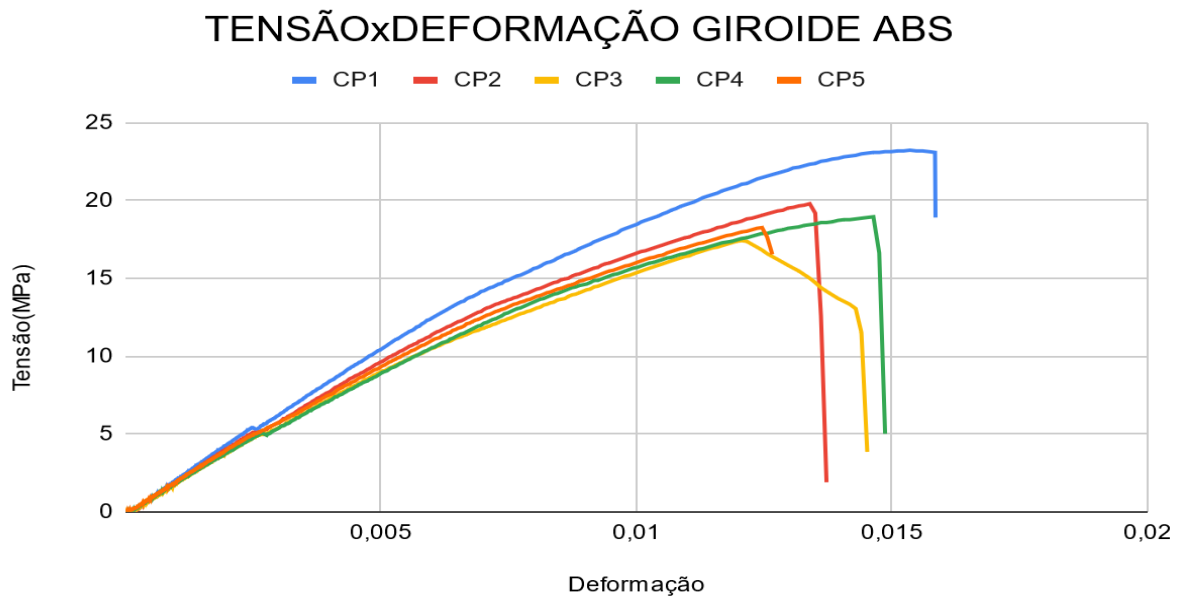


Figura 21: Tensão x Deformação Cúbico ABS.

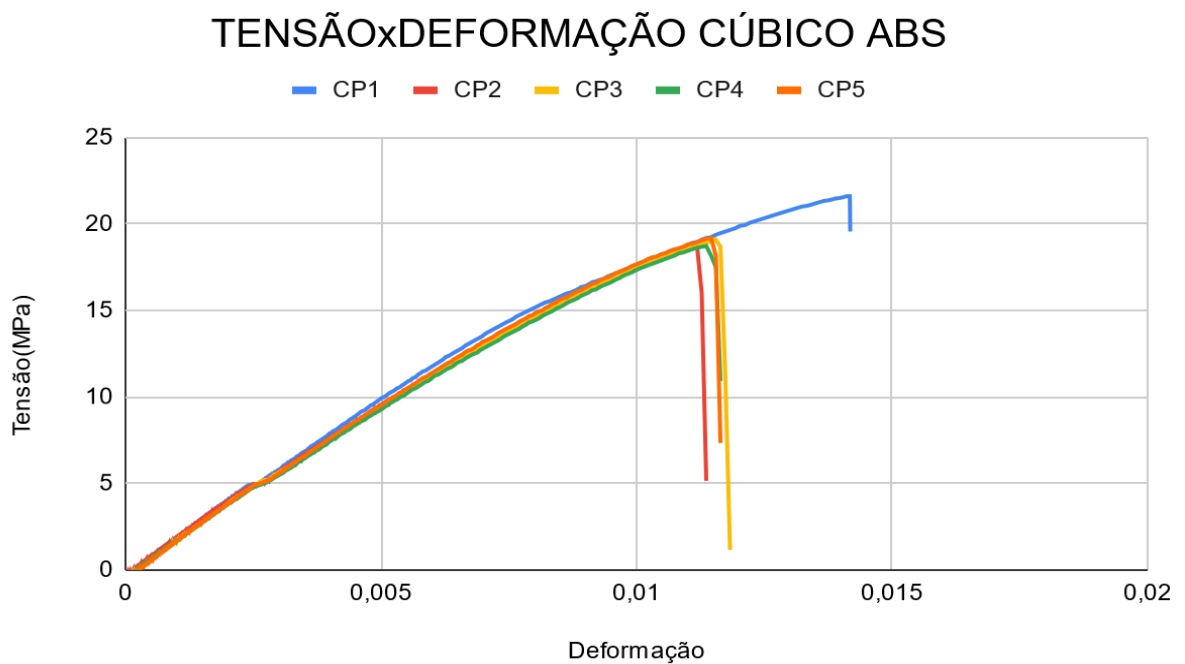
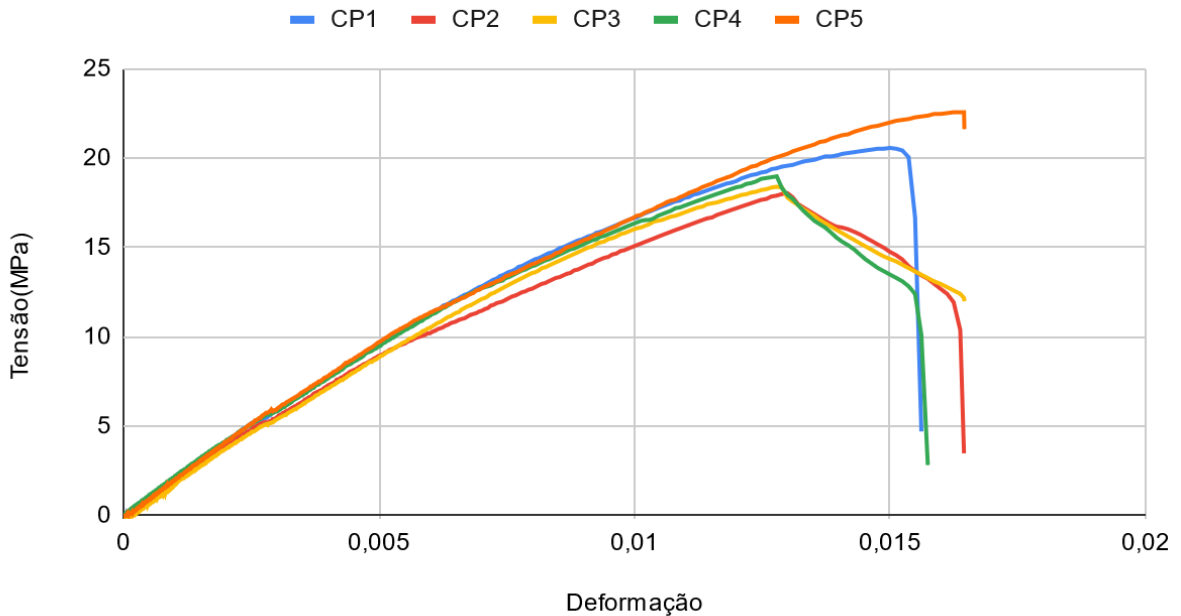


Figura 22: Tensão x Deformação Ziguezague ABS.

## TENSÃO x DEFORMAÇÃO ZIGUEZAG ABS



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

No padrão de preenchimento Giroide de ABS, a média da tensão máxima foi de 19,54 MPa (figura 24), com um desvio padrão de 2,25 MPa (figura 23). Este resultado indica uma certa variabilidade nos dados, sugerindo que o padrão Giroide pode apresentar características de resistência que variam em torno dessa média.

Ao analisar o padrão de preenchimento Cúbico de ABS, se observa uma média ligeiramente inferior, atingindo 19,45 MPa, com um desvio padrão de 1,23 MPa. A menor dispersão dos dados indica uma maior consistência na resistência do material quando submetido a esse tipo de preenchimento.

Já no caso do padrão Ziguezague de ABS, a média da tensão máxima foi de 19,71 MPa, com um desvio padrão de 1,87 MPa. Este resultado sugere que o padrão Ziguezague pode proporcionar um desempenho ligeiramente superior em termos de resistência, quando comparado com os padrões Giroide e Cúbico.

Comparando o padrão Giroide com o Ziguezague, se observa que a média de tensão máxima no padrão Ziguezague é 0,86% superior em relação ao Giroide. No entanto, o desvio padrão do Ziguezague é menor do que o do Giroide, indicando uma maior variabilidade nos resultados do Giroide.

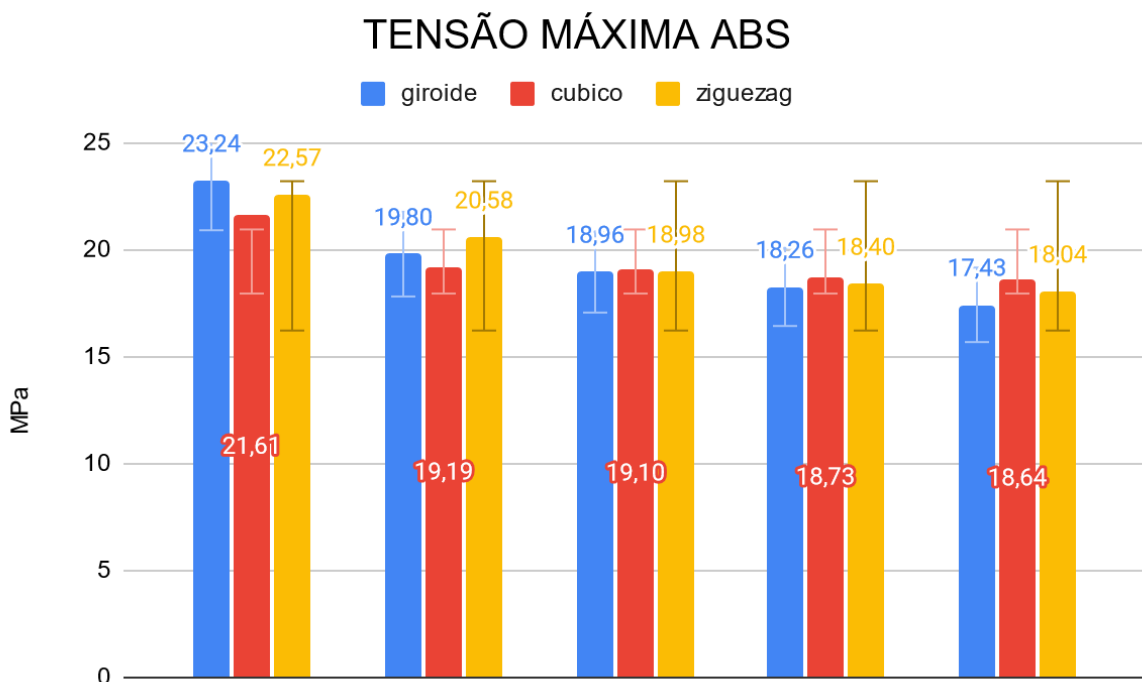


Ao confrontar o padrão Giroide com o Cúbico, se nota que a média de tensão máxima é praticamente equivalente, com o Giroide atingindo 19,54 MPa e o Cúbico 19,45 MPa mostrando uma variação de menos de 0,5%. O desvio padrão do Giroide é um pouco maior em comparação com o Cúbico, sugerindo uma maior uniformidade nos resultados do padrão Cúbico.

Por fim, ao comparar o padrão Ziguezague com o Cúbico, observamos que a média de tensão máxima no Ziguezague é 1,3% superior à do Cúbico. O desvio padrão do Ziguezague é um pouco maior do que o do Cúbico, indicando uma maior variabilidade nos resultados do Ziguezague quando comparados.

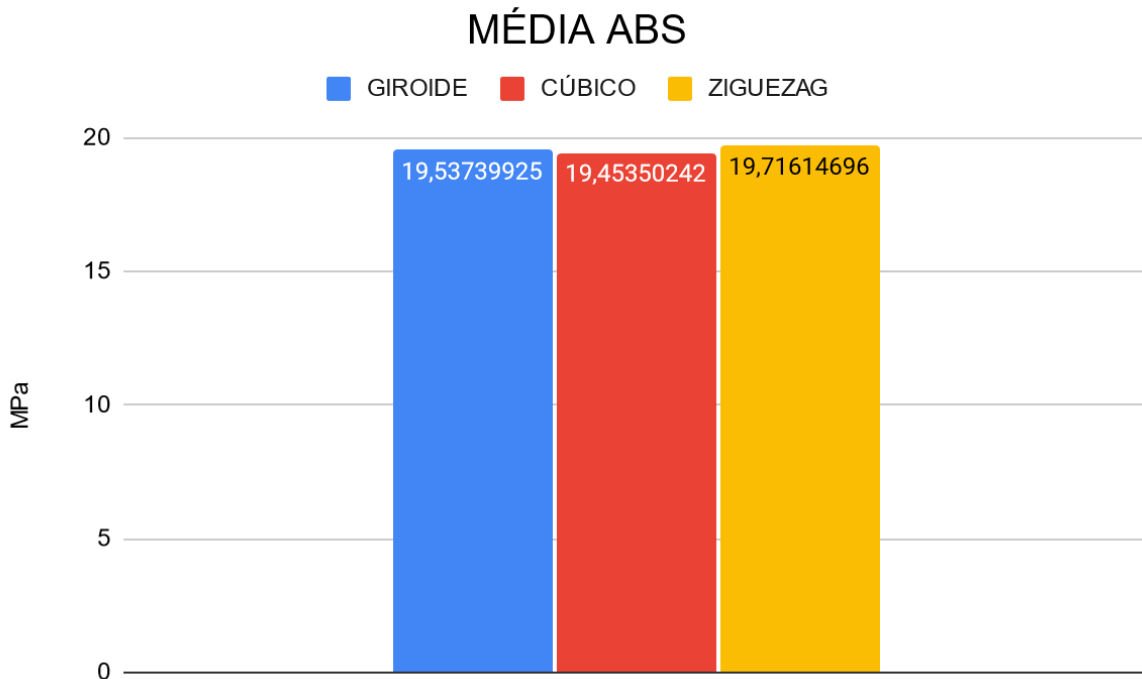
Ao analisarmos os três padrões, observamos que a variação na média da tensão máxima é inferior a 1,5% entre eles. No que diz respeito à variabilidade, o padrão Cúbico continua apresentando resultados com menor dispersão.

Figura 23: Tensão máxima ABS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 24: Tensão média ABS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

#### 4.3 RUPTURA CORPOS DE PROVA

Durante os ensaios de tração foi verificado a ruptura das peças na região inicial da seção estreita dos corpos de prova e não na região mais central conforme mostrado na Figura 25.

A análise estrutural revelou que a presença da costura de impressão, criada a partir do ponto de início e fim de cada camada, cria uma região suscetível a falhas, comprometendo a resistência mecânica do material. A falta de fusão completa entre as camadas resulta em possíveis microdefeitos que se manifestam como pontos frágeis durante os ensaios de resistência à tração. Essa constatação levanta a necessidade de uma análise mais aprofundada dos parâmetros de impressão, como temperatura, mudança do local da costura e velocidade de deposição, visando otimizar a fusão entre as camadas e minimizar os pontos de concentração de falhas.

Em síntese, os resultados deste estudo destacam a relevância da costura de impressão 3D como um elemento crítico na fragilidade das peças durante ensaios de resistência à tração. Recomenda-se uma abordagem mais cuidadosa na otimização dos parâmetros de impressão, a fim de aprimorar a fusão entre as camadas e mitigar os potenciais pontos de concentração de falhas.

Figura 25: Ruptura dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de corpos de prova produzidos em PLA e ABS revelaram variações significativas na espessura, especialmente nas amostras de PLA, que apresentaram reduções de até 12,5%. Essas discrepâncias, embora estejam dentro das tolerâncias estabelecidas pela norma ASTM D638-22, indicam a necessidade de uma análise mais detalhada das configurações de impressão e das propriedades específicas do material PLA para otimizar a consistência dimensional.

No ensaio de tração, a análise dos gráficos de tensão versus deformação para diferentes padrões de preenchimento evidenciou diferenças significativas entre PLA e ABS. No caso do PLA, o padrão Giroide destacou-se pela resistência média superior à tração, enquanto o padrão Cúbico apresentou uma consistência mais estreita nos resultados. Para o ABS, o padrão Ziguezague demonstrou resistência ligeiramente superior, porém com maior variabilidade.

A presença da costura de impressão foi identificada como um ponto crítico na fragilidade das peças durante os ensaios de resistência à tração. A falta de fusão completa entre as camadas resultou em microdefeitos que comprometem a resistência mecânica do material, evidenciando a importância da otimização dos parâmetros de impressão para melhorar a fusão entre camadas e minimizar pontos de concentração de falhas.

Em síntese, este estudo destaca a influência significativa das condições de impressão, escolha de materiais e padrões de preenchimento na qualidade e desempenho dos objetos impressos em 3D. Recomenda-se uma abordagem cuidadosa na otimização dos parâmetros de impressão para garantir resultados consistentes, especialmente ao lidar com materiais sensíveis a condições ambientais. A compreensão desses fatores é crucial para a seleção adequada de materiais e processos de impressão, visando a obtenção de peças com propriedades mecânicas confiáveis e adequadas para aplicações específicas.

## **6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Diante o aprofundamento sobre o tema, surgiram algumas questões que podem ser levadas a trabalhos futuros:

- Avaliar a influência de outros parâmetros de impressão;
- Testar outros padrões de preenchimento;
- Realizar a troca de local de início e fim de cada camada e avaliar resultados;
- Analisar as dispersões dos resultados dos ensaios de tração e os motivos que levaram aos resultados;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3DLAB. **Ender 3 V2**. [Online]. Disponível em: <https://www.3dlab.com.br/produto/ender-3-v2/>. Acesso em: 13 de setembro de 2023.
- 3DLAB. **Padrões de preenchimento no Cura**. Ilustração. Disponível em: <https://3dlab.com.br/preenchimento-no-cura/>. Acesso em: 26 de setembro de 2023.
- 3DLAB. **Programas CAD são famosos entre os profissionais que trabalham com criação de projetos e produtos**. Disponível em: <https://3dlab.com.br/cad-o-que-e/>. Publicado em 17 de maio de 2021. Acesso em 18 de setembro de 2023.
- ASTM. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. Ilustração. Disponível em: <https://www.astm.org/d0638-22.html>. Acesso em: 27 de setembro de 2023.
- BAIÃO, Francisco José. **Funcionalidades e tecnologias da impressora 3D**. 2012. Disponível em: <https://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/2347.pdf>. Acesso em: 29 de outubro de 2023.
- BARBOSA, Elson. **Desvio padrão**. Publicado em 27 de fevereiro de 2019. Disponível em: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/matematica/desvio-padrao>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.
- BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russel Jr.; DEWOLF, John T.; MAZUREK, David F. **Mecânica dos Materiais**. 5ª edição. Porto Alegre-RS: AMGH Editora Ltda, 2011.
- BELLINI, A., Güçeri, S., & Güçeri, M. S. (2013). **Caracterização mecânica de componentes fabricados com impressoras 3-D de código aberto sob condições ambientais realistas**. *Materiais e Design*, 49, 810-816.
- CAVALCANTE, Alexandre A. (2022). **Correlação entre parâmetros de impressão 3D e a resistência mecânica anisotrópica de peças impressas em PLA**.
- CREALITY. **Impressora 3D CR-200B**. Disponível em: <https://www.creality.com/br/products/cr-200b-3d-printer>. Acesso em: 20 de novembro de 2023.

CREALITY. **Impressora 3D Ender 3 V2.** Disponível em: <https://www.creality3dofficial.com/products/ender-3-v2-3d-printer>. Acesso em: 20 de novembro de 2023.

CRUZ, Mirna Liz da. **Impressora 3D Digital Light Processing (DLP): Introdução de Conceito em Ortodontia.** Publicado em 10 de julho de 2021. Disponível em: <http://odontologiahumana.blogspot.com/2021/07/impressora-3d-digital-light.html>. Acesso em: 20 de novembro de 2023.

DIAMANTOPOULOU, M., Tancogne-Dejean, T., Wheeler, JM, & Mohr, D. (2021). **Nanoredes cerâmicas de parede dupla: maior rigidez e capacidade de recuperação por design.** *Materials & Design*, 208, 109928. Publicado em outubro de 2021.

DIZON, J. R., Espera Jr, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). **Caracterização mecânica de polímeros impressos em 3D.** *Fabricação Aditiva*, 20, 44-67.

EDWARDS, R. A., & Hall, R. C. (2010). **Inventário do ciclo de vida da produção de resina PLA.** *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(6), 639-646.

FOGGIATTO, José Aguiomar. **Utilização do Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) na Fabricação Rápida de Insetos para Injeção de Termoplásticos .** 2005;

GALINA, D. M., Garcia, D. P., Maziero, R., Zancanella, A. C. B., Castro, B. D., & Rubio, J. C. C. (2018). **Influência da espessura de camada de impressão 3D nas propriedades mecânicas de peças fabricadas com o copolímero ABS.** *Revista Iberoamericana de Polímeros y Materiales*, 19(3), 116-127.

GIBSON, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2014). **Tecnologias de Fabricação Aditiva: Impressão 3D, Prototipagem Rápida e Fabricação Digital Direta.** *Springer*.

GIORDANO, Caio Mezzeti; ZANCUL, Eduardo de Senzi; RODRIGUES, Vinícius Picanço. **Análise dos Custos da Produção por Manufatura Aditiva em Comparação a Métodos Convencionais.** *Revista Produção Online*, Florianópolis, SC, v. 16, n. 2, p. 499-523, abr./jun. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/304001824>. Acesso em: 20 de novembro de 2023.

GUSE, Rosana. **Conheça a impressora 3D CR-200B**. *MakerHero*, [Online], 11 de agosto de 2021. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/conheca-a-impressora-3d-creality-cr-200b/>. Acesso em: 13 de setembro de 2023.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7ª edição. *Pearson Education do Brasil Ltda.*, 2010. São Paulo - SP.

HOTZA, Dachamir. **Prototipagem rápida de Pilhas a Combustível de Óxido Sólido**. *Revista Matéria*, v. 14, n. 4, pp. 1101-1113, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/NL9LkVsnkVFCFN6NmD5jMHQ/>. Acesso em: 18 de setembro de 2023.

INDUSMART. **O que é Infill ou densidade na Impressão 3D?** Publicado em 27 de março de 2023. Disponível em: <https://www.indusmart.com.br/blog/o-que-e-infill-ou-densidade-na-impressao-3d/>. Acesso em: 26 de setembro de 2023.

ISMAIL, S. O., & El-Sayed, A. A. (2017). **Propriedades mecânicas e térmicas de nanocomposites de mistura ABS/PC: efeito de nanoclay e ABS-g-MA como compatível**. *Engenharia e Ciência de Polímeros*, 57(7), 742-751.

MALAVOLTA, A. T.; MÜLLER, A. G. **Estudo das tensões residuais e distorções de peças produzidas por impressão FDM utilizando o método dos elementos finitos**. *Journal of Engineering and Exact Sciences (jCEC)*, v. 06, n. 05, p. 717-722, 2020. DOI: 10.18540/jcecv16iss5pp0717-0722. ISSN: 2527-1075.

MANUFACTURING GUIDE. **Fused Deposition Modeling (FDM)**. Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>. Acesso em: 20 de novembro de 2023.

MARIN, Tiago. **Qual é o material 3D mais forte?**. 2022. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/material-3d-mais-forte/>. Acesso em: 29 de outubro de 2023.



PORTELA, Sergio. **O que é impressão 3D? Conheça a tecnologia de impressoras 3D!** Publicado em 29 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tag/tipos-de-preenchimento/>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

REIS, Alex; ROMANIO, Dagonir de Limas; FERREIRA, Alexandre Marcos; SILVA, Daniele. **Análise de Estratégias de Impressão 3D por Método FDM (Modelagem de Deposição Fundida)**. 2021;

RODA, Daniel Tietz. **Impressoras 3D: Como funciona**. Revisão em 13 de agosto de 2018. Disponível em: <https://www.tudosobreplasticos.com/processo/impressao3D.asp>. Acesso em: 20 de novembro de 2023.

SANTANA, L. **Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA**. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/160786>.

SILVA, F. M. **Relação dos parâmetros de impressão com propriedades mecânicas de peças poliméricas obtidas por impressão 3D pela técnica FDM**. 2022. Disponível em: <https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/10573/2/Dissertação%20Milena%20Fontoura%20da%20Silva.pdf>.

SILVA, Milena F. (2022). **Relação dos parâmetros de impressão com propriedades mecânicas de peças poliméricas obtidas por impressão 3D pela técnica FDM**.

ULTIMAKER. **Ultimaker Cura [software]**. Disponível em: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>. Acesso em: 27 de setembro de 2023.

VOLPATO, Neri. et al. **Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D** [livro eletrônico]. São Paulo : Blucher, 2017.

WISHBOX. SLA vs DLP: **Comparando as Tecnologias De Impressão 3D**. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/sla-vs-dlp-comparando-as-tecnologias/>. Acesso em: 20 de novembro de 2023.